

5302 62+181.7
П 73

Э. ПРЕТОРИУС

ТЕПЛОВОЕ ХОЗЯЙСТВО

ДВД

КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

ЭНЕРГО ИЗДАТ 1932

21.181,7

П 73

621.13

Инж. Э. ПРЕТОРИУС

П-73

F5 04

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА БССР

ТЕПЛОВОЕ ХОЗЯЙСТВО КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Д Е П

Перевод с немецкого
инж. Д. М. ГОРФИНКЕЛЯ и инж. Д. Л. ОРШАНСКОГО

Под редакцией
проф. А. А. РАДЦИГА

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА БССР

46100

ЛИОТЕК
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА БССР

М. 89, 56, 08
РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА БССР

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА БССР

315

О Н Т И

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ЛЕНИНГРАД 1932 МОСКВА

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА.

Книга Преториуса «Тепловое хозяйство котельных установок» (E. Praetorius, *Wärme-wirtschaft im Kesselhaus*, Dresden und Leipzig, 1930) встретила очень благоприятную оценку в немецких технических журналах.

Цель, поставленная автором этой книги (известным специалистом по вопросам котельного дела), хорошо выяснена в предисловии автора: при необыкновенно быстром развитии котельного дела в последние годы, имевшаяся до сих пор техническая литература быстро становится устарелой, и даже изменения, вносимые в новые издания старых сочинений, не могут дать общей картины современного состояния котельного дела.

Преториус поставил своей задачей именно дать общий обзор вопросов котельного дела, основанный на новейшем материале. Этот материал частью состоит из данных немецкой котельной техники новейшего времени, частью же заимствован из опыта американских котельных установок, которые вообще оказывают в послевоенные годы большое влияние на немецкую технику: достаточно вспомнить многочисленные работы Мюнцингера, в значительной степени воспроизводящие достижения американской техники. Новейшая немецкая и американская техническая литература использована поэтому Преториусом в широкой степени. Особенности изложения Преториуса (небольшое число теоретических выводов, широкое пользование графическими изображениями, численными таблицами и т. д.) вполне соответствуют поставленной автором задаче — дать общий обзор всего котельного дела, не входя в частности отдельных вопросов.

Русская литература по котельному делу представляет картину, во многих отношениях сходную с немецкой: имеется тоже довольно большое число специальных сочинений по отдельным вопросам котельного дела, частью оригинальных, частью переводных. Многие из этих сочинений являются чрезвычайно ценными трудами, стоящими вполне на уровне современной техники. Но сочинения эти предназначены, главным образом, для специалистов по котельному делу. Между тем имеется обширный класс техников, которым необходимо *общее знакомство* с котельным делом. К этому классу относятся электрики, занимающиеся общими вопросами электрических станций, механики, имеющие дело с котельными установками на заводах, заказчики и эксплуатационные инженеры по паровым котлам (и учащиеся втузов и техникумов по соответствующим специальностям). Для этих деятелей мне казалось весьма полезным издание перевода книги Преториуса, которая даст хорошее общее знакомство с современным состоянием котельного дела за границей.

В виду обширного объема книги не представлялось возможным сделать к ней дополнения, отражающие достижения советской техники в области котельного дела. Небольшие добавления и примечания к отдельным главам имеют целью, главным образом, дать указания по русской технической литературе, при помощи которых можно глубже познакомиться с вопросами, затрагиваемыми в книге Преториуса.

Проф. А. А. Радциг.

ИЗ ПРЕДИСЛОВИЯ АВТОРА К НЕМЕЦКОМУ ИЗДАНИЮ.

За последние годы лишь очень немногие отрасли техники могут отметить в истории своего развития столь выдающиеся успехи и столь значительные и крупные научные и практические работы и достижения, каковыми характеризуется современное парокотельное дело. Достаточно упомянуть о непрерывном увеличении давлений, о введении пылеугольного топлива, о все возрастающих требованиях, предъявляемых к производительности, коэффициенту полезного действия, к гибкости работы топок и к прочности материалов, чтобы ясно оценить всю трудность задач, поставленных не только перед котлостроением, но и, притом не в меньшей мере, перед техникой эксплуатации паросиловых установок.

Неудивительно, впрочем, что в результате бурных темпов развития котельного дела, книжная литература по вопросам постройки и эксплуатации парокотельных установок чрезвычайно быстро оказывается устаревшей. Всего лишь несколько лет тому назад существовал целый ряд первоклассных трудов выдающихся специалистов, пригодных для конструктора, производственника и молодого инженера, переходящего от школьной скамьи к практике, со всеми существенными вопросами парокотельной техники. Сегодня же большинство этих книг уже устарело и представляет в лучшем случае только исторический интерес. Переиздания, появившиеся за последнее время, в большинстве случаев, правда, значительно дополнены и расширены, но все-таки они не дают и не могут дать полной, без пробелов, картины современной фазы развития паротехники, ибо почти все без исключений, они построены на таких основах, которые ныне уже оставлены.

Настоящая книга преследует цель заполнения указанного пробела в литературе. Я попытался дать обзор *всего современного парокотельного дела в целом*. Для достижения намеченной цели я пользовался исключительно новейшими материалами, находившимися в моем распоряжении. Одна часть этих материалов является результатом моих собственных научных и практических работ, другая часть была собрана мною в результате подробного изучения руководящих специальных журналов и книг как немецких, так и иностранных. Я сделал здесь попытку дать связное изложение всех наиболее существенных вопросов теплотехнического, конструктивного, эксплуатационного и экономического характера.

Столь широкая трактовка требует, однако, и определенных жестких ограничений. Область парокотельной техники столь обширна, что сравнительно ограниченный объем этой книги настоятельно требовал сжатого изложения почти безграничного материала. Поэтому пришлось преднамеренно отказаться от подробного описания всех физических основ, всех практически важных конструкций, всех интересных нововведений. По этой же причине, как правило, в теоретической части опущены общие математические выводы, а в практической части из всего многообразного материала взяты только характерные примеры, на которых и разъяснены принципиальные положения.

Дальнейшая концентрация материала оказалась возможной в результате замены, главным образом в первой, преимущественно теоретической части, таблиц, уравнений и длинных словесных объяснений графическими интерпретациями. Такой метод графического изображения технических процессов и экономических или статистических взаимоотношений обладает кроме всего еще тем большим преимуществом, что соответствующие закономерности улавливаются гораздо яснее и скорее и что читатель избавляется от утомительных подсчетов.

Особое внимание было уделено единообразию обозначений. В начале каждого крупного отдела даны объяснения примененных букв и указаны размерности. Легкая и быстрая ориентировка в буквенных обозначениях обеспечивается соответственным их алфавитным списком, помещенным перед текстом книги.

Книга эта является попыткой связного изложения большого комплекса вопросов. Я надеюсь, что студент, молодой инженер и вообще всякий инженерно-технический работник, желающий вкратце ознакомиться с быть может довольно для него чуждой областью парокотельного хозяйства, найдет в этой книге легкодоступное руководство, а производительник — удобный справочник и практическую настольную книгу. Конечно, в ней есть еще некоторые пробелы, конечно, она еще нуждается в кое-каких дополнениях и изменениях. Я был бы очень рад, если бы путем открытой критики и указаний читатели настоящей книги оказали мне поддержку в деле дальнейшей переработки материала для возможного последующего ее издания.

Эрист Преториус.

ОБОЗНАЧЕНИЯ (В АЛФАВИТНОМ ПОРЯДКЕ).

1. Латинский алфавит.

$A\%$ — содержание золы в твердых и жидких топливах (по весу),

B кг, т, m^3 — количество топлива,

B мм рт. ст. — барометрическое давление,

$C\%$ — содержание углерода в топливе (по весу),

$C_0\%$ — сгорает в топке,

$C_1\%$ — содержится в золе,

$C_2\%$ — содержится в уносе,

$C_3\%$ — содержится в саже,

$C_0\% = C_1\% + C_2\% + C_3\%$ — не используется в топке,

C кал/ m^2 ч $^\circ C^4$ — коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела,

C_1, C_2 и т. д. кал/ m^2 ч $^\circ C^4$ — коэффициенты лучеиспускания прочих тел,

$$C' = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}} \text{ кал/}m^2 \text{ ч } ^\circ C^4 \text{ — коэффициент лучистого теплообмена,}^1$$

$C_{\lambda} c$ — теплоемкость (удельная теплота),

$C_p (c_p)$ — теплоемкость при постоянном давлении, отнесенная к $1 m^3$ (кг),

$C_v (c_v)$ — теплоемкость при постоянном объеме, отнесенная к $1 m^3$ (кг),

$C_{p\text{ср}} (c_{p\text{ср}})$ } — средние теплоемкости,
 $C_{v\text{ср}} (c_{v\text{ср}})$ }

$CH_4\%$ — содержание метана в газообразных топливах (по объему),

$ch\%$ — содержание метана в сухих продуктах горения (по объему),

$CO\%$ — содержание окиси углерода в газообразных топливах (по объему),

$CO_2\%$ — содержание углекислоты в газообразных топливах (по объему),

D кг, т — количество пара,

d м — диаметр верхнего сечения дымовой трубы,

F m^2 — поверхность (поверхность нагрева, поверхность тела и т. п.),

G_x кг — вес дымовых газов (считая на $1 m^2$ поперечного сечения и H м высоты),

$G_{\text{воз}}$ кг — вес воздуха (считая на $1 m^2$ поперечного сечения и H м высоты),

e — испарительная способность,

e_n — нормальная испарительная способность (т. е. отнесенная

$$\text{к нормальному пару)} = \frac{D}{B} \cdot \frac{i''}{610},$$

e_d — действительная испарительная способность (т. е. отне-

$$\text{сенная к пару соответствующей характеристики)} = \frac{D}{B},$$

$H\%$ — содержание водорода в твердых и жидких топливах (по весу),

$h\%$ — содержание водорода в газообразных топливах (по объему),

$h\%$ — содержание водорода в сухих продуктах горения (по объему),

H м — высота дымовой трубы,

I (к) кал/ m^3 — теплосодержание,

$I_{\text{воз}_1}$ кал. — теплосодержание воздуха до воздухоподогревателя, считая на 1 кг топлива,

$I_{\text{воз}_2}$ кал. — теплосодержание воздуха после воздухоподогревателя, считая на 1 кг топлива,

I_d кал/ m^3 — теплосодержание дымовых газов,

¹ Строго говоря, формула, приведенная для C' , действительна только для частного случая взаимного лучеиспускания двух параллельных поверхностей, находящихся друг от друга на расстоянии, незначительном по сравнению с их размерами. В других случаях формула для C' принимает другой вид. Подробности — см., например, Шаки Руммель, Практическое приложение законов теплопередачи, ГИЗ, стр. 20 и след., 1928. Прим. пер.

I_1, I_2 кал. — теплосодержание дымовых газов до и после перегревателя, считая на 1 кг топлива,
 I_3, I_4 кал. — теплосодержание дымовых газов до и после экономайзера, считая на 1 кг топлива,
 I_5, I_6 кал — теплосодержание дымовых газов до и после воздухоподогревателя, считая на 1 кг топлива,
 i' кал/кг — теплосодержание жидкости (воды),
 i'' кал/кг — теплосодержание пара (вообще),
 $i''_{п.п}$ кал/кг — теплосодержание насыщенного пара,
 $i''_{п.п}$ кал/кг — теплосодержание перегретого пара,
 $i''_{п.п}$ кал/кг $= i''_{п.п} - i''_{п.п}$ — теплота перегрева,
 i_1', i_2' кал/кг — теплосодержание воды до и после подогревателя,
 K — характеристический индекс, равный отношению средней величины потерь лучеиспусканием и теплопроводностью за период перерыва в работе к потерям лучеиспусканием и теплопроводностью при установившемся состоянии,
 k кал/м² ч °C — коэффициент теплопередачи,
 k_1 % — содержание углекислоты в сухих продуктах горения (по объему),
 k_2 % — содержание окиси углерода в сухих продуктах горения (по объему),
 $k_{макс}, k_{теор}$ — теоретические максимальные значения,
 L м³ — количество воздуха для горения,
 $L_{мин}$ м³ — теоретическое минимальное количество воздуха (на 1 кг топлива),
 $L_{факт}$ м³ — действительное количество воздуха (на 1 кг топлива),
 $N_{%}$ — содержание азота в твердых и жидких топливах (по весу),
 $N_{%}$ — содержание азота в газообразных топливах (по объему),
 $n_{%}$ — содержание азота в сухих продуктах горения (по объему),
 $N_{квт}$ — полезная мощность,
 O м² — средняя величина наружной поверхности дымовой трубы,
 $O_{%}$ — содержание кислорода в твердых и жидких топливах (по весу),
 $O_{%}$ — содержание кислорода в газообразных топливах (по объему),
 $o_{%}$ — содержание кислорода в сухих продуктах горения (по объему),
 $O_{мин}$ м³ — теоретический минимальный расход кислорода для горения (считая на 1 кг топлива),
 p кг/см², атм. абс. атм. ман. — давление пара,
 Q кал. — количество тепла,
 Q_2 кал. — теплоотдача теплопроводностью и конвекцией,
 Q_4 кал. — теплоотдача лучеиспусканием,
 $Q_{общ}$ кал. $= Q_2 + Q_4$ — общая теплоотдача,
 Q кал/кг — теплотворная способность твердых и жидких топлив,
 Q кал/м³ — теплотворная способность газообразных топлив,
 Q_v — высшая теплотворная способность,
 Q_n — низшая теплотворная способность,
 r кал/кг — теплота испарения жидкостей,
 S % — содержание серы в твердых топливах (по весу),
 S кал./кг °C — энтропия,
 T — абсолютная температура,
 t °C — температура,
 t_1 °C — температура отходящих (дымовых) газов,
 t_f °C — температура топлива,
 t_p °C — температура пара,
 $t_{воз}$ °C — температура воздуха,
 $t_{исп}$ °C — температура испарения,
 t_2 °C — температура горения,
 t_3 °C — температура воды,
 t_1 °C — температура более горячих газов или жидкостей,
 t_2 °C — температура более холодных газов или жидкостей,
 $t_{вых}$ °C — температура отходящих газов при выходе из дымовой трубы,
 $t_{вх}$ °C — температура отходящих газов при входе в дымовую трубу,
 $t_{ср}$ °C — средняя температура газов в дымовой трубе,
 V м³ — объем,
 V_r м³ — общий объем дымовых газов (от 1 кг топлива),
 $V_{с.г}$ м³ — объем сухих дымовых газов (от 1 кг топлива),
 $V_{в.г}$ м³ — объем влажных дымовых газов (от 1 кг топлива) $= V_{с.г} + V_{в.г_2}$,
 $V_{в.г_2}$ м³ — объем влажных дымовых газов (от 1 кг топлива), образовавшихся вследствие наличия влаги в топливе,

- $V_{\text{в.г.}} \text{ м}^3$ — объем влажных дымовых газов (от 1 кг топлива), образовавшихся вследствие наличия водорода в топливе,
 $V_{\text{теор.}} \text{ м}^3$ — теоретическая минимальная величина общего объема дымовых газов (от 1 кг топлива),
 $V_{\text{действ.}} \text{ м}^3$ — действительный объем дымовых газов,
 v — удельный объем (отнесенный к 1 кг),
 $v' \text{ л/кг}$ — удельный объем жидкости,
 $v'' \text{ м}^3/\text{кг}$ — удельный объем пара,
 $Q_{\text{кал.}}$ — тепловые потери (считая на количество тепла, подведенное к 1 кг топлива),
 η % — тепловые потери (считая на количество тепла, подведенное к 1 кг топлива),
 $Q_{\text{доп.}} = Q_{\text{доп.1}} + V_{\text{доп.2}} + V_{\text{доп.3}} + V_{\text{доп.4}}$ — общие дополнительные потери, возникающие вследствие перерывов в работе котла,¹
 $Q_{\text{пер.}} = Q_{\text{г.}} + Q_{\text{н.}} + Q_{\text{о.}} + Q_{\text{к.}} + Q_{\text{с.}} + Q_{\text{л.}}$ — общие потери при установившемся состоянии,¹
 $\varphi_{\text{воз.}}$ % — содержание воздуха в дымовых газах,
 W % — содержание влаги в твердых и жидких топливах (по весу),
 $W_{\text{кг}}$ — содержание влаги в газообразных топливах, считая на 1 м³ сухого газа,
 $W \text{ м}^3 \text{ ч. } ^\circ\text{C/кал} = \frac{1}{k}$ — удельное сопротивление теплопередаче,
 $w \text{ м}^3 \text{ ч } ^\circ\text{C/кал} = \frac{1}{\lambda}$ — удельные теплосоппротивления (w_1, w_2 и т. д.),
 $Z \text{ мм вод. ст.}$ — сила тяги (разрежение) и потеря тяги,²
 z час — время.

2. Греческий алфавит.

- $\alpha = \frac{L_{\text{действ.}}}{L_{\text{теор.}}}$ — коэффициент избытка воздуха,
 $\alpha \text{ кал/м}^3 \text{ ч } ^\circ\text{C}$ — коэффициент теплоотдачи,
 $\alpha_1 \text{ кал/м}^3 \text{ ч } ^\circ\text{C}$ — коэффициент общей теплоотдачи от газов или жидкостей стенкам,
 $\alpha_2 \text{ кал/м}^3 \text{ ч } ^\circ\text{C}$ — коэффициент общей теплоотдачи от стенок газам или жидкостям,
 $\alpha_{\text{т.1}}; \alpha_{\text{т.2}} \text{ кал/м}^3 \text{ ч } ^\circ\text{C}$ — коэффициент теплоотдачи теплопроводностью и конвекцией,
 $\alpha_{\text{т.1}}; \alpha_{\text{т.2}} \text{ кал/м}^3 \text{ ч } ^\circ\text{C}$ — коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием,
 γ — удельный вес (отнесенный к 1 м³ или 1 л),
 $\gamma' \text{ кг/л}$ — удельный вес жидкостей (воды),
 $\gamma'' \text{ кг/м}^3$ — удельный вес пара,
 $\gamma_{\text{г.}} \text{ кг/м}^3$ — удельный вес дымовых газов при $t_{\text{г.}}$,
 $\gamma_{\text{ср.}} \text{ кг/м}^3$ — удельный вес дымовых газов при $t_{\text{ср.}}$,
 $\gamma_{\text{о.}} \text{ кг/м}^3$ — удельный вес дымовых газов при 0°C и 760 мм рт. ст.,
 $\gamma_{\text{воз.}} \text{ кг/м}^3$ — удельный вес воздуха при $t_{\text{воз.}}$,
 $\delta \text{ мм}$ — толщина стенки,
 ϵ % — коэффициент доброкачественности (отношение полезно воспринятого к израсходованному теплу),
 $\epsilon_{\text{к.}}, \epsilon_{\text{п.}}, \epsilon_{\text{э.}}, \epsilon_{\text{в.}}$ — коэффициенты доброкачественности соответственно для котла, перегревателя, экономайзера и воздухоподогревателя,
 $\zeta \text{ м}^2 \text{ ч } ^\circ\text{C/кал.}$ — удельное сопротивление теплоотдаче ($\zeta_1 = \frac{1}{\alpha_1}; \zeta_2 = \frac{1}{\alpha_2}$),
 η % — коэффициент полезного действия (к. п. д.),
 $\eta_{\text{к.}}, \eta_{\text{п.}}, \eta_{\text{э.}}, \eta_{\text{в.}}$ — частичные к. п. д. для котла, перегревателя, экономайзера и воздухоподогревателя,
 $\eta'_{\text{к.}}, \eta'_{\text{п.}}, \eta'_{\text{э.}}, \eta'_{\text{в.}}$ — индивидуальные к. п. д. для котла, перегревателя, экономайзера и воздухоподогревателя,
 θ °C — температура стенки,
 θ_1 °C — температура более нагретой поверхности стенки,
 θ_2 °C — температура менее нагретой поверхности стенки,
 $\theta_{\text{ср.}}$ °C — средняя температура стенки или разность внутренней и внешней температур,
 $\lambda \text{ кал/м ч } ^\circ\text{C}$ — коэффициент теплопроводности (λ_1, λ_2 и т. д.),
 $\lambda_{\text{к.}} \text{ кал/м ч } ^\circ\text{C}$ — кажущийся коэффициент теплопроводности воздуха конвекцией,
 $\lambda_{\text{л.}} \text{ кал/м ч } ^\circ\text{C}$ — кажущийся коэффициент теплопроводности воздуха лучеиспусканием,
 $\lambda_{\text{действ.}} \text{ кал/м ч } ^\circ\text{C}$ — фактический коэффициент теплопроводности воздуха.

¹ Объяснение отдельных обозначений $V_{\text{доп.1}}; V_{\text{доп.2}}; V_{\text{г.}}; V_{\text{н.}}$ и т. д. приведено в начале VI и IX разделов гл. 3 ч. I.

² Отдельные индексы для Z указаны в начале раздела V гл. 1, ч. II.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ.

ГЛАВА ПЕРВАЯ.

СУЩНОСТЬ, ЦЕЛЬ И ЗНАЧЕНИЕ ТЕПЛОВОГО ХОЗЯЙСТВА.

Прежде всего необходимо остановиться более подробно на самом понятии теплового хозяйства, уточнить смысл и цель последнего и выяснить его значение в широком смысле этого слова. Вопросы эти нуждаются в рассмотрении по причинам двоякого рода: во-первых, такое общее рассмотрение важнейших принципиальных проблем сразу определит содержание и характер данной книги; во-вторых, такой обзор целесообразен потому, что за последние десятилетия и особенно за последние годы имели место неоднократные переоценки и пересмотры основных воззрений в областях теплотехники и теплового хозяйства, а несомненно, что характер этих переоценок лучше всего и полнее всего обрисовывает картину современных взаимоотношений между техникой и экономикой.

1. ИСТОРИЧЕСКОЕ РАЗВИТИЕ.

Создавшаяся в Германии в результате проигранной войны обстановка продиктовала в свое время величайшую бережливость в отношении совершенно недостаточных наличных запасов горючего, улучшение коэффициентов полезного действия всех машин и аппаратов, применяемых при химических, физических и механических преобразованиях энергии, стопроцентное использование отбросного тепла и избыточных количеств энергии, получающихся при различных технических процессах. Почти все предприятия располагали в тот период большей частью весьма урезанными запасами топлива, хватавшими нередко всего лишь на несколько дней, и при частых задержках в добыче и доставке угля стояли часто перед опасностью приостановки производства. При таких обстоятельствах ведение топливного хозяйства обратилось в дело первейшей важности, оправдывавшей даже такие улучшения к. п. д. и такое использование отбросного тепла, которые были связаны с очень большими расходами (капитальные затраты, дополнительные расходы на зарплату и ремонт и т. д.). Дело в том, что, во-первых, вследствие исключительно высоких цен на уголь и сравнительно низких ставок зарплаты, эти добавочные затраты и расходы почти во всех случаях полностью перекрывались достигаемой экономией тепла; во-вторых же, как раз в период инфляции производство и сбыт топлива промышленными предприятиями находились на количественно очень высоком уровне, благодаря чему оборудование предприятий использовалось полностью, и удельный вес капитальных вложений и амортизационных отчислений почти совершенно ступеньвался перед производственными расходами. Это был период, когда уголь стал самым важным, самым дорогим и самым дефицитным материалом, и тепловое хозяйство явилось средоточием забот всех предприятий, потребляющих тепло и силу.

Затем, после стабилизации валюты, наступила реакция. Недостаток угля сменился его избытком. Промышленное производство и сбыт уменьшились, вследствие чего понизились загрузки и использование установок, частично только что вступивших в работу и нередко поглощавших очень значительные капиталовложения.

Высокие цифры капитальных затрат, на которые в период инфляции, вследствие непрерывного обесценения денег и полного использования оборудования, почти не обращалось никакого внимания и которые почти не влияли на стоимость выпускаемой продукции, обусловили теперь удорожание последней, тем большее, чем меньше становился коэффициент использования. Следствием всего этого было то, что крупные затраты на теплотехнические усовершенствования,

произведенные многими германскими предприятиями, оказались экономически совершенно неоправданными. Однако даже в тех отдельных случаях, в которых, несмотря на изменившуюся конъюнктуру, была достигнута известная экономия, незначительность последней по отношению ко всей себестоимости продукта резко поколебала убеждение в целесообразности улучшений теплотехнического характера.

II. СМЫСЛ И СУЩНОСТЬ ТЕПЛОВОГО ХОЗЯЙСТВА.

Тепловое хозяйство вообще не является ни важнейшей, ни подчиненной и лишенной значения составной частью техники и экономики. Оно является неотъемлемым звеном общехозяйственной цепи, влияние которого при всех его широких колебаниях, в зависимости от условий места и времени и от специфических особенностей различных производств, ни в каком случае не следует недооценивать.

Тепловое хозяйство представляет собой всего только одну шестерню в сложном механизме современной технической и хозяйственной жизни, несколько не менее важную, чем все остальные его шестерни, и столь же необходимую, как и они, для технического прогресса.

Однако для усвоения и практического приложения такого понимания теплового хозяйства необходимо освободиться от узких взглядов и ограниченности, в настоящее время еще очень широко распространенных в кругах специалистов. Нет ничего удивительного в том, что инженер-теплотехник часто подчиняет экономические соображения техническим; наиболее часто он побуждается к этому непосредственным воодушевлением, вызываемым в нем каким-либо гениальным техническим нововведением. Нередко шуточно говорят об «охотниках за калориями», т. е. о людях, величайшей целью которых является «сбережение тепла ради самого тепла» и которые, преследуя свою цель, очень часто не замечают того, что стоимость мероприятий по экономии оказывается много выше самой экономии, достигаемой с их помощью при самых благоприятных условиях.

При правильном подходе к тепловому хозяйству экономическим соображениям всегда должна предоставляться решающая роль.

III. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПРЕДЕЛЫ СБЕРЕЖЕНИЯ ТЕПЛА.

Рациональное тепловое хозяйство не ограничивается своей прямой, ближайшей задачей, т. е. непосредственной экономией топлива, но захватывает в свою область и все остальные элементы производства. Ближайшие стремления всякого инженера-теплотехника сводятся, разумеется, к возможно большему повышению к. п. д. всех теплотехнических устройств. Однако этому стремлению положен некоторый экономический предел, определяемый величиной максимально достижимых сбережений; подсчет последних должен производиться обязательно с учетом всех возникающих при этом затрат (капитального характера, зарплата, содержание, установки, производственные расходы и т. д.).

1. Влияние затрат на капитал.¹

Для пояснения указанного можно остановиться, как на примере, на давлении пара. С чисто теплотехнической точки зрения, повышение давления пара является разумным и целесообразным во всех случаях, вплоть до наивысших технически осуществимых давлений, так как, как это показывает кривая *a* на рис. 1, экономия тепла возрастает с повышением давления благодаря улучшению термического к. п. д. машины. С другой стороны, однако, можно видеть, что возрастание экономии с увеличением давления становится все меньше: кривая, поднимающаяся вначале очень круто, становится затем, по мере увеличения давления, все более пологой. Далее, в виду того, что обычно стоимость сооружения также возрастает с повышением давления пара (см. кривую *b*), возрастают и затраты на капитал,² тогда как расходы на ремонт, эксло-

¹ Под затратами на капитал подразумеваются расходы на погашение процентов, на восстановление капитала и т. п.

Прим. пер.

² Для упрощения здесь принята линейная зависимость от давления, что, хотя и не в точности соответствует действительно имеющимся на практике условиям, тем не менее вполне отчетливо иллюстрирует закономерность, поясняемую настоящим примером. Вместе с тем следует указать, что при известных условиях, при очень высоких давлениях пара капитальные затраты вообще не увеличиваются, так как размеры котлов и машин для очень высоких давлений меньше таковых для средних давлений и так как стоимость сооружения значительно уменьшается благодаря специальным дешевым конструкциям, котлам без барабанов, без обмуровки и т. д. В этих случаях наиболее экономичные давления расположены, разумеется, очень высоко.

атационные расходы и т. д., в общем мало зависящие от давления пара, могут быть приняты постоянными (см. кривую c).

Фактическая экономия, фактические сбережения получают лишь как разницу между экономией тепла и расходами на амортизацию, погашение процентов, ремонт и т. д. [см. кривую $d = a - (b + c)$]. Можно видеть, что наивысшая экономичность достигается при некотором вполне определенном давлении пара (точка A), что затем кривая сбережения d снова понижается и при известных обстоятельствах может даже перейти в отрицательную область (на рис. 1 это произошло бы приблизительно при 200 атм. абс.). Другими словами, повышение давления пара, хотя и ведет к возрастанию сбережений на топливе, может, тем не менее, обусловить убытки из-за увеличения затрат на капитал. Если же, наоборот, представляется возможным каким-либо образом (напр., понижением стоимости сооружения, уменьшением процента на капитал в случае экономически благоприятной хозяйственной конъюнктуры и т. п.) сократить затраты на капитал, то вследствие снижения кривой b_1 наиболее экономичное давление пере-

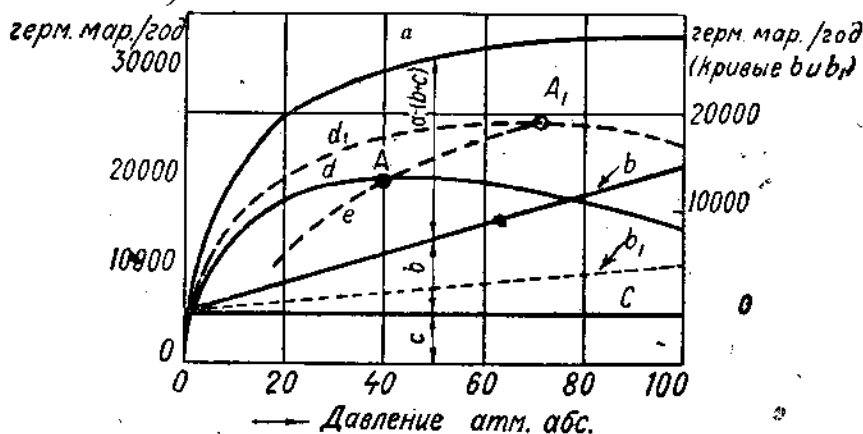


Рис. 1. Влияние затрат на капитал: b — 15 000 герм. марок/год, b_1 — 5000 герм. марок/год; при начальном давлении 100 атм. абс.

Определение фактических сбережений в наиболее экономичных давлениях пара, a , a_1 — сбережения на топливе; b , b_1 — затраты на капитал; c — прочие расходы; d , d_1 — фактические сбережения, $d = a - (b + c)$; a — кривая наиболее экономичного давления; A и A_1 — наиболее экономичные давления для d и d_1 .

мещается вверх. Исследуя таким путем ряд различных случаев, можно получить кривую e , дающую величины наиболее экономичного давления в зависимости от затрат на капитал. Подобные же перемещения могут быть получены также и в результате сокращения прочих расходов (см. кривую c).

2. Влияние степени нагрузки.

Влияние степени нагрузки силовой установки на величину фактической экономии тепла вполне аналогично влиянию затрат на капитал. Если принять, что экономия тепла на рис. 2 (кривая a) получена при полном использовании машинной установки и что прочие расходы определяются кривыми b и c , так же как и на рис. 1, то при уменьшающейся загрузке кривая a снижается так, что при 50-процентном использовании сбережения составляют также приблизительно лишь 50%.¹ Можно видеть, следовательно, что при уменьшающейся загрузке не только снижается величина фактических сбережений и возрастает относительное влияние затрат на капитал и прочих расходов, но что и наиболее экономичное давление оказывается тем меньше, чем незначительнее средняя нагрузка установки. Этим соображениям уделялось до сего времени слишком мало внимания, а между тем они чрезвычайно существенны прежде всего для электростанций с большими пиковыми нагрузками, т. е. с малым средним использованием, далее — для всех резервных теплосиловых установок промышленных предприятий.

Таким образом рис. 1 и 2 чрезвычайно наглядно показывают влияние разнороднейших экономических и технических факторов на тепловое хозяйство и являются еще одним лишним

¹ Строго говоря, величина сбережений не вполне пропорциональна степени использования; это происходит потому, что обычно вместе со степенью использования, т. е. степенью нагрузки, меняется и к. п. д.

доказательством той совершенно несомненной, но все еще далеко не всеми усвоенной истины, что инженер-теплотехник при проведении любого теплотехнического мероприятия всегда должен ясно понимать и учитывать все существенные экономические зависимости. То, что является действительным для вышеприведенного примера с силовой машиной, — примера, имеющего лишь косвенное отношение к котельному хозяйству, — в полной мере действительно и в отношении любых других теплотехнических проблем.

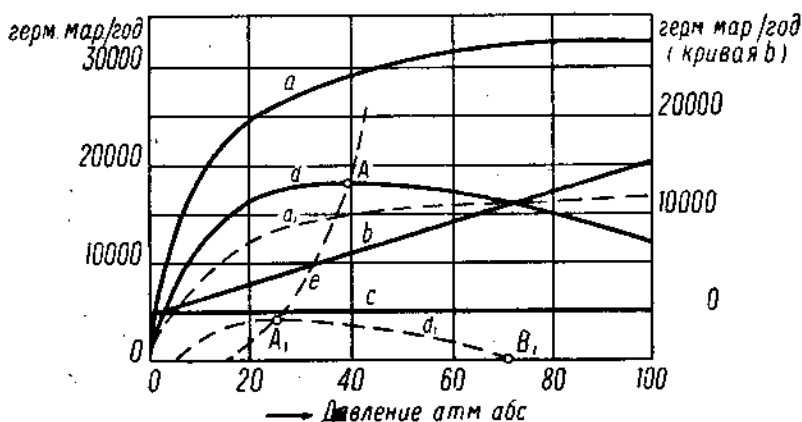


Рис. 2. Влияние степени загрузки. a —100-процентное, a_1 —50-процентное использование машины.

Определение фактических сбережений и наиболее экономичных давлений пара. a, a_1 — сбережения на топливо; b — затраты на капитал; c — прочие расходы; d, d_1 — фактические сбережения, $d = a - (b + c)$; e — кривая наиболее экономичного давления; A и A_1 — наиболее экономичные давления для a и a_1 .

3. Независимость от коэффициента использования.

В связи со всем вышесказанным необходимо остановиться еще на одном экономически в высшей степени важном вопросе. Как это следует из рис. 2, средняя загрузка теплосиловых или отопительных установок, а также и коэффициент использования, в свою очередь зависящий главным образом от общего хозяйственного положения, оказывают во многих случаях исключительно большое влияние на экономию топлива. Как известно, конъюнктурные колебания в целом ряде случаев могут вызвать очень значительные изменения в размерах продукции предприятия; однако обычно при проектировании и расчете новых установок эти колебания остаются неизвестными величинами. Поэтому всегда следует подходить с известной осторожностью к приобретению дорогостоящих устройств, поскольку таковые хорошо окупаются только при полной загрузке. Напротив, все те теплотехнические мероприятия, которые мало или совсем не зависят от степени загрузки, т. е. от конъюнктурных колебаний, и которые, следовательно, обеспечивают достижение приблизительно постоянной экономии тепла при любых коэффициентах использования, т. е. при любой загрузке предприятия, — такие мероприятия не только уместны и целесообразны во всех случаях, но как раз при низких коэффициентах использования дают особенно значительный экономический эффект. Дело в том, что абсолютная величина непроизводительных побочных расходов (расходов, связанных с потерями) по большей части также лишь в очень малой степени зависит от коэффициента использования, а следовательно, относительное значение этих расходов (отнесенных к продукции) становится особенно значительным как раз при малом выпуске продукции. Из этого вытекает, что теплотехнические мероприятия вышеупомянутого рода тем больше сокращают в процентном отношении означенные побочные расходы, чем меньше коэффициент использования установки. Для примера здесь можно указать на экономию тепла, достижимую с помощью изоляции трубопроводов, котлов и т. п., — экономию, почти не зависящую от передаваемых или производимых количеств пара; далее можно упомянуть о сокращении тепловых потерь, имеющих место в неплотных конденсационных горшках, и т. д. Возможность осуществления этих улучшений, часто с затратой совершенно незначительных средств, а часто и без всяких затрат, посредством одних только организационных мероприятий, еще больше увеличивает их экономическое значение.

IV. ТЕПЛОВОЕ ХОЗЯЙСТВО В САМОМ ШИРОКОМ СМЫСЛЕ ЭТОГО СЛОВА.

Современное развитие всей вообще техники характеризуется все более и более резким выявлением экономических моментов. Наиболее отчетливо эту тенденцию можно проследить в теплотехнике.

Сначала, когда впервые всплыли термические и термодинамические соображения и расчеты, занялись как теоретически, так и практически доведением до наивысшей степени совершенства самых термических процессов. Целесообразнейшими мероприятиями к повышению экономичности в ту пору представлялись: максимально возможное уменьшение тепловых потерь, возникающих при нормальной работе, и *повышение к. п. д. установившегося состояния* (состояния равновесия), во что бы то ни стало, с помощью любых средств.

Следующий шаг свелся к уяснению и учету факторов, мешающих ходу производства и создающих потери в таковом. Был установлен тот чрезвычайно важный факт, что между так называемыми «парадными» к. п. д., специально определяемыми для установившихся состояний при тщательнейшем надзоре за работой персонала и всех машин и аппаратов, с одной стороны, и *эксплуатационными к. п. д.*, являющимися средним значением из данных производственной статистики за более или менее длительный период времени — с другой, обычно имеется очень и очень значительная разница. Далее пришли к заключению, что устранение с помощью целесообразных организационных и теплотехнических мероприятий (напр., путем уменьшения потерь от охлаждения) причин, мешающих ходу производства, в очень многих случаях не только дешевле, но и много эффективнее, чем дальнейшее повышение парадного к. п. д.

Параллельно с этим крепло понимание того факта, что даже и эксплуатационный к. п. д. и тепловой баланс все-таки еще не составляют целиком критерия экономичности. Нередко гораздо более значительная роль таких факторов, как *затраты на капитал, коэффициент использования, расходы на ремонт, зарплату и эксплуатацию (производственные расходы)*, получила постепенно должное признание, естественным следствием чего явился переход к калькуляции рентабельности на основании не только различных, ранее уже учитывавшихся факторов, но также и стоимости тепла, исчисляемой из эксплуатационного к. п. д. и стоимости топлива. В результате такого подхода к вопросам теплового хозяйства ценность того или иного теплотехнического мероприятия стала измеряться конечным общим экономическим эффектом.

И однако даже всем этим сфера деятельности инженера-теплотехника не исчерпывается до конца. Даже при таком чисто хозяйственном подходе он все еще остается целиком в своей узко профессиональной специальной области. Для действительно разумного ведения теплового хозяйства необходимо, преследуя экономичность теплосиловой части производства, как таковой, все время помнить и иметь перед глазами экономичность всего производства в целом, а также все время изучать и учитывать все те многообразные и важные влияния, которые всякое теплотехническое мероприятие — прямо или косвенно — оказывает на почти все составные элементы производства. Остановимся здесь вкратце лишь на трех моментах, особенно тесно связанных с тепловым хозяйством, а именно на бесперебойности производства, повышении качества продукции и на увеличении производительности.

1. Бесперебойность производства.

Котельная — это в известном смысле сердце производства; когда биение сердца прекращается — организм становится нежизнеспособным. Поэтому перебои в работе котельной, поскольку они сказываются вне последней (уменьшенная отдача пара или полная приостановка подачи такового, падение давления и температуры и т. п.), играют, по большей части, очень значительную роль и могут привести к потерям и авариям в производстве, лишь туго поддающимся цифровому учету и достигающим в известных случаях очень больших значений. Поэтому важнейшим требованием, которое должно быть предъявлено ко всякой теплосиловой установке, является бесперебойность ее работы. Более того, бесперебойность работы является условием, предшествующим даже экономичности, поскольку должны быть признаны совершенно непригодными все те мероприятия, которые, будучи сами по себе целесообразны и экономичны, тем не менее в какой бы то ни было мере угрожают бесперебойности производства. Этот принцип необходимо утвердить со всей решительностью, так как, к сожалению, против него и поныне еще грешат слишком часто. Лозунг «за высокий к. п. д.» уже привел к многочисленным неблагоприятным последствиям в области котло- и машиностроения. Можно сказать, что не проходит и дня без того, чтобы опять и опять не всплывало какое-либо предложение о введении различных сложных, высокочувствительных и дорогостоящих устройств и «улучшений».

Следует, однако, подчеркнуть, что и чрезмерная осторожность, являющаяся противоположной крайностью, также неуместна. В каждом отдельном случае, в зависимости от влияния возможных перебоев на все остальное производство, необходимо тщательно исследовать роль и значение бесперебойности производства и найти оптимальное соотношение между надежностью и экономичностью. Иной раз, в особо благоприятных случаях, оба фактора действуют в одном и том же направлении. Сюда относятся, например, уменьшение потерь от охлаждения котла во время перерывов в его работе и включение в установку аккумуляторов Рутса, чем не только достигается экономия тепла, но одновременно увеличивается также готовность к работе всей установки в целом, и бесперебойность ее работы. Как бы то ни было, во всех случаях бесперебойность производства является тем фактором, с рассмотрения которого должен начинать инженер-теплотехник при разработке любого из предположенных им к осуществлению мероприятий.

2. Повышение качества продукции.

Очень часто путем рационализации теплового хозяйства представляется возможным добиться улучшения качества продукции. Достаточно показать это на нескольких кратких примерах. Общеизвестно, как чувствительны многие высокоценные вещества даже к самым незначительным колебаниям давления и температуры, имеющим место в процессе их производства. Так, например, высшие сорта резины могут быть совершенно испорчены при вулканизации, если давление пара упадет на несколько десятых атмосферы хотя бы в течение немногих минут; точно так же товар может утратить свои качества и ценность, если при сушке произойдет хотя бы самое незначительное отклонение в ту или другую сторону от нормальной температуры. В брикетном производстве сами по себе совершенно незначительные отклонения от нормального режима сушки могут привести к тому, что высушиваемая пыль будет либо пересушена, либо не досушена; результатом этого явится уменьшение прочности, т. е. значительное снижение ценности или даже полное обесценение готовых брикетов. Можно привести еще целый ряд примеров из самых различных отраслей промышленности, которые показывают, что качество продукции в сильной степени зависит от правильной тепловой обработки. Одной из важнейших задач теплового хозяйства как раз и является создание предпосылок, обеспечивающих безупречный ход производственного процесса и получение высокоценного готового продукта. Перед этими соображениями и требованиями непосредственная экономичность теплосилового хозяйства, в узком смысле этого слова, очень часто совершенно отступает на задний план. Более того, могут быть даже такие случаи, когда в целях повышения выгодности всего производства в целом, достигаемого за счет повышения качества продукции, следует мириться с заведомыми потерями в котеларке. Такого рода — очень, впрочем, не легкая — оценка всех плюсов и минусов, возникающих в самых различных звеньях производственного процесса, как раз и является самой важной, самой трудной, но вместе с тем и самой благодарной задачей инженера-теплотехника.

3. Увеличение производительности.

С повышением качества продукции тесно связано увеличение производительности. Первое является качественным фактором, второе — количественным, но оба они ведут к одной цели, а именно к увеличению оборота и, следовательно, к повышению экономичности.

Как раз по части увеличения производительности за последние годы была проделана большая и нелегкая работа, частично приведшая к значительным успехам; достаточно упомянуть о работе непрерывным потоком, дающей неопределимые преимущества при массовом производстве. Теплотехнические мероприятия также могут быть очень действительным средством для увеличения производительности. Примером тому могут служить успехи, достигнутые за последние годы с помощью аккумуляторов Рутса, позволяющих совершенно обособить производство, как таковое, от производства пара в котельной. Это нововведение обеспечило возможность получения любого количества пара в произвольно короткий промежуток времени в зависимости только от требований производства и вне всякой зависимости от производительности котельной установки. Громадные преимущества такого устройства совершенно очевидны, если вспомнить, что производство пара без применения тепловых аккумуляторов связано ограниченной паропроизводительностью котельной, а всякий внезапный и резкий отбор пара безусловно крайне нежелателен. Многочисленные эксплуатационные данные говорят за то, что производительность может быть сильно увеличена с помощью установки тепловых аккумуляторов. Аналогичные же результаты могут быть достигнуты без какого бы то ни было

расширения собственной котельной установки с помощью автоматической регулировки топок, укорочения времени растопки, приспособления работы котельной установки к резко колеблющейся нагрузке и т. д. Везде и всегда, когда общие расходы по производству теплосиловой энергии незначительны по сравнению с собственно производственными расходами, представляется необходимым — в интересах всего предприятия в целом — максимально приспособлять теплосиловое хозяйство к требованиям производства и тем самым увеличивать его производительность. И здесь случается покупать это преимущество ценой теплотехнического ущерба (например потерей теплового перепада).

У. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Настоящий краткий обзор задач и значения теплового хозяйства является одновременно сводкой тех принципиальных соображений и идей, которые легли в основу данной книги. Каждый руководитель производства и каждый инженер-теплотехник всегда должен твердо помнить о них. Все те, кому приходится иметь дело с тепловым хозяйством в теории или на практике, всегда должны руководствоваться в своей специальной области высказанной выше основной идеей, формулируемой ниже еще раз.

Как и вся вообще техника, так и теплотехника является не самоцелью, а средством для достижения цели. Цель эта заключается в прогрессе хозяйства, возможном только в том случае, когда все составные части производства непринужденно скоординированы между собой. Ведение действительно рационального теплового хозяйства отнюдь не сводится к одной только «погоне за калориями и к. п. д.» и не ограничивается сбережениями топлива и обеспечением экономичности работы одних только котельных и силовых установок, как таковых, являющихся лишь малой частью всего предприятия в целом. Разумно осмысленное тепловое хозяйство должно служить на пользу этого целого. Высшая цель его — *добиваться повышения качества продукции и увеличения производительности с минимальными затратами и с максимальным использованием установки при безусловной бесперебойности производства*. В таком понимании тепловое хозяйство имеет чрезвычайно большое значение для каждого предприятия в отдельности, а следовательно, в конечном итоге и для всего народного хозяйства в целом.

ГЛАВА ВТОРАЯ.

ТОПЛИВО.

1. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ.

Исходя из того общеизвестного факта, что нулевая точка абсолютной температурной шкалы находится при -273° , можно утверждать, что во всех встречающихся на земле газообразных, жидких и твердых веществах накоплены колоссальнейшие количества теплоты. Однако все эти запасы тепла в громадном большинстве случаев не могут быть использованы для технических целей, так как предпосылкой ~~каждого~~ энергетического преобразования теплоты является наличие *температурного перепада*, а таковой в природе очень часто или совсем отсутствует или имеется в столь незначительной степени, что лишь очень редко можно говорить о его техническом использовании. Точно так же и большинство других теплотехнических процессов (варка, нагрев, сушка и т. д.) требует такого уровня температуры, который в нормальных условиях нигде не существует и который обычно достижим лишь искусственно, с помощью определенного энергетического процесса, называемого *горением*.

В природе существуют вещества, содержащие в себе химически связанную энергию, которая при известных условиях может быть преобразована в теплоту, — *горючие вещества* или *топлива*. Эта химическая энергия, являющаяся, в сущности говоря, не чем иным, как аккумулярованной за определенный промежуток времени солнечной энергией, представляет собою основу и предпосылку почти всех термических процессов техники. Только с помощью топлива достигаются высокие температуры, необходимые для производства пара; вследствие этого роль и значение топлива в тепловом хозяйстве котельной исключительно велики. Поэтому далее приводится краткое общее описание различных видов топлива и их важнейших химических и физических свойств.¹

¹ В рамках настоящей работы может идти речь лишь о кратком обзоре обширной области, охватываемой наукой о топливе. Интересующихся более подробным изложением и освещением отдельных вопросов из области добычи, доставки, обработки и облагораживания топлива, из области химии горючих веществ и т. д. отсылаем к обширной специальной литературе.

Все виды топлива, все виды горючих веществ, разделяются, с одной стороны, по своему агрегатному состоянию на *твердые*, *жидкие* и *газообразные*, а с другой стороны, в зависимости от степени подготовки — на *естественные* и *искусственные*. Естественными видами топлива называются такие, которые пускают в дело либо прямо в том состоянии, в котором они были добыты, либо после известной сортировки и незначительной подготовки, тогда как искусственные топлива подвергают предварительно механическому или химическому облагораживанию. При процессе облагораживания возможен также переход топлива из одного агрегатного состояния в другое. Так, например, из твердого топлива как из сырья могут быть получены жидкие или газообразные топлива.

Что касается значения естественных видов топлива для энергетического и теплового хозяйства, то можно сказать, что в общем до сего времени преобладающее значение имеют находящиеся в природе твердые топлива, хотя, впрочем, за последнее время жидкое топливо завоевывает все большее и большее значение.

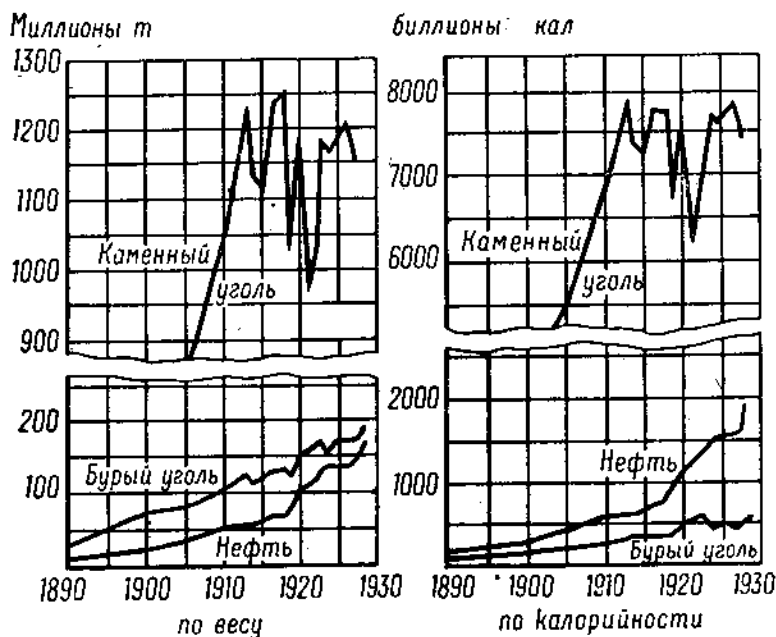


Рис. 3 и 4. Мировая добыча каменного угля, бурого угля и нефти.

Диаграммы на рис. 3 и 4 показывают, что хотя за последние 30 лет и произошло громадное увеличение добычи нефти, но добыча каменного угля как количественно, так и по суммарной калорийности все еще значительно превышает добычу и нефти и бурого угля. Газообразное топливо естественного происхождения добывается в сравнительно очень незначительных количествах; только в Америке оно имеет сколько-нибудь ощутительное значение для энергетического хозяйства.

Что касается искусственного топлива, то тут положение вещей совсем иное. Газообразные и жидкие искусственные топлива играют сейчас роль по меньшей мере столь же важную, как и твердые искусственные топлива, а в дальнейшем, по всей видимости, будут играть роль еще гораздо большую; достаточно вспомнить о возрастающем потреблении светильного газа и о частично уже претворившихся в жизнь планах газоснабжения на дальние расстояния и об ожигении угля. Такие обстоятельства, как крайняя малочисленность (низкосортность) больших количеств добываемых естественных твердых топлив и малая пригодность их к перевозкам на дальние расстояния (вследствие высокого содержания в них золы и влаги), а также чрезвычайно неполное и скверное использование таких топлив при непосредственном сжигании их, — все эти обстоятельства побуждают облагораживать большие количества такого рода топлив путем соответственной обработки; в процессе облагораживания, однако, помимо искусственных высокосортных твердых горючих, получаются, по большей части, еще и ценные жидкие и газообразные горючие вещества.

В котельных применяют пока что почти исключительно твердое топливо, главным образом — каменные и бурые угли. Жидкое топливо (нефть), в виду его дороговизны, применяют лишь в отдельных редких случаях или для специальных целей, например для отопления судовых котлов, ибо здесь оно дает ряд преимуществ, выражающихся в удобстве перевозки, неизменности потребного габарита хранилищ и легкой регулировке работы топок. Газообразные горючие находят применение большей частью там, где газ уже и без того употребляется для каких-либо других целей, либо там, где газ получается как побочный продукт какого-либо технологического процесса (например в доменных заводах, коксовальных и пергонных установках). а иных, более выгодных применений для него не имеется.

Однако все это не выходит за пределы отдельных частных случаев, имеющих значение пока только для отдельных отраслей промышленности. В общем же наибольший интерес с точки зрения современного котельного хозяйства представляют, конечно, твердые топлива.

II. ТВЕРДОЕ ТОПЛИВО.

1. Классификация и состав естественных твердых топлив.

Дерево было тем первоначально единственным материалом, из которого в результате естественного разложения образовались все виды твердого топлива. В зависимости от продолжительности процесса разложения, а также и от ряда особых местных условий (влияние влажности, давление пластов земли, воздуха, смолистых составных частей древесины и т. д.) образовались различнейшие виды топлива. Твердые топлива растительного происхождения быть грубо разделены на четыре больших группы: каменные угли, бурые угли, торф и дерево; дальнейшая разбивка по многочисленным подгруппам носит уже более или менее произвольный характер. Вообще говоря, достоинство горючего тем выше, чем дольше оно подвергалось естественному процессу разложения при наличии высоких давлений и температур.

Длившийся нередко многие тысячелетия процесс минерализации дерева, отражающийся в химическом составе топлива: уголь тем старше, чем выше содержание в нем углерода и кислорода; чем меньше влажность угля, тем значительнее были давления и температуры.

Обзор важнейших топлив и общепринятая для них классификация показывают, однако необходимо особенно подчеркнуть, что приведенные в топливе горючие летучие составных частей, твердого углерода, для воды и золы, а также и для углерода (C), водорода (H) и кислорода (O), являются только средними значениями, так как очень часто наблюдаются чрезвычайно значительные отклонения как вверх, так и вниз. Такая классификация углей более или менее произвольна. В природе существуют любые переходные формы от одного сорта к другому, причем зачастую наблюдаются такие неожиданные и разнообразные комбинации отдельных составных частей, что нередко просто затруднительно подвести данный уголь под признаки вообще какого бы то ни было сорта.

Как уже было сказано, естественные твердые топлива обычно подразделяют на четыре больших группы: каменные угли, бурые угли, торф и дерево.

Каменный уголь, старейший продукт разложения растительных тканей, возник по большей части под очень высокими давлениями, а частично и при очень высоких температурах. Он содержит поэтому сравнительно много углерода и мало влаги и обладает, таким образом, наивысшей теплотворной способностью. В зависимости от продолжительности процесса разложения и имевших при этом место давлений и температур, существует громадное множество разновидностей каменных углей, классифицируемых обычно, по признаку содержания летучих составных частей, ¹ на антрациты, тощие, жирные и газовые угли.

Бурый уголь образовался в результате процесса мокрого разложения под некоторым давлением пластов земли, однако в гораздо более краткий промежуток времени, чем каменный уголь. Он содержит поэтому сравнительно большие количества влаги (до 65%) и много летучего. Он может быть подразделен на более старые и высококачественные сорта, встречающиеся глав-

¹ Под летучими составными частями подразумевают такие горючие вещества, которые переходят уже при сравнительно низких температурах в газообразное состояние, после чего только и сгорают, тогда как твердый углеродистый остаток сгорает только в высоких температурах в твердом состоянии.

ТАБЛИЦА 1.

Классификация, состав и теплотворная способность естественных твердых топлив (средние величины).

Род топлива	Месторождение	Весовые части						Теплотворная способность			
		Неклеточный угль	Летучие состав-	Влага	Зола	Химический состав (считая горючую массу 1 за 100%)			Q _н кал/кг	Q _г кал/кг	
						С	Н	О			
В процентах											
Каменные угли:	Вестфалия, Южный Уэльс	85	7	2	6	93	3	4	8100	7900	
Антрацит	»	77	12	3	8	91,5	4	4,5	7500	7200	
Тонкий уголь	»	69	17	4	10	89,5	4,5	6	7400	7100	
Кузнечный уголь	»	57	25	5	13	88	4,5	7,5	7400	7100	
Жирный	Вестфалия, Англия, Шотландия	45	35	7	13	83	5	12	7200	6800	
Гамовый	Силезия, Саксония, Сварская область	32	45	10	13	78	6	16	6100	5800	
Песчанистый и спелый уголь											
Бурные угли:	Богемия	40,5	37	17,5	5	74	7	19	5500	5000	
Старые	Средняя Германия	13	32	37	18	67	6	27	3600	3200	
Молодые	Рейнская провинция, Гессен	18	25	50	7	65	5	30	2500	2100	
Торф	Различные местности	33	44	18	5	58	5	37	3900	3500	
(Прессованный)											
Дрова	»	15	69	13,5	2,5	50	6	44	4000	3600	
(Сухие)	»										

¹ Органической (горючей) массой топлива называется его беззольная и безводная часть. Топливе состоят из углерода, водорода, кислорода, азота, кальция, серы, фосфора и др. элементов. Топливе состоят из углерода, водорода, кислорода, азота, кальция, серы, фосфора и др. элементов. Топливе состоят из углерода, водорода, кислорода, азота, кальция, серы, фосфора и др. элементов.

ным образом в Богемии, и на сорта более молодые, богатые влагой и поэтому менее ценные (встречающиеся в Средней Германии, Гессене и Рейнской провинции).

Торф образовался в процессе мокрого разложения без давления земли; он содержит поэтому в сыром виде чрезвычайно много воды (часто 90% и более) и может быть использован в качестве топлива лишь после известной обработки (сушка или прессование).

Дерево, самое молодое из всех твердых топлив, точно так же находит применение в качестве горючего для котельных топок лишь в исключительных случаях (например отходы древесины в целлюлозном производстве); более часто оно применяется для целей растопки вследствие своей легкой воспламеняемости. В свежем состоянии дерево также очень влажно и поэтому перед применением в качестве топлива оно нуждается в сушке.

2. Классификация, добыча и состав искусственных твердых топлив.

Выше уже было сказано, что во многих случаях представляется гораздо более экономичным предварительно обогатить малоценные естественные топлива посредством механической или химической переработки, нежели прямо использовать их как горючий материал. Нередко, однако, подготовке подвергают и высокосортные топлива, особенно в тех случаях, когда им нужно сообщить специальные свойства, имеющие особую ценность для определенных применений, или же когда перед сжиганием желательно извлечь из них ценные «побочные продукты», например смолы. В общем же для целей эксплуатации котельных искусственных твердых топлив имеют до сего времени лишь второстепенное значение. Единственным исключением из этого положения является угольная пыль (пылевидное топливо). Так как однако тенденция развития современной техники отнюдь не исключают возможности применения (и даже в непродолжительном будущем) искусственного топлива также и в котельных топках в размерах значительно больших, чем сейчас, то представляется вполне уместным кратко остановиться на нем ниже.

Механическая переработка, в большей или меньшей мере целесообразная и общепринятая почти для всех топлив (сортировка, размельчение, мытье и т. д.), разделяется на две больших группы: *сушка* и *формовка*. В большинстве случаев оба процесса взаимно связаны, так как топливо сначала сушат, а затем ему придают ту или иную целесообразную форму. Нередко, однако, довольствуются одной сушкой (например при кусковом буром угле) или (при сухом сырье) — одной формовкой. В некоторых случаях при формовке (например при брикетировании каменного угля) необходима добавка связующих веществ.

Как уже было сказано, сушка совершенно необходима для торфа и дерева, а также как подготовительная операция при брикетировании бурого угля и приготовлении угольной пыли из сырых исходных материалов; точно так же она целесообразна, как операция, предшествующая сжиганию, в отношении всех прочих очень сырых сортов топлива, причем следует отметить, что иногда она совершается лишь непосредственно перед поступлением топлива в топочное пространство. Различают естественную и искусственную сушку, и притом еще непосредственную и посредственную, в зависимости от того, приходят ли горячие высушивающие агенты (жидкости, пары или газы) в соприкосновение с высушиваемым материалом или нет. Реальное значение для всех топлив, за исключением дерева и торфа, имеет только искусственная сушка.

Что касается формовки, то и здесь существенное значение имеют главным образом два вида таковой: раздробление топлива на мельчайшие частицы путем помола (угольная пыль) и прессование в формах (прессованное топливо, брикеты). Процессу прессования обычно предшествует еще и процесс помола.

Химическая переработка твердых топлив заключается преимущественно в том, что топливо подвергается действию высоких температур без доступа воздуха, вследствие чего летучие составные части удаляются в виде газов (коксовые газы, газы низкотемпературной перегонки и т. п.), тогда как некоторая часть горючей массы остается в виде твердого углеродистого остатка.¹ В зависимости от рода этого процесса перегонки в остатке получается кокс (при коксовании) или полукокс (при ливелевании, т. е. коксовании при низких температурах), а в зависимости от рода топлива: газовый кокс (как побочный продукт при производстве светильного газа из жирных или газовых углей), цеховой, т. е. металлургический и литейный

¹ Другие методы химической переработки топлива, газификация и окисление, сюда не относятся, так как в этих случаях получают исключительно только газообразные и жидкие топлива.

кокс (как основной продукт из тощих углей на коксовых заводах), буроугольный шведс-
вальный кокс (как побочный продукт при низкотемпературном коксовании бурых углей) и т. д.
Точно так же и из торфа может быть путем перегонки получен торфяной кокс, тогда как из де-
рева перегонкой добывается древесный уголь.

Таблица 2 содержит в себе обзор важнейших искусственных твердых топлив и данные
относительно их химического состава.

ТАБЛИЦА 2.

Классификация, состав и теплотворная способность искусственных твердых топлив (средние
величины).

Род топлива	Весовые части							Теплотворная способность			
	Твердый угле- род	Легучие состав- ные части	Влага	Зола	Химический состав (считая горючую массу за 100%)			Q _v кал/кг	Q _n кал/кг		
					С	Н	О				
в процентах											
Угольная пыль	{ Соответственно роду и составу исходного угля, но с уменьшенным содержанием влаги (от 2 до 5%) }							7 000	6 800		
Каменный уголь										4 800	4 500
Бурый » 											
Брикеты											
Тонкий уголь	73,5	15	1,5	10	87	4	11	7 800	7 700		
Газовый » 	58	29	4	11	75	7	18	7 500	7 250		
Бурый » 	30	43	15	12	65	6	29	5 000	4 700		
Кокс											
Цеховой кокс	82	3	5	10	96	1	3	7 300	7 250		
Газовый » 	79	2	7	12	95	1	4	7 150	7 100		
Полукокс											
Каменный уголь	60	17	11	12	68	3	9	6 900	6 550		
Бурый » 	70	5	12	13	95	2	3	5 000	4 500		
Торфяной кокс	72	12	8	8	87	4	9	6 800	6 500		
Древесный уголь . . .	68	20	10	2	76	4	20	6 900	6 300		

3. Свойства твердых топлив.

Способность твердых топлив к горению, особые требования, выдвигаемые применением
того или иного топлива в отношении конструкции топки и методов ее эксплуатации, и, наконец,
поведение топлива при горении — все это зависит от химических, физических
и механических свойств самого топлива. Как видно из таблиц 1 и 2, все виды твердого топлива
состоят главным образом из соединений С, Н и О, содержат еще воду (H_2O) и золу. Наряду
с ними находятся незначительные количества азота, серы и т. д. Ценными теплотворными
составными частями являются С и Н; чем больше процентное содержание обоих этих элемен-
тов, тем более ценным является топливо. Кислород (О) точно так же входит в состав горючей
массы, так как при сжигании топлива он заменяет часть воздуха, необходимого для горения.
Напротив, вода, зола и азот являются совершенно бесполезными, во многих отношениях
даже вредным балластом, понижающим ценность топлива хотя бы уже из-за накладных
расходов на транспорт. Еще вреднее сера, хотя она и обладает довольно значительной тепло-
творной способностью.¹

¹ См. стр. 22.

Газовые и негазовые угли. Горючая масса всякого твердого топлива состоит из легко сгорающих *летучих составных частей* (водородистые и углеводородистые соединения) и из сгорающей лишь при высоких температурах *твердой составной части* (нелетучий углерод). *Газовые угли*, т. е. угли с высоким содержанием летучих составных частей, сгорают легко, при сравнительно низких температурах, с образованием длинного пламени; *негазовые угли* сгорают при высоких температурах с образованием короткого пламени. Поэтому антрацит и тощие угли, имеющие крайне незначительное содержание летучих частей (см. таблицу 1), трудно воспламеняются и требуют высоких температур в топочном пространстве, но вместе с тем благодаря короткому пламени и малому газообразованию для них нужны лишь незначительные размеры этого топочного пространства. Напротив, жирные и газовые угли благодаря высокому содержанию в них летучих частей воспламеняются быстро, и им нужны низкие температуры в топочном пространстве, но, в силу образования длинного пламени, они требуют большой емкости топочного пространства. Эти соображения чрезвычайно важны для проектирования и эксплуатации топок и, как мы это увидим далее, играют очень существенную роль как в случаях резких колебаний нагрузки, так и в особенности для «радиационных котлов» (экранированных котельных топок). Вурые угли вследствие свойственного им высокого содержания газа, воды и золы обладают сравнительно очень низкими температурами горения; то же относится и к дереву и к торфу. Наоборот, большинство сортов кокса состоит почти исключительно из соединений с высоким содержанием углерода, а потому они сгорают только при высоких температурах.

Далее, одним из важнейших различий между газовыми и негазовыми углями является то, что при применении первых легко может получиться неполное сгорание и образование сажи; обычно эти явления наблюдаются (при наличии слишком малого топочного пространства) в момент заброса топлива, так как внезапно развивающиеся при этом газовые массы не имеют ни времени, ни места для полного сгорания. Наоборот, при сжигании негазовых сортов топлива очень часто возникают значительные потери, обусловливаемые наличием несгоревших частиц горючего в очаговых остатках, так как при нецелесообразной конструкции топки или же при плохом ее ведении частицы твердой горючей массы обволакиваются негорючими частицами топлива (золой и шлаками).

Таким образом совершенно очевидно, что каждый сорт угля, в зависимости от своего химического состава, требует особого подхода до и во время сжигания, особых конструкций решетки и топочного пространства, различной подачи воздуха и различного времени горения и т. д. Лишь в результате последних успехов топочной техники стало возможным строить топки и решетки или горелки (при пылеугольном топливе), которые в одинаковой мере пригодны для различных горючих и в которых учет особенностей соответственного топлива производится лишь посредством регулирования подачи воздуха.

Температуры горения. Температура горения топлива точно так же является фактором, очень серьезно влияющим на экономичность работы котельной. Чем выше температура горения, тем выше полезный перепад тепла и теплопередача, тем значительнее, однако, и напряжения в материалах топки и котла. Температура горения зависит прежде всего от химического состава и теплотворной способности топлива, далее — от содержания влаги и золы, от температур самого топлива при подаче и подводимого для горения воздуха и, наконец, от размеров лучистой теплоотдачи топочного пространства. Температура горения тем выше, чем выше теплотворная способность и содержание углерода, чем меньше содержание воды и золы, чем больше подогрев воздуха и чем меньше поверхность котла, воспринимающая теплоту непосредственно через лучеиспускание в топке.¹ Для работы современных котельных, в которых приходится иметь дело с большими поверхностями, нагреваемыми лучеиспусканием, но вместе с тем и с высокими степенями воздухоподогрева, эти вопросы имеют первостепенное значение. Эти соображения будут освещены более детально в последних главах.

Балластные вещества.² Наиболее неблагоприятное влияние из всего балласта оказывают *вода и зола*. Причиной этому является то, что они понижают температуры горения и боль-

¹ См. по этому вопросу интересные соображения, приведенные в статье Rosin'a в Arch. f. Wärmewirtschaft, 7, 314, 1926.

² В русской технической литературе и балласту топлива относят только золу, воду и серу, все же остальное (включая кислород и азот) объединяют понятием «органической части топлива» [см. Те ц н е р и Г е й н р и х, Паровые котлы, стр. 20; А. А. Н а д е ж и н, Основные виды топлив России, стр. 7, формула (2)]. *Прим. ред.*

шей частью значительно уменьшают к. п. д. процесса горения; ¹ в некоторых случаях они приводят также к очень неприятным перебоям в работе и могут значительно удорожить ремонт котельных установок (загрязнение и зарастание поверхностей нагрева, закупорка колосников и газоходов, развезание, разрушение котельной кладки и т. д.). Вода не только не имеет никакой теплопроводной способности, но, напротив, даже расходует значительную часть теплоты топлива для своего испарения во время горения. Что касается содержания золы, то здесь играет роль не только ее количество, но и химический состав, так как от последнего в высокой степени зависит поведение золы в топке. В частности очень большое значение имеет *температура плавления золы*, особенно при пылеугольных топках, в каковых большей частью приходится считаться с высокими температурами топочного пространства. Если температура топочного пространства выше температуры плавления золы, то последняя плавится, становится жидкой, сильно развезает кладку, а иногда закупоривает также горелки и каналы, подводящие воздух, что приводит к частым, нередко дорогостоящим и продолжительным ремонтным работам. Степень развезания кладки зависит, однако, не только от температуры плавления, но и от химического состава жидкого шлака. Влияние различных составных частей золы до сего времени, к сожалению, еще мало выяснено; впрочем, новейшие работы американского Горного бюро (Bureau of Mines), ² Броше (Broche) ³ и др. содержат ценные материалы для дальнейших систематических исследований. Во всяком случае уже сейчас твердо установлено, что с точки зрения как теплового хозяйства, так и производственно-технической желательнее и выгоднее, чтобы температура плавления золы была, во избежание самой возможности образования жидкого шлака, выше температуры топочного пространства.

Из числа прочих составных частей балласта кислород и азот безвредны, так как они частично заменяют воздух, потребляемый для горения, не требуют добавочного тепла, как вода, и не образуют остатков, как зола. *Сера*, являющаяся балластом, обладает даже очень значительной теплопроводной способностью, т. е., иными словами, при сжигании даже отдает теплоту; тем не менее она все же чрезвычайно неприятное вещество балласта, так как, во-первых, вследствие своей низкой температуры плавления, она не может содействовать процессу горения и, во-вторых, образующиеся газы (сернистый газ) чрезвычайно вредны для всех близрасположенных частей котельной установки (они сильно разрушают металлы, камень кладки и т. д.).

Форма и величина. Следует помнить, что для процесса горения существенны не только химические, но также и физические и механические свойства топлива. По размерам различают следующие сорта угля: *рядовой уголь*, т. е. нераздробленные куски различной величины, в том виде, в каком они извлекаются на поверхность земли; *кусковой уголь* (так называемые *плита* и *кулак*), т. е. отобранные куски, величиной свыше 80 мм; *орешек* от I до V сортов, размерами приблизительно от 75 до 15 мм; *семячко*, размерами от 15 до 8 мм; *угольная мелочь* (зубок со штыбом), размерами от 8 до 0 мм, и *штыб* или *угольная пыль* (3—0 мм). Наиболее равномерно на колосниках сгорают различные сорта орешка, так как у него отдельные куски лишь незначительно различаются по величине друг от друга. При неотсортированном же, например рядовом, угле может легко получиться неравномерное горение, так как более крупные куски, естественно, сгорают полностью медленнее, нежели более мелкие; вследствие этого, особенно при механических топках, получается неравномерная толщина слоя топлива, прогары (воздушные окна) на решетке, через которые проникают значительные количества избыточного воздуха, и т. д. Кроме того, при очень мелких углях, если тяга велика (например при нижнем дутье), легко возникают потери от уноса и сажки, так как газовый поток захватывает легкие, неполностью или даже совсем не сгоревшие частицы топлива из зоны высоких температур и уносит их в дымоходы, боровы и в дымовую трубу. С другой стороны, при наличии мелкого угля прозоры колосниковой решетки должны быть очень узки, так как в противном случае чрезмерно большая доля порошкообразной массы топлива проваливается сквозь колосники в несгоревшем виде.

Неприятной особенностью некоторых как негазовых, так и газовых каменных углей является *спекание* их во время горения, вследствие чего резко возрастает сопротивление, которое приходится преодолевать воздуху, проникающему через прозоры решетки. Поэтому

¹ См. также: Vogel, Verbrennung von Kohle mit hohem Aschen- und Wassergehalt, Arch. f. Warmewirtschaft, 9, 189, 1928.

² См. Barkley, Fuel, 4, 270, 1925, а также Brennstoffchemie, 6, 375, 1925.

³ См. Arch. f. Warmewirtschaft, 7, 99, 1926. В этой статье приведена кроме того полная библиография вопроса.

либо приходится сжигать такие угли в тонком слое, либо же следить за тем, чтобы образующиеся «угольные пироги» время от времени разрыхлялись механически, либо от руки.

Прочность. Механическая прочность углей варьирует в очень широких пределах. В частности, бурые угли бывают волокнистой, землистой и раковистой разновидности, из числа коих последняя довольно прочна и хорошо сопротивляется сотрясениям и ударам, тогда как землистые угли распадаются в порошкообразную массу даже при совсем незначительных механических воздействиях. Прочность каменных углей также очень различна: из числа естественных твердых топлив наиболее прочны антрациты и тощие угли, а из числа искусственных — коксы. Вообще говоря, для транспорта на дальние расстояния топливо, обладающее высокой прочностью, является более пригодным, нежели малопрочное топливо, потому что прочное топливо не подвержено истиранию, а следовательно и потери при перегрузках невелики; в отношении же рыхлых, ломких и землистых сортов топлива наиболее целесообразным является их облагороживание на месте добычи посредством соответствующей обработки (брикетирование, швелевание, размол на пылеугольное топливо и т. д.). При производстве пылеугольного топлива расход энергии на размол много меньше при землистых топливах, чем при весьма прочных топливных материалах.

Теплотворная способность. Теплотворная способность (теплопроизводительность или калорийность) топлива, т. е. то количество тепла в больших калориях, которое освобождается при полном сгорании 1 кг топлива, зависит, с одной стороны, от содержания в горючем С и Н, а с другой стороны — от содержания в нем балласта. Она является важнейшим критерием ценности топлива и основой для построения теплового баланса котельной установки. На практике различают высшую и низшую теплотворные способности (Q_v и Q_n). Низшая теплотворная способность получается путем вычитания из высшей теплотворной способности *калорий теплоты* испарения влаги, как содержащейся в топливе и в воздухе, подаваемом для горения, так и образующейся при процессе горения и переходящей в водяной пар. Разница между обеими теплотворными способностями таким образом тем больше, чем выше содержание влаги и водорода в топливе. В следующей главе будут подробно изложены мотивы, побуждающие пользоваться в одних случаях величиной Q_v , в других же Q_n .

Таблицы 1 и 2, а также рис. 5 и 6, позволяют убедиться в том, как велики бывают различия между обеими теплотворными способностями разных видов топлива. Совершенно очевидны исключительные преимущества тощих и жирных углей перед добываемыми в Германии бурными углями (богемские бурые угли гораздо высокосортнее германских); вместе с тем, однако, не менее очевидны и большие возможности повышения теплотворной способности с помощью соответствующей переработки (например переработки рядового бурого угля в буроугольные брикеты). Так как большинство топлив не особенно различается в отношении золосодержания, то теплотворная способность определяется прежде всего содержанием влаги в топливе; и действительно, существует определенная зависимость теплотворной способности от содержания влаги.¹

На рис. 7 графически изображены теплотворные способности обеих важнейших горючих составных частей всякого угля, а именно С и Н, далее — теплотворные способности СО и ряда углеводородов, содержащихся в жидких и газообразных топливах. Можно видеть, что 1 кг Н обладает калорийностью в 4 раза большей, чем 1 кг С; после этого понятно, что богатые водородом виды топлива в отношении калорийности ценнее топлив с высоким содержанием углерода.

В заключение, однако, следует сказать, что ценность топлива отнюдь не определяется одной только его калорийностью. Не меньшее значение в очень многих случаях имеют как механические свойства, так и температуры воспламенения и горения топлива. Поэтому при оценке топлива они должны быть полностью приняты во внимание.

Свойства угольной пыли. Среди всех остальных видов твердого топлива совсем особое место занимает угольная пыль, приобретшая за последнее десятилетие очень большое значение в качестве распыленного топлива. По характеру своему распыленное топливо напоминает жидкие и газообразные топлива в гораздо большей мере, чем твердые; действительно, подобно первым, оно вводится в топочное пространство с помощью форсунок и сгорает, следовательно, не на решетке, а в воздухе во взвешенном состоянии. Так как благодаря малой величине своих зерен оно приходит в очень тесное соприкосновение с воздухом, то при условии хорошего распыления

¹ Подробности по этому вопросу см. в следующей главе, раздел «Горение топлива», стр. 48.

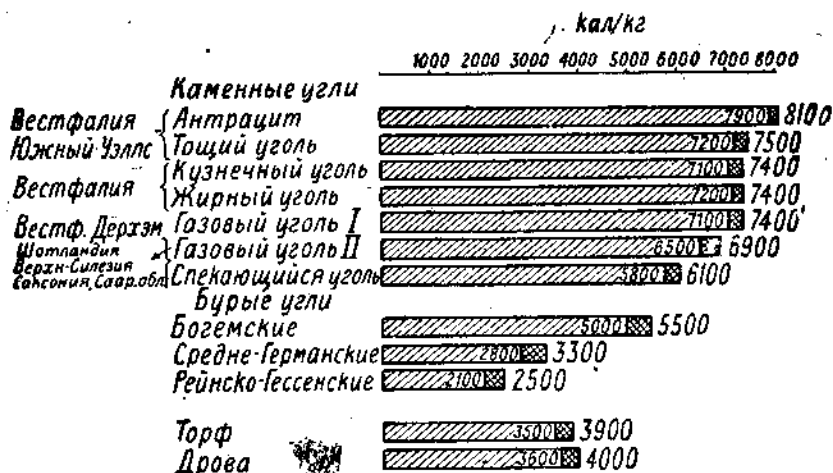


Рис. 5. Высшие и низшие теплотворные способности естественных твердых топлив (средние величины).

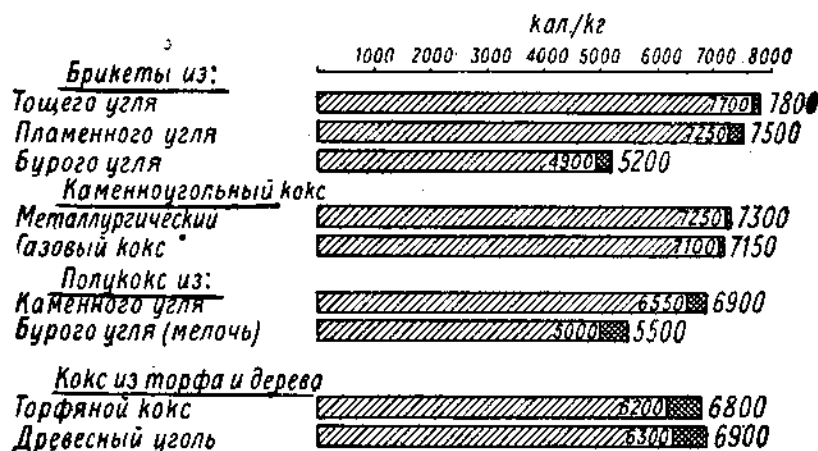


Рис. 6. Высшие и низшие теплотворные способности искусственных твердых топлив (средние величины).

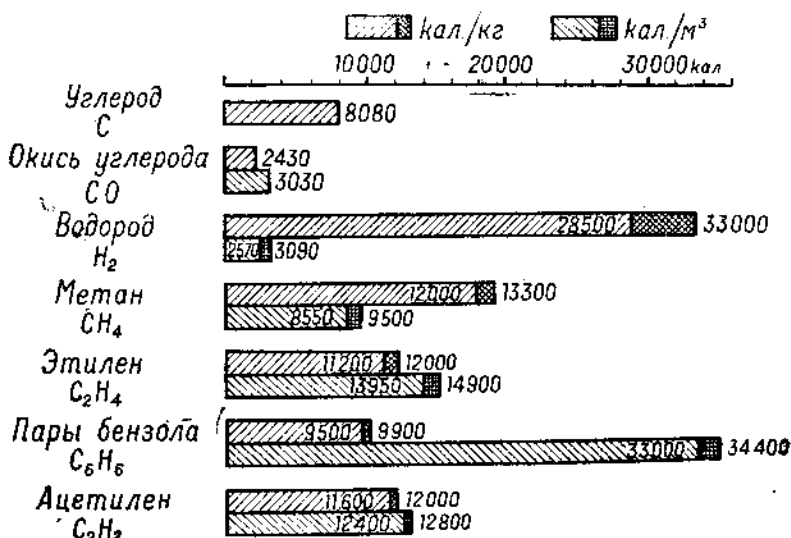


Рис. 7. Высшие и низшие теплотворные способности химически однородных веществ (средние величины).

и правильной подачи воздуха распыленное топливо сгорает в краткий срок и весьма совершенно. Кроме того пылеугольные топки могут быть точно регулируемы и легко приводимы в соответствие с любой нагрузкой котла, что является их очень важным преимуществом; и в этом отношении, следовательно, пылеугольные топки также схожи с нефтяными и газовыми топками.

Из всех свойств угольной пыли наибольшее и преимущественное значение имеют влажность и степень измельчения, так как в первую очередь именно эти качества определяют как расход энергии на размол, так и легкость подачи и горения. Несмотря на то, что очень многие вопросы продолжают еще оставаться неразъясненными, все же тщательные исследования, предпринятые Розиным, Раммлером, Е. Шульцом, Шульте, Шультезом, Хольдом (Rosin, Rammler, E. Schulz, Schulte, Schultes, Hold) и др., показали, ¹ что потребление энергии угольными мельницами резко возрастает с увеличением влажности угольного сырья и что также и подача пыли и сгорание последней при этом определенно ухудшаются. Поэтому тщательная сушка сырого угля перед размолом является целесообразной и уместной почти во всех случаях, а нередко она даже просто необходима.

Со степенью измельчения угольной пыли дело обстоит несколько иначе. С одной стороны, большая степень измельчения является фактором, несомненно благоприятствующим горению, ибо при этом частицы угольной пыли — при условии хорошего смешения с воздухом — сгорают очень быстро (благодаря этому газоходы могут быть короткими, а топочные пространства небольшими); с другой же стороны, расход энергии на мельницы становится тем значительнее, чем мельче размалывается уголь. Таким образом, экономические причины побуждают довольствоваться такими максимальными размерами зерна, т. е. таким минимальным размельчением, при котором в данной камере горения уже может быть получено полное сгорание.

Само собой разумеется, что те свойства пылеугольного топлива, которые являются характерными для кусковых углей, играют ту же самую роль и для его характеристики и оценки; к числу этих свойств относятся, например, теплотворная способность, температура горения, зольность, температура плавления золы и т. п.

III. ЖИДКОЕ ТОПЛИВО.

И здесь также приходится различать естественные и искусственные топлива; первые, так называемые нефти, добываются в различных странах, главным образом в Северной и Южной Америке, СССР, Персии, Румынии и Галиции, вторые получают при перегонке твердых топлив. Почти все нефти являются чрезвычайно ценным топливом с высшей теплотворной

Удельный вес при 15° С

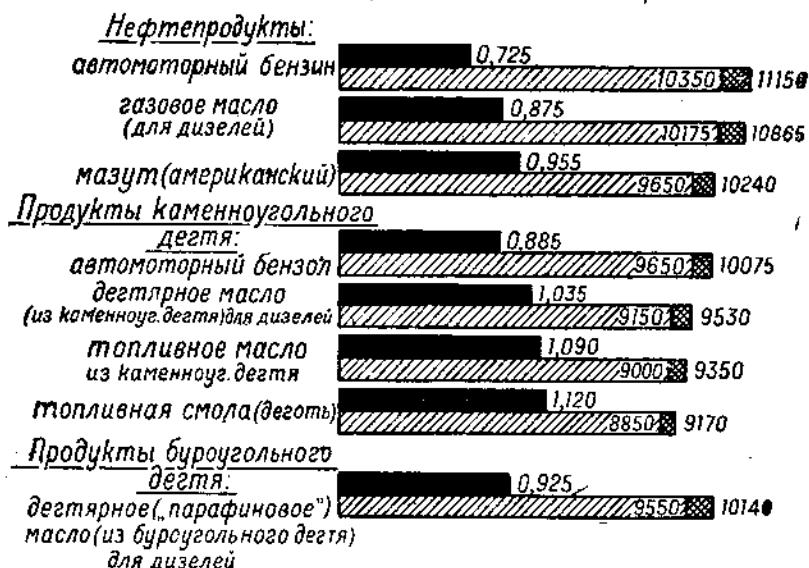


Рис. 8. Высшие и низшие теплотворные способности жидких топлив (средние величины).

¹ Наиболее интересными являются работы Rosin'a, Rammler'a и Schulz'a, см. Arch. f. Wärmewirtschaft, 7, 54, 81, 1926; 8, 69, 109, 239, 1927.

способностью, колеблющейся от 9000 до 12 000 кал/кг; так как кроме того они содержат лишь незначительные количества балласта, то вполне понятно то широкое применение, которое они находят в качестве топочного и моторного горючего для двигателей различного рода. Однако в Германии, как уже было сказано выше, их до сего времени не применяют в сколько-нибудь значительных размерах для отопления паровых котлов. Объясняется это тем, что, несмотря на превосходные термические свойства нефтей, сжигание их в котеларках оказывается неэкономичным вследствие их относительно высокой стоимости. Применение их может, впрочем, оказаться очень выгодным в отдельных частных случаях, например в качестве добавочного горючего для топок с колосниковыми решетками (топки с добавочным или вспомогательным нефтяным отоплением) или в качестве топлива для резервных котлов с незначительным годовым использованием, предназначенных главным образом для возможно быстрого введения в работу в случае аварии основных котлов, благодаря непродолжительности растопки и легкой приспособляемости жидких горючих к колебаниям нагрузки. При таких малоиспользуемых установках повышенная стоимость топлива не играет почти никакой роли. В Америке и Восточной Европе (СССР, Галиция, Румыния), где нефть добывается в больших количествах и где поэтому цены на жидкое топливо сравнительно невысоки, нефтетопливо применяют довольно часто и в качестве горючего для топок постоянно работающих, стационарных и передвижных парокотельных установок.

На рис. 8 даны теплотворные способности некоторых, технически более важных, жидких топлив; из них для сжигания в топках применяют почти исключительно мазут.

IV. ГАЗООБРАЗНОЕ ТОПЛИВО.

В природе газообразное топливо встречается сравнительно очень редко; только в Соединенных Штатах добывают относительно значительное количество такового. Напротив, при различных процессах перегонки твердых топлив обычно получают высокоценные газы (светильный газ, коксовальный газ, газы, отгоняющиеся при низкотемпературной перегонке), а при так называемой газификации твердых топлив в генераторах — горючие газы, обладающие, впрочем,

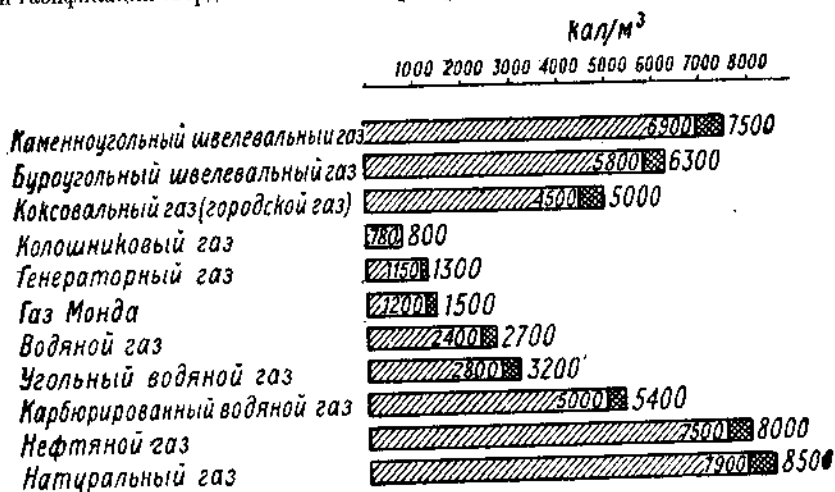


Рис. 9. Высшие и низшие теплотворные способности газообразных топлив (средние величины).

значительно меньшей теплотворной способностью (слабые или бедные газы, водяные газы). Далее, в результате некоторых важных металлургических процессов, в первую очередь — доменного процесса, получают как побочный продукт *колошниковые* или *доменные газы*, точно так же могущие быть использованными в качестве топлива; наконец, еще и из жидких топлив и из негорючих веществ могут быть получены высокоценные газы (*нефтяные газы*, *карбидные газы* и т. д.). Различие между газами, получающимися из твердых топлив в результате отгонки (Entgasung), с одной стороны, и «газификации», т. е. превращения в газ (Vergasung), с другой, заключается в основном в том, что первые состоят преимущественно из водорода и высококалорийных углеводородов, тогда как вторые содержат в себе большие количества балласта, прежде всего — азота, и кроме того, в горючей своей части состоят

ТАБЛИЦА 2.

Классификация, состав и теплотворная способность газобразных топлив (средние величины).¹

Исходный продукт	Способ получения	Наименование ²	Объемные части					Теплотворная способность	
			CH ₄	C _m H _n	CO	H ₂	Остатки, кислорода, азот и т. д.	Q _в кал/м ³	Q _н кал/м ³
Твердые топлива	Сухая перегонка	Каменноугольный швелельный газ a	43	13	7	27	5	7 500	6 900
		Буригольный швелельный газ b	25	18	13	22	22	6 300	5 800
		Коксовальный газ c	29	4	8	50	9	5 000	4 500
		Колошниковый » d	—	—	28	4	68	800	770
		Генераторный » e	3	—	28	12	57	1 300	1 150
Газификация	Газификация	Газ Монда f	4	—	12	25	59	1 500	1 200
		Водяной газ g	0,5	—	42	49	8,5	2 700	2 400
		Угльноводной газ h	8	0,6	28	45	18,4	3 200	2 800
		Холодновоздушные газы (Kalt-luftgase) i	—	25	—	—	75	2 500	2 400
		Газы расщепления ³ k	40	6	5	40	9	6 500	6 000
Природные газы	Разложение	Метановые газы l	95	1	—	—	4	8 500	7 900
		Карбиловые газы m	—	100	—	—	—	12 000	11 500
		Водород n	—	—	—	100	—	3 090	2 570

¹ Классификация заимствована из листа норм DIN 1340 „Горючие технические газы“.

² a — c называются также *большими газами*, d — f — *средними газами*, g — h — *водными газами*.

³ Химический состав и теплотворная способность колеблются в очень широких пределах: так, например, теплотворная способность, равняясь в отдельных случаях всего лишь 40000 кал/м³, достигает нередко 10 000 кал/м³ и даже большего значения.

главным образом из неособенно высококалорийной окиси углерода (CO) (см. рис. 7). Впрочем, для горения, как для такового, это не играет существенной роли, ибо почти все газы могут быть сжигаемы с высоким к. п. д. Напротив, для передачи на дальние расстояния пригодны по экономическим причинам только газы с высокой теплотворной способностью, так как для транспорта бедных газов необходимы трубопроводы больших размеров, стоимость которых оказалась бы чрезмерной.

В таблице 3 сопоставлены технически важнейшие горючие газы и их наиболее существенные свойства. Рис. 9 показывает различия в теплотворной способности не только у разных групп газов, но также и в пределах отдельных групп. Химический состав отдельных газов, приведенный в таблице 3, является лишь грубо примерным, средним составом; цифры такого состава действительны не для всякого газа соответствующего наименования, а только для имеющих указанную в таблице теплотворную способность. Следует еще упомянуть, что теплотворную способность газообразных горючих относят обычно к 1 м³, а не к 1 кг, как это принято в отношении твердых и жидких топлив.

V. ОТБОРСНЫЕ ТОПЛИВА.

Существует целый ряд различных технических процессов, в результате которых возникают в качестве побочных продуктов те или иные горючие вещества. Последние обладают большей частью лишь очень незначительной теплотворной способностью и поэтому обычно называются отборскими топливами. Принципиально к таким отборским топливам следует относить также и все малоценные горючие с высоким содержанием балласта (влаги, золы, серы, азота и т. д.), как, например, очень влажные бурые угли, колошниковые газы и т. п.

Здесь мы охарактеризуем в самой краткой форме лишь наиболее важные виды твердого отборского топлива, представляющего нередко очень большой интерес, особенно для тех отраслей промышленности и производственных предприятий, в которых оно как раз и получается, ибо обычно дело идет не столько о наиболее полном и совершенном использовании теплоты топлива, сколько о том, чтобы вообще каким бы то ни было образом удалить отходы (мусор в городском хозяйстве, отбросные сульфитные щелока на бумажных фабриках и т. д.). Транспорт отбросных материалов возможен лишь в самых редких случаях.

Отбросные вещества получают преимущественно:

- 1) при добыче и обогащении углей,
- 2) при сухой перегонке твердых топлив,
- 3) при сжигании твердых топлив,
- 4) в разнообразнейших промышленных производствах и
- 5) в хозяйственных предприятиях.

В частности, при добыче и обогащении угля в углемойках получается остаток — *угольный шлам*, являющийся горючим веществом с обычно очень высокими влажностью и зольностью. На коксовательных заводах получается относительно высокий процент *коксовой золы* и *коксовой мелочи*, в дымовых коробках паровозов — так называемые *паровозные сажки*, состоящие главным образом из коксозависающего уноса — «летучего кокса». Точно так же и в других топочных устройствах при чистке ходов топки, боровов и т. п. нередко собираются очень значительные количества летучего кокса и сажки, пригодные для сжигания в приспособленных для этого топках.

Наконец, в очаговых *остатках* (зола и шлак) всех топочных устройств также всегда еще содержится некоторое количество горючих веществ, хотя непосредственно и не используемых, но поддающихся извлечению из остатков при соответственной переработке последних (мокрым или магнитным методами).

Чрезвычайно многочисленны отбросные топлива, получаемые в промышленных производствах. *Фанерная стружка*, *отходы при обточке*, *опилки*, *щепы* и т. п. могут быть сжигаемы либо непосредственно, либо после предварительной прессовки в формах. На красильных, дубильных и кожевенных заводах отходят большие количества обычно очень сырого *хорья*, которое целесообразно подвергать предварительной сушке перед сжиганием. ²

¹ Очень обстоятельное и подробное описание отбросных топлив имеется в превосходной книге G. De Grahl, *Verwertung von Abfall- und Ueberschussenergie*, VDI-Verlag, Berlin, 1926.

² См. Voss, *Arch. f. Wärmewirtschaft*, 8, 23, 1927.

Все эти отбросы сжигают большей частью в смеси с высококалорийными видами топлива.

Чрезвычайно важной проблемой, наконец, является удаление отбросных горючих веществ из хозяйственных предприятий. По Гейльману (Heilmann) мусор в городе, имеющем 100 000 жителей, составляет в год около 30 000 м³, а животные отбросы — около 5000 м³. Так как, однако, значительная часть этих больших масс — горюча (теплотворная способность их равна примерно 1000 кал/кг при приблизительно 15% влажности) и так как кроме того шлак от горения мусора может пойти — в противоположность самому мусору — разнообразные применения (шлаковые кирпичи, щебень, изоляционные массы и др.), то является вполне верным, что сжигание мусора будет играть еще очень значительную роль в коммунальных хозяйствах. Ориентировочный подсчет показывает, что из 1 кг мусора с теплотворной способностью 1000 кал/кг при к. п. д., равном 70%, может быть получено около 1 кг перегретого пара.

В связи со всем вышесказанным следует упомянуть еще об одном естественном низкокалорийном топливе, а именно о *горючих сланцах*, в отношении которых, впрочем, экономически более уместным является не сжигание, а в виду высокого содержания в них смолистых частей — низкотемпературная перегонка.

Таблица 4 дает сводку теплотворной способности, влажности и зольности ряда важных отбросных топлив.

ТАБЛИЦА 4.

Теплотворная способность, влажность и зольность отбросных топлив (средние величины).

	Вышая теплотворная способность Q_v кал/кг	Влажность %	Зольность %
Каменноугольный шлак	3 000 ÷ 2 000	35	30
Старки из паровозной дымовой ко- робки	6 000 ÷ 4 000	3 ÷ 20	15 ÷ 22
Летучий каменноугольный зольный кокс	5 000 ÷ 4 000	5 ÷ 10	30 ÷ 40
Толочные (очаговые) остатки	1 500 ÷ 500	—	75 ÷ 90
Древесная кора, щепа и т. п.	4 000 ÷ 1 000	Очень различна	0 ÷ 10
Сухое корье	3900	10	2 ÷ 4
Сырое »	1 200 ÷ 500	65 ÷ 80	1 ÷ 2

ДОПОЛНЕНИЯ РЕДАКТОРА.

1. Топливо.

Вопрос о мировых запасах тепловой энергии (а также и других видов энергии) и о роли различных видов энергии в мировом хозяйстве часто подвергался исследованию, причем в виду сложности вопроса и недостаточности данных мировой статистики результаты, полученные различными исследователями, сильно расходятся.

В одном из докладов на II Теплотехническом съезде (в Москве в 1925 г.)¹ приводились следующие данные о мировых запасах энергии (см. таблицу на стр. 30).

Некоторые новейшие сведения и многочисленные литературные данные по вопросам мировой энергетики приведены в докладе инженера В. И. Вейца — «Энергетическая проблема современного мирового хозяйства». Доклады СССР на II Мировой энергетической конференции, Госиздат, 1930 г.

Обширные данные по этому вопросу см. в труде Quigley, Power Resources of the World. London, 1929.

¹ «Энергетические ресурсы СССР», Труды II Всесоюзного теплотехнического съезда, том I, вып. 1.

Ресурсы энергии (в миллиардах тонн 7000-калорийного топлива)

	Мировые			С С С Р			
	Млрд. тонн	%	%	Млрд. тонн	%	%	% миров.
Невозобновляемые							
Ископаемые угли . . .	5 600	96,1	75,1	393,9	69,5	50,8	7,0
Нефть	11,5	0,2	0,15	4,3	0,75	0,6	37,4
Торф	215	3,7	2,9	168,6	29,8	21,7	78,0
Итого . . .	5 826,5	100	78,1	566,8	100	73,1	9,8
Возобновляемые							
Торф (прирост) . . .	50	3,1	0,7	39,0	18,7	5,0	78,0
Дрова	340	20,8	4,6	63,0	30,2	8,1	18,5
Солома	37	2,3	0,5	6,7	3,2	0,4	18,1
Ветер	826	50,8	11,1	69,0	33,0	8,9	8,3
Водные силы	374	23,0	5,0	31,1	14,9	4,0	8,3
Итого	1 627	100	21,9	208,8	100	26,9	12,8
Всего	7 453	—	100	775,6	—	100	10,4

2. Топливо в СССР.

Из только что приведенных данных относительно мировых запасов энергии видно, какими богатыми и разнообразными запасами топлива обладает СССР. Книга Преториуса не преследует цели давать подробную характеристику топлив, применяемых в котельном хозяйстве, поэтому и в настоящем дополнении мы даем только краткие сведения о главных видах топлив СССР, отсылая интересующихся более детальными сведениями к специальной литературе.

Приводим только несколько основных трудов, так как даже приведение подробной библиографии возможно только в специальных трудах по топливу.

Проф. А. А. Надежин, Основные виды топлив в России и их характеристика, Москва, 1925.

Проф. М. Г. Ожнов, Топливо и его сжигание, Ленинград, 3 изд., 1931.

Проф. Д. Чернобаев, Топливо, Харьков—Киев, 1931.

Статья С. В. Выхирева, «Топливо» в сборнике «Теплотехник», Ленинград, 1928.

Э. С. Меерович, Эксплуатация центральных электрических станций, Москва, 1928.

Библиография, доведенная до 1925 г., имеется в книге «Топливо», изданной под редакцией проф. П. Г. Рубина (Госиздат Украины, 1925). Обширные материалы по различным вопросам, касающимся топлива и его сгорания, имеются в журналах: «Известия Теплотехнического института» (1924 — 1931 гг.), «Тепло и сила» (1926 — 1931 гг.), «Нефтяное хозяйство» и «Торфяное дело», а также в «Трудах всесоюзных теплотехнических съездов» (I съезд в 1923 г., II — в 1925 г., III — в 1926 г., IV — в 1928 г., V — в 1930 г.). Особенно много данных по различным топливам имеется в «Трудах комиссии по установлению эквивалентов топлива», «Материалах к III Всесоюзному теплотехническому съезду», вып. 8, «Материалах Всесоюзной топливной конференции» 1930 г. и в многочисленных изданиях учреждений (Донугля и др.). Сводки главных данных по каменному углю и другим видам топлива имеются также в книгах по паровым котлам: А. И. Иванов, Котельные установки, Москва, 1928. Ф. Тецнер и О. Гейнрих, Паровые котлы. 3 изд., 1929, под редакцией и с дополнениями проф. А. А. Предтеченского. Р. Г. Грановский, Котельные установки, Ленинград, 1930.

Приблизительное распределение запасов угля (включая и горючие сланцы) в СССР приведено в следующей таблице: ¹

Запасы угля и сланцев (в млрд. тонн):

Кузнецкий бассейн	250,0
Донецкий бассейн	59,6
Иркутский бассейн	52,0
Северно-Сибирский	40,5
Подмосковный	8,0
Прочие	18,2

В с е г о 428,3

Распределение этого запаса по различным видам углей следующее (в млрд. тонн):

Антрацита	54,1
Каменного угля	354,3
Бурого угля	15,1
Богхэдов	3,2
Горючих сланцев	1,6

До сих пор наибольшее значение в топливоснабжении имели донецкий уголь и антрацит, с окончанием же строительства Урало-кузнецкого комбината огромное значение получает уголь Кузнецкого района.

Приводим данные относительно главных видов топлива, применяемых в СССР ² (см. таблицу на стр. 32).

Подробные данные об антраците приведены в вышеупомянутой статье С. В. Вяхирева в сборнике «Теплотехник» (стр. 226). Основной труд по антрациту: К. В. Кирш, Антрацит как топливо котельных, Москва, 1925.

Из других сортов каменного угля получил большое значение подмосковный уголь, занимающий среднее место между каменным и бурым углем. Данные о его составе приведены в таблице на стр. 32. ³

Что касается собственно бурых углей, то запасы их в СССР невелики, и они особенного значения (в отличие от германских условий, которые имеет в виду Преториус) не имеют. Известностью пользуются залежи бурого угля в б. Киевской, Волынской и Николаевской губ.

Кроме каменного угля, заметную роль из твердых топлив в теплоснабжении СССР играют дрова, торф и сланцы.

Средний состав органической массы древесного топлива следующий:

$$\begin{aligned} C_o &= 49,85\% \\ H_o &= 6,25\% \\ (O + N)_o &= 43,9\% \end{aligned}$$

причем содержание азота крайне незначительно и может быть принято равным одному проценту. Теплотворная способность (низшая) органической массы древесного топлива — около 4445 кал. Рабочая же теплотворная способность дров в значительной степени зависит от способа доставки и от влажности дров. Проф. А. А. Надежин ⁴ дает следующую таблицу для рабочей теплотворной способности дров:

Содержание влаги в % .	15	20	25	30	40	50	60
Для дров сухолуфной до- ставка («горных») . . .	3 625	3 376	3 128	2 879	2 382	1 885	1 388
Для дров сплавных . . .	3 203	2 980	2 578	2 535	2 090	1 645	1 290

¹ Д. Чернобаев, Топливо, стр. 104.

² Данные эти приводятся по статье «Основные уравнения для дымовых газов при полном горении». «Известия Теплотехнического института», № 1(14), 1926. Более подробные данные см. в статье, помещенной в «Известиях Теплотехнического института», № 2(35), 1928.

³ Таблица эта взята из книги Р. М. Грановского, Котельные установки, Ленинград, 1930.

Новейшие данные о подмосковном угле и условиях его сжигания см. в статье Л. Г. Баранова и Б. С. Швецова, Местное топливо в народном хозяйстве, «Материалы Всесоюзной топливной конференции», стр. 8, Москва, 1930.

⁴ А. А. Надежин, Основные виды топлив России, стр. 18.

Основные характеристики топлива СССР (в %).

№ по порядку		Дрова		Торф		Бурый уголь очень влажный	Подмосковный крупный уголь	Донецкое				Назут	
		Очень влажные	Средние	Очень влажные	Средний			Длинноплодный	Паровальный жирный	Тонкий	Антрацит	Обводненный	Средний
1	Углерод	19,9	34,8	21,2	37,0	20,7	32,9	58,4	73,2	78,0	79,6	77,8	83,9
2	Водород	2,4	4,3	2,1	3,8	1,8	2,5	4,1	4,4	3,7	1,8	11,5	12,3
3	Кислород	16,9	25,5	11,9	20,8	6,7	9,2	8,2	4,0	2,0	1,7	0,4	0,4
4	Азот	0,4	0,7	0,7	1,2	0,3	0,6	1,3	1,4	1,3	0,4	—	—
5	Сера (летучая)	—	—	0,1	0,2	0,5	2,8	3,0	2,0	2,0	1,5	0,1	0,2
6	Зола	0,4	0,7	4,0	7,0	10,0	20,0	15,0	11,0	9,0	10,0	0,2	0,2
7	Влажность	60,0	30,0	60,0	30,0	60,0	32,0	10,0	4,0	4,0	5,0	10,0	3,0
8	Теплотворная способность (низшая)	Q _н 1 400	2 980	1 570	3 220	1 600	2 920	5 580	6 930	7 200	6 860	9 060	9 800

Элементарный состав рабочей массы подмосковного крупного угля (в %).

Название марки	C	H	O + N	W (зола)	A (зола)	S	Q _н
K (круп. 2")	38,4	2,86	10,74	30,0	15,0	3,0	3 440
O (орех — 1 — 2")	37,0	2,75	10,25	30,0	17,0	3,0	3 300
PM (ржд. с мелк.)	35,1	2,6	9,8	32	17,0	3,5	3 150
M (мелк. 0 — 1")	30,6	2,28	8,82	33,0	21,5	4,0	2 740

Содержание золы колеблется в дровах от 2% (сухопутная доставка) до 4% (сплавные дрова).

Специальное исследование по дровяному топливу: К. В. К и р ш, Дрова как топливо, изд. Теплового комитета при Теплотехническом обществе, 1919. Новейшая работа: Л. А. Мор-ж е ц к и й, Теплотворная способность древесных пород европейской части СССР, «Известия Теплотехнического института», № 4, 1930. ¹

Большую роль в топливоснабжении некоторых районов СССР играет торф. Вероятные запасы его в СССР исчисляются в 168 800 миллиардов тонн, составляя около 78% от мировых ресурсов торфа. ²

Особенное значение получил торф для Центрального района (область Московская, районы: Нижегородский, Владимирский и др.), Ленинградской и Уральской областей. Так как торф обладает невысокой калорийностью и часто содержит большое количество воды и золы, то экономически он не выдерживает значительных перевозок. Поэтому непосредственное сжигание его целесообразнее всего производить на электроцентралях, на месте добычи его. Для утилизации же его в более отдаленных районах необходимо облагораживание его на месте добычи путем механической, термической и химической переработки. Для этого предложены способы брикетирования торфа, его газификации и коксования.

Состав торфа и его теплотворная способность сильно зависят от содержания золы и влаги. Так, состав органической части торфа (беззольной и безводной массы) можно принять ³ примерно таким: С—60%; Н—6%; О—32% и N—2%. Для торфа с 10% золы получаются уже такие цифры: С—54%; Н—5,4%; О—28,8%; N—1,8%; А (зола)—10%. Для влажного торфа (с 10% золы и 40% влаги) получится состав: С—30%; Н—3%; О—16%; N—1%; W (вода)—40% и А (зола)—10%. Теплотворная способность торфа изменяется линейно, в зависимости от содержания воды. Так, имеем для торфа вышеприведенного состава:

при безводном и беззольном торфе	5 440 кал.
при безводном торфе с 10% золы	4 896 "
при торфе с 10% золы и 40% воды	2 480 "

Горючие сланцы имеют особенное значение для Северного района и Среднего Поволжья, где они могут явиться существенным дополнением к торфу и вместе с последним сократить потребность в высокосортном каменном угле, привозимом издалека. Приводим данные о сланцах Ленинградской области: ⁴

	Ленинградская область	
	Гдовский район	Реймаринский район
Влажность	0,5	7,0
Зола	30,2	43,8
Теплотворная способность	5 723	3 625

Как видно из этой таблицы, гдовские сланцы могут с успехом применяться как топливо в паровых котлах, что подтверждается также опытом Эстонии, где сжигание сланцев нашло широкое применение в цементной промышленности и на паровозах. ⁵

¹ По сжиганию дров см. еще проф. М. М. Щеголев, Сжигание дров и торфа, «Труды I Теплотехнического съезда», вып. 2, Москва, 1924.

² Цифры эти, равно как и нижеприведенные данные, взяты из вышеупомянутой статьи Л. С. Баранова и Б. С. Швецова, помещенной в «Материалах Всесоюзной конференции по топливу».

³ Проф. М. Г. Окнов, Топливо и его сжигание, стр. 61, Ленинград, 1929.

О сжигании торфа имеется большая литература, см., например, доклад проф. П. М. Соловьева («Труды I Теплотехнического съезда», вып. 2) и Т. Ф. Макарьева («Труды II Теплотехнического съезда»).

⁴ Новейшие данные о запасах горючих сланцев в СССР имеются в «Материалах Всесоюзной конференции по топливу», стр. 345.

⁵ См. проф. А. М. Регнрер, О сжигании влажных сланцев, «Труды I Теплотехнического съезда», вып. 2, 1924; Проф. П. М. Соловьев, Сланцевая топка, «Труды III Теплотехнического съезда», т. II, вып. 2; Н. М. Каравас и И. Б. Раппопорт, Сапропелиты р. Кузнецкого бассейна, «Известия Теплотехнического института», № 3(56), 1930.

Зола, получающаяся при сжигании сланцев, находит себе применение при заготовке цемента.

Имеются также предложения о газификации сланцев и о химической обработке их.

Из жидких топлив громадное значение во всей экономике СССР имеет нефть, продукты ее перегонки и нефтяные остатки (мазут). Выше приводились уже цифры, указывающие на богатство СССР в отношении запасов нефти. Для сжигания в топках применяются обыкновенно остатки от перегонки нефти, а именно мазут, средний состав которого следующий: ¹

C	86%
H	12%
N	0,05%
O	1,6%
Золы, серы и влаги	0,3%

Удельный вес нефтяных остатков — 0,9 — 0,915. Теплотворная способность: $Q_v = 10\,520$ кал/кг, $Q_n = 9\,850$ кал/кг.

Грозненская нефть дает различные сорта парафинистого мазута, застывающего при высоких температурах и требующего для своего применения особых устройств. ²

В общем в настоящее время замечается тенденция к сокращению потребления нефти и мазута в топках стационарных паровых котлов, так как эти продукты представляют собой ценный материал для химической переработки и экспорта.

Отбросное топливо чрезвычайно разнообразно и не поддается простой характеристике. В СССР применяются отбросы деревообделочного производства, кожевенного производства, маслобойного производства и др.

Приводим только некоторые данные по литературе:

Проф. А. П. Ставровский, Топливо и его использование в хлопковой промышленности, Москва, 1927. (Утилизация отбросов хлопкового производства для целей сжигания в топках паровых котлов.)

Инж. П. Н. Павлович, Сжигание отдушины, «Известия Теплотехнического института», № 11/13, 1925.

М. А. Токаревский, Тепловое хозяйство предприятий на отбросах производства, Ленинград, 1928.

Инж. С. В. Татичев, Сжигание отдушины на механических топках, «Известия Теплотехнического института», 1930.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ.

ТЕПЛОВОЕ ХОЗЯЙСТВО КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК.

1. ЗНАЧЕНИЕ КОТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ВСЕГО ПРОИЗВОДСТВА В ЦЕЛОМ.

Паропроизводящая установка имеет чрезвычайно большое значение для всех промышленных предприятий и силовых станций, потребляющих в какой бы то ни было форме пар или горячую воду. Поэтому с полным правом можно говорить о том, что котельная — это *сердце производства*. И действительно, бесперебойность, экономичность и производительность всего предприятия в целом не зависят, в сущности говоря, ни от какой другой части производства в такой мере, как от безукоризненной и надежной работы котельной установки. С другой стороны, именно к паропроизводящей установке предъявляются зачастую очень высокие требования, и притом тем более высокие, чем дальше идет технический прогресс.

Значение котельной вытекает из разнообразия применений тепла вообще и в частности производимого в ней пара: для энергетических целей (паровые машины и турбины), для производственных целей (варка, сушка и т. д.) и, наконец, обычно также в широких размерах, для

¹ Проф. Д. Чернобаев, Топливо, стр. 122.

² См. Р. Г. Грановский, Котельные установки, стр. 639 и сл.; Н. И. Черножуков и Г. М. Григорян, Парафинистый мазут и его применение, Москва, 1929; Г. Ю. Козловский, Сжигание и эксплуатация парафинистого мазута, «Известия Теплотехнического института», № 2(25), 1927.

По нефти имеется своя обширная литература, указания на которую можно найти в вышеуказанных специальных сочинениях по топливу.

отопления помещений. В большинстве промышленных предприятий имеется сильно разветвленная сеть трубопроводов. Каждое отделение в определенные периоды времени требует значительных количеств пара, тогда как в другие периоды расход пара снова становится незначительным. Степень использования заводской аппаратуры или, в случае силовых установок, нагрузка сети определяют расход пара в машинах, варочных аппаратах, сушильных устройствах и т. п., в то время как расход пара для отопительных устройств определяется погодой. И то и другое может, однако, резко меняться в течение очень короткого времени. Поэтому парокотельная установка должна быть в состоянии не только подавать во всякое время потребные количества пара, но также и поддерживать его постоянное давление в сети паропроводов, так как колебания давления гибельно отражаются на экономичности всего производства в целом и на качестве продукции, а, при известных обстоятельствах, могут даже поставить под вопрос самую возможность продолжения производства.¹ Бесперебойность и гибкость работы не исчерпывают собой требований, предъявляемых к котельной установке: она должна кроме того работать экономично, производить пар минимальной стоимости и максимально использовать теплоту топлива.

Безусловная бесперебойность работы, высшая приоритетность к внезапным и резким толчкам нагрузки и наивысшая экономичность— вот три задачи первоочередной важности, разрешение которых предъявляет высокие требования к самой установке, и к обслуживающему персоналу, и к техническому руководству, тем более, что ныне обычные паропроизводящие установки, за исключением котлов лишь самых современных силовых станций, еще очень далеки от того, чтобы быть настоящими, в полном смысле этого слова, машинами. В частности, в котельных средних и мелких предприятий экономичность, бесперебойность и гибкость работы топочных и паропроизводящих устройств в очень большой мере зависят от умения кочегара и от тщательности наблюдения со стороны технического персонала.

Именно поэтому и представляется особенно важным, чтобы все лица, причастные к надзору или обслуживанию котлов, имели вполне отчетливые представления относительно химических и физических процессов, происходящих при горении и парообразовании, относительно свойств и особенностей различных топлив и целесообразного обращения с ними до и во время сжигания, относительно производительности котлов, размеров и характера потерь и т. д. Для экономически правильной оценки и для экономного управления котельной необходимо совершенное овладение основными принципами теплотехники и теплового хозяйства; никакой, даже самый продолжительный и глубокий практический опыт не может, при всей своей неоспоримо высокой ценности, заменить точное знание.

Разумеется, нет никакой надобности в том, чтобы каждый мастер и руководитель производства владели всеми химическими формулами и уравнениями термодинамики. Для нужд практики обычно совершенно достаточно понимания самых основных физико-химических взаимоотношений и умения надлежаще использовать главные данные, составленные на основании научных работ, цифровые таблицы и графики. Для этого не требуется никакой специальной математической подготовки и никакого углубленного изучения научных трудов, а достаточно краткого общепонятного руководства. Объяснения в последующих отделах этой главы как раз и имеют в виду дать возможность теплотехнику, даже и не обладающему специальной научной подготовкой, составить себе представление о важнейших взаимоотношениях в данной области и с помощью соответствующих графиков следить и разбираться во всех теплотехнических процессах в котельной, делая необходимые практические выводы.

II. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ.

1. Процесс производства пара.

Принципиально всякий паровой котел состоит из двух основных частей: *топки*, в которой химическая энергия топлива преобразуется в тепловую энергию, и *поверхности нагрева*, по которой происходит передача тепловой энергии топочных газов содержимому котла, в результате чего

¹ Забегая вперед, следует сразу же подчеркнуть, что даже при вполне современных топках и котлах далеко не всегда представляется возможным полностью поддерживать постоянное давление и воспринимать резкие, внезапные и значительные колебания нагрузки и что поэтому во всех производствах с сильными колебаниями потребления пара и нагрузки целесообразно применять тепловые аккумуляторы и в первую очередь аккумуляторы Рутса. См. также отдел «Аккумуляирование тепла».

и происходит парообразование. Представляется возможным, как это иногда и делается при точных научных исследованиях, рассматривать порознь оба эти процесса, совершенно различные по самой своей сущности; при таком подходе получают два отдельных, различных тепловых баланса: один для процесса горения и другой для процесса теплопередачи. Возможно, однако, исходя из практических соображений (а так оно обычно и бывает в большинстве всех опытов с котлами), рассматривать оба процесса совместно как один общий процесс, т. е. как явление генерирования пара; в этих случаях получается уже один общий тепловой баланс всего котла в целом.

2. Потери при горении.

Процесс горения состоит в соединении горючих составных частей топлива с кислородом воздуха. Как при всяком химическом или физическом процессе, так и при горении возникают потери. Некоторая часть горючей массы лишь недостаточно или вовсе не приходит в соприкосновение с кислородом воздуха, проваливается сквозь прозоры колосниковой решетки или же обволакивается негорючими составными частями топлива и падает вместе с остатками последнего в зольник (потери вследствие недожога топлива в очаговых остатках), или же захватывается тягой в трубу в виде мелких зерен и хлопьев (потери с уносом и сажей).¹ Иные части топлива сгорают лишь не полностью в окись углерода (CO) и тяжелые углеводороды, удаляющиеся вместе с отходящими газами в дымовую трубу (потери от химической неполноты горения).

Наконец значительная часть тепла поглощается стенками топочного пространства, колосниковыми решетками и т. д. и переходит затем оттуда частью во внешний воздух, частью в землю (потери лучеиспусканием, конвекцией и теплопроводностью). Раскаленные зола и шлаки также уносят с собой в зольник некоторую долю физического тепла (потери с теплотой очаговых остатков).

3. Потери при теплопередаче.

Таким образом, из всего количества теплоты, содержащегося в топливе, для процесса парообразования остается только некоторая его часть, а именно теплота, передаваемая поверхностью нагрева путем лучеиспускания, конвекции и теплопроводности самим пламенем и топочными газами.

Если принять во внимание, что теплота теряется также и в ходах котла (и здесь также кладка отнимает часть тепла), затем внешние части котла снова отдают наружному воздуху некоторую часть тепла, уже переданного воде, и что, наконец, полное, без остатка, использование теплосодержания топочных газов является практически неосуществимым, то и при этом процессе также неизбежно возникает ряд потерь. Потери с теплосодержанием отходящих газов зависят как от физико-химического процесса горения, так и от термического процесса теплопередачи; они становятся тем меньше, чем совершеннее горение, с одной стороны (минимальный избыток воздуха), и чем лучше теплопередача — с другой.

Такого рода двойная зависимость затрудняет разделение обоих процессов (горения и теплопередачи) при числовых подсчетах; в этом заключается также основная причина того, почему обычно при всех практических опытах отказываются от такого расчленения и определяют просто общий тепловой баланс всего котла в целом. Это представляется тем более отвечающим действительности, что именно за последнее время в котлостроении все явственнее выступает стремление оформить топку и котел как единое и слитное гармоническое целое; так, например, для этого перемещают часть поверхности нагрева в топочное пространство, строят котлы с явно выраженной внутренней топкой и т. п.² Поэтому, как правило, в дальнейшем изложении котел и топка рассматриваются как одно неделимое целое.

На основании всего вышесказанного тепловой баланс котла рисуется в следующей форме (см. таблицу 5).

¹ Оба вышеозначенные вида потерь, вместе взятые, называются также потерями от механического недожога или от механической неполноты горения. Прим. пер.

² Замечательно то, что в результате такого рода конструктивного оформления наших современных котлов большой мощности мы снова возвращаемся в некоторых отношениях к прежним конструктивным формам (жаротрубные котлы).

ТАБЛИЦА 5.

Схема теплового баланса при установившемся состоянии.

1. Потери V :

- а) теплота отходящих газов V_g ,
- б) химическая неполнота горения V_n ,
- в) недожог топлива в очаговых остатках V_{o1} ,
- г) теплота очаговых остатков V_{o2} ,
- д) летучий кокс V_k ,
- е) сажа V_c ,
- ж) лучеиспускание, конвекция и теплопроводность V_d .

2. Полезная производительность N .

3. Затраченное тепло $B = V + N$.

4. Коэффициент полезного действия.

Одной из важнейших величин, лучше всего характеризующей доброкачественность любой машины, является ее коэффициент полезного действия (сокращенно к. п. д.).

Применительно к работе паровых котлов к. п. д. называется отношение количества использованного тепла ко всему затраченному теплу. К. п. д. котла выражается большей частью не в виде дроби, а в процентах, причем количество затраченного тепла принимается за 100%. Если в таблице 5 вместо абсолютных величин потерь, полезной производительности и затраченного тепла проставить соответственные процентные значения, то полезная производительность N даст величину к. п. д.

Подобно тому как можно установить к. п. д. всего котла в целом, относя к котлу все вспомогательные устройства (экономайзер, перегреватель, воздухоподогреватель и т. д.), точно так же представляется возможным определить к. п. д. каждой составной части котла в отдельности, если только известны количества подведенного к ней и в ней полезно использованного тепла. Так, например, очень часто оказывается необходимым определение к. п. д. экономайзера и перегревателя. В последующем эти вопросы подвергнутся более подробному рассмотрению.

5. Коэффициент полезного действия установившегося состояния и эксплуатационный коэффициент полезного действия.

Уже здесь приходится вкратце указать на коренное различие между этими двумя родами к. п. д. Коэффициент полезного действия котла является постоянным только при наличии так называемого установившегося состояния (состояния равновесия), т. е. только тогда, когда каждая часть котла, обмуровки и т. п. получает и отдает в единицу времени одинаковые количества тепла. Такое установившееся состояние достигается, особенно после длительных перерывов в работе котла, обычно лишь спустя много часов после начала растопки. Поэтому приемное испытание, производимое с целью установления фактической производительности котла, должно начинаться лишь после того, как установившееся состояние достигнуто полностью, для чего обычно (при 8—16 час. остановки в работе) между началом растопки и началом опыта должно пройти минимум 6 час., а при совершенно холодном котле нередко даже несколько дней. Если опыт начать преждевременно, то в результате получится, в качестве среднего значения, некоторый к. п. д., меньший, чем к. п. д. для установившегося состояния.

Руководителя предприятия однако в гораздо большей мере интересует эксплуатационный или производственный к. п. д., являющийся мерилем фактической производительности котла в нормальных рабочих условиях, в то время как к. п. д. установившегося состояния (сокращенно именуемый «установившийся к. п. д.») характеризует производительность котла в особенно благоприятных условиях (в установившемся состоянии).

При непрерывной работе, если только колебания нагрузки не слишком велики, эксплуатационный к. п. д. и установившийся к. п. д. практически одинаковы, так как в течение всего периода действия котел находится в состоянии, очень близком к равновесному. Наоборот, при работе с ежесуточной остановкой получается очень значительное расхождение между обоими к. п. д., так как состояние равновесия достигается лишь в течение дня. Таким образом эксплуатационный к. п. д. является к. п. д. *средним* за некоторый более или менее продолжительный срок работы, например в течение суток, недели, месяца, года и т. д.

В противоположность установившемуся к. п. д. он составляется из бесчисленного множества отличных друг от друга и действительных лишь для определенных промежутков времени к. п. д. и может быть определен только в том случае, когда для всего отрезка времени, для которого определяется средняя величина, известны расход тепла и полезная производительность котла. Эксплуатационный к. п. д. за более продолжительные периоды работы определяется проще всего (конечно, при наличии хорошо поставленной производственной статистики) как среднее из всех отдельных записей за данный период.

6. Потери вследствие перерывов в работе.

Что же в конце концов является причиной такого различия между установившимся и эксплуатационным к. п. д.? Потери, не учтенные в вышеприведенном тепловом балансе (таблица 5) и именно возникающие вследствие перерывов в работе котла. Эти потери порождаются в результате, во-первых, охлаждения внешних поверхностей котла и топки, во-вторых, внутреннего остывания топочного пространства вследствие протекания через него холодного воздуха и, в-третьих, благодаря дополнительным потерям с отходящими газами и с очаговыми остатками, как при растопке, так и при остановке котла, причем, как мы это увидим дальше, потери эти могут достигать при известных обстоятельствах чрезвычайно большой величины. Таким образом, тепловой баланс котла, работающего с перерывами, оказывается уже много сложнее (см. таблицу 6).

ТАБЛИЦА 6.

Схема теплового баланса за одни сутки, включая перерыв в работе.

1. Нормальные потери (при установившемся состоянии)

$$V_{\text{норм}} = V_{\Gamma} + V_{\text{н}} + V_{\text{о.г.}} + V_{\text{о.к.}} + V_{\text{к}} + V_{\text{с}} + V_{\text{х}}.$$

2. Дополнительные потери вследствие перерыва в работе $V_{\text{доп}}$:

а) внешние охлаждения $V_{\text{доп. 1}}$.

б) внутреннее остывание $V_{\text{доп. 2}}$.

в) дополнительные потери, связанные с растопкой и пуском котла $V_{\text{доп. 3}}$.

г) дополнительные потери, связанные с остановкой котла $V_{\text{доп. 4}}$.

3. Полезная производительность N .

4. Затраченное тепло $B = V_{\text{норм}} + V_{\text{доп}} + N$.

7. Изменения коэффициента полезного действия и потерь.

До сих пор припиралось, что к. п. д. установившегося состояния есть величина постоянная и вполне независимая. Однако это совершенно не отвечает действительности. Существует целый ряд факторов, от которых в высокой степени зависит абсолютная и относительная величина потерь, а следовательно и коэффициент полезного действия. В связи с этим в первую очередь заслуживает упоминания *нагрузка котла*, т. е. количество воды, испаряемой в единицу времени. По большей части говорят о среднем напряжении (нагрузке) поверхности нагрева, относя такое к 1 м^2 поверхности нагрева и к продолжительности работы в один час. Вместе с величиной нагрузки изменяются потери с отходящими газами, с очаговыми остатками, от лучеиспускания и теплопроводности и т. д., а также и взаимное соотношение отдельных видов потерь, так что для каждого напряжения получаются особый тепловой баланс и особый к. п. д. Таким образом (совершенно аналогично тому, как это делается и для паровых машин, электромоторов и т. п.) получают *характеристические кривые к. п. д.*, показывающие изменение к. п. д. в зависимости от нагрузки (напряжения).

Однако и эти характеристики не являются чем-то неизменным во всех случаях, а различаются друг от друга в зависимости от конструкции котла, а также рода и особенностей примененного топлива. Представляется, правда, возможным привести общие ориентировочные цифры для важнейших конструкций и сортов топлива, однако они всегда являются лишь большей или меньшей степенью приближения к действительности. Поэтому одной из важнейших задач всякого руководителя производства является тщательное установление характеристик каждого из котлов установки и детальное изучение влияния колебаний нагрузки на к. п. д. и тепловые потери. Имея эти данные, он может уже затем точно установить наиболее экономичный режим работы и, поскольку это возможно, соответственно реорганизовать производство.

Кроме уже указанных, имеется еще целый ряд других факторов, влияющих на к. п. д., из их числа мы укажем здесь только на *атмосферные условия*. Во-первых, потери лучеиспусканием и теплопроводностью меняются в зависимости от внешней температуры и условий ветра;

во-вторых, — и это является наиболее существенным, — потери в трубу также зависят от температуры, условий ветра, облучения солнцем, влажности, осадков и т. п. Эти влияния также будут рассмотрены более подробно в последующих отделах.

8. Напряжение поверхности нагрева.

Наряду с к. п. д. экономичность всякой котельной установки характеризуется прежде всего ее возможной паропроизводительностью. В Германии, как правило, напряжение поверхности нагрева котла выражается количеством пара, получаемым с 1 м² поверхности нагрева в течение 1 часа работы, причем это количество дается в абсолютных единицах, т. е. в кг/м² ч. В противоположность этому в Америке установлена нормальная паропроизводительность, а величина фактической выражается в процентах нормальной.¹ Так называемое напряжение колосниковой решетки также выражается в килограммах пара на 1 м² в час (кг/м² ч.), т. е. относится к 1 м² решетки. Для пылеугольных, нефтяных и газовых топок, а для сравнительных целей также и для топок с решетками, считают напряжения топочного пространства, выражаемые в кг/м³ ч. В сомнительных случаях необходимо указывать, к каким частям — поверхности нагрева, поверхности решетки или топочного пространства — относится указываемая цифра. Так, например, при неправильной форме топочного пространства может оказаться неясным, до какого места считать топочное пространство и где начинаются уже ходы котла. Далее, при топках с водяными экранами, при наличии поверхностей нагрева экономайзеров и перегревателей нередко представляется сомнительным, следует ли считать все эти поверхности поверхностями нагрева собственно котла. Обычно паропроизводительность относят только к той части поверхности нагрева котла, которая находится в соприкосновении с водой. В этом случае, однако, паропроизводительность уже не является вполне однозначным критерием, пригодным для сравнения между собой различных котельных установок в целом.²

«Правила приемных испытаний для паровых установок»³ следующим образом формулируют понятия «поверхность колосниковой решетки» и «поверхность нагрева».

«Поверхностью колосниковой решетки является вся та ее поверхность, которая покрыта топливом и снабжена отверстиями для прохода воздуха. Поверхностью нагрева котлов и подогревателей является измеренная с огневой стороны поверхность стенок, омываемых с одной стороны топочными газами, а с другой — водой. Если в котле имеются стенки, с одной стороны омываемые паром, а с другой находящиеся в соприкосновении с топочными газами, то их следует указывать отдельно, но не причислять к поверхности нагрева. Граница между подогревателем и котлом определяется питательным (обратным) вентилем.

«Поверхностью нагрева перегревателей является измеренная с огневой стороны поверхность стенок, омываемых с одной стороны топочными газами, а с другой — паром.

«Мерой производительности паропроизводящей установки является количество воды, превращаемое в течение одного часа в пар с теплосодержанием в 640 кал. (нормальный пар).⁴ Удельная производительность (напряжение) выражается числом килограммов нормального пара, производимого за 1 час на 1 м² поверхности нагрева.⁵

¹ 100% «rating» (рэтинг, т. е. оценка) равнозначна паропроизводительности в 16,86 кг/м² ч. насыщенного пара при 1 атм. абс. и 100°, получаемого из воды, также находящейся при 100°.

По проекту норм «котельных испытаний», принятых на IV Всесоюзном теплотехническом съезде, количество килограммов пара, испаряемых с 1 м² в час, предложено называть «паронапряжением» поверхности нагрева. Прим. ред.

² H u d l e r, Feuerungstechnik, 16, 121, 1928.

³ Определения площади колосниковой решетки и поверхности нагрева котла, принятые в СССР, даны ниже в выноске 5. Прим. ред.

⁴ Мы принимаем для перехода к нормальному пару число 639 кал., а не 640, так как первая цифра точнее и ее принимает большинство русских авторов. Прим. ред.

⁵ В СССР приняты как временные «Нормы испытаний котельных агрегатов», рассмотренные на IV Всесоюзном теплотехническом съезде. Они напечатаны в «Известиях Теплотехнического института» за 1928 г., № 4(37). В этих правилах даются такие определения площади колосниковой решетки и поверхности нагрева котла: «Площадь колосниковой решетки в квадратных метрах определяется по размерам поддерживающего топливо устройства, по его ширине и длине, в пределах между топочными стенами и приспособлениями, ограничивающими горящий слой (шибер, порог, шлакосниматель и пр.).»

■ Под поверхностью нагрева котла подразумевается поверхность всех его элементов, входящих в систему циркуляции собственно котла, измеренная со стороны газового потока и омываемая с одной стороны — водой, а с другой — обогревающими газами. При подсче-

Наиболее удобным и безукоризненным мерилom напряжения безусловно является *количество тепла*, получаемого в единицу времени на единице поверхности и выражаемого в кал/м² ч. Эта мера уже получила довольно широкое распространение на практике.

Здесь будет уместным указать на то, что к. п. д. и производительность находятся между собой лишь в косвенной связи. Котел может обладать превосходным к. п. д. и при этом иметь лишь незначительные удельные производительности, и наоборот. Что именно является более существенным, можно сказать лишь в каждом отдельном случае особо. В одних случаях большую пользу приносит повышение производительности, достигаемое хотя бы за счет снижения к. п. д., в других случаях, наоборот, целесообразно уменьшение производительности, если только оно ведет к увеличению к. п. д. Вообще же следует с помощью соответствующих мероприятий стремиться к одновременному повышению как к. п. д., так и производительности.

9. Испарительная способность топлива.

Существуют определенные цифровые величины и соотношения, просто и легко определяемые и уже сами по себе дающие производственному хорошему критерию для оценки состояния обслуживаемой им установки; они имеют такое же значение, как приближенные, упрощенные расчетные формулы для конструктора. Почти всегда, впрочем, их реальная практическая применимость ограничивается предпосылкой, сводящейся к тому, что отдельные пренебрегаемые, неучитываемые факторы либо должны оставаться приблизительно постоянными, либо должна существовать возможность хотя бы приближенно оценивать их влияние. Если инженер не отдает себе вполне ясного отчета в роли этих факторов, то, базируясь на общих ориентировочных цифрах, он может — и это следует особенно подчеркнуть — очень легко прийти к совершенно ложным выводам.

Так, например, установленная по данным производственной статистики величина расхода угля за определенный период времени может, при условии лишь незначительных изменений калорийности угля и размеров производства пара, служить для других периодов времени мерилom ухудшения или улучшения экономичности. Для этого необходимо только сравнить между собой расходы угля за оба периода. Путем такого сравнения, правда, возможно произвести лишь относительную оценку теплового хозяйства котельной установки, ибо вопрос о том, ведется ли работа действительно выгодным или невыгодным образом, остается открытым, так как ведь неизвестно, насколько хороша или плоха исходная сравнительная цифра.

В противовес этому действительная *испарительная способность топлива* (Rohverdampfzahl), т. е. отношение количества испаренной воды к количеству сожженного угля (оба количества должны быть, разумеется, измерены в одинаковых весовых единицах), является уже вполне приемлемой и потому часто применяемой на практике мерой качественной стороны процесса производства пара. Она определяется гораздо проще, чем к. п. д. (большой частью обе величины, т. е. количество пара и угля, можно заимствовать прямо из данных производственной статистики). А поэтому представляется вполне целесообразным ее включение в число постоянных текущих записей производственной статистики. Однако и тут следует остерегаться рассматривать эти цифры как нечто абсолютное, совершенно однозначно характеризующее состояние котла. Абсолютно верные сравнительные цифры получаются только в том случае, если:

1) теплотворная способность угля остается неизменной, 2) не меняется температура питательной воды, и 3) теплосодержание пара остается постоянным.

В большинстве производств предпосылки эти не соблюдаются; колебания, и даже в очень широких пределах, зачастую совершенно неизбежны. Поэтому *при оценке величины действительной испарительной способности необходима величайшая осторожность*. Во всяком случае следует твердо помнить, что действительная испарительная способность никогда не может служить характерным критерием для сравнительной оценки котлов, работающих в различных эксплуатационно-производственных условиях. Единственно пригодной для этой цели величиной является коэффициент полезного действия.

тах надлежит руководиться нормами, установленными III Всесоюзным теплотехническим съездом (напечатаны в «Материалах» к III съезду, вып. 8, стр. 41—43, Москва, 1926).

Далее поясняется, что части котла, хотя и обогреваемые газами, но омываемые не водой, а паром (перегреватели), не должны входить в состав поверхности нагрева котла. Наоборот, водяные *подогреватели* должны включаться в эту поверхность (хотя и указываются отдельно).

Элементы котла, не входящие в систему его циркуляции и не соединяющиеся с его паровым пространством, рассматриваются как экономайзеры. Границей между котлом и экономайзером является обратный клапан.

Прим. ред.

В целях устранения влияния температуры питательной воды и теплосодержания пара иногда пользуются так называемым *нетто*, или *нормальной испарительной способностью*; в этом случае в основу подсчета, вместо действительно произведенного количества пара, кладут соответствующие ему количества нормального пара. 1 кг нормального пара принимается равным 1 кг насыщенного пара с температурой в 100° при 1 атм. абс., полученного из воды с температурой 0°; таким образом теплосодержание его, согласно таблицам для пара, составляет $100 + 539 = 639$ кал/кг.¹ Если, следовательно, в какой-либо котельной установке из питательной воды с температурой t_b произведен насыщенный или перегретый пар теплосодержанием i'' кал/кг, то при паропроизводительности D кг/ч и расходе топлива B кг/ч действительная испарительная способность будет

$$e_a = \frac{D}{B},$$

а нормальная испарительная способность

$$e_n = \frac{D}{B} \cdot \frac{i'' - i'}{639} \approx \frac{D}{B} \cdot \frac{i'' - t_b}{639}.$$

В последнем равенстве сделано допущение одинаковости численных значений температуры питательной воды t_b и теплосодержания i' питательной воды, что, вообще говоря, обычно имеет место с достаточно большой степенью точности. Только при очень высоких температурах питательной воды представляется необходимым подставлять вместо t_b соответствующую, заимствованную из таблиц для пара, величину i' .

Пользование значением нормальной испарительной способности дает уже значительно больше возможности сравнения, чем применение цифр действительных испарительных способностей, так как единственным источником возможных ошибок здесь остается только величина теплотворной способности топлива. Недостатком нормальной испарительной способности является то обстоятельство, что ее определение требует относительно большего количества измерений и подсчетов. В отношении точности нормальная испарительная способность занимает промежуточное положение между действительной испарительной способностью и коэффициентом полезного действия.

10. Экономический баланс.

Как это уже было упомянуто ранее, коэффициент полезного действия не является величиной, характеризующей вполне однозначно экономичность котельной установки. Стоимость топлива может быть при высоком к. п. д. более значительной, чем при низком к. п. д. Так, например, если котельная установка работает с эксплуатационным к. п. д. в 70% на высококачественном угле, чистая цена тепла в котором (т. е. стоимость определенного количества тепла в калориях франко-котельная) вдвое выше цены тепла в низкосортном угле, дающем при работе только 50% к. п. д., — то очевидно, что установка, работающая при последних условиях, т. е. термически худшая, будет более выгодна в отношении стоимости топлива. Такие случаи нередко встречаются при сравнении дешевых бурых углей (сжигаемых вблизи рудника) с дорогими каменными углями, особенно сильно удороженными фрахтом.

Однако и стоимость топлива является только частью общих расходов. Влияние прочих расходов, а именно расходов на эксплуатацию, ремонт, зарплату, рабочие материалы, погашение процентов, амортизацию и т. д., на величину экономичности нередко столь же значительно или даже еще более значительно, чем влияние стоимости топлива. При малом использовании, например в случае котельных установок, находящихся в работе только в течение части года или части суток (отопительные установки, котлы для покрытия пиковых нагрузок на силовых станциях и т. п.), прекрасная в термическом отношении установка с хорошим к. п. д. и низкой стоимостью топлива нередко оказывается значительно менее экономичной, чем установка, работающая теплотехнически невыгодно, но зато связанная с меньшим вложением капитала, а следовательно, и с меньшими цифрами процентных начислений и амортизации.

¹ В Англии и Америке под нормальным паром подразумевают насыщенный пар, полученный из воды в 100° и требующий, следовательно, подвода тепла в количестве всего $639 - 100 = 539$ кал/кг.

Хотя все эти соображения уже приводились ранее, мы считаем совершенно необходимым обратить на них еще раз самое серьезное внимание.

ТАБЛИЦА 7.

Экономический баланс.

	Всего	На 1 квт-ч
1. Стоимость топлива . . .		
2. Прогенты на основной капитал		
3. Списание основного капитала		
4. Ремонт		
5. Зарплата		
6. Эксплуатационные расходы (вода, смазочные вещества, привод вспомогательных машин, очистка воды и т. д.)		
7. Прочие расходы		
8. Общий расход		

Ни на одну минуту не должен забывать о них ни один руководитель производства, стремящийся вести свою котельную установку с минимальной затратой средств.

При соответствующем учете всех расходных статей получается экономический баланс (таблица 7), который, будучи отнесен к единице энергии (1 квт-ч), дает представление об общем распределении затрат.

При сравнении между собой нескольких установок, величина общего расхода является решающим фактором; при этом, однако, не следует упускать из виду, что некоторые достоинства эксплуатационного, а также и чисто экономического характера (повышение производительности, улучшение качества продукции, бесперебойность и надежность работы и т. п.) не поддаются цифровой оценке.¹ Чисто расчетным путем до конца не решаются не только техниче-

ские, но тем более и экономические задачи. Расчет должен только создать возможность ориентировки и облегчить принятие того или иного решения.

III. ГОРЕНИЕ ТОПЛИВА.

Обозначения.

A — проценты, содержание золы
C — " " углерода
H — " " водорода
N — " " азота
O — " " кислорода
S — " " серы
W — " " влаги

в топливе (по весу) для
твердых и жидких
топлив

CO — " " окис углерода
CO₂ — " " углекислоты
CH₄ — " " метана
H — " " водорода
O — " " кислорода
N — " " азота
W — " " влаги в 1 м³ сухих газов

в топливе (по объему) для
газообразных топлив

C₀ % — углерод, сгорающий в топке
C₁ " — " содержащийся в золе
C₂ " — " " уносе
C₃ " — " " саже
C' = C₁ + C₂ + C₃ = C — C₀ не используется в топке

по весу

L_{мин} м³ — теоретическое минимальное количество воздуха для сжигания 1 кг топлива²

L_{действ} м³ — действительное количество воздуха для сжигания 1 кг топлива

$\alpha = \frac{L_{\text{действ}}}{L_{\text{мин}}}$ — коэффициент избытка воздуха

¹ См. стр. 13—15.

² Для газообразных топлив количества воздуха, кислорода и дымовых газов следует относить к 1 м³ топлива. Далее все количества газов отнесены к 760 мм рт. ст. и 0° С.

$O_{\text{мин}}$ м³ — теоретическое минимальное количество кислорода для сжигания 1 кг топлива

$V_{\text{г}}$ „	— общий объем дымовых газов	} на 1 кг топлива
$V_{\text{с.г}}$ „	— объем сухих „ „	
$V_{\text{в.г}}$ „	= $V_{\text{с.г}} + V_{\text{в.г2}}$ общий объем влажных дымовых газов	
$V_{\text{в.г1}}$ „	— объем влажных дымовых газов, образовавшихся вследствие наличия влаги в топливе	
$V_{\text{в.г2}}$ „	— объем влажных дымовых газов, образовавшихся вследствие наличия водорода в топливе	
$V_{\text{мин}}$ „	— теоретическое минимальное количество дымовых газов	} по объему
$V_{\text{действ}}$ „	— действительное количество дымовых газов	
$v_{\text{воз}}$ %	— содержание воздуха в дымовых газах	
ch „	— метана в сухих продуктах сгорания	
h „	— водорода в сухих продуктах сгорания	
k ₁ „	— углекислоты в сухих продуктах сгорания	} по объему
k ₂ „	— окиси углерода в сухих продуктах сгорания	
p „	— азота „ „ „ „	
o „	— кислорода „ „ „ „	
$C_p, C_{p\text{ср}}$	— истинная и средняя теплоемкости при постоянном давлении, отнесенные к 1 м ³	
$c_p, c_{p\text{ср}}$	— истинная и средняя теплоемкости при постоянном давлении, отнесенные к 1 кг	} по объему
$I_{\text{д}}$ кал/м ³	— теплосодержание дымовых газов	
$t_{\text{д}}$ °C	— температура отходящих (дымовых) газов	
$t_{\text{г}}$ °C	— топлива	
$t_{\text{воз}}$ °C	— воздуха	
$Q_{\text{в}}$ кал/кг, $Q_{\text{в}}$ кал/м ³	— высший предел теплотворной способности топлива	} по объему
$Q_{\text{н}}$ кал/кг, $Q_{\text{н}}$ кал/м ³	— низший „ „ „ „	

1. Уравнения горения.

Прежде чем перейти к рассмотрению потерь котла, как таковых, необходимо остановиться более подробно на процессе горения, от которого в очень высокой степени зависят как раз наиболее существенные статьи потерь: с теплотой отходящих газов, вследствие химической неполноты горения и, наконец, вследствие механического недожога, т. е. вследствие наличия несгоревшего углерода в очаговых остатках и в дымовых газах.

Горением называют такого рода химический процесс, при котором происходит сопровождающееся развитием значительных количеств тепла соединение кислорода с различными «горючими» веществами топлива. Из числа горючих веществ в топливе содержатся главным образом химические соединения углерода С, водорода Н, серы S и кислорода О.¹ Для полного, безостановочного горения необходима подача достаточного количества кислорода, чтобы все горючие вещества, содержащиеся в топливе, могли сгореть без остатка, развив соответственные количества тепла. Потребность в кислороде разных горючих чрезвычайно различна, но вполне определена для каждого данного вещества. Так, например,

1 кг С,	соединяясь с 2,667 кг О ₂ ,	сгорает полностью в СО ₂ ,	развивая при этом 8 080 кал. тепла
1 „ Н ₂	„ „ 8 „ „ „ „	Н ₂ О	„ „ „ 34 290 „ „
1 „ ОО	„ „ 0,571 „ „ „ „	СО ₂	„ „ „ 2 440 „ „
1 „ S	„ „ 1 „ „ „ „	SO ₂	„ „ „ 2 220 „ „
1 „ СН ₄	„ „ 4 „ „ „ „	„СО ₂ + Н ₂ О	„ „ „ 13 240 „ „

Так как в случае газообразного топлива расчет ведется обычно не на кг, а на м³, представляется, уместным привести здесь некоторые из уравнений горения, пересчитанные соответствующим образом, причем за основную единицу взят «нормальный» кубический метр газа (нм³).²

1 м ³ Н ₂ ,	соединяясь с 0,5 м ³ О ₂ ,	сгорает надело в Н ₂ О,	развивая при этом 3 070 кал. тепла
1 „ СО	„ „ 0,5 „ „ „ „	СО ₂	„ „ „ 3 050 „ „
1 „ СН ₄	„ „ 2 „ „ „ „	„СО ₂ + Н ₂ О	„ „ „ 9 470 „ „

¹ См. гл. II «Топливо», стр. 19 и след.

² В дальнейшем нормальный кубический метр газа обозначается нм³ или просто м³; он относится к 760 мм рт. ст. и к 0° С. Следует все же упомянуть, что нередко принимаются и иные исходные величины, например 1 атм. абс. (735,6 мм рт. ст.) и 15° С. Моллье (Mollie)

Если, как это иногда бывает, представляется целесообразным и для твердых топлив вести подсчеты на объемные величины, а не на весовые, то требуемые цифры получаются путем деления весовых выражений на соответствующие удельные веса γ , выраженные в $\text{кг}/\text{м}^3$.

Удельные веса важнейших газов, фигурирующих в процессах горения, считая на 1 м^3 при 760 мм рт. ст. и 0°C , таковы:

воздух	1,293 $\text{кг}/\text{м}^3$	окись углерода CO	1,250 $\text{кг}/\text{м}^3$
кислород O_2	1,429 "	углекислота CO_2	1,964 "
азот N_2	1,251 "	сернистый газ SO_2	2,860 "
водород H_2	0,090 "	водяной пар H_2O	0,804 "
		метан CH_4	0,715 "

Вообще говоря, обычно все подсчеты, относящиеся к уравнениям горения, поскольку речь идет о газообразных веществах, ведут в куб. метрах, поскольку же дело касается твердых или жидких веществ (составных частей или жидких топлив) — в килограммах. Нижеследующие формулы, выведенные из вышеприведенных уравнений с помощью удельных весов, служат основой для всех расчетов процессов горения:

Для твердых и жидких топлив

1 кг C	+ 1,865 $\text{м}^3 \text{O}_2$	= 1,865 $\text{м}^3 \text{CO}_2$
0,536 "	" $\text{C} + 1$	" $\text{O}_2 = 1$ " CO_2
1 "	" $\text{C} + 0,932$	" $\text{O} = 1,865$ " CO
0,536 "	" $\text{C} + 0,5$	" $\text{O} = 1$ " CO
1 "	" $\text{C} + 3,73$	" $\text{H} = 1,865$ " CH_4
0,536 "	" $\text{C} + 2$	" $\text{H} = 1$ " CH_4
1 "	" $\text{H}_2 + 5,55$	" $\text{O} = 11,05$ " H_2O
0,090 "	" $\text{H}_2 + 0,5$	" $\text{O} = 1$ " H_2O
1 "	" $\text{S} + 0,703$	" $\text{O}_2 = 0,703$ " SO_2
1,428 "	" $\text{S} + 1$	" $\text{O}_2 = 1$ " SO_2

Для газообразных топлив

1 $\text{м}^3 \text{H}_2$	+ 0,5 $\text{м}^3 \text{O}$	= 1 $\text{м}^3 \text{H}_2\text{O}$
1 " CO	+ 0,5 " O	= 1 " CO_2
1 " CH_4	+ 2 " O	= 1 " $\text{CO}_2 + 2 \text{м}^3 \text{H}_2\text{O}$

Теперь, если известен химический состав топлива, представляется возможным точно подсчитать теоретически потребное количество кислорода, а исходя из последнего, и теоретически потребное количество воздуха, ибо, как известно, воздух состоит из 79 объемных частей азота и 21 объемной части кислорода или, соответственно, приблизительно из 76,8 весовой части азота и 23,2 весовой части кислорода. Если при горении топлива к нему не подводится достаточно воздуха, то некоторая часть горючей массы либо совершенно не сгорает, либо сгорает лишь неполностью; так, например, если углерод сгорает в окись углерода CO , то освобождается

предлагает принять за единицу $1/24$ моля, что составляет 1 м^3 при 1 атм. абс. и 10°C (ср. Нütте, 25 изд., 1, 471). Одним «молем» или килограмм-молекулой называется, как известно, число килограммов газа, равное его молекулярному весу μ (μ равно, например, для кислорода 32, для азота и для окиси углерода 28, для углекислоты 44, для водорода 2, для водяного пара 18 и т. д.). При одинаковых давлениях и температурах объемы, занимаемые одним молем любого газа, одинаковы, а именно объем, занимаемый одним молем при 760 мм рт. ст. и 0°C , составляет около $22,4 \text{ м}^3$, при 1 атм. абс. и 15°C — около $24,4 \text{ м}^3$ и при 1 атм. абс. и 10°C — 24 м^3 . Так как последняя величина выражается целым числом, то, будучи принята за исходную, она приводит к очень простому и удобному способу расчетов. Так, например, 1 м^3 (при 1 атм. абс. и 10°C) водорода весит $2/24 = 1/12 \text{ кг}$; 1 м^3 кислорода весит $32/24 = 4/3 \text{ кг}$; 1 м^3 азота или окиси углерода весит $28/24 = 7/6 \text{ кг}$; 1 м^3 водяного пара весит $18/24 = 3/4 \text{ кг}$ и т. д. Для веществ, не имеющих определенного молекулярного веса, подставляется атомный вес, и таким образом, например, для углерода получается вес 1 м^3 $12/24 = 1/2 \text{ кг}$, для серы — $32/24 = 4/3 \text{ кг}$ и т. д. Этот метод подсчета чрезвычайно удобен, но сравнительно мало привился до сего времени, так как обычно объемы газов относятся к 760 мм рт. ст. и 0°C .

В связи с вышесказанным следует упомянуть о введенной также Моллье «характеристике топлива» σ , представляющей собою отношение теоретически потребного для сжигания 1 кг топлива количества кислорода $\text{O}_{\text{мн}}$ (в м^3) к содержанию углерода в 1 кг топлива (в м^3).

Так как 1 м^3 углерода при 1 атм. абс. и 10°C весит $0,5 \text{ кг}$, то, следовательно, $\sigma = \frac{\text{O}_{\text{мн}}}{2\text{C}}$

Характеристика топлива σ равна для чистого углерода 1, для различных сортов угля примерно от 1,1 до 1,2, для жидких топлив от 1,2 до 1,5.

лишь 2440 кал/кг, тогда как в случае полного сгорания углерода в углекислоту CO_2 освобождается и может быть использовано втрое большее количество тепла, а именно 8140 кал/кг. Из рассмотренных данных становится вполне ясным, что потери вследствие химической неполноты сгорания могут достигать очень значительной величины.

2. Теплотворная способность.

Наряду с количествами кислорода, потребными для сгорания отдельных составных частей топлива, известны также и количества тепла, освобождающиеся при сгорании этих составных частей; эти количества тепла также были уже приведены выше. Количество тепла, освобождающееся при сгорании 1 кг, либо, в соответствующих случаях, 1 м³ топлива — элементарного или сложного — называется его теплотой горения, или теплопроизводительностью, или еще, наконец, *теплотворной способностью*. Из вышесказанного вытекает, что если химический состав топлива известен, то его теплотворная способность может быть определена на основании теплот горения его отдельных составных частей. Широко известная, так называемая «формула Союза германских инженеров»,¹ служащая для определения теплотворной способности твердых топлив, имеет вид:

$$Q_v = 80,8 C + 342 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 22,2 S. \quad (1)$$

Q_v обозначает здесь «высшую» теплотворную способность; C, H, O и S суть весовые части 1 кг топлива, выраженные в долях кг; $H - \frac{O}{8}$ — так называемый свободный водород, так как считается, что количество его, равное $\frac{O}{8}$, является уже химически связанным² с кислородом, также содержащимся в топливе и, следовательно, не нуждается в кислороде воздуха и не развивает тепла.

Очень важное значение имеют горячо и много добавируемые в настоящее время понятия *высшей и низшей теплотворной способности*³ (иначе — высший и низший пределы теплотворной способности). При топливах с содержанием воды, дымовые газы которых, следовательно, содержат влагу, некоторая часть тепла, развиваемого при горении, расходуется на нагрев этой воды до точки кипения, на ее испарение и на перегрев образовавшихся водяных паров. Если бы охладить затем отходящие газы снова до температуры воздуха, то теплота испарения, так же как и теплота жидкости, выделилась бы обратно и даже могла бы быть еще использована. Так как, однако, при современном состоянии топочной техники случай возможного охлаждения дымовых газов ниже так называемой «точки росы»⁴ исключительно редки и так как, наоборот, пар, содержащийся в отходящих газах, обычно уходит вместе с ними в трубу в перегретом состоянии (большой частью при температурах минимум 120—150°), то расход на нагревание, испарение и отчасти на перегрев воды, содержащейся в топливе, приходится рассматривать как потерю и притом (по крайней мере в настоящее время) как потерю неустранимую. Поэтому до сего времени на практике обычно пользовались так называемой низшей теплотворной способностью Q_u , равной высшей теплотворной способности Q_v за вычетом расхода тепла на испарение влаги. Так как степень перегрева находится в прямой зависимости от температуры отходящих газов и, следовательно, различна для каждой данной котельной установки, то она не учитывается, и в качестве общей затраты тепла на испарение 1 кг воды при 0°С принимается величина:

$$i'' = r = 595 \approx 600 \text{ кал.}^5$$

¹ Формула эта является приближенной, ибо она не учитывает так называемой «теплоты образования», т. е. тех количеств тепла, которые освобождаются или поглощаются при образовании или разложении химических соединений.

² Что, впрочем, не всегда верно.

³ Вместо термина «низшая теплотворная способность» русские авторы часто применяют термин «рабочая теплотворная способность».

Прим. ред.

⁴ «Точкой росы» называется та температура, при которой какой-либо газ, содержащий водяной пар, оказывается как раз насыщенным. Если газ охладится ниже этой температуры, то часть водяного пара немедленно сконденсируется в воду.

⁵ См. Mollier, Neue Tabellen und Diagramme für Wasserdampf. 6 Auflage. Verlag J. Springer, Berlin, 1929. См. также таблицы для водяного пара в приложениях к этой книге.

В этом выражении τ представляет собою теплоту парообразования, равную при 0° тепло-содержанию пара.

При сгорании 1 кг Н и 8 кг O_2 образуется 9 кг воды. В соответствии с этим низшая теплотворная способность водорода будет:

$$Q_n = Q_v - 9 \cdot 600 = 34200 - 5400 = 28800 \text{ кал/кг},$$

и формула Союза германских инженеров для низшей теплотворной способности принимает следующий вид:

$$Q_n = 80,8 C + 288 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 22,2 S - 6 W. \quad (2)$$

Подсчеты с низшей теплотворной способностью удобны и представляют собою базу, вполне пригодную для проведения сравнительных параллелей между котельными топками, отапливаемыми различными топливами. Если бы при такого рода сравнительных опытах воспользоваться значениями высшей теплотворной способности, то, например, для коэффициента полезного действия котла, отапливаемого влажным бурным углем, получились бы значения много меньше, чем для к. п. д. котла такой же конструкции, но отапливаемого сухим каменным углем, только потому, что в первом случае имеют место высокие потери, обусловленные теплотой испарения воды, а во втором случае эти потери чрезвычайно малы. Таким образом при сравнительных испытаниях котельных топок не рекомендуется вести расчетов с высшим пределом теплотворной способности.

С другой стороны, однако, высшая теплотворная способность является единственным критерием для вполне научного, объективного сравнения между собой различных родов топлива. Это вполне понятно, ибо высшая теплотворная способность действительно в точности отвечает фактической затрате тепла. Если бы представлялось возможным использовать теплоту отходящих газов вплоть до той самой температуры, при которой топливо и воздух были подведены к топке, то тем самым была бы снова утилизирована теплота испарения воды. Таким образом, с научной точки зрения является совершенно ничем не оправданным ведение расчетов с такой теплотворной способностью, которая не соответствует реальным условиям работы, и отказ от учета значительных потерь только потому, что пока еще не найдено способа их устранения.

Можно легко представить себе — и, действительно, иной раз так оно и бывает на практике, — что температура отходящих газов падает ниже точки росы, в частности в непосредственной близости у рабочих поверхностей подогревателей, так что некоторая часть воды конденсируется на трубках подогревателей. Этим самым, однако, часть теплоты испарения оказывается уже использованной,¹ и тогда, если вести расчет по низшей теплотворной способности, мы сталкиваемся со своеобразным случаем использования тепла, приход которого вообще нигде не был учтен. Вследствие этого коэффициент полезного действия определялся бы теоретически, т. е. если бы не имели места еще и иные потери, цифрой, превышающей 100%.

Из вышесказанного с полной очевидностью вытекает, что хотя пользование величинами низшей теплотворной способности и может быть оправдано в некоторых отношениях, но что все же в значительном большинстве случаев таковое является нецелесообразным, а иногда даже бессмысленным.² Поэтому за последние годы в Германии перешли при большинстве научных опытов к построению тепловых балансов на основе высшей теплотворной способности; правило это принято и в целом ряде других стран: САСШ, Франции, а в последнее время также и в Англии, Голландии и т. д.³ В последнем издании «Правил приемных испытаний паросило-вых установок»⁴ высшая теплотворная способность, пересчитанная на 0° конечной температуры и жидкую воду, рассматривается поэтому как основная обязательная величина. Наряду с этим, однако, в виду необходимости считаться с предшествовавшей методикой «Правил» рекомендуют пока что, впредь до особого постановления, приводить и учитывать при всех исследованиях параллельно также и низшую теплотворную способность.

¹ Используется только в термическом отношении. В действительности же всякое падение температуры ниже точки росы крайне вредно, ибо ведет к загрязнению и разрушению материала частей установки.

² См. по этому вопросу: Volkman n, Arch. f. Wärmewirtschaft, 7, 46, 1926; Merkel, VDI-Ztschr, 70, 1337, 1926; Nissen, Transactions of the Fuel Conference (World Power Conference), London, сентябрь — октябрь 1928, 2, VDI-Verlag, Berlin.

³ См. Arch. f. Wärmewirtschaft, 8, 191, 1927.

⁴ Вышли в издании VDI, 1925.

Так как почти все данные о теплотворной способности, встречающиеся в немецкой литературе, относятся к низшему пределу теплотворной способности, а также и потому, что в некоторых случаях расчет и пользование низшей теплотворной способностью целесообразнее и удобнее, чем высшей, — в этой книге, как правило, приводятся оба предела теплотворной способности; в отдельных случаях низшая теплотворная способность была сохранена также и из соображений целесообразности. Так как, однако, на графических изображениях представление обеих величин не всегда возможно, то необходимо обратить внимание на то, что для всех твердых топлив существует довольно точная и закономерная зависимость между высшим и низшим пределами теплотворной способности, приведенная на рис. 10. Для многих сотен топлив различных сортов, калориметрически определенные теплотворные способности которых я сравнивал друг с другом, получились отклонения, не превышающие $\pm 1\%$, так что графики рис. 10 могут сослужить хорошую службу для практических целей, а именно для быстрого пересчета Q_v в Q_n и обратно.

Для жидких и газообразных топлив, в виду чрезвычайно резких различий в их химическом составе, точность уже не так велика, а для бедных газов оказалось вообще невозможным установить какую бы то ни было закономерность. Рис. 10 чрезвычайно наглядно пока-

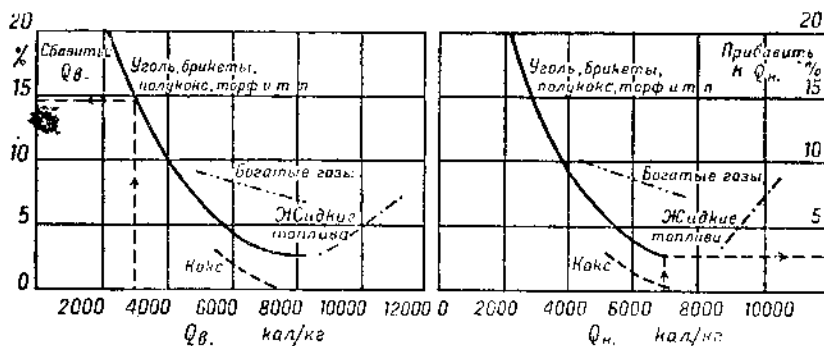


Рис. 10. Соотношение между низшей теплотворной способностью Q_n и высшей теплотворной способностью Q_v (вычисленные средние значения). Ординаты дают вычет в процентах с Q_v и прибавку в процентах к Q_n .

Пример 1. При твердом топливе и $Q_v = 3000$ кал/кг получается вычет примерно 14,35%. Отсюда имеем $Q_n = 3000 (1 - 0,1435) = 2570$ кал/кг.

Пример 2. При твердом топливе и $Q_n = 7000$ кал/кг получается прибавка примерно 3%. Отсюда имеем $Q_v = 7000 (1 + 0,03) = 7210$ кал/кг.

зывает в процентном исчислении разницу между Q_v и Q_n для малоценных топлив. Для отбросных топлив, имеющих высшую теплотворную способность в пределах от 1500 до 1000 кал/кг, она возрастает до 40%.

Определение теплотворной способности топлива на основании его химического состава с помощью уравнения 1 или 2 (формулы Союза германских инженеров) или же с помощью других неоднократно предлагавшихся уравнений, является, как это доказано многочисленными исследованиями, определением неточным. Не точно оно главным образом потому, что горение практически применяемых видов топлива, большей частью очень сложного и запутанного состава, подвержено воздействию целого ряда факторов, не поддающемуся цифровому учету, и вследствие этого нередко протекает совершенно иначе, чем горение тех отдельных элементов, из которых топливо состоит.¹

¹ Выше уже было отмечено, что формула Союза германских инженеров не учитывает теплоты образования, см. выноску 1 на стр. 45.

Необходимо также упомянуть о том, что, вообще говоря, экспериментально легче определить теплотворную способность топлива, чем его элементарный состав; уже по одному этому было бы нецелесообразно подсчитывать теплотворную способность, исходя из данных анализа топлива. Наоборот, анализ топлива может быть сравнительно легко установлен по данным калориметрического определения теплотворной способности с помощью бомбы и газоанализатора Орса. См. В о š н j а к о в i џ, Arch. f. Wärmewirtschaft, 9, 309, 1928.

Проект «Правил испытания топлива»,¹ разработанный специальной комиссией Союза германских инженеров, предусматривает, поэтому, что при приемных испытаниях определение теплотворной способности твердых и жидких топлив должно производиться *исключительно* *калориметрическим* путем, т. е. путем опыта сжигания в калориметре. Для целей же нормальных текущих испытаний и для ориентировочных подсчетов формула Союза германских инженеров может, поскольку уже известен элементарный анализ применяемого топлива, сослужить хорошую службу; в частности для бедных влагой твердых топлив (каменные угли) применение этой формулы приводит к получению довольно точных результатов.

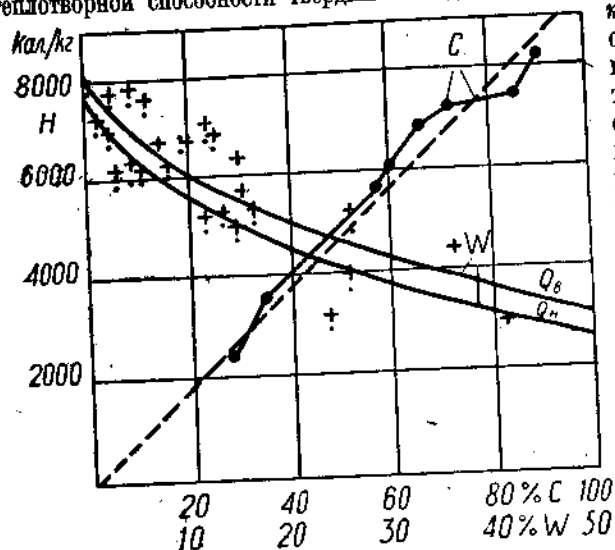


Рис. 11. Зависимость содержания влаги и углерода от теплотворной способности. Действительно для твердых топлив.

- + экспериментальные точки для высшего предела теплотворной способности.
- экспериментальные точки для низшего предела теплотворной способности.
- кривые средних значений высшего и низшего пределов теплотворной способности.
- - - - - средняя характеристика.

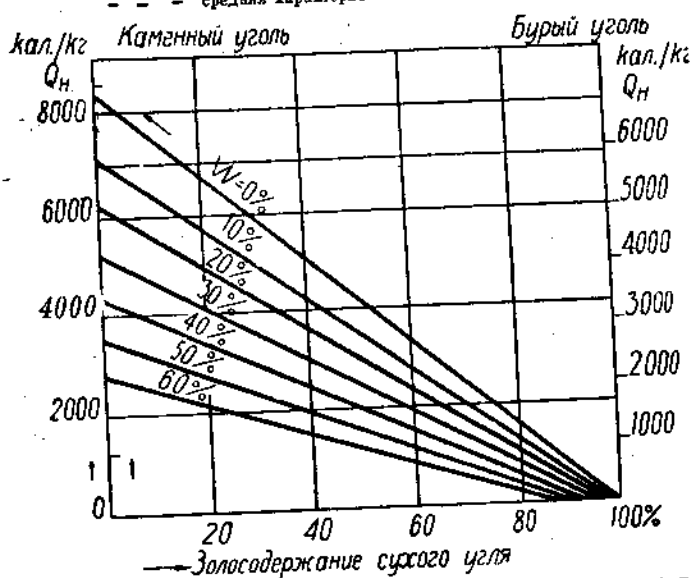


Рис. 12. Зависимость зольности от низшего предела теплотворной способности при различном содержании влаги. Действительно для каменных и бурых углей (средние величины). Для низшей теплотворной способности горючего вещества угля (безводный и беззольный уголь) приняты следующие цифры: для каменного угля $Q_n = 8100$, для бурого угля $Q_n = 6800$ кал/кг.

Для ориентировочных подсчетов кроме того можно воспользоваться рис. 11 и 12. Ранее уже указывалось, что между влажностью и теплотворной способностью твердых топлив существует известное закономерное соотношение. Последнее изображено на рис. 11, на котором кроме того нанесено большое количество калориметрически измеренных значений Q_n и Q_n . Обе кривые, как для Q_n , так и для Q_n , отвечают средним значениям, вычисленным на основании большого количества отдельных цифровых данных. Необходимо отметить, что по отдельным сортам топлива имеются все же довольно значительные расхождения, получающиеся главным образом вследствие значительных различий в зольности. Поэтому для более точных расчетов, когда, кроме влажности, известна также и зольность, следует пользоваться рис. 12, позволяющим немедленно получить величину низшей теплотворной способности для любых значений зольности и влажности. Впрочем, и рис. 12 также не абсолютно точен, так как он действителен только в том случае, если допустить постоянство величины низшего предела теплотворной способности безводной и беззольной горючей массы угля; теплотворная способность го-

¹ См. Arch. f. Wärmewirtschaft, 7, 116, 1926.

рочей массы каменного угля была принята равной 8100, а бурого угля 6800 кал/кг. В действительности же и эта величина также различается, и притом довольно основательно, для различных сортов угля. Поэтому, как правило, при всех точных испытаниях следовало бы определять теплотворную способность только калориметрическим путем.

Пример 1. Топливо содержит 80% С. Каков высший предел его теплотворной способности? Из рис. 11 получаем среднюю величину при 80% С $Q_H = 7550$ кал/кг.

Пример 2. Топливо содержит 40% влаги. Каковы высший и низший пределы его теплотворной способности? Из рис. 11 получаем средние значения $Q_H = 3600$ кал/кг и $Q_{H_2} = 3100$ кал/кг.

Пример 3. Топливо (бурый уголь) содержит 30% влаги и 20% золы. Каковы высший и низший пределы его теплотворной способности? Из рис. 12 получаем $Q_H = 3500$ кал/кг, из правой половины рис. 10 получаем прибавку в 11,5%. Таким образом, высший предел теплотворной способности определится в $Q_H = 3500 + 0,115 \cdot 3500 = 3500 + 402 = 3902$ кал/кг.

3. Избыток воздуха и состав дымовых газов.

В разделе «Уравнения горения» уже было показано, каким образом может быть определен расход кислорода и воздуха.

Из этих уравнений вытекают следующие выражения для теоретического расхода кислорода (минимальный расход)

$$\begin{aligned} O_{\text{мин}} &= 0,02667 C + 0,08 H + 0,01 S - 0,01 O \text{ кг} = \\ &= 0,0187 C + 0,056 H + 0,0075 S - 0,007 O \text{ м}^3 \end{aligned} \quad (3a)$$

и для теоретического расхода воздуха

$$\begin{aligned} L_{\text{мин}} &= 0,125 C + 0,345 H + 0,0431 S - 0,0431 O \text{ кг} = \\ &= 0,089 C + 0,267 H + 0,0333 S - 0,0333 O \text{ м}^3. \end{aligned} \quad (3b)$$

При этом следует твердо помнить, что С, Н, S и О выражают и подставляют не в кг, а в весовых процентах 1 кг топлива, т. е., например, С = 90%, Н = 3% и т. п. Если пользоваться цифрами абсолютных весов, то необходимо множить все члены правых половин уравнений на 100, так как С = 90% означает $\frac{90}{100} = 0,9$ кг.

Избыток воздуха. Теоретически потребное количество воздуха в действительности, однако, отнюдь не достаточно для сгорания топлива, так как совершенно невозможно подвести воздух для горения ко всем частям топки столь равномерным образом, чтобы повсюду как раз оказалось достаточное для горения количество кислорода. Наоборот, в ряде мест возник бы недостаток воздуха, следствием чего было бы или неполное сгорание, или даже полное прекращение горения, тогда как в ряде других мест оказался бы избыток воздуха. Поэтому для того, чтобы наверняка добиться полного сгорания во всех частях топочного пространства, необходимо вести работу с известным избытком воздуха; величина этого избытка находится в зависимости от рода топки, от топлива и от тщательности обслуживания. Действительное количество воздуха $L_{\text{действ}}$, следовательно, всегда больше теоретического минимального количества воздуха $L_{\text{мин}}$, а отношение этих двух величин определяет так называемый коэффициент избытка воздуха:

$$\alpha = \frac{L_{\text{действ}}}{L_{\text{мин}}} \quad (4)$$

Если бы было возможно работать с $L_{\text{мин}}$, достигая при этом повсеместно полного сгорания, то в дымовых газах вообще не содержалось бы кислорода; они состояли бы только из газообразных продуктов горения (главным образом CO_2 и H_2O) и из азота, происходящего частью из воздуха, идущего на горение, частью же из самого топлива. Напротив, в случае действительного процесса горения вместе с отходящими газами удаляется и излишний кислород.

Рассмотрение и вывод частью очень запутанных уравнений, выражающих состав дымовых газов (в объемных или весовых долях) в зависимости от избытка воздуха, завели бы нас здесь

чересчур далеко.¹ Поэтому далее приводятся в форме удобных таблиц и графиков только такие сведения, которые имеют реальное значение для практики.

Количество дымовых газов.² Определение количества и состава дымовых газов представляется практически чрезвычайно важной задачей и притом важной не в одном, а сразу в нескольких отношениях. Конструктор и проектирующий инженер могут на основании количества дымовых газов определить размеры ходов котла, борова и дымовой трубы. Для инженера-производственника количество и состав дымовых газов являются базой для построения теплового баланса, ибо как раз они и определяют собою размеры потерь с теплотой отходящих газов и вследствие химической неполноты горения.

Определение количества и состава отходящих газов представляется точно так же совершенно необходимым для установления размеров подогревателей, использующих теплоту дымовых газов, и для оценки их производительности и их к. п. д.

Если избыток воздуха известен, то количество и состав дымовых газов могут быть определены на основании элементарного анализа топлива, приблизительно они могут быть определены также и на основании величины теплотворной способности. Еще более важным в большинстве случаев является определение на основании содержания CO_2 и CO в отходящих газах, устанавливаемого с помощью газоанализатора.

Для топлив, горючая масса которых состоит большей частью из углерода, можно с довольно значительной степенью точности представить количество дымовых газов в функции низшего предела теплотворной способности (рис. 13). Во всяком случае эта зависимость действительна только для сухих дымовых газов ($V_{с.г.}$). Объемное содержание водяных паров в 1 м^3 на 1 кг топлива определяется уравнением

$$V_{в.г.} = \frac{9H + W}{100 \cdot 0,804} = \frac{9H + W}{80,4}, \quad (5)$$

в котором величина 0,804 представляет собою удельный вес водяного пара при 0°C и 760 мм рт. ст. Таким образом для определения общего объема дымовых газов V_g в случае сильно влажных сортов топлива необходимо к объему, определенному с помощью рис. 13 для каких-то значений теплотворной способности и избытка воздуха, прибавить объем пара, т. е.

$$V_g = (V_{с.г.} + V_{в.г.}) \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (6)$$

Пример. Топливо с низшей теплотворной способностью $Q_n = 6000 \text{ кал/кг}$ содержит 2% Н и 45% W. Каково будет количество дымовых газов на 1 кг топлива при величине избытка воздуха $\alpha = 1,6$? Из рис. 13 имеем $V_{с.г.} = 10,75 \text{ м}^3/\text{кг}$, а из уравнения (5)

$$V_{в.г.} = 9 \cdot \frac{0,02 + 0,45}{0,804} = 0,66 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Общий объем газов будет, следовательно,

$$V_g = 10,75 + 0,66 = 11,41 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

¹ Желающих ознакомиться более подробно с самими уравнениями и их выводом отсылаем к специальной литературе, например Schüle, Thermodynamik, 1. Berlin 1930, Verlag J. Springer; Herberg, Feuerungstechnik und Dampfkesselbetrieb, 4 Auflage, Berlin, 1928, Verlag J. Springer; необходимо также в связи с этим отметить статью «Richtlinien für die Auswertung der Ergebnisse der Feuerungsuntersuchung» в Arch. f. Wärmewirtschaft, 7, 287, 1926.

² Необходимо подчеркнуть здесь еще раз, что в дальнейшем как количества дымовых газов, так и количества воздуха приведены в нормальных кубических метрах (нм^3), т. е. все они отнесены к 760 мм рт. ст. и 0°C . При желании перейти к действительным количествам дымовых газов следует воспользоваться рис. 18 на стр. 53.

Еще более простую закономерность дает Розин¹ (рис. 14). На основании многочисленных исследований топлива он нашел для твердых, жидких и газообразных топлив линейную зависимость от *нижнего* предела теплотворной способности. Точность этой первоначально чисто эмпирически установленной закономерности² для практических целей совершенно доста-

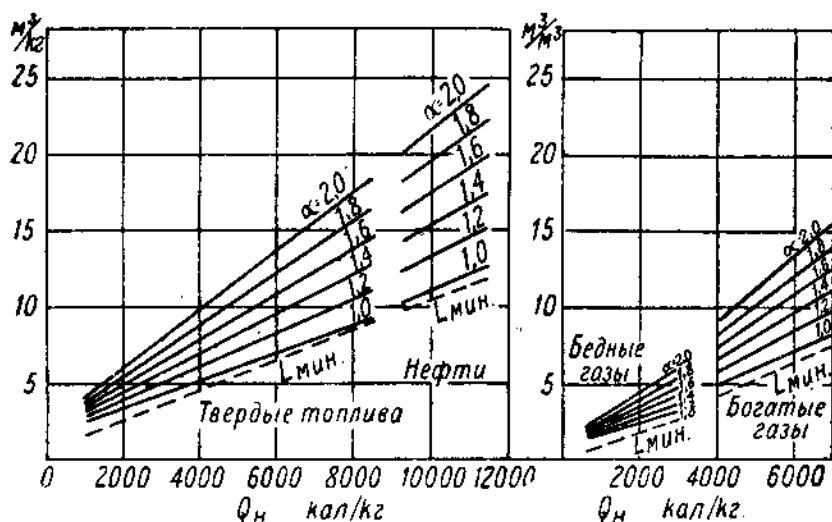


Рис. 14. Общий объем дымовых газов V_g и теоретическое количество воздуха $L_{\text{мин}}$ для твердых, жидких и газообразных топлив в зависимости от нижнего предела теплотворной способности Q_n .

точно. Поставленные мною исследования говорят за то, что между количеством дымовых газов и *высшим* пределом теплотворной способности не существует столь простого соотношения; поэтому представляется целесообразным вести в этом случае расчет с Q_n , а могущие оказаться необходимыми соответствующие пересчеты производить с помощью графика на рис. 10.

Любопытна разница между высоко- и низкокалорийными газами (рис. 14, правая часть), объясняющаяся совершенно различным химическим составом того и другого рода газов.

Пример 1. Генераторный газ, сгорая с 1,4-кратным избытком воздуха, дает, считая на 1 м³ газообразного горючего, 4 м³ дымовых газов. Как велика низшая теплотворная способность? Из рис. 14 справа внизу получаем: $Q_n = 2300$ кал/м³.

Пример 2. Каково будет теоретически необходимое количество воздуха для горения каменного угля с низшей теплотворной способностью в 7000 кал/кг? Из рис. 14 слева получаем: $L_{\text{мин}} = 7,5$ м³/кг.

Пример 3. Количество дымовых газов коксовального газа, обладающего низшей теплотворной способностью в 5500 кал/м³, должно быть равно максимум 10 м³/м³. Какова будет величина максимально допустимого избытка воздуха? Из рис. 14 справа получаем: $\alpha_{\text{макс}} = 1,6$.

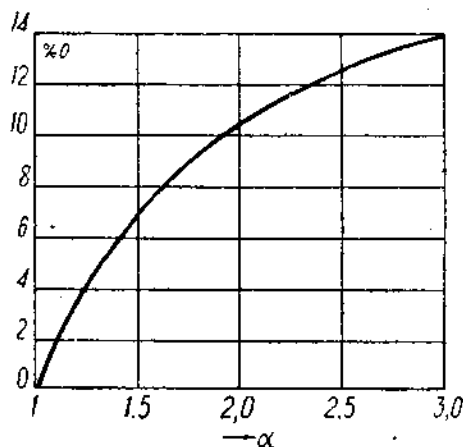


Рис. 15. Содержание кислорода o в отходящих газах в зависимости от коэффициента избытка воздуха α .

¹ См. VDI-Ztschr., 71, 384 и 385, 1927, далее Rosin und Fehling, Das It-Diagramm der Verbrennung. VDI-Verlag, Berlin, 1929.

² В недавно вышедшей книге Rosin und Fehling, Das It-Diagramm der Verbrennung (VDI-Verlag, Berlin, 1929), эта закономерность доказывается также и теоретически.

Состав дымовых газов. Влияние избытка воздуха на состав дымовых газов представлено на рис. 15 для всех твердых топлив. Рисунок этот показывает, что с увеличением избытка воздуха процентное содержание кислорода o возрастает довольно значительно, хотя и не вполне пропорционально.

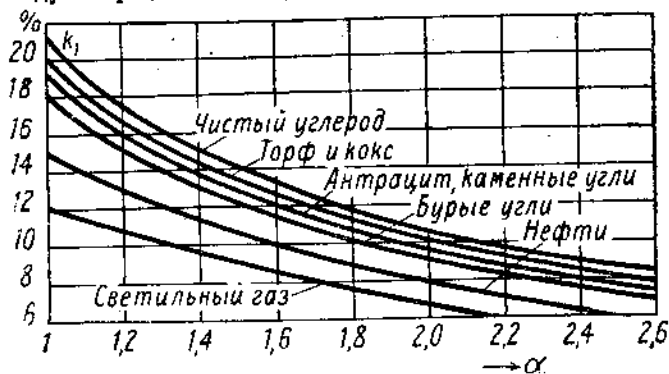


Рис. 16. Содержание углекислоты k_1 в отходящих газах в зависимости от коэффициента избытка воздуха α .

показано далее, даже теоретические величины k_1 (при $\alpha = 1$) различны в зависимости от рода топлива. Поэтому при изображении k_1 в зависимости от α получается семейство кривых (рис. 16). Максимальные значения всех кривых отвечают величине $\alpha = 1$. Так как, однако, как это будет показано далее, каждому роду топлива отвечают определенные характерные значения величины $k_{1, \max}$, то с помощью рис. 16 можно с довольно большой степенью точности найти для любого топлива величины содержания углекислоты k_1 при различных значениях коэффициента избытка воздуха α .

Пример. Какова будет величина коэффициента избытка воздуха для хорошо обслуживаемой топки для каменного угля с цепной решеткой? Обычно считается, что при тщательном ведении огня среднее содержание CO_2 равно $k_1 = 12 - 14\%$. По кривой для антрацита и каменного угля на рис. 16 находим соответствующие значения коэффициента избытка воздуха $\alpha = 1,37 - 1,6$. Так как большинству сортов каменного угля отвечают значения $k_{1, \max}$ несколько меньшие 19%, то большей частью получаются несколько меньшие величины коэффициента избытка воздуха (приблизительно $\alpha = 1,33 - 1,55$).

Если известны содержание CO_2 в отходящих газах k_1 и состав топлива, то общий объем дымовых газов вычисляется по формуле

$$V_{\text{д.г.}} = \frac{C}{0,536 k_1} + 0,112 H + 0,0124 W = (V_{\text{с.г.}} + V_{\text{в.г.}} + V_{\text{в.г.}}) \text{ м}^3/\text{кг}, \quad (7)$$

где C , H и W обозначают, как известно, содержание в 1 кг топлива весовых долей составляющих, а k_1 — содержание CO_2 в объемных процентах. Использование уравнения (7) облегчается рис. 17, на котором представлены в отдельности объемы $V_{\text{с.г.}}$, $V_{\text{в.г.}}$ и $V_{\text{в.г.}}$ в зависимости от C , H и W и для различных содержаний CO_2 . Общий объем получается как сумма изображенных на рис. 17 отдельных объемов.

Чрезвычайно большое значение для целого ряда практических измерений и подсчетов имеет зависимость, существующая между содержанием углекислоты k_1 и коэффициентом избытка воздуха α . Правда, зависимость между k_1 и α не носит характера такой однозначности, как зависимость между содержанием кислорода и коэффициентом избытка воздуха, ибо, как это будет

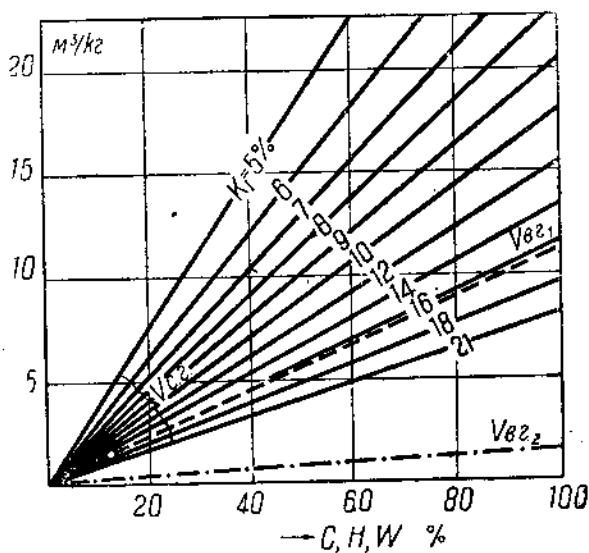


Рис. 17. Объемы сухих отходящих газов $V_{\text{с.г.}}$ и влажных отходящих газов ($V_{\text{в.г.1}}$ и $V_{\text{в.г.2}}$) в зависимости от содержания углерода, водорода и влаги [см. уравнение (7)].

Пример. Для 60% С, 5% Н, 25% W и $k_1 = 10\%$ имеем

$$V_{c. r} = 11; V_{n. r} = 0,6, V_{w. r} = 0,3, \\ V_r = 11 + 0,6 + 0,3 = 11,9 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Из этого примера не трудно усмотреть, что влияние Н и еще более W на величину общего объема совершенно незначительно, даже при их сравнительно высоком содержании. Поэтому во многих случаях представляется возможным совершенно пренебречь $V_{n. r}$ и $V_{w. r}$.

Объемы газов, о которых упоминалось до сих пор, относились к 0° С и 760 мм рт. ст. (мм³). Допущение это однако не соответствует действительным условиям, так как газообразные продукты горения во время их нахождения в ходах котла, борове и дымовой трубе имеют гораздо более высокие температуры, а также всегда находятся под несколько пониженным, по сравнению с внешним воздухом, давлением: но зато, с другой стороны, такой метод создает возможность лучшего сопоставления с воздухом, подводимым для горения и обычно относимым к 0° С и 760 мм рт. ст. Так как все же в отдельных случаях, в частности при проектировании котельных установок, действительные объемы также имеют значение и знание их предста-

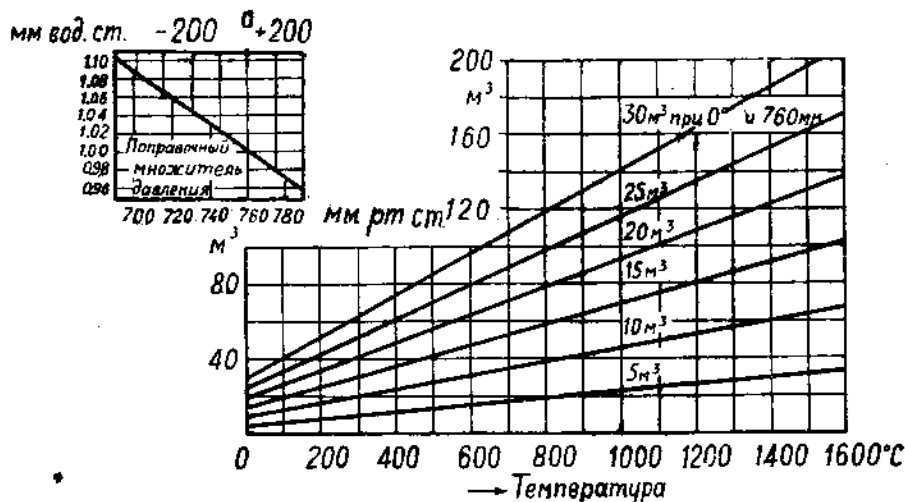


Рис. 18. Изменение объема газа V_r с температурой и поправочный множитель давления (наверху слева).

вляет определенный интерес, то на рис. 18 представлено изменение объема в зависимости от давления и температуры. Из этого рисунка видно вполне ясно, как сильно возрастают объемы с увеличением температуры.

Пример. Каков будет действительный объем 25 м³ газа при 600°С и 700 мм рт. ст.? Из рис. 18 для 25 м³ и 600°С имеем $V = 80 \text{ м}^3$ при 760 мм рт. ст. Для 700 мм рт. ст. находим поправочный множитель 1,085. Следовательно, действительный объем будет

$$V = 80 \cdot 1,085 = 87 \text{ м}^3.$$

Максимальное содержание CO_2 . Для полного понимания и правильной оценки процессов горения необходимо установить величину *максимального* процентного содержания CO_2 в сухих газообразных продуктах горения ($k_{1 \text{ макс}}$), т. е. величину содержания CO_2 при горении без избытка воздуха. Если горение происходит без избытка воздуха и горючая масса угля состоит только из С, то в дымовых газах должно содержаться столько же объемных частей CO_2 , сколько содержится объемных частей кислорода в воздухе, подводимом для горения, т. е. 21%, и именно потому, что из 1 м³ О и 0,536 кг С образуется в точности 1 м³ CO_2 . Таким образом, для сгорания 0,536 · 21 кг чистого углерода потребовался бы 21 м³ кислорода и образовался бы 21 м³ CO_2 , в то время как 79 м³ азота, подведенного вместе с воздухом для горения, оказались бы содержащимися в неизменном виде в отходящих газах, и, следовательно, общий объем дымовых газов оказался бы равным 100 м³.

Однако, как это уже указывалось ранее, всякое топливо состоит, кроме С, из целого ряда других составных частей, которые в той или иной форме также переходят в состав дымовых газов. Часть кислорода соединяется с Н, образуя H_2O , другая часть соединяется с S, образуя

SO₂. Вследствие этого максимальная величина содержания CO₂ ($k_{1\text{макс}} = 21\%$) не достигается в действительности никогда, даже и при горении без избытка воздуха; впрочем, чем топливо беднее влагой и серой, тем больше приближается значение $k_{1\text{макс}}$ к величине 21%.

При горении с избытком воздуха содержание CO₂ падает, тогда как содержание O₂ соответственно возрастает. Сумма обеих величин для какого-либо определенного топлива должна, однако, всегда равняться примерно одной и той же величине $k_{1\text{макс}}$, так как весь недостающий объем CO₂ замещается таким же объемом O₂.¹

Рис. 19 представляет в весьма наглядной форме максимальные содержания $k_{1\text{макс}}$ и подразделение состава на k_1 и o при сгорании с избытком воздуха важнейших родов топлива. Рисунок показывает, что для торфа или кокса вследствие преобладающего в них содержания C $k_{1\text{макс}}$ равно почти 21%, тогда как для жидких и газообразных топлив вследствие высокого в них содержания водорода и водородистых соединений значения $k_{1\text{макс}}$ много меньше. С помощью рис. 19 представляется возможным немедленно отсчитать для любой, полученной путем измерения,

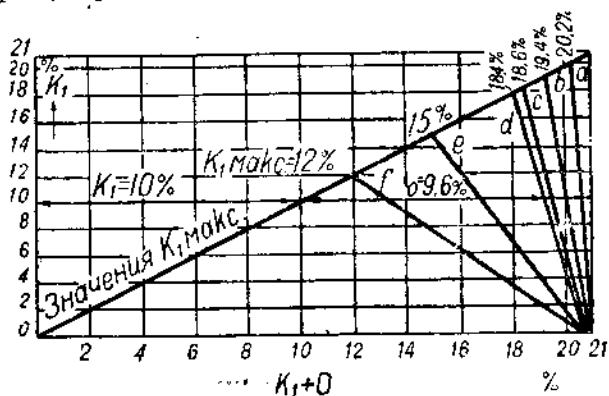


Рис. 19. Содержание углекислоты k_1 , содержание кислорода o и максимальное содержание углекислоты $k_{1\text{макс}}$ при полном сгорании для различных важнейших родов топлива (средние величины).

a — торф и кокс; b — антрацит; c — каменный уголь; d — германский бурый уголь; e — жидкие топлива; f — коксовальный и светильный газы. Пример. Для германского бурого угля при полном сгорании получаем $k_{1\text{макс}} = 18,4\%$, при $k_1 = 10\%$ получаем $o = 9,6\%$ и $k_1 + o = 19,6\%$.

дут, следовательно, таковы: 21 м³ CO и 39,5 м³ N. Таким образом общий объем (21 + 39,5 = 60,5 м³) оказывается меньше, нежели при полном сгорании, при котором для тех же условий ранее был найден объем 100 м³ (21 м³ CO₂ + 79 м³ N). Напротив процентная доля газов, образующихся в результате горения, оказывается больше, потому что

$$\begin{array}{l} 100 \text{ м}^3 \text{ дымовых газов содержат } 21 \text{ м}^3 = 21\% \text{ CO}_2 \\ 60,5 \text{ » » » » » » » » 21 \text{ » } = 34,7\% \text{ CO} \end{array}$$

Из этого следует, что даже и при частичном, неполном сгорании с избытком воздуха и без него сумма всех газов, образующихся в результате горения, всегда больше, чем при полном сгорании, т. е.

$$\frac{\text{неполное}}{k_1 + k_2 + o} > \frac{\text{полное}}{k_1 + o}$$

Если предположить, например, что при подаче теоретически потребного количества воздуха $L_{\text{теор}}$ образуется только CO, то получится опять-таки тот же 21 м³ CO, но кроме того еще половина поданного кислорода $\frac{21}{2} = 10,5$ м³ и 79 м³ азота. Таким образом общий объем дымовых газов равняется 110,5 м³, а сумма ($k_1 + k_2 + o$) равна 31,5 м³ или 28,5 %.

¹ В точности величина $k_1 + o$ несколько больше величины $k_{1\text{макс}}$, что, вообще говоря, нетрудно сообразить; при этом она тем больше, чем меньше значение k_1 . При $k_1 = 0$ $o = 21\%$, т. е. вообще нет никакого топочного газа, а имеется один только воздух (см. также рис. 19).

Чем менее полно сгорание, чем больше, следовательно, содержание CO , т. е. величина k_2 , тем больше становится сумма $k_1 + k_2 + o$, причем увеличение последней происходит главным образом за счет возрастания k_2 , в то время как содержание кислорода, вообще говоря, уже при незначительном содержании CO снижается почти до нуля.

Содержание CO_2 с увеличением содержания CO немного возрастает вначале, но только до тех пор, пока оно не достигнет своего максимального значения $k_{1\text{макс}}$, после чего оно также начинает снижаться, доходя до нуля при $k_{2\text{макс}} = 34,7\%$.

В случае если топливо содержит, кроме C , еще и другие горючие составные части, то $k_{2\text{макс}}$ будет соответственно меньше; здесь также имеет место закономерность, аналогичная представленной на рис. 18 для $k_{1\text{макс}}$.

Таким образом, существует совершенно определенная зависимость между фактически установленным содержанием CO_2 (k_1), вполне определенной для данного топлива величиной ($k_1 + o$) и содержанием CO (k_2). Если две первые величины известны, то третья (k_2) может быть определена расчетным или же графическим путем. Для обоих особенно важных значений величины $k_{1\text{макс}}$ 18,5 и 19% (антрацит, каменные и бурые угли, см. рис. 19), эти соотношения представлены графически на рис. 20. С помощью последнего для любого процесса горения можно непосредственно отсчитать содержание CO (k_2), если только известны значения k_1 и $k_1 + o$. По этому же принципу построены известные графики состава отходящих газов по Оствальду (Ostwald),¹ позволяющие очень легко определять k_1 , k_2 , o и коэффициент избытка воздуха α , но, как это показал Аболин (Abolin),² дающие (как и все прочие графики состава отходящих газов) верные результаты только при соблюдении определенных предпосылок. В частности при точных подсчетах нельзя пренебрегать влиянием метана (CH_4).

Резюмируя все предыдущее, можно сказать, что при полном сгорании условия протекания процесса горения в общем довольно просты, так что с помощью вышеприведенных уравнений и графиков представляется возможным достаточно точно определить количество и состав дымовых газов. При неполном сгорании процесс горения крайне усложняется, ибо отходящие газы содержат нередко не только CO , но также еще и CH_4 , сажу и т. п. составные части. Поэтому при точных исследованиях здесь допустимо только экспериментальное определение состава дымовых газов; что же касается примерных ориентировочных подсчетов, то для этих целей можно с успехом воспользоваться рис. 20, а также графиками Оствальда и Аболина. Надо, впрочем, сказать, что практически эти графики имеют лишь ограниченное значение, ибо каждый из них является действительным только для какого-либо одного топлива, тогда как на практике большей частью приходится иметь дело с топливом переменных качеств и состава.

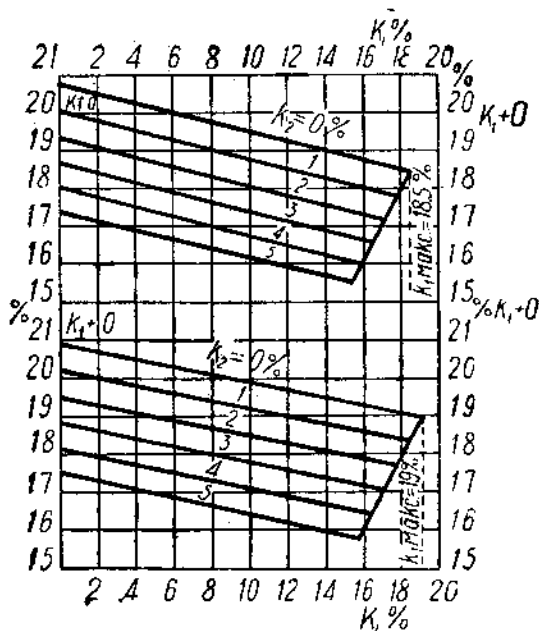


Рис. 20. Содержание углекислоты, кислорода и окиси углерода.

Наверху $k_{1\text{макс}} = 18,5\%$; внизу $k_{1\text{макс}} = 19\%$.

¹ См. Ostwald, Beiträge zur graphischen Feuerungstechnik, Leipzig, 1921, Verlag O. Spamer; далее Seufert, Berechnung von Schaubildern zur Abgasanalyse. VDI-Ztschr., 64, 505, 1920.

На русском языке диаграмма Оствальда описана в книге Зейферт, Теория горения, Ленинград 1926, стр. 50 и след. Прим. ред.

² Abolin, Verluste durch unvollkommene Verbrennung in Dampfkesselfeuerungen. Arch. f. Wärmewirtschaft, 7, 345, 1926.

Пример. Сжигается германский бурый уголь. С помощью прибора Орса замерено 12% углекислоты и 7% кислорода. Содержится ли в дымовых газах окись углерода, и если да, то в каком количестве? Германскому бурому углю согласно рис. 19 соответствует примерно $k_{\text{макс}} = 18,4\%$. Верхняя часть рис. 20, действительная для $k_{\text{макс}} = 18,5\%$, соответствует, следовательно, довольно точно условиям буроугольной топки. Для $k_1 = 12\%$ и $k_1 + o = 12 + 7 = 19\%$ находим по рис. 20 (верх), что $k_2 = 0,4\%$. Содержание CO, таким образом, крайне незначительно.

4. Теплоемкость и теплосодержание дымовых газов.¹

Если количество и состав дымовых газов известны, то представляется возможным подсчитать теплосодержание дымовых газов, важное для определения потерь с отходящими газами, поскольку известны также и теплоемкость и температура последних. Температура может быть

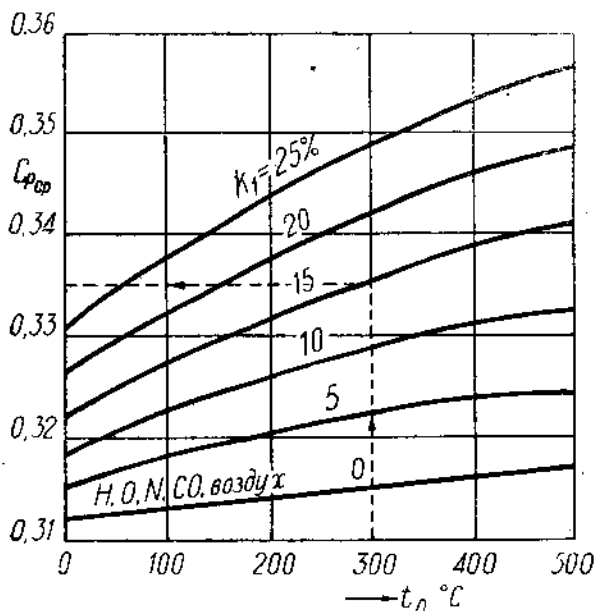


Рис. 21. Средние теплоемкости $C_{\text{ср}}$ сухих отходящих газов при различных содержаниях CO_2 (k_1) в зависимости от температуры отходящих (дымовых) газов t_d .

Пример. Для $t_d = 300^\circ \text{C}$, $t_{\text{воз}} = 0^\circ \text{C}$ и $k_1 = 15\%$ находим $C_{\text{ср}} = 0,335$.

содержатся CO и H, ибо, как это видно из самой нижней кривой, теплоемкости $C_{\text{ср}}$ кислорода, азота, водорода, окиси углерода и воздуха практически одинаковы. В противоположность этому присутствие более или менее значительных количеств метана и водяных паров вызывает необходимость внесения некоторых поправок.

Средние теплоемкости $C_{\text{ср}}$ топочных газов изображены на рис. 22. Из этого рисунка видно, что в пределах нормальных температур отходящих газов значения теплоемкостей метана и водяных паров значительно превышают таковые для нормальных сухих топочных газов с 10% CO_2 и что, следовательно, с увеличением содержания H_2O и CH_4 значения $C_{\text{ср}}$ сильно возрастают. Поэтому цифры, определенные по рис. 21, подлежат перерасчету в зависимости от содержания водяных паров и метана в отходящих газах.

Итак, теплосодержание топочных газов определяется как произведение разности температур и средней теплоемкости. Подсчеты эти, однако, довольно затруднительны, главным образом вследствие зависимости теплоемкости от различных факторов, и поэтому рекомен-

непосредственно измерена в любом желательном месте. Что же касается теплоемкости, т. е. того количества тепла, которое потребно для нагревания 1 кг (c_p) или 1 м³ (C_p) газа на 1° C при постоянном давлении, то таковая зависит не только от состава дымовых газов, но и от температуры последних. Поэтому следует пользоваться средней для данного интервала температур теплоемкостью ($c_{\text{ср}}$ и $C_{\text{ср}}$); так, например, при определении потерь с отходящими газами следует брать $C_{\text{ср}}$ для $t_d - t_{\text{воз}}$, где t_d — температура отходящих (дымовых) газов, а $t_{\text{воз}}$ — температура воздуха. Обычно для газов пользуются величиной $C_{\text{ср}}$, так как количества газов даются в м³.

Точное определение теплоемкости топочных газов довольно затруднительно, поэтому здесь мы удовольствуемся кратким сообщением уже достигнутых результатов. Как это видно из рис. 21, средняя теплоемкость дымовых газов возрастает с увеличением температуры и содержания CO_2 .

Рис. 21 можно пользоваться также и в том случае, когда в отходящих газах

¹ Новейшие данные о теплоемкостях продуктов сгорания и о других свойствах газообразных продуктов сгорания имеются в книге Schüle, Neue Tabellen und Diagramme für technische Feuergase. Berlin, 1929. Есть русский перевод. Прим. ред.

дается работать по какому-либо практически пригодному приближенному методу. Особенно интересны и поучительны для практики закономерные соотношения между расходом воздуха, количеством дымовых газов, тепло-содержанием и низшей теплотворной способностью, установленные Розином¹ на основании большого числа подсчетов процессов горения. Зависимость расхода воздуха и количества дымовых газов от низшей теплотворной способности уже была ранее представлена на рис. 14. На рис. 23 показана зависимость теплосодержания топочных газов от низшей теплотворной способности для твердых, жидких и газообразных топлив.

Из этого рисунка выясняется следующий интересный факт: в то время как теплосодержание дымовых газов жидких топлив, а также высококалорийных горючих газов почти совершенно не зависит от теплотворной способности, теплосодержание газов, образующихся от сгорания твердых и малоценных газообразных топлив, резко изменяется в зависимости от величины теплотворной способности. Хотя закономерность этих соотношений установлена пока только чисто эмпирически, а посему последние и не могут претендовать на абсолютную точность,² тем не менее в подавляющем большинстве случаев они вполне пригодны для практических целей и позволяют,

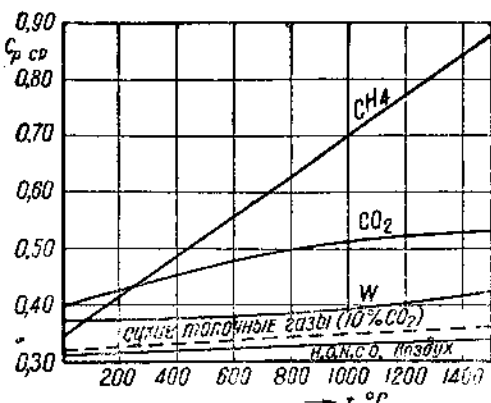


Рис. 22. Средние теплоемкости $C_{p,ср}$ различных газов.

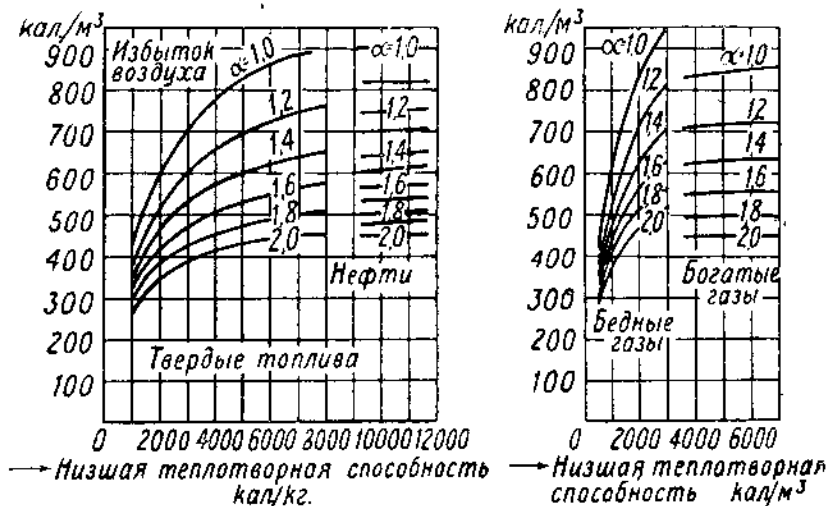


Рис. 23. Теплосодержание дымовых газов I_d твердых, жидких и газообразных топлив в зависимости от низшего предела теплотворной способности Q_n .

при известной теплотворной способности топлива, непосредственно отсчитать, пользуясь рис. 23, теплосодержание топочных газов при той или иной величине избытка воздуха.

5. Температура горения.

Соотношения, существующие между температурой горения и химическим составом горючего, степенью предварительного подогрева воздуха и топлива, величиной отдачи лучеис-

¹ См. VDI-Zschr., 71, 383, 1927.

² Уже дано, впрочем, их теоретическое доказательство; см. Rosin und Fehling, Das It-Diagramm der Verbrennung. VDI-Verlag, Berlin, 1929.

пусканием и т. д., — до сего времени мало изучены и плохо известны. С другой стороны, однако, эти вопросы играют столь большую роль в работе современных котельных с подогревом воздуха и охлаждаемыми водой топочными пространствами, что знание этих важных соотношений является обязательным для каждого конструктора и производственника. Поэтому ниже затрагиваются только наиболее существенные пункты и притом в наивозможно сжатой форме, с применением графических методов изложения материала.

Теоретические температурные уравнения. Теоретическая температура горения t_r какого-либо топлива может быть определена расчетным путем, если известны его теплотворная способность и химический состав. Зная химический состав, можно определить указанным выше способом [см. уравнение (7) и рис. 17] количество топочных газов на 1 кг топлива. Деля затем высшую теплотворную способность на количество топочных газов, получаем теплосодержание I_x 1 м³ топочных газов:

$$\frac{Q_n [\text{кал/кг}]}{V_r [\text{м}^3/\text{кг}]} = I_x [\text{кал/м}^3]. \quad (8)$$

С другой стороны, если известны средняя теплоемкость топочных газов $C'_{p_{cp}}$ и теплота испарения содержащихся в таковых водяных паров, то теплосодержание 1 м³ топочных газов будет:

$$I_x = C'_{p_{cp}} \cdot t_r + 600 \frac{W}{V_r}, \quad (9)$$

если в 1 кг топлива содержится W кг влаги.

Решая совместно уравнения (8) и (9), можно определить t_r :

$$C'_{p_{cp}} \cdot t_r = \frac{Q_n}{V_r} - 600 \frac{W}{V_r}; \quad t_r = \frac{Q_n}{V_r C'_{p_{cp}}}. \quad (10)$$

Отсюда следует, что между $C'_{p_{cp}}$, V_r , t_r и низшей теплотворной способностью Q_n существует простое соотношение.¹

Уравнение (10) является вполне точным только в том случае, когда начальные температуры воздуха, подводимого для горения, и топлива — $t_{воз}$ и t_r равны 0°, т. е. когда теплосодержания последних также равны 0. В случае же предварительно подогретых воздуха или топлива получаются нижеследующие уравнения, вывод коих аналогичен выводу уравнения (10):

$$t_r = \frac{Q_n + C'_{p_{cp}} \cdot t_r}{V_r \cdot C'_{p_{cp}}} \quad \text{для подогретого топлива,}^2 \quad (10a)$$

$$t_r = \frac{Q_n + L_{мин} \cdot C'_{p_{cp}} \cdot t_{воз}}{V_r \cdot C'_{p_{cp}}} \quad \text{для подогретого воздуха,} \quad (10b)$$

$$t_r = \frac{Q_n + C'_{p_{cp}} \cdot t_r + L_{мин} \cdot C'_{p_{cp}} \cdot t_{воз}}{V_r \cdot C'_{p_{cp}}} \quad \text{для подогретых топлива и воздуха.}^2 \quad (10c)$$

В этих уравнениях $C'_{p_{cp}}$ — средняя между 0° и t_r теплоемкость топочных газов, $C'_{p_{cp}}$ — средняя между 0° и t_r ,² теплоемкость топлива и $C'_{p_{cp}}$ — средняя между 0° и $t_{воз}$ теплоемкость воздуха.

Идя этим путем, можно определить теоретическую температуру горения для любого случая. Например, для случая, когда $t_{воз} = 0^\circ$ и $V_r = V_{мин}$ (количество дымовых газов при теоретическом количестве воздуха $L_{мин}$), получаются температуры горения, сведенные в таблице 8, содержащей в себе данные как для важнейших химических составных частей различных топлив, так

¹ Именно по этой причине все последующие графические изображения относятся к *низшей* теплотворной способности.

² В случае твердых и жидких топлив в уравнения (10a) и (10c) вместо $C'_{p_{cp}}$ подставляют теплоемкость, отнесенную к 1 кг, т. е. величину $c'_{p_{cp}}$.

и для самых топлив, как таковых; следует только иметь в виду, что данные, приводимые в таблице в отношении топлив, как таковых, являются средними величинами, по отношению к которым нередко возможны значительные, в зависимости от состава, колебания как вверх, так и вниз.

ТАБЛИЦА 8.

Теоретические температуры горения при начальной температуре 0° и при теоретическом количестве воздуха для горения ($L_{\text{мнн}}$; $\alpha = 1$) (средние величины).

Вещество	Теплотворная способность				Температура горения t_r $^\circ\text{C}$
	Q_b кал/м ³	Q_n кал/м ³	Q_b кал/кг	Q_n кал/кг	
Ацетилен	13 900	13 470	12 000	11 600	2 575
Углерод	—	—	8 080	—	2 200
Водород	3 070	2 570	34 200	2 880	2 150
Нефтяные пары	—	—	11 200	10 500	2 050
Каменный уголь	—	—	6 800	6 500	2 000
Водяной газ	2 700	2 400	4 880	3 900	1 990
Коксовальный газ	5 000	4 500	9 150	8 250	1 950
Бурый уголь	—	—	3 400	3 000	1 760
Генераторный газ	1 300	1 200	1 275	1 175	1 720
Доменный газ	930	900	725	700	1 580

Таблица 8 показывает, что t_r отнюдь не находится в простой зависимости от теплотворной способности. Так, например, любопытно, что высококалорийный коксовальный газ имеет температуру горения меньшую, чем значительно более малощелочной водяной газ. Тем не менее, если подразделить различные топлива на определенные группы, можно, как мы это увидим далее, установить все же очень простую и закономерную зависимость между t_r и Q_n .

Действительные температуры. Значения t_r , приведенные в таблице 8, представляют собою теоретически вычисленные величины; на практике они не достигаются, хотя бы даже приблизительно. Следующие факторы влияют на горение, а следовательно и на температуру горения: 1) избыток воздуха, 2) влажность топлива и воздуха, 3) зольность топлива, 4) род горючих составных частей (C, H₂, O, CH₄ и т. д.), 5) лучистая теплоотдача в камере горения во время горения, 6) начальные температуры воздуха и топлива.

Вообще говоря, как это уже упоминалось ранее,¹ температура горения тем ниже, чем выше избыток воздуха, влажность, зольность и лучистая теплоотдача; наоборот, она тем выше, чем больше процентное содержание горючих составных частей в топливе и чем выше начальные температуры воздуха и топлива.

Избыток воздуха. Цифры, приведенные в таблице 8, вычислены уже с учетом пунктов 2—4, так как в уравнении (10) фигурирует величина теплотворной способности, зависящей от зольности, влажности, содержания углерода и т. п.² Таким образом, если теплотворная способность топлива известна и может быть, следовательно, использована для расчета, то для определения действительной температуры горения необходимо принять в расчет лишь пункты 1, 5 и 6. Если вместо теоретического количества топочных газов $V_{\text{мнн}}$ подставить в уравнение (10) действительное количество $V_{\text{действ}}$, то тем самым избыток воздуха (пункт 1) окажется уже учтенным; точно так же, как это уже было показано ранее (уравнения 9а и 10а), можно вместо нормальной исходной температуры 0° ввести действительную начальную температуру воздуха $t_{\text{воз}}$ (пункт 6). Наибольшие трудности представляет учет лучистой теплоотдачи (пункт 5) в виду сложности как определения количества излученного тепла, так и самого расчета. Поэтому мы рассмотрим здесь сначала удобный графический метод определения температуры горения без учета лучистой теплоотдачи.

¹ См. гл. II «Топливо», стр. 21.

² Это верно, разумеется, только приближенно. При точных расчетах необходимо учитывать химический состав. Очень легко может случиться, что два топлива с одинаковыми теплотворными способностями, относящиеся к одной и той же группе, будут иметь различные температуры горения вследствие небольших отличий в химическом составе.

Если теплосодержание топочного газа известно (а таковое всегда может быть легко определено для любого топлива по величине его низшей теплотворной способности с помощью рис. 23), то, пользуясь так называемой диаграммой It, рис. 24, впервые предложенной Шюле (Schüle) и затем дополненной Розином, можно непосредственно отсчитать температуру горения, отнесенную к 0° (т. е. без учета подогрева воздуха, если таковой имеет место).

Диаграмма It имеет очень большое значение для всякого практика, так как она является превосходным и вместе с тем очень простым пособием для определения теоретической температуры горения на основании теплосодержания топочных газов, для установления к. п. д. топки и т. д.; помимо этого диаграмма It дает в высшей степени наглядную картину всего процесса горения в целом, а также степени использования тепла. По величинам температур горения и отходящих газов можно непосредственно определить перепад тепла, соответствующий данной разности температур, и установить, какие именно доли всего количества тепла, содер-

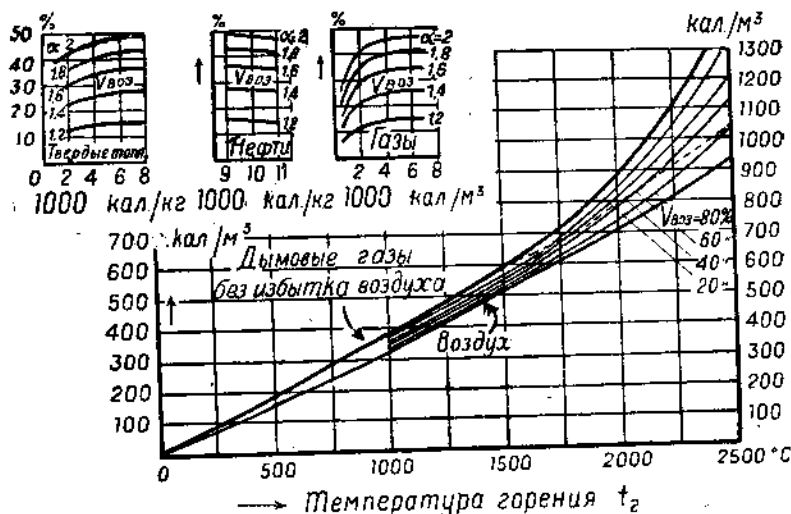


Рис. 24 (внизу справа). Диаграмма It для дымовых газов при температуре воздуха $t_{\text{воз}} = 0^\circ$ (теплосодержание $I_{\text{г1}}$ в зависимости от теоретической температуры горения t_2).

Рис. 25 (вверху слева). Количество воздуха $v_{\text{воз}}$ в дымовых газах твердых, жидких и газообразных топлив в зависимости от низшей теплотворной способности Q_d .

жащегося в топочных газах, использованы в котле, перегревателе, подогревателе и т. д., какие количества отбросного тепла еще останутся в наличии для целей утилизации и т. д. Содержание воздуха в дымовых газах $v_{\text{воз}}$ целесообразно определять с помощью рис. 25, на котором изображены кривые $v_{\text{воз}}$ в зависимости от величины низшей теплотворной способности для различных избытков воздуха и для твердых, жидких и газообразных топлив.

В виду очень большого практического значения этого графического метода представляется целесообразным пояснить его на примере:

Пример. В топке котла сжигается твердое топливо (каменный уголь), имеющее низшую теплотворную способность 7000 кал/кг; коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1.4$; следовательно, согласно рис. 25, содержание воздуха $v_{\text{воз}}$ будет 28%. Находим по рис. 23 теплосодержание топочных газов $I_{\text{г1}} = 640$ кал/м³; по диаграмме It, рис. 24, $t_2 = 1710^\circ\text{C}$. Если температура отходящих газов за котлом равна 250°C , то теплосодержание отходящих газов определится величиной $I_{\text{г2}} = 85$ кал/м³. Коэффициент полезного действия, следовательно, равен $\frac{I_{\text{г1}} - I_{\text{г2}}}{I_{\text{г1}}} = \frac{640 - 85}{640} = 86,7\%$. Потери равны $\frac{85}{640} = 13,3\%$.

При установке за котлом подогревателя, использующего теплоту дымовых газов, и охлаждения вследствие этого отходящих газов до 125°C теплосодержание уменьшилось бы до 50 кал/м³, а потери сократились бы до $\frac{50}{640} = 7,8\%$.

Подчеркивая еще раз крупное значение диаграммы t_r для понимания процессов горения и использования тепла в котле, следует все же указать, что подсчет температур горения производится более удобно с помощью рис. 26; на последнем температуры горения изображены в зависимости от низшей теплотворной способности, так что представляется возможным непосредственно отсчитать t_r для любого топлива, если только известна его теплотворная способность. Рис. 26 действителен также для $t_{воз} = 0^\circ \text{C}$ и при условии отсутствия лучистой теплоотдачи.

П р и м е р. Каковы предельные теоретические температуры горения германских бурых углей? На рис. 5 и в таблице 1 имеются некоторые средние данные для германских бурых углей. Согласно этим данным низшая теплотворная способность колеблется в пределах от 2000 до 3500 кал/кг. Согласно рис. 26 наивысшие теоретические температуры горения ($\alpha = 1$) для 2000 кал/кг 1570°C и для 3500 кал/кг 1810°C . При хорошем горении современной топки можно считать, что средняя величина содержания CO_2 будет 12%; согласно рис. 16 такому содержанию CO_2 для бурых углей отвечает коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,55$. Таким образом, если учесть избыток воздуха, теоретические температуры горения находятся, согласно рис. 26, в пределах примерно от 1200 до 1400°C . При этом предполагается, что нет никакой лучистой теплоотдачи и что топливо и воздух подаются в топку при 0°C .

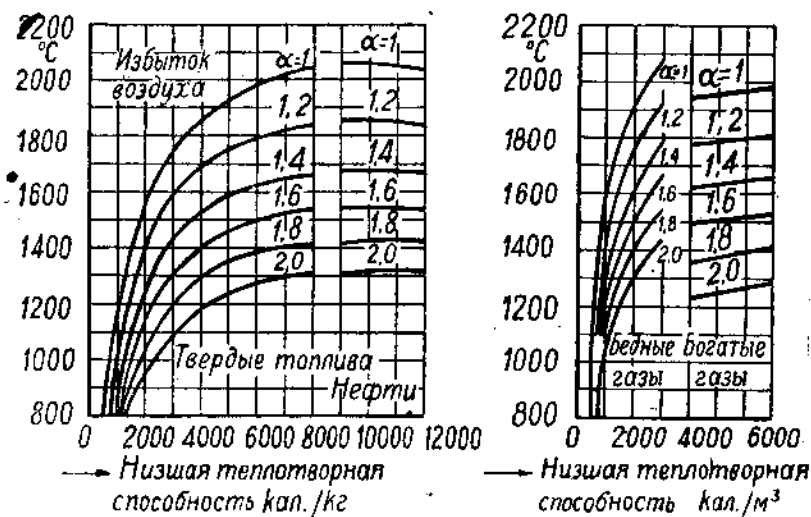


Рис. 26. Теоретические температуры горения t_r твердых, жидких и газообразных топлив в зависимости от низшей теплотворной способности C_h .
Температура воздуха $t_{воз} = 0^\circ \text{C}$.

Разумеется, все эти графики никоим образом не могут претендовать на абсолютную точность. Между количеством дымовых газов, теплосодержанием, температурой горения и теплотворной способностью вообще не существует никакой математически точной зависимости, ибо теплотворная способность сама зависит от различнейших факторов. Отклонения от средних величин, однако, столь незначительны, что для практических целей точность оказывается совершенно достаточной.

Влажность и зольность. Несмотря на все это, рассмотрение в отдельности вопроса о влиянии степени влажности и зольности представляется во многих отношениях поучительным, а при некоторых практических исследованиях даже и очень важным. Рис. 27 показывает, что влажность влияет на температуру горения в гораздо большей мере, чем зольность. Это станет совершенно очевидным, если принять во внимание, что средняя теплоемкость воды $c_p = 0,24$, а воды $c_p = 1$, т. е. последняя превышает первую более чем в четыре раза. В этом же направлении действует то обстоятельство, что от сгоревших веществ отнимаются значительные количества тепла на испарение влаги; кроме всего этого, перегрев пара, средняя теплоемкость которого колеблется между 0,45 и 0,5, требует по сравнению с нагревом воды примерно вдвое большего количества тепла при одинаковом повышении температуры. Отсюда следует, что в термическом отношении влага является наиболее вредной составляющей балласта.¹

¹ См. также главу II «Топливо», стр. 21 и 22.

Пример. Беззольное топливо с 30% влаги сжигается при 1,6-кратном избытке воздуха. Какова его теоретическая температура горения? При каком золосодержании безводное топливо имело бы ту же самую температуру горения? Из рис. 27 для $W = 30\%$ и $\alpha = 1,6$ имеем $t_r = 1400^\circ$. Для 1400° и $\alpha = 1,6$ находим $A = 60\%$. Таким образом зольность могла бы быть вдвое больше влажности.

Лучистая теплоотдача. Определяемые с помощью вышеприведенных методов температуры горения, однако, обычно не достигаются в топочном пространстве, ибо (как это уже указывалось ранее) уже во время самого горения в любом топочном пространстве имеет место лучистая теплоотдача частично стенкам топочного пространства, частично поверхности нагрева; тем самым некоторое количество тепла теряется для процесса горения,¹ что ведет к существенному снижению действительных температур горения. Вообще говоря, можно считать, что из всего количества тепла, освобождающегося при горении, путем лучеиспускания отдается: в котлах с выносной топкой — от 10 до 15%, в водотрубных котлах с наклонными трубками и низко расположенной решеткой — от 15 до 25%, в водотрубных котлах с вертикальными трубками — от 25 до 30% и в котлах с внутренней топкой или с водяными экранами — до 60%. Рис. 28 показывает, как сильно, при известных условиях, может уменьшиться температура горения каменных и бурых углей вследствие лучистой теплоотдачи. Из него

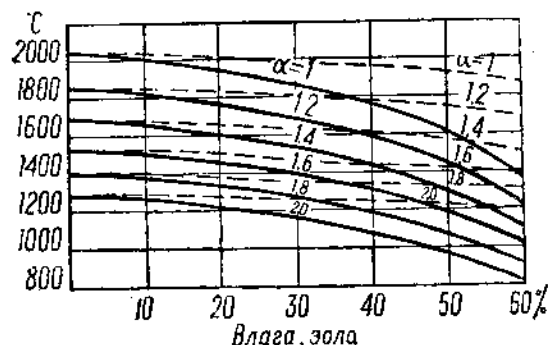


Рис. 27. Теоретическая температура горения t_r в зависимости от влажности и зольности.

Температура воздуха $t_{воз} = 0^\circ$.
 ———— влага; — — — — зольн.

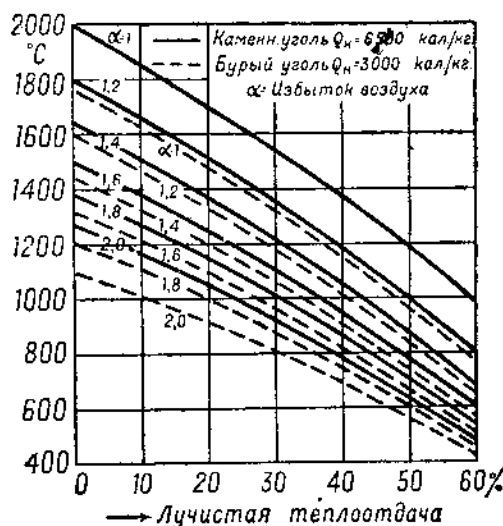


Рис. 28. Температура горения t_r в зависимости от лучистой теплоотдачи.

видно, что если при отсутствии лучистой теплоотдачи температура горения t_r каменного угля равна, например, приблизительно 1530° , то при лучистой теплоотдаче в 50% t_r будет равна уже только 820° , что составляет всего лишь немного больше половины от 1530° . Таким же путем, с помощью рис. 28, можно определить действительную температуру горения и перепад температур как для любой выраженной в процентах величины лучистой теплоотдачи, так и для других топлив, не показанных на рис. 28; для последней цели необходимо только, отложив на оси ординат заимствованное из рис. 26 значение соответствующей температуры без учета лучистой теплоотдачи, провести затем через полученную точку кривую, параллельную ближайшей на рисунке кривой.

Пример. Необходимо определить действительную температуру горения для водотрубного котла с вертикальными трубками, с буроугольной топкой ($Q_n = 3000$ кал/кг и 30% лучистой теплоотдачи) при 1,4-кратном избытке воздуха. На рис. 28 находим пунктирную кривую для $\alpha = 1,4$, согласно которой имеем (при 30% лучистой теплоотдачи) $t_r = 1070^\circ$. При этом предполагается, что топливо и воздух подаются в топку при 0° .

Подогрев воздуха. Все вышеприведенные графики основываются на допущении начальной (исходной) температуры 0° , что, впрочем, в очень многих случаях довольно близко отвечает действительности. Небольшие колебания в пределах от 10 до 20° лишь очень мало отража-

¹ Для котла теряются только излученные наружу количества тепла, тогда как количества тепла, переданные поверхности нагрева путем лучеиспускания, используются котлом.

ются на конечном результате. Если же, напротив, как это нередко бывает в современных котельных установках, работа ведется с очень сильно подогретым воздухом, то температура горения, разумеется, повышается. Влияние подогрева воздуха показано на рис. 29 для каменного угля, бурого угля, мазута и генераторного газа. Из рисунка видно, что с возрастанием температуры воздуха температура горения также возрастает и притом довольно значительно.

Температура горения

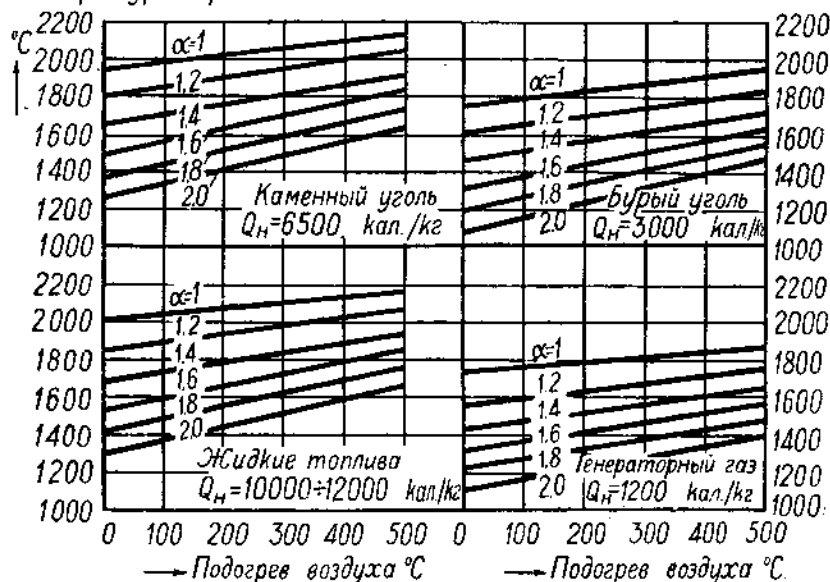


Рис. 29. Влияние подогрева воздуха на теоретическую температуру горения t_r .

Пример. Температура горения в одной нефтяной топке без подогрева воздуха равна 1800° С (без учета лучистой теплоотдачи). Какова величина избытка воздуха? Насколько нужно было бы предварительно нагреть воздух для того, чтобы повысить температуру горения до 2000° С? Согласно рис. 29 коэффициент избытка воздуха (α) будет приблизительно 1,23. Тот же рис. 29 показывает, что при неизменном избытке воздуха, для достижения температуры горения в 2000° необходимо вести подогрев воздуха примерно до 400°.

С помощью приведенных выше графиков можно без труда определять температуры горения в любых возможных случаях.¹

6. Температура воспламенения и продолжительность горения.

Прочие важные проблемы горения, как, например, температура воспламенения, продолжительность горения, объем пламени и т. п., мы можем затронуть здесь лишь очень поверхностно. Большая часть этих вопросов, также имеющих большое значение для топочной техники, освещена до сего времени совершенно недостаточно. Тем не менее следует отметить, что именно температура воспламенения и продолжительность горения как раз играют очень большую роль при конструировании камер горения пылеугольных, нефтяных и газовых топок. На рис. 30 представлены температуры воспламенения пыли из рурских углей, установленные исследованиями Хольда (Hold).² Из этого рисунка видно, что негашовые угли воспламеняются при температурах гораздо более высоких, чем угли гашовые, а главным образом еще и то, что степень измельчения угольной пыли чрезвычайно сильно влияет на температуру воспламенения. На рис. 31 представлена найденная Розиним и Хольдом зависимость продолжительности горения от отношения поверхности к весу. Чем больше поверхность, тем меньше продолжительность горения. Эта закономерность чрезвычайно важна для пылеугольных топок, поскольку в случае очень мелкой пыли поверхность отдельных

¹ Очень наглядные графики составил Vogel для углей с высокими содержаниями золы и влаги; см. Arch. f. Wärmewirtschaft, 9, 189, 1928.

² См. диссертацию: Hold, Rheinisch-Westfälische Steinkohlenarten in der Staubeuerung, изд. G. D. Baedeker, Berlin 1926, см. также Schultes, Arch. f. Wärmewirtschaft, 8, 41, 1927.

частиц очень велика по сравнению с их весом, а следовательно продолжительность горения очень мала. Отсюда следует, что при высокой степени измельчения можно работать с малыми объемами камеры горения и большими скоростями газа, не опасаясь того, что частицы пыли попадут в ходы котла в негоревшем состоянии.

Хотя исследования Хольда были проведены только с некоторыми рурскими углями и для пылеугольной топки только одной вполне определенной конструкции и хотя, следовательно, нет основания и возможности, базираться на них, делать какие-либо широкие обобщения, представляется все же допустимым установить следующие важные положения.

1. Температуры воспламенения негазовых топлив выше, чем газовых; при большом измельчении пыли температуры воспламенения ниже, чем при малом измельчении.

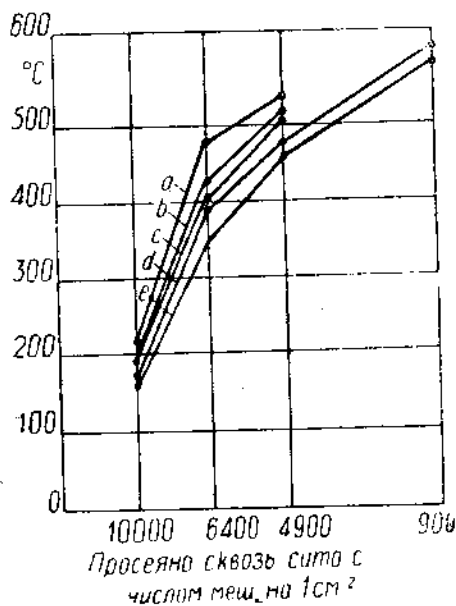


Рис. 30. Температуры воспламенения пыли рурского угля при различных степенях измельчения.

a — антрацит; b — тощий уголь; c — жирный уголь; d — газовый уголь; e — газовый пламенный уголь.

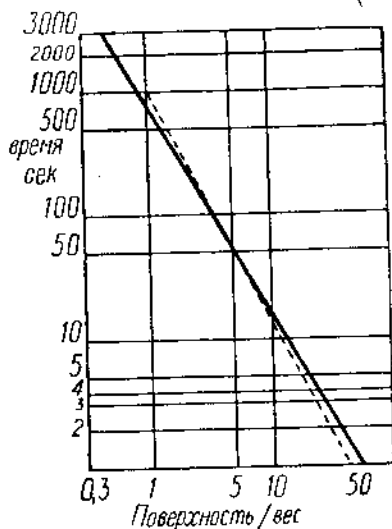


Рис. 31. Продолжительность горения (в секундах) в зависимости от отношения поверхности к весу.

— каменный уголь;
- - - бурый уголь.
(Логарифмическая шкала абсцисс и ординат)

2. Продолжительность горения приблизительно одинакова для всех каменных и бурых углей. Однако она в очень большой степени зависит от величины поверхности. Чем последняя больше по сравнению с весом, тем меньше продолжительность горения. Поэтому мелкие частицы пыли сгорают быстрее крупных, а частицы неправильной формы (зубчатые, вытянутые в виде палочек) скорее, чем частицы круглые (шарообразные). То же самое относится и к углям, сжигаемым на решетках.

ДОПОЛНЕНИЯ РЕДАКТОРА.

1. Горение топлива.¹

Русская литература по горению топлива чрезвычайно велика и в значительной степени самостоятельна. Она разрабатывается притом различно в разных областях. В направлении *металлургических* приложений теория горения излагается в вышеуказанной книге М. Г. Окнова («Топливо и его сжигание», Ленинград, 1929). Приложения к печам химических производств (а также и к металлургическим печам) даны в книге Д. Чернобаева («Топливо», Харьков — Киев, 1931).

Литература по сгоранию топлива в *котельных топках* сама по себе очень велика и не вполне однородна по приемам расчета и обозначениям. Указываем только на несколько трудов, особенно распространенных среди советских теплотехников.

К. В. К и р ш, Котельные установки. Москва, 1926.

Проф. А. А. Н а д е ж н ы й, Тепловой расчет котельных установок. Москва, 1927.

Проф. В. Н. Шретер, Паровые котлы в тепловых расчетах и цифрах, 3 изд., Ленинград, 1930.

Проф. В. Н. Шретер, Процессы горения и работа топочных устройств паровых котлов, Ленинград, 1927.

Многочисленные статьи по сгоранию топлива в топках паровых котлов имеются в журнальной литературе, указанной выше («Известия Теплоэнергетического института», «Тепло и сила», «Труды всесоюзных съездов» и т. д.), и в курсах котельных установок (указанных там же).

Исследование явлений сгорания в паровозных котлах дано в книге проф. С. П. Сыромятникова, Тепловой процесс паровоза, Москва, 1926.

2. Теплота сгорания составных частей топлива и формулы теплотворной способности.

Данные о теплоте сгорания главных составных частей топлива несколько отличаются у различных авторов. «Округления» в этих данных производятся тоже различно, в соответствии с чем получаются и различные формулы для теплотворной способности топлива, определяемой по их химическому составу. Так, например, пользуясь данными проф. М. А. Павлова¹ (применяемыми в СССР при металлургических расчетах), проф. М. Г. Окнов даст следующую формулу для низшей теплотворной способности:

$$Q_n = \frac{8137 C + 28905 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 2181 S - 600 W}{100},$$

где C , H , O , S и W даны в процентах.

Кроме того в СССР часто пользуются формулой Д. И. Менделеева

$$Q_n = \frac{8100C + 30000H - 2600(O - S) - 600(W + 9H)}{100},$$

где буквы имеют то же значение, что и в предыдущем случае.

Другие формулы — см. М. Г. Окнов, Топливо и его сжигание, стр. 18.

Новейшие данные (1924 г.) о молекулярных теплотах реакции — см. у Д. Чернобаева, Топливо, стр. 16.

IV. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА.

О б о з н а ч е н и я.

F м² — поверхность (поверхность нагрева, поверхность тела и т. п.),

τ час. — время,

t_1 °C — температура более нагретых газов (жидкостей),

t_2 °C — температура более холодных газов (жидкостей),

θ_1 °C — температура более нагретой поверхности стенки,

θ_2 °C — температура более холодной поверхности стенки,

θ_{cp} °C — средняя температура стенки,

α_1 кал/м² ч. °C — коэффициент общей теплоотдачи от газов или жидкостей стенкам,

α_2 кал/м² ч. °C — коэффициент общей теплоотдачи от стенок газам или жидкостям,

α_{a1} , α_{a2} кал/м² ч. °C — коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием,

α_{r1} , α_{r2} кал/м² ч. °C — коэффициент теплоотдачи теплопроводностью и конвекцией,

ζ_1 , ζ_2 , ζ_3 м² ч. °C/кал — удельные сопротивления теплоотдаче ($= \frac{1}{\alpha}$),

λ_1 , λ_2 , λ_3 и т. д. кал/м ч. °C — коэффициенты теплопроводности (считая на 1 м² поверхность),

λ_k кал/м ч. °C — кажущийся коэффициент теплопроводности воздуха конвекцией,

$\lambda_{\text{факт}}$ кал/м ч. °C — кажущийся коэффициент теплопроводности воздуха лучеиспусканием,

$\lambda_{\text{действ}}$ кал/м ч. °C — фактический коэффициент теплопроводности воздуха, $\frac{\lambda}{\alpha}$

σ_1 , σ_2 , σ_3 и т. д. м ч. °C/кал — удельные теплосоппротивления ($= \frac{1}{\lambda}$),

k кал/м² ч. °C — коэффициент теплопередачи,

W м² ч. °C/кал — удельное сопротивление теплопередаче ($= \frac{1}{k}$),

δ_1 , δ_2 , δ_3 и т. д. м — толщины стенок,

¹ М. А. Павлов. Журнал русского металлургического общества, 1, 402, 1911; 1, 421, 1912.

Q , $Q_{\text{общ}}$ кал — общее количество тепла (отдаваемого теплопроводностью, конвекцией и лучеиспусканием),
 Q_1 кал — теплоотдача теплопроводностью и конвекцией,
 Q_2 кал — теплоотдача лучеиспусканием,
 C кал/м² ч. °С⁴ — коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела,
 C_1 , C_2 и т. д. кал/м² ч. °С⁴ — коэффициенты лучеиспускания прочих тел,
 C' кал/м² ч. °С⁴ — коэффициент лучистого теплообмена. $\left(= \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C}} \right)$.

Наряду с процессом горения, т. е. преобразованием химической энергии в тепловую, не меньшее значение для работы паровых котлов имеет теплопередача, являющаяся чисто тепловым, термическим процессом.

Полезный эффект котельной установки тем значительнее, чем большая доля энергии, полученной из топлива, может быть передана воде путем теплопередачи. Чем большее количество единиц тепла может быть передано в единицу времени единице поверхности нагрева, тем значительнее производительность котельной установки или, что то же самое, тем меньше становятся размеры при той же мощности. С другой стороны, однако, полезный эффект и мощность котла тем меньше, чем больше теплопередача остальным поверхностям, не являющимся поверхностями нагрева (обмуровка, фундаменты, железный каркас и т. п.).

Отсюда следует, что к процессу теплопередачи приходится подходить с двух диаметрально противоположных сторон: с одной стороны, необходимо возможно улучшать его, с другой — стараться сводить к минимуму. В отношении использования пара действительны те же соображения, что и в отношении производства пара: в то время как питательные водо- и паропроводы должны отдавать наружу возможно меньше тепла, т. е. должны быть возможно лучше изолированы, собственно отопительные или нагревательные трубопроводы должны, наоборот, отдавать наружу возможно большие количества тепла. Представляется чрезвычайно важным отдавать себе на практике совершенно ясный отчет в том, в каких именно местах следует добиваться максимального улучшения теплопередачи и в каких — всячески ей препятствовать и ухудшать ее. При эксплуатации котельных приходится в общем одинаково часто встречаться и с теми и с другими случаями.

Теплопередача представляет собой в высшей степени сложный процесс, зависящий от очень большого числа факторов. Вопросы теплопередачи являются темами ряда обстоятельных трудов; здесь же мы вынуждены ограничиться кратким рассмотрением главных закономерностей. Интересующихся подробностями мы отсылаем к соответствующим специальным работам.

Переход тепла от одной среды через стенку к другой разбивается на следующие три стадии:

1. Теплоотдача от нагретого вещества перегородке (стенке).
2. Переход тепла через стенку путем теплопроводности.
3. Теплоотдача от стенки более холодному веществу.

Теплопроводность в свою очередь может быть расчленена на ряд отдельных процессов, в зависимости от того, является ли стенка (перегородка) простой или составной (одно- или многослойной).

Далее, как при переходе тепла, так и при теплоотдаче необходимо различать количества тепла, перенесенные теплопроводностью, конвекцией и лучеиспусканием. Под *теплопередачей путем конвекции* подразумевают перенос тепла вследствие течений или токов в жидких и газообразных телах; необходимо тут же отметить, что, в частности, в газообразных телах теплопередача конвекцией обычно значительно выше теплопередачи за счет одной только теплопроводности. Процессы отопления помещений, например, сводятся почти исключительно к конвекционным явлениям, поскольку объемы воздуха, нагретого нагревательным телом (печью, радиатором и т. п.), поднимаются вверх, освобождая место более холодным слоям воздуха, притекающим снизу и с боков к нагревательному телу. Действительная теплопроводность не играет при этом практически никакой роли вследствие исключительно ничтожной

¹ Строго говоря, формула, приведенная для C' , действительна только для частного случая взаимного лучеиспускания двух параллельных поверхностей, находящихся друг от друга на расстоянии, незначительном по сравнению с их размерами. В других случаях формула для C' принимает иной вид. Подробности см. например Шап и Руммель, Практическое приложение законов теплопередачи, стр. 20 и след., ГИЗ, 1928. *Прим. пер.*

теплопроводной способности воздуха, а лучеиспускание становится ощутительным только при очень высоких температурах поверхности нагревающего тела. Точно так же и при всех процессах кипения, а следовательно и при производстве пара, основными факторами, вызывающими кипение и парообразование, являются почти исключительно конвекционные процессы. Вследствие того, что нагретая жидкость, имеющая сравнительно меньший удельный вес, поднимается вверх, ее место занимает притекающими более холодными слоями воды; эти последние нагреваются или испаряются на горячих поверхностях стенок и снова поднимаются вверх либо в виде горячей жидкости, либо в форме мелких пузырьков пара. Если же, наоборот, вести нагревание жидкости сверху, то теплопередача конвекцией вообще не может иметь места, ибо нагретые слои остаются сверху. Жидкость будет поэтому нагреваться за счет одной только теплопроводности. Явления, происходящие в природе, как, например, нагревание рек и морей солнцем, показывают, как медленно происходит такого рода нагрев.

Таким образом теплопередача конвекцией имеет решающее значение для всех жидких и газообразных тел. Лучеиспускание, как уже было указано выше, играет решающую роль только при очень высоких температурах. Теплопроводность как таковая, наиболее существенна для твердых тел (в особенности для металлов), для коих она может достигать очень значительных величин.

Мы рассмотрим ниже в последовательном порядке сначала теплоотдачу от жидких и газообразных тел телам твердым и обратно, затем теплопроводность твердых, жидких и газообразных тел, и, наконец, суммарный, общий процесс теплопередачи от одного какого-либо жидкого или газообразного тела другому, отделенному от первого простой или составной (сложной, многослойной) стенкой.

Обычно, при изучении явлений теплоотдачи, влиянии или действия теплопроводности и конвекции рассматриваются совместно, а теплоотдача лучеиспусканием, наоборот, отдельно.

1. Теплоотдача теплопроводностью и конвекцией.

Величина теплоотдачи стенке путем теплопроводности и конвекции находится по формуле

$$Q_{\tau 1} = Fz(t_1 - \vartheta_1)\alpha_{\tau 1}, \quad (11)$$

где $Q_{\tau 1}$ — количество переданного тепла в калориях, F — поверхность в м^2 , z — время в часах, t_1 — температура нагретого вещества, ϑ_1 — температура поверхности стенки и $\alpha_{\tau 1}$ — так называемый коэффициент теплоотдачи теплопроводностью и конвекцией. Формула для определения теплоотдачи от стенки более холодному веществу имеет совершенно аналогичный вид:

$$Q_{\tau 2} = Fz(\vartheta_2 - t_2)\alpha_{\tau 2}, \quad (11a)$$

где ϑ_2 — температура поверхности стенки со стороны более холодного вещества, t_2 — температура более холодного вещества и $\alpha_{\tau 2}$ — коэффициент теплоотдачи теплопроводностью и конвекцией для перехода от стенки к жидкости или газу.

Коэффициенты теплоотдачи выражаются в $\text{кал}/\text{м}^2 \text{ ч.}^\circ\text{C}$ и представляют собою количество тепла, переходящего в течение одного часа на 1 м^2 поверхности при разности температур в 1°C . Они зависят как от рода вещества, его агрегатного состояния (жидкое или газообразное), от температуры и давления, от скорости по отношению к стенке (покой, слабое или сильное движение, простое течение, вихревое течение и т. д.), так, наконец, и от температуры, формы и строения поверхности стенки (плоская или криволинейная, гладкая или шероховатая и т. д.). Вообще говоря, α_{τ} тем больше, чем больше скорость течения; для жидкостей α_{τ} больше, чем для паров,¹ и для паров больше, чем для газов; кроме того с увеличением разности температур α_{τ} обычно несколько возрастает.

Поэтому с увеличением разности температур величина общей теплоотдачи возрастает очень значительно; так, например, если коэффициент теплоотдачи при разности в 50° равен 9, а при разности в 100° равен 10, то теплоотдача при 50° будет равна 450, а при 100° уже 1000 $\text{кал}/\text{м}^2 \text{ ч.}$ Сюда присоединяется еще, как мы это увидим ниже, влияние лучеиспускания, очень резко

¹ Только для неконденсирующихся паров. Конденсирующиеся пары обладают по большей части коэффициентами теплоотдачи большими, чем жидкости.

увеличивающиеся с возрастанием разности температур. Таким образом большие разности температур являются, вообще говоря, первой предпосылкой хорошей теплопередачи и, наоборот, малые разности температур являются верной гарантией незначительности тепловых потерь.

Второе по значению место принадлежит процессу течения. Высокие скорости газов, в особенности в последних ходах котла, где влияние лучеиспускания газов вследствие низких температур лишь очень незначительно, сильные завихрения в газах и энергичная циркуляция воды внутри котла¹ увеличивают теплоотдачу. Сюда присоединяется еще и то обстоятельство, что при сильной циркуляции воды разность температур также больше; холодная вода притекает непрерывно и благодаря этому образующиеся пузырьки пара, значительно ухудшающие теплоотдачу, все время уносятся течением.

Напротив, всюду, где теплоотдача должна быть сведена к возможному минимуму, как, например, у обмурованных стенок кладки, уместны малые скорости газов и воды; сильное бурление в верхних барабанах котлов также несколько увеличивает теплоотдачу стенкам барабанов, а вместе с этим и потери лучеиспусканием и теплопроводностью. Далее, наличие очень больших скоростей в трубопроводах для пара и горячей воды увеличивает внешние тепловые потери; увеличение это, впрочем, вследствие малого коэффициента внешней теплоотдачи очень незначительное. Напротив, обдувание ветром и вообще действие сильных токов воздуха может привести к чрезвычайно большому увеличению коэффициента внешней теплоотдачи, а вместе с тем, следовательно, и тепловых потерь стенок котлов, дымовых труб, трубопроводов и т. п.

В связи с этим представляется необходимым подчеркнуть, что *теплопередача является не столько чисто тепловой, сколько, и притом в гораздо большей мере, производственно-технической проблемой*. Плохая теплопередача на поверхностях нагрева вследствие недостаточной циркуляции воды может повести к перегреву котельного железа, образованию отдулин и катастрофическим последствиям; сильные завихрения у стенок топки ведут большей частью к недопустимой напряженности материалов кладки и обмуровки, что связано с укорочением сроков службы последних и с крупными цифрами ремонтных расходов; слишком высокие скорости пара в трубопроводах обуславливают кроме того значительные потери напора. Отсюда следует, что в результате применения теплотехнически целесообразных конструкций и разумного ведения дела во многих случаях могут быть достигнуты крупные эксплуатационно-технические выгоды и преимущества.

В таблице 9 приведены некоторые коэффициенты теплоотдачи, представляющие интерес с точки зрения парокотельного дела. Мы подчеркиваем здесь еще раз, что цифры, приведенные в таблице 9, представляют собою частью сравнительно грубые примерные средние величины, частью же результаты опытов, которые, будучи сами по себе вполне точными, могут быть обобщены лишь при условии определенных ограничений. До настоящего времени еще не установлен какой-либо общий закон теплоотдачи, который сделал бы возможным точный расчет величины таковой в каждом отдельном случае. В подавляющем большинстве случаев на практике приходится исходить из примерной, ориентировочной оценки, или итти путем опытов; таблица 9 является только пособием, приблизительно определяющим порядок искомой величины. В частности при пользовании цифровыми величинами, приведенными в таблице, необходимо очень внимательно отнестись к данным последнего вертикального столбца таблицы — «Примечания».

Резюмируя все вышесказанное, можно наметить следующие основные положения, характеризующие явления теплопередачи.

1. Коэффициенты теплоотдачи α , имеющие значение для эксплуатации парокотельных установок, частично чрезвычайно сильно разнятся между собою. Наименьшие значения α имеют все газы и сильно перегретые пары (до тех пор, пока они не начинают конденсироваться); наибольшие значения α отвечают переходу из газообразного агрегатного состояния в жидкое и обратно (конденсация, испарение). Однако и для большинства некипящих жидкостей значения α много больше, чем для газов.

2. Температуры поверхностей стенок и соприкасающихся с последними веществ, а также разности температур, хотя и влияют очень сильно на количества переданного тепла, но зато обычно лишь очень незначительно отражаются на величине коэффициента тепло-

¹ Последняя, впрочем, практически лишь очень незначительно влияет на величину коэффициента теплопередачи вследствие сравнительно очень малого коэффициента внешней теплоотдачи.

отдачи. Обычно с возрастанием разности температур α , несколько увеличивается; наоборот, при неизменной разности температур и одновременном с этим повышении температуры более нагретого вещества t_1 , α , несколько уменьшается.

3. Давление газов существенно влияет на величину α , давление жидкостей, напротив, влияет очень мало; вообще говоря, α , увеличивается с возрастанием давления.

4. Величина α , зависит в очень высокой степени от скорости течения. Для неподвижных газов и жидкостей значения α , большей частью много меньше, чем при больших скоростях. Далее, сильные завихрения способствуют теплоотдаче больше, нежели равномерное течение.

5. Большое влияние на величину α , имеет также форма стенки. При плоских стенках α , будет минимальным, для труб много больше и притом тем большим, чем меньше диаметр трубки. Далее, эллиптическая форма благоприятствует теплоотдаче больше, чем форма круговая, и т. д.

6. Затем играет роль характеристика стенки и ее пространственное расположение. Так, например, отнюдь не безразлично, является ли стена шероховатой или гладкой, расположена ли она горизонтально, вертикально или наклонно по отношению к направлению течения, обращена ли к текущему газу короткая или длинная стенка (при эллиптической форме последней) и т. д.

7. Наконец, α , зависит также от направления течения и от расположения трубок, поверхностей нагрева и т. д. Течение может ударяться перпендикулярно о стенку или же направляться вдоль нее, оно может образовывать завихрения и мертвые пространства, может многократно отклоняться или же идти ровно и беспрепятственно. Во всех этих случаях ответ на вопрос о величине α может быть дан только опытом; во многих же случаях практики (напр., при конструировании) довольствуются чисто качественным подходом к вопросу, основанным на общем понимании характера закономерных связей физических вообще и тепловых в частности.

8. Само количество переданного тепла зависит, однако, не от одних только коэффициентов теплоотдачи, но и от разностей температур, от длительности процесса и, наконец, от размеров участвующей в процессе (рабочей) поверхности соприкасания [см. уравнение (11)].

Поэтому для переноса больших количеств тепла нужно стремиться к возможному увеличению не только α , но также и $(t_1 - \vartheta_1)$, либо $(\vartheta_2 - t_2)$, и F . Следует заметить, что именно увеличение поверхности нередко имеет решающее значение; на этом главным образом основаны преимущества котлов с водяными и дымогарными трубками по сравнению с жаротрубными котлами, ребристых радиаторов для отопления помещений и ребристых экономайзеров по сравнению с гладкотрубными и т. д. Наоборот, во всех тех случаях, когда дело идет о сокращении, об уменьшении теплоотдачи, поверхность должна быть минимальной.

2. Теплоотдача лучеиспусканием.

Кроме теплоотдачи теплопроводностью и конвекцией существует теплоотдача лучеиспусканием, играющая очень большую роль при тех высоких температурах, которые господствуют в топочных пространствах котельных установок. По известной формуле Стефана-Больцмана количество тепла, отданного лучеиспусканием за время z часов, равно:

$$Q = F_1 z \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] C' = F_1 z \left[\left(\frac{t_1 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_2 + 273}{100} \right)^4 \right] C', \quad (12)$$

где T_1 —температура лучеиспускающего тела, T_2 —температура тела, воспринимающего лучеиспускание, в градусах абсолютной температурной шкалы, а t_1 и t_2 —соответствующие температуры в °C, далее F_1 —поверхность лучеиспускающего тела и C' —так называемый коэффициент лучистого теплообмена. Последний зависит от коэффициента лучеиспускания C_1 лучеиспускающего тела, от коэффициента лучеиспускания C_2 тела, воспринимающего лучеиспускание, от коэффициента лучеиспускания C абсолютно черного тела и, наконец, от отношения лучеиспускающей поверхности к поверхности, воспринимающей лучеиспускание, $\frac{F_1}{F_2}$. Для двух протяженных, параллельных и равновеликих поверхностей эта зависимость выражается следующим образом:¹

$$C' = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C}}. \quad (13)$$

¹ См. в связи с этим примечания переводчика к спискам условных обозначений, помещенным в начале книги и в начале настоящего отдела. *Прим. пер.*

ТАБЛИ
Коэффициенты теплоотдачи

Т е л о о т д а ч а		Разность температур обих тел °C	Коэффициент теплоотдачи α_t кал/м ² ч. °C
откуда	куда		
Воздух, газы (в покое: при 760 мм рт. ст. и температуре воздуха 15° C	Твердая стенка	10	3,8
		50	5,9
		100	7,0
		200	8,3
		400	9,8
Воздух, газы (в движении): 2,5 м/сек 5 " 10 " 15 "	Стальная трубка (62 мм в диаметре)	0—300	4—20
		0—300	6—35
		0—300	10—60
		0—300	15—85
		0—300	
Топочные газы (в движении)	Котельная водяная трубка	552 219	28,1 27,6
Перегретый пар (неконденсирующийся): в покое " движении 2,5 м/сек " " 5 " " " 10 " " " 15 "	Стальная трубка (40 мм в диаметре) 10 (6) атм. ман.	100—400	(10 атм. ман.) 4—10 (6 атм. ман.) 3—8
		100—400	28—63 20—48
		100—400	54—118 40—91
		100—400	100—225 73—169
		100—400	140—315 107—234
		100—400	
Перегретый пар и насыщенный пар (конденсирующий) ¹	Металлическая стенка: (медлен. стекан. конденс.) (быстрое стекан. конденс.)	—	8 000 — 9 000 10 000 и более
Кипящая вода: (слабое движение) (сильное движение)	Металлическая стенка	—	2 000 — 3 000 4 000 — 6 000
Некипящая вода: (в покое) (течение над перемешивание)	Металлическая стенка	—	500 2 000 — 5 000

¹ По исследованиям Стендера (Stender, VDI-Zeitschr., 69, 805, 1925), а также Якоба и Эрва (Jakob даже еще несколько больше, чем при конденсирующемся насыщенном паре, если относить ее к равным, как правило, много меньше, чем при насыщенном, и кроме того еще сильно уменьшается с возрастанием Wärmeübertragung, 148 и далее, изд. Th. Steinkopff, Dresden und Leipzig, 1927 (имеется русский перевод

Ца 9.
(средние величины).

Удельное сопротивление теплоотдаче $\zeta = \frac{1}{\alpha_t}$	Исследователь, литературный источник	Примечания
0,264 0,170 0,143 0,121 0,102	Нуссельт (Nusselt) см. Hütte, 24 немецк. изд., том I, стр. 458	При более низком барометрическом давлении α_t меньше (пропорционально корню квадратному из барометрического давления), также и при более высокой температуре воздуха (обратно пропорционально корню квадратному из абсолютной температуры)
0,050 — 0,250 0,029 — 0,167 0,017 — 0,100 0,012 — 0,067	Гребер (Gröber) Forschungsheft 130	Чем выше температура воздуха, тем меньше α_t . При больших диаметрах труб α_t уменьшается, при меньших диаметрах, наоборот, увеличивается: при половинном диаметре α_t становится больше примерно на 15%, при $\frac{1}{3}$ диаметра — больше примерно на 25%
0,0356 0,0362	Бройдо (Broido) Mechanical Engineering, том 48, стр. 133	Эксплуатационные опыты. Меньшая величина α_t при более низкой температуре объясняется, во всей вероятности, меньшей скоростью течения
(10 атм. ман.) (6 атм. ман.) 0,100 — 0,250 0,125 — 0,333 0,016 — 0,036 0,021 — 0,050 0,0085 — 0,0185 0,011 — 0,025 0,0045 — 0,0100 0,0059 — 0,0137 0,0032 — 0,0072 0,0043 — 0,0094	Пёнсген (Poensgen) Forschungsheft 191/192	α_t уменьшается с возрастанием температуры стенки, а также с уменьшением давления и с увеличением диаметра
1/8000 — 1/9000 1/10000 1/2000 — 1/3000 1/4000 — 1/6000 1/500 1/2000 — 1/5000	Различные исследователи	Средние величины. И здесь также α_t возрастает с увеличением давления. Влияние температуры пока еще не вполне ясно. Сильная зависимость от характера движения, а также от рода стенок. Для шероховатых стенок величины α_t больше, чем для гладких

und Eck, VDI-Zeitschr., 73, 761 и 1517, 1929) теплоотдача при конденсирующемся перегретом паре введенным теплоемкостями. Напротив, коэффициент теплоотдачи при перегретом паре, по видимому, температуры. Вопрос этот пока еще не выяснен до конца. См. также Merkel, Die Grundlagen der Фридрих Меркель, Основы теплопередачи, ГИЗ, 1929, стр. 222 и след.) Прим. пер.

Если теплоотдающее тело целиком окружено со всех сторон поверхностями, воспринимающими лучеиспускание, то выражение для C' принимает следующий вид:

$$C' = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{C_2} + \frac{1}{C} \right)} \quad (13a)$$

Если, как это обычно бывает в топочном пространстве, имеется несколько тел, различно наклоненных друг относительно друга, то необходимо учесть еще и углы наклона. Мы не имеем, однако, возможности подвергнуть здесь более подробному рассмотрению эти, частично очень сложные, взаимоотношения.¹

В таблице 10 приводятся некоторые важные коэффициенты лучеиспускания.

ТАБЛИЦА 10.

Коэффициенты лучеиспускания в кал/м² ч. °С⁴ (по Э. Шмидту).

Материал	Состояние поверхности	Коэффициент лучеиспускания
Абсолютно черное тело	—	4,96
Алюминий	полированный	0,26
„	шероховатый	0,35
Листовое железо	докрасна жарженное	3,40
„	полированное, никелированное	0,27 — 0,30
„	оцинкованное, серого цвета	1,37
Чугун	литейная корка	4,06
„	шероховатая	—
Медь	полированная	0,20
„	валяцованная	3,10
„	покрытая черной окисью	3,86
Листовая сталь	пленка прокатной окалины	3,26
„	толстый шероховатый слой окислов	3,98
„	толстый блестящий слой окислов	4,06
Алюминиевый лак	—	1,98
Эмалевый лак, белоснежный	—	4,50
Лак черный блестящий	—	4,35
Асбодемонт (асбестовый шифер)	шероховатый	4,76
Дубовые доски	строганные	4,44
Кровельный толь	—	4,52
Гипс	—	4,48
Стекло	гладкое	4,65
Резина	мягкая	4,26
Мрамор светлосерый	полированный	4,62
Масло	—	4,17
Бумага	—	4,62
Кирпич красный	шероховатый	4,61

Для топок можно принять с большой степенью приближения $C'=4$, так как слой раскаленного угля имеет коэффициент лучеиспускания, очень близкий к таковому абсолютно черного тела, а коэффициент лучеиспускания листовой стали также равен 4, и так как, наконец, поверхности F_1 и F_2 большей частью приблизительно одинаковы.

¹ См. по этому поводу прежде всего Münzinger, Leistungssteigerung von Grossdampfesseln, изд. J. Springer, Berlin, 1922; далее — очень интересна работа Seibert's Arch. f. Wärmewirtschaft, 9, 180 и след., 1928.

Коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием определяется по формуле:

$$\alpha_x = \left[\left(\frac{t_1 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_2 + 273}{100} \right)^4 \right] \cdot \frac{1}{t_1 - t_2} \cdot C', \quad (14)$$

а теплоотдача лучеиспусканием определяется, аналогично уравнению (11), следующим образом:

$$Q_x = F z (t_1 - t_2) \alpha_x, \quad (15)$$

причем температура стенок t_2 соответствует температуре θ_2 в уравнении (11а).

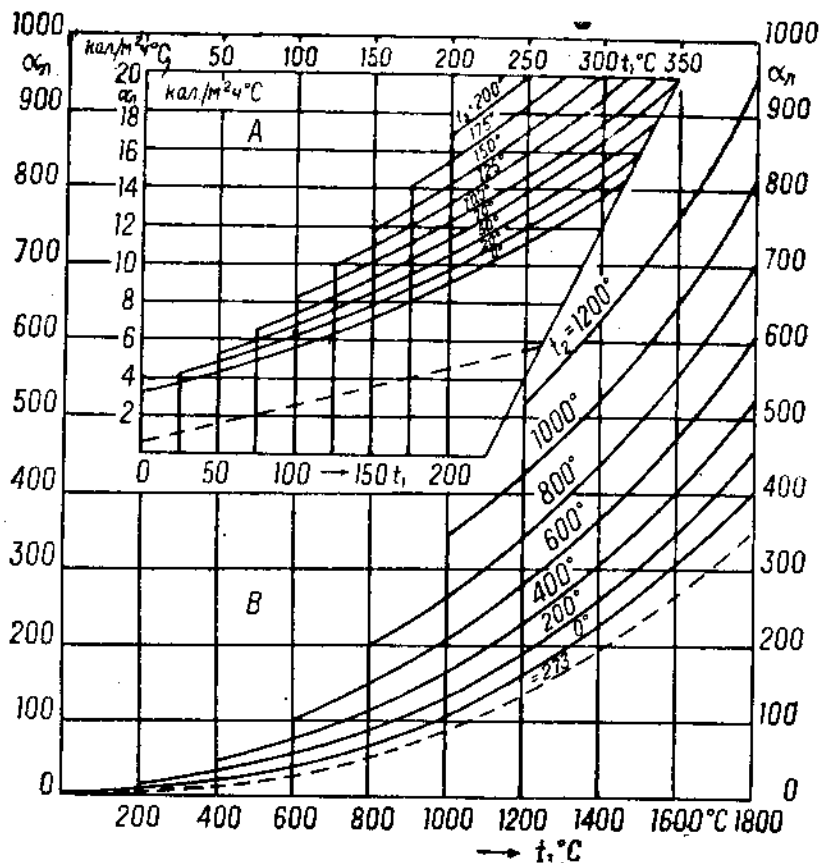


Рис. 32. Коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием в зависимости от температуры t_1 лучеиспускающего тела и температуры t_2 тела, принимающего лучеиспускание; действителен для равных поверхностей обоих тел ($F_1 = F_2$) и для коэффициента лучеиспускания абсолютно черного тела $C' = 4$.

Вверху и слева: диаграмма А для $t_1 = 0 \div 350^\circ \text{C}$ и $t_2 = 0 \div 200^\circ \text{C}$.
Внизу и справа: диаграмма В для $t_1 = 0 \div 1800^\circ \text{C}$ и $t_2 = 0 \div 1200^\circ \text{C}$.

Легко видеть, что в противоположность α_x , коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием α_x зависит только от трех величин, а именно от t_1 , t_2 и C' . Если положить коэффициент лучистого теплообмена $C' = 4$, то получается вполне закономерная зависимость, представленная на рис. 32.

Пример 1. Определить величину коэффициента теплоотдачи α_x при $t_1 = 1400^\circ \text{C}$ и $t_2 = 600^\circ \text{C}$. Из рис. 32В имеем $\alpha_x = 368 \text{ кал/м}^2 \text{ ч. } ^\circ \text{C}$.

Пример 2. Определить величину α_x при $t_1 = 100^\circ \text{C}$ и $t_2 = 75^\circ \text{C}$. Из рис. 32А имеем $\alpha_x = 7,5 \text{ кал/м}^2 \text{ ч. } ^\circ \text{C}$.

Хотя абсолютные величины α_x , изображенные на рис. 32, действительны только для $C' = 4$, представляется возможным, так как коэффициенты теплоотдачи α_x меняются пропорционально C' , определить значения α_x и для других C' простым пересчетом.

В противоположность значениям α , зависящим от большого числа различных факторов, величина лучеиспускания сравнительно гораздо легче поддается количественному подсчету. Очевидно, что α может достигать очень большой величины; чем выше температуры тел лучеиспускающего и воспринимающего лучеиспускание, тем больше и значения α . В парокотельном деле такими поверхностями, воспринимающими лучеиспускание, являются прежде всего поверхности обмуровки и поверхности нагрева. В зависимости от давления в котле они имеют в среднем примерно 200—300 °C, так что величина α находится в зависимости от температуры слоя раскаленного угля, в пределах примерно от 125 до 300 кал/м² ч. °C; величина эта значительно превышает коэффициент теплоотдачи теплопроводностью и конвекцией от топочных газов поверхностям нагрева, имеющий при средних скоростях газов в 5—10 м/сек гораздо меньшие значения (см. таблицу 9). Так как все прочие условия равны, то очевидно, что *теплоотдача лучеиспусканием в топочном пространстве и в первых ходах много больше теплоотдачи теплопроводностью и конвекцией*. Именно по этой причине современное котлостроение идет по пути всемерного увеличения поверхностей нагрева, обогреваемых лучеиспусканием, ибо этот путь ведет к резкому увеличению удельного напряжения поверхностей нагрева. С другой стороны, следует стремиться к достижению возможно более высоких температур в топке, так как при этом лучистая теплоотдача резко возрастает с увеличением температуры t_1 . Предельному стремлению положен прочностью материала обмуровки и величиной допустимого теплового напряжения поверхности нагрева; кроме того в топках с незащищенной обмуровкой потери лучеиспусканием с увеличением температуры естественно также увеличиваются соответственным образом.

Далее необходимо иметь в виду, что в результате увеличения поверхностей, обогреваемых лучеиспусканием, температуры горения очень сильно уменьшаются, вследствие чего, в свою очередь, не только сокращается теплоотдача, но даже, при известных обстоятельствах, не достигается температура воспламенения, а следовательно горение вообще не может происходить. Для того чтобы достигнуть максимума тепла, отдаваемого лучеиспусканием, необходимо, с одной стороны, возможно больше увеличивать поверхность нагрева, обогреваемую лучеиспусканием, с другой — путем высокого подогрева воздуха не допускать снижения температуры горения, вызываемого большими количествами излучаемого тепла.

С другой стороны, лучеиспусканием слоя раскаленного угля обогревается также и обмуровка. Если последняя не снабжена охлаждением (а так оно обычно еще и бывает в настоящее время), то стенки нагреваются до очень высоких температур, лишь немного уступающих температурам в самом топочном пространстве. Значения α в этом случае, как это видно из рис. 32, возрастают до очень больших величин. Так, например, при температуре пламени 1400° C и температуре стенок 1200° C $\alpha = 630$, из чего следует, что как сама теплоотдача, так, следовательно, и тепловые потери лучеиспусканием в данном случае очень велики, а именно

$$Q = \alpha \cdot (t_1 - t_2) = 630 \cdot 200 = 126\,000 \text{ кал/м}^2 \text{ ч.}$$

Сюда присоединяется еще значительная напряженность стенок и их быстрый износ вследствие чрезмерно высоких температур их поверхностей. Если же снова предположить теперь, что обмуровка охлаждается воздухом или водой, например до 800°, то оказывается, что при той же температуре пламени, и несмотря на значительно меньшую величину α (440), потери тепла лучеиспусканием все еще велики; это последнее явление представляет необходимое следствие значительного увеличения разности температур, а именно

$$Q = 440 \cdot 600 = 264\,000 \text{ кал/м}^2 \text{ ч.}$$

Для того чтобы устранить эти во всех случаях крупные потери, а также для того чтобы по возможности защитить обмуровку от действия как высоких температур, так и резких колебаний температур, за последнее время топочные пространства окружают, «одевают» (поскольку это только является допустимым по условиям процесса горения) омываемыми водой поверхно-

¹ Как это будет показано далее, высота температуры стенки зависит от сопротивления стенки теплопередаче. При высоком сопротивлении теплопередаче, т. е. при толстой стенке и хорошей изоляции, температуры стенок высоки; при низком сопротивлении теплопередаче, т. е. при тонких стенках и плохой изоляции, температуры внутренних поверхностей стенок низки.

стями нагрева; этим одновременно достигается еще выгода существенного увеличения действующей, полезной — с точки зрения лучистой теплоотдачи — поверхности нагрева котла.

Из рис. 32 и вышеприведенного примера следует, что температура пламени t_1 двойным образом влияет на теплоотдачу лучеиспусканием. Во-первых, α_x очень сильно возрастает с увеличением t_1 и, во-вторых, возрастает также и разность температур ($t_1 - t_2$).

Далее, с понижением температуры t_2 поверхности воспринимающей лучеиспускание, теплоотдача увеличивается, даже несмотря на то, что α_x становится меньше; происходит это потому, что влияние увеличения разности температур $t_1 - t_2$ больше влияния уменьшения величины α_x . И, наконец, теплоотдача пропорциональна C . Следовательно, количество отданного тепла тем больше, чем выше коэффициенты лучеиспускания как тел лучеиспускающих, так и тел, воспринимающих лучеиспускание.

Лучеиспускание газов. Лишь в последние годы было установлено, что не только слой раскаленного угля, и сами топочные газы отдают значительные количества тепла посредством лучеиспускания. Данные опытов Шака, Нуссельта, Шмидта (в Данциге), Волленберга, Бройдо и др. (Schack, Nusselt, Schmidt, Wohlenberg, Broido) говорят за то, что влиянием лучеиспускания газов пренебрегать не следует. По опытам Бройдо даже при температуре газа в 760°C теплоотдача путем лучеиспускания самого газа составляла еще около 25% от общей величины всей теплоотдачи, и лишь при температуре газа 427°C она уменьшилась до 14%.¹

Влияние *лучеиспускания газов* зависит главным образом от состава газов, от толщины газового слоя и от его температуры. В то время как водород, азот, кислород и многие другие газы почти совершенно не отдают тепла лучеиспусканием, в отношении углекислоты и водяного пара обстоятельства складываются совершенно иначе. По исследованиям Шака углекислота отдает посредством лучеиспускания чрезвычайно значительное количество тепла; Грёбер (Gröber) показал, что большой избыток воздуха, ведущий к потерям уже по целому ряду других причин, потому сильно ухудшает теплоотдачу, что при низком содержании CO_2 лучеиспускание газа крайне незначительно. Шака заключает из своих опытов, что водяной пар точно так же лучеиспускает значительные количества тепла, хотя и много меньше, нежели углекислота; наоборот, самые последние опыты Шмидта (в Данциге), правда, еще не вполне законченные, позволяют прийти к заключению об очень большой величине лучеиспускания водяного пара.²

Наши знания о процессах лучеиспускания газов пока еще крайне отрывочны; тем не менее установленные до настоящего времени факты достаточны для того, чтобы наметить важнейшие отправные точки для дальнейшего развития современной топочной техники. Наиболее существенными моментами являются: высокое содержание CO_2 в топочных газах, возможно большая толщина газового слоя, т. е., иначе говоря, большие поперечные сечения, и малые скорости газов в горячих зонах. Только в последних ходах котла, где лучеиспускание газов не играет почти совершенно никакой роли, выгодны и целесообразны малые сечения и большие скорости газов, способствующие увеличению теплоотдачи теплопроводностью и конвекцией. Наконец, следует также иметь в виду, что высокое содержание водяных паров в топочных газах, хотя и является крайне нежелательным в иных отношениях, увеличивает и притом очень существенно лучеиспускание газов.

В случае пылеугольных топок величина лучеиспускания еще много больше, нежели газовое лучеиспускание CO_2 и H_2O ; однако тут уже нельзя говорить о чисто газовом лучеиспускании, так как эффект лучеиспускания обусловливается главным образом мельчайшими частицами раскаленной пыли. Впрочем, и здесь могут быть применены те же принципиальные соображения, что и в отношении чисто газового лучеиспускания.

3. Общая (суммарная) теплоотдача.

На практике большей частью представляется необходимым установить величину всей теплоотдачи в целом или, иначе говоря, суммарной или общей теплоотдачи, чтобы затем иметь возможность определить коэффициент полезного действия, мощность и т. п. всей котельной установки или ее отдельных частей. Также и для подсчета тепловых потерь через обмуровку котла, потерь теплопроводностью и лучеиспусканием отдельных стен, трубопроводов и т. п. большей частью достаточно знания величины суммарных, общих потерь. В этом слу-

¹ См. Mechanical Engineering, 48, 133, 1926; далее Arch. f. Wärmewirtschaft, 7, 299, 1926.

² См. J a k o b, VDI-Zeitschrift, 72, 343, 1928.

ТАБЛИЦА 11.

Коэффициенты теплопроводности важнейших строительных и изоляционных материалов при 20—40°C (средние значения).

Род вещества	Удельный вес кг/м ³	Теплоемкость кал/кг	Коэффициент теплопроводности λ кал/м ч. °C	Удельное теплосопротивление $w = \frac{1}{\lambda}$	Примечания
Металлические строительные материалы:					
чугун	7 200	0,130	30—45	0,033—0,022	
сталь	7 800	0,130	30—55	0,033—0,018	
латунь	8 600	0,095	74—79	0,0135—0,0127	
алюминий	2 800	0,210	175	0,0057	
медь	8 600	0,094	260—340	0,0039—0,0029	
Неметаллические строительные материалы:					
дуб	700—1 000	0,570	0,31	3,25	сухой
сосна	350—600	0,650	около 0,30	около 3,38	"
известняк	2 000	0,190	0,6—0,8	1,67—1,25	
бетон	2 100	0,210	0,65—0,75	1,54—1,33	
капли	1 450	0,200	0,34—0,44	2,94—2,28	при 200° 0,52
шамот	1 700	0,200	0,40—0,50	2,5—2	" 600° 0,66
					" 1 000° 0,88
фарфор	2 350	0,250	0,9	1,11	резко различно в зависимости от состава
стекло	около 2 500	0,120—0,170	0,5—0,80	2—1,25	
шафер	2 800	0,180	1,1—1,3	0,91—0,77	перпендикулярно к слоям

Род вещества	Удельный вес г/см ³	Теплоемкость кал/кг	Коэффициент теплопроводности λ кал/м ч. °C	Удельное теплосопротивление $w = \frac{1}{\lambda}$	Примечания
Изоляционные материалы:					
пробка	45—150	0,330	0,03—0,07	33,3—14,3	
кисельгур (лифторная земля, тропел) .	250—350	0,210	0,06—0,12	16,7—8,35	
рыхлый обожженный тропеловый кирпич	200—450	0,210	0,06—0,08	16,7—12,5	
асбест	580	—	0,06—0,15	16,7—6,67	
торфяная мелочь	100—190	—	0,04—0,07	22,5—14,3	
овечья шерсть	135	—	0,04	22,5	
Прочие твердые вещества:					
каменный уголь	1 200—1 500	0,310	0,12—0,15	8,35 — 6,67	
графит	1 900—2 300	0,200	4,2	0,238	
котельный камень (с большим содержанием гипса)	весьма переменные	—	1—3	1—0,33	
котельный камень (с большим содержанием кремня)		—	0,1—1	10—1	
Жидкости и газы:					
вода	1 000.	1,000	0,52	1,92	
масла разные	920	0,420	0,1—0,15	10—6,67	
ртуть	13 600	0,033	5,4—7,1	0,185—0,141	
воздух	—	—	0,021	47,7	
окись углерода	—	—	0,020	50	
углекислота	—	—	0,013	77	
водород	—	—	0,15	6,67	
водяной пар	—	—	0,02	50	при 100°

чае целесообразно пользоваться для теплоотдачи от стенки жидкости или газу выражением, получающимся из уравнений (11) и (15):

$$Q_{\text{обм}} = Fz(\vartheta_2 - t_2) \cdot (\alpha_r + \alpha_x) = Fz(\vartheta_2 - t_2) \cdot \alpha_{\text{обм}}. \quad (16)$$

Величина общей теплоотдачи от газов или жидкостей какой-либо стенке выразится соответственно:

$$Q_{\text{обм}} = Fz(t_1 - \vartheta_1) \cdot (\alpha_r + \alpha_x) = Fz(t_1 - \vartheta_1) \cdot \alpha_{\text{обм}}. \quad (16a)$$

Значения α_r и α_x можно заимствовать из таблицы 9 и рис. 32. Для некоторых целей достаточно применения приближенных значений. Так, например, можно положить для наружных стен, в зависимости от силы ветра и наружной температуры, $\alpha_{\text{обм}} = 20 - 30$, для внутренних вертикальных стен $\alpha_{\text{обм}} = 5$, для горизонтальных стен, при теплоотдаче снизу вверх, $\alpha_{\text{обм}} = 7$, при теплоотдаче же сверху вниз $\alpha_{\text{обм}} = 5$.

4. Теплопроводность.

Теплопередача, однако, зависит не только от коэффициентов теплоотдачи α_r и α_x , но также и от теплопроводности стенки, разделяющей две среды. Для плоской стенки толщиной δ м, площадью F м² и с температурами поверхностей ϑ_1 и ϑ_2 величина теплопередачи составляет:

$$Q = Fz(\vartheta_1 - \vartheta_2) \frac{\lambda}{\delta}, \quad (17)$$

где λ обозначает коэффициент теплопроводности в кал/м ч. °С.¹ Расчет теплопередачи для криволинейных стенок сложнее, ибо внутренняя поверхность у них меньше внешней. Тут приходится учитывать величины внешнего и внутреннего радиусов, в результате чего получаются в достаточной мере громоздкие формулы, от приведения коих мы здесь воздерживаемся тем более, что во многих случаях, в особенности при больших радиусах кривизны и тонких стенках, можно пользоваться уравнением (17), дающим в этих случаях совершенно достаточную точность. Величина коэффициента теплопроводности, как это видно из таблицы 11, чрезвычайно различна в зависимости от рода вещества. Кроме того его величина зависит от температуры; для большинства веществ коэффициент теплопроводности возрастает с увеличением температуры.

Если через стенку необходимо передавать большие количества тепла, то следует применять стены минимальной толщины и из материалов, имеющих очень большие коэффициенты теплопроводности. Поэтому, например, сталь является в высшей степени целесообразным материалом для изготовления тепловоспринимающих поверхностей нагрева, так как, во-первых, она обладает очень высоким коэффициентом теплопроводности, а во-вторых, в виду высокой механической прочности материала, возможно допустить минимальную толщину стенок. Наоборот, для уменьшения теплопередачи целесообразно применять материалы с малыми коэффициентами теплопроводности и прежде всего так называемые изоляционные материалы.

Однако важнейшим условием хорошей теплопередачи в паровых котлах является чистота поверхности нагрева. Котельная накипь изнутри и загрязнение поверхностей нагрева сажей, летучей золой и т. п. снаружи могут чрезвычайно серьезно ухудшить теплопередачу. Как это видно из таблицы 11, коэффициент теплопроводности котельного камня в 30—50 раз меньше, а в случае котельного камня с высоким содержанием кремния даже во много сот раз меньше коэффициента теплопроводности стали, так что теплопередача теплопроводностью через составную (сложную) стенку из стали и котельного камня, даже при самом ничтожном отложении котельной накипи, составляет лишь незначительную долю теплопередачи теплопроводностью через чистую стальную стенку. Помимо больших тепловых потерь и существенного снижения производительности котла, в результате отложения значительного и притом различного по толщине слоя накипи могут также очень легко возникнуть обусловленные очень высокими и к тому же различными температурами стенок опасные местные напряжения в железе котла, которые при неблагоприятном стечении обстоятельств способны привести к образо-

¹ Коэффициент теплопроводности λ представляет собою то число калорий, которое проходит в течение одного часа сквозь стенку толщиной 1 м и площадью 1 м², если разность температур между обеими поверхностями стенки составляет 1° С.

ванию отдулин, трещин, к чреватым последствиями авариям, взрывам и т. п. Рис. 33 показывает, как значительно могут иной раз возрастать температуры вследствие образования котельной накипи.

Процесс передачи тепла теплопроводностью в жидких и газообразных телах много сложнее процесса передачи тепла теплопроводностью в твердых телах; это становится вполне

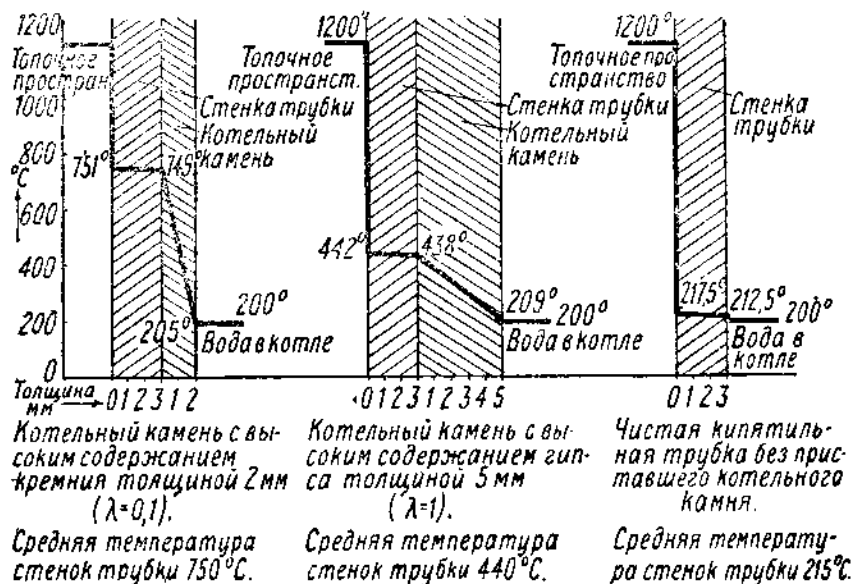


Рис. 33. Тепловой поток сквозь кипятельные трубы котла при наличии котельного камня и в отсутствии такового.

ясным, если принять во внимание, что здесь, так же как и при процессе теплоотдачи, при наличии известных условий играют очень большую роль явления конвекции и лучеиспускания. Можно даже, не греша особенно против истины, сказать, что действительные, экспериментально установленные коэффициенты теплопроводности, вообще говоря, почти совершенно не характеризуют и не определяют процессов распространения тепла в жидких и газообразных средах.

Пожалуй, наиболее разительным примером только что высказанного положения может служить воздух, являющийся, как известно, одним из лучших тепловых изоляторов, существующих в природе. Из рис. 34 видно, что действительный коэффициент теплопроводности λ (коэффициент собственно теплопроводности как таковой) чрезвычайно мал. Однако в большинстве случаев теплопроводность как бы увеличивается конвекцией и притом очень значительно. Если обозначить через λ_k и λ_d коэффициенты теплопроводности, которые должно было бы иметь тело, заполняющее пространство, фактически занимаемое воздухом, чтобы отводить такие же количества тепла, какие переносятся воздухом путем конвекции и лучеиспускания, то получим следующее выражение для общего действительного коэффициента теплопроводности:

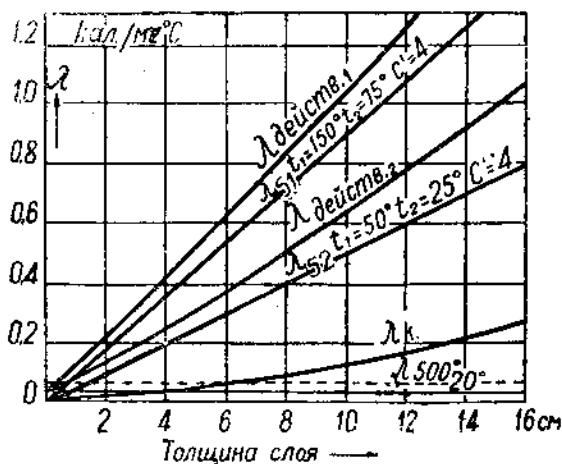


Рис. 34. Коэффициент теплопроводности воздуха в зависимости от толщины слоя последнего.

$$\lambda_{\text{действ}} = \lambda + \lambda_k + \lambda_d.$$

(18)

Коэффициент теплопроводности λ_a вычисляется с помощью приведенного в предыдущем разделе уравнения Стефана-Больцмана:

$$\lambda_a = \frac{\delta}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C}} \cdot \left[\left(\frac{t_1 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_2 + 273}{100} \right)^4 \right] \cdot \frac{1}{t_1 - t_2} = \left. \begin{aligned} &= \delta C' \left[\left(\frac{t_1 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_2 + 273}{100} \right)^4 \right] \cdot \frac{1}{t_1 - t_2} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

где, помимо уже ранее указанных обозначений, δ — толщина слоя воздуха в м, а t_1 и t_2 — пограничные температуры.

На рис. 34 величины λ , λ_k , λ_a и $\lambda_{\text{дейст.}}$ нанесены в зависимости от толщины слоя, причем величины λ_k заимствованы из данных опытов Шмидта в Данциге.¹ Рисунок показывает, что величина собственно λ оказывает заметное влияние лишь при самых незначительных толщинах воздушного слоя. Вообще же говоря, преобладающее значение имеет лучеиспускание, даже при сравнительно низких температурах. Предпосылкой для этого являются, правда, высокие значения коэффициентов лучеиспускания обеих пограничных поверхностей, которые были здесь приняты равными $C_1 = C_2 = 4,5$, так что $C' = 4$, что является цифрой обычной для большинства строительных материалов (см. таблицу 11). При более низких значениях C' значения λ_a также становятся пропорционально меньше.

5. Теплопередача.

Вся теплопередача в целом, состоящая из процессов теплоотдачи, а также перехода тепла через стенку путем теплопроводности, может быть подсчитана с помощью следующего уравнения:

$$Q = Fz(t_1 - t_2) \cdot k. \quad (20)$$

Входящие в это уравнение величины F , z , t_1 и t_2 известны уже по предыдущим уравнениям, а величина k представляет собою так называемый *коэффициент теплопередачи* (в кал/м² ч. °C), охватывающий все те сопротивления, которые должны быть преодолены при теплопередаче. Для простой стенки толщиной δ с коэффициентом теплопроводности λ получается следующее выражение:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}. \quad (21)$$

Для многослойной составной стенки (например, поверхность нагрева с отложением сажи с одной стороны и слоя котельной накипи — с другой) с толщинами отдельных составляющих стенок δ_1 , δ_2 и δ_3 получается следующее выражение:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_2}. \quad (21a)$$

В таблице 12 приведены некоторые практически важные величины k . Разумеется, это только примерные средние величины, ибо коэффициенты теплопередачи меняются от случая к случаю; непостоянство это обусловлено их зависимостью от коэффициентов теплоотдачи и теплопроводности веществ, в среде коих идет процесс перехода тепла, от температур, скорости и т. д.

Исходя из уравнений для процессов теплоотдачи, теплопроводности и теплопередачи, можно вывести еще целый ряд очень важных закономерностей и зависимостей, действительных, впрочем, только для установившихся процессов теплообмена, т. е. для таких случаев, когда количества тепла, оттекающего вследствие теплоотдачи и теплопроводности, все время остаются одни и те же. Так, например, из уравнений

$$Q = Fz(t_1 - \theta_1) \alpha_1 \quad (11)$$

$$Q = Fz(\theta_1 - \theta_2) \frac{\lambda}{\delta} \quad (17)$$

¹ См. VDI-Zeitschrift, 51, 1395, 1927, а также Arch. f. Wärmewirtschaft, 8, 346, 1927.

$$Q = Fz(\theta_2 - t_2)\alpha_2 \quad (11a)$$

$$Q = Fz(t_1 - t_2)k \quad (20)$$

и основного уравнения теплопередачи

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (21)$$

можно вывести зависимость между α_1 , λ , α_2 , k и четырьмя температурами, легко поддающуюся графической интерпретации. Таким образом, если известны 4 величины, можно без труда графически определить остальные 4 величины. Метод этот вполне приложим и к более сложным случаям, например к многослойной составной стенке. Для примера на рис. 35 показано графическое определение теплового потока через стенку топочного пространства.

Кроме того с помощью уравнений (11), (11a) и (17) можно вывести простые расчетные формулы для α_1 и α_2 :

$$\alpha_1 = \frac{\lambda}{\delta} \cdot \frac{\theta_1 - \theta_2}{t_1 - \theta_1} \quad (22a)$$

$$\alpha_2 = \frac{\lambda}{\delta} \cdot \frac{\theta_1 - \theta_2}{\theta_2 - t_2} \quad (22a)$$

Таблица 12.

Средние коэффициенты теплопередачи, действительные для малых скоростей движения воздуха и для средних внешних температур (при больших скоростях движения воздуха, очень низких внешних температурах и т. п. величины k увеличиваются примерно на 30 — 50%).

Род металла или конструкции	Коэффициент теплопередачи k в кал/м ² ч. °С и удельное сопротивление теплопередаче $W = \frac{1}{k}$ для стенок различной толщины ¹				Примечания
	10 см	25 см	50 см	100 см	
Кирпичная кладка	2,5 (0,4)	1,7 (0,59)	1,1 (0,91)	0,65 (1,54)	
Бетон	3,4 (0,29)	2,4 (0,42)	1,7 (0,59)	1,2 (0,83)	
Плитняк и нетесанный камень	—	2,7 (0,37)	1,9 (0,53)	1,3 (0,77)	
Потолки и полы	—	1,8—1,6 (0,55—0,62)	—	—	
То же	—	1,5—2,2 (0,67—0,45)	—	—	Из железобетона
Крыши	—	1,3—3,2 (0,77—0,31)	—	—	
Крыши из волнистого железа	—	10 (0,1)	—	—	Из обрешетки
Двери	—	2—3 (0,5—0,33)	—	—	
Простые (ординарные) окна	—	5 (0,2)	—	—	
Двойные окна	—	3 (0,33)	—	—	

¹ Цифры в скобках представляют собою величины удельного сопротивления теплопередаче.

Пользуясь этими формулами, можно сразу же подсчитать коэффициенты теплоотдачи, если только известны температуры обеих поверхностей стенки, температура воздуха, толщина и коэффициент теплопроводности стенки.

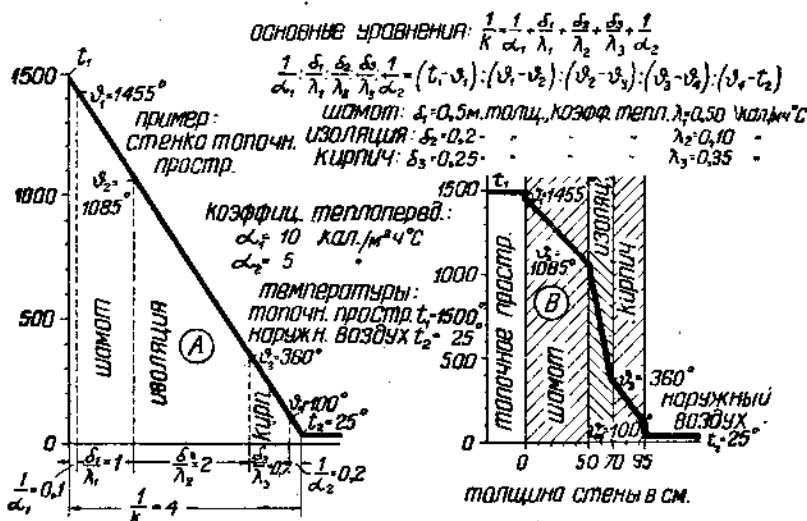


Рис. 35. Графическое изображение теплового потока сквозь стенку топочного пространства.

6. Термические сопротивления.

Совсем вкратце укажем здесь еще на то обстоятельство, что, как это впервые предложил Вирц (Wierz), а недавно подтвердил Меркель (Merkel),¹ во многих случаях гораздо удобнее оперировать с удельными термическими сопротивлениями, т. е. с обратными величинами коэффициентов теплоотдачи, теплопроводности и теплопередачи; аналогичное положение вещей мы имеем, например, в электротехнике — в отношении электросопротивления, в механике — в отношении сопротивления трения и т. п. Формулы становятся при этом гораздо проще; так, например, величина W общего удельного сопротивления теплопередаче для составной многослойной стенки будет:

$$W = \zeta_1 + w_1\delta_1 + w_2\delta_2 + w_3\delta_3 + \zeta_2, \quad (23)$$

где ζ_1 и ζ_2 — удельные сопротивления теплоотдаче ($= \frac{1}{\alpha_1}$ и $\frac{1}{\alpha_2}$), а w — удельное теплосопротивление ($= \frac{1}{\lambda}$). Уравнение (23) много проще, яснее и удобнее для расчетов, нежели соответствующее ему уравнение (21а).

К сожалению, пользование цифрами удельных термических сопротивлений пока мало пришло на практике. Тем не менее, соответствующие их значения приведены в таблицах 9, 11 и 12; они применены также и во всех дальнейших подсчетах в этой книге, когда это вело к упрощению расчета.²

7. Теплопередача в ходах котла (пример).

Чтобы показать, каким именно образом практические вопросы целесообразно разрешаются с помощью уравнений и графиков, приведенных в предшествующем и этом отделах «Горение топлива» и «Теплопередача», ниже помещается подробный пример из парокотельной практики.

¹ См. по этому вопросу: Wierz, Gesundheitsingenieur, 48, 457, 1925; Praetorius, Arch. f. Warmewirtschaft, 7, 199, 1926; Merkel, Grundlagen der Wärmeübertragung, стр. 186, изд. Th. Steinkopff. (Есть русский перевод: Меркель, Основы теплопередачи, стр. 276, Гиз, 1929. Прим. пер.)

² Необходимо здесь отметить, что оперирование очень малыми удельными термическими сопротивлениями может оказаться иной раз неудобным, в виду большого числа знаков после запятой. Так, например, для теплоотдачи от конденсирующегося пара твердой стенке $\zeta = 0,000125$, ибо $\alpha = 8000$.

Пример. Общая поверхность нагрева котла с наклонными кипяtilьными трубками и с механической решеткой конвейерного типа составляет, без перегревателя и экономайзера, 203,3 м², из числа коих на 1-й ход падает 71,5 м², на 2-й ход 56,6 м² и на 3-й и 4-й ходы 75,2 м². Поверхность нагрева 1-го хода, на которую непосредственно падает лучеиспускание с колосниковой решетки, составляет в проекции 4,83 м².

При тщательно обставленном опыте в установившемся состоянии было сожжено 726 кг/ч рурского угля с низшей теплотворной способностью 6965 кал/кг и содержанием влаги всего лишь 2%. Давление в котле составляло в среднем 8,5 атм. ман. = 9,5 атм. абс. Был получен нижеследующий тепловой баланс:

Полезная теплота	5 240	кал/кг = 3 800 200	кал/ч
Потери с теплотой отходящих газов	1 183	" = 860 000	"
Потери с очаговыми остатками	130	" = 94 500	"
Потери вследствие неполноты горения и сажей	17	" = 12 300	"
Потери вследствие лучеиспускания и теплопроводности	395	" = 287 000	"
Всего затрачено тепла	6 965	кал/кг = 5 054 000	кал/ч.

Потери вследствие лучеиспускания и теплопроводности распределились между отдельными частями котла следующим образом (распределение потерь было установлено на основании замеров температур поверхностей обмуровки котла, произведенных в соответствующих точках последней):

Лучеиспускание и теплопроводность обмуровки 1-го хода	35	кал/кг = 25 400	кал/ч
" " " " 2-го "	54	" = 39 200	"
" " " " 3-го и 4-го ходов	42	" = 30 500	"
" " " " прочих частей котла и обмуровки топочного пространства	264	" = 191 900	"
		295 кал/кг = 287 000	кал/ч

Далее за отдельными ходами котла были замерены следующие температуры топочных газов:

Температура газов за 1-м ходом	635°
" " " 2-м "	463°
" " " концом котла	335°

На основании всех этих данных нужно теперь определить количества тепла, переданные в отдельных ходах котла поверхностям нагрева посредством лучеиспускания и теплопроводности, а также установить соответственные коэффициенты теплоотдачи.

Прежде всего необходимо установить температуру горения. Так как коэффициент избытка воздуха был в среднем $\alpha = 1,4$ (содержание CO_2 равнялось 13%), то, пользуясь рис. 26, находим для низшей теплотворной способности $Q_n = 6965$ кал/кг теоретическую температуру $t_r = 1650^\circ \text{C}$. Для котлов с наклонными кипяtilьными трубками лучистая теплоотдача составляет около 20%, так что действительная температура, согласно рис. 28, оказывается равной приблизительно 1370°C .

Теперь можно установить, сколько же именно тепла было отдано в общей сложности в каждом отдельном ходе котла. Так как температуры за ходами известны, то представляется возможным определить с их помощью теплосодержания топочных газов. Рис. 14 дает для $Q_n = 6965$ кал/кг и $\alpha = 1,4$ объем дымовых газов $V_r = 10,7$ м³ на 1 кг топлива, а рис. 22 дает среднюю теплоемкость $C_{р ср}$ сухих топочных газов¹ между t° и 0° при 13% CO_2 : при 635°C $C_{р ср} = 0,341$, при 463°C она равна 0,336 и при $335^\circ \text{C} \rightarrow 0,331$. Таким образом, теплосодержание топочных газов определится следующими цифрами:

Теплосодержание за 1-м ходом	$0,341 \cdot 10,7 \cdot 635 = 2305$	кал/кг топлива = 1 670 000	кал/ч
" " " 2-м "	$0,336 \cdot 10,7 \cdot 463 = 166$	" = 1 208 000	"
" " " концом котла	$0,331 \cdot 10,7 \cdot 335 = 1183$	" = 860 000	"

Непосредственно в самом топочном пространстве потеряно с очаговыми остатками 130 вследствие неполноты сгорания 17 и вследствие лучеиспускания и теплопроводности 264 кал/кг. Теплосодержание топочных газов перед 1-м ходом составляет таким образом: $6965 - (130 + 17 + 264) = 6554$ кал/кг топлива = 4 755 300 кал/ч.

Теперь, наконец, можно вычислить количества тепла, отданные в ходах котла. Получаем:

Теплота, отданная в 1-м ходу	$6554 - 2305 = 4249$	кал/кг топлива = 3 085 300	кал/ч
" " " во 2-м ходу	$2305 - 166 = 2139$	" = 1 540 000	"
" " " в 3-м и 4-м ходах	$1662 - 1183 = 479$	" = 348 000	"
" " " во всех ходах	5 71	кал/кг топлива = 3 973 300	кал/ч

¹ Влажными дымовыми газами можно в данном случае пренебречь в виду крайне ничтожного содержания влаги и водорода в сжигаемом угле.

Некоторая часть всей теплоты отдается обмуровке ходов и таким образом теряется. Если вычесть эти количества теряющегося тепла, то получим количества полезно отданного тепла:

Полезная теплота в 1-м ходу	4 249 — 35 = 4 214 кал/кг топлива = 3 059 900 кал/ч
” ” во 2-м ходу	613 — 54 = 559 ” ” = 422 800 ”
” ” в 3-м и 4-м ходах	479 — 42 = 437 ” ” = 317 500 ”
” ” во всех ходах	5 240 кал/кг топлива = 3 800 200 кал/ч

Из всего этого следует, что огромная часть тепла передается в 1-м ходу. Считая в процентах, получаем:

Теплопоглощение 1-го хода	80,5%
” 2-го ”	11,2%
” 3-го и 4-го ходов	8,3%

В виду неравенства поверхностей нагрева отдельных ходов и в целях создания возможности сравнительной оценки представляется целесообразным пересчитать количества переданного тепла на 1 м² в час; тогда получим:

Теплопоглощение 1-го хода	42 800 кал/м ² ч.
” 2-го ”	7 430 ”
” 3-го и 4-го ходов	4 200 ”

Среднее теплопоглощение в 1-м ходу таким образом более чем в 10 раз превышает среднее теплопоглощение в 3-м и 4-м ходах. Если же сравнить между собой самую переднюю часть первого хода, подвергающуюся непосредственному действию лучеиспускания решетки, с 3-м и 4-м ходами, то получается, как это будет показано ниже, еще много более значительная разница.

Перейдем теперь к определению коэффициентов теплоотдачи.

а) Теплоотдача лучеиспусканием.

Вычисленная действительная температура горения $t_r = 1370^\circ \text{C}$. Температура поверхности нагрева, подвергающейся непосредственному действию лучеиспускания, при трубках без отложений котельной накипи может быть принята (с достаточной степенью приближения) равной температуре воды плюс примерно 5°C (см. рис. 33, правая часть. Так как температура воды при среднем давлении в 9,5 атм. абс. составляет $176,8^\circ \text{C}$ (по М о л л е, Таблицы водяного пара), то температура трубок равна, следовательно, $176,8 + 5 = 181,8^\circ \text{C}$. Для $t_1 = 1370^\circ \text{C}$ и $t_2 = 181,8^\circ \text{C}$ имеем из рис. 32 $\alpha_1 = 245 \text{ кал/м}^2 \text{ ч. } ^\circ \text{C}$. Таким образом при величине поверхности, подвергающейся прямому действию лучеиспускания, $F = 4,83 \text{ м}^2$ общее количество тепла, отдаваемого лучеиспусканием, составит, согласно уравнению (15):

$$Q_A = F \alpha (t_1 - t_2) \cdot a = 4,83 \cdot 1 (1370 - 181,8) \cdot 245 = 1400000 \text{ кал/ч.},$$

а напряжение поверхности нагрева будет:

$$B = \frac{Q_A}{F} = \frac{1400000}{4,83} = 290000 \text{ кал/м}^2 \text{ ч.}$$

Это отвечает паропроизводительности примерно $\frac{290000}{485} = 600 \text{ кг/м}^2 \text{ ч.}$, если допустить, что в этой части поверхности нагрева вода уже нагрета до температуры кипения и что, следовательно, к ней подводится только теплота испарения (485 кал/кг).¹

Напряженность этой части поверхности нагрева таким образом чрезвычайно велика и превосходит среднюю нагрузку 3-го и 4-го ходов (4200 кал/м² ч.) почти в 70 раз.²

б) Теплопередача конвекцией и теплопроводностью.

Влиянием лучеиспускания газов в ходах топки мы пренебрегаем и считаем, что на поверхностях нагрева, не подвергающихся непосредственно действию лучеиспускания, все тепло передается конвекцией и теплопроводностью.

Прежде всего на основании температур, замеренных за ходами, вычисляются средние температуры в ходах.

Далее необходимо принять во внимание, что найденная нами цифра представляет собою теплоотдачу только лучеиспусканием. Однако сюда же присоединяется еще, и притом довольно значительная, теплопередача конвекцией и теплопроводностью, которая подсчитана ниже.

¹ См. рис. 41 и 42 на стр. 89.

² При расчете водотрубного котла высокого давления с вертикальными трубками Зейберт (Seibert) пришел к почти столь же высокой цифре (216 000 кал/м² ч.); см. Arch. f. Warmewirtschaft, 9, 188, 1928.

Температура топочного пространства	1 370° C
Температура за 1-м ходом	635°
Средняя температура в 1-м ходу	$\frac{1370 + 635}{2} = 1\,002,5^\circ$
Температура за 2-м ходом	463°
Средняя температура во 2-м ходу	$\frac{635 + 463}{2} = 549^\circ$
Температура за концом котла	335°
Средняя температура в 3-м и 4-м ходах	$\frac{463 + 335}{2} = 399^\circ$

Теперь можно приступить к вычислению разностей температур, для чего необходимо предварительно установить температуры поверхностей нагрева в отдельных ходах. Питательная вода подводится к котлу нагретой до 120° C, быстро смешивается с находящейся в котле водой, нагретой до кипения, и протекает затем сквозь ходы. Поэтому можно принять с достаточно большой степенью приближения, что почти повсеместно у поверхностей нагрева преобладает температура кипения, так что, следовательно, и сами стенки поверхностей нагрева, точно так же как и поверхность нагрева, на которую падает прямое лучеиспускание, имеют температуру (приблизительно) $\vartheta_1 = 180^\circ$ C. Таким образом получаем:

Перепад температуры в 1 ходу	1002,5 — 180 = 822,5° C
" " " 2 "	549 — 180 = 369°
" " " 3 и 4 ходах	399 — 180 = 219°

Коэффициенты теплоотдачи определяются на основании уравнения (11):

$$Q_T = Fz (t_1 - \vartheta_1) \cdot \alpha_T$$

$$\alpha_T = \frac{Q_T}{Fz (t_1 - \vartheta_1)}$$

В отношении 1-м хода необходимо помнить, что здесь следует откинуть количество тепла, отданное лучеиспусканием. Общее количество полезного тепла в 1-м ходу определилось в размере 3 059 900 кал/ч, а количество лучистого тепла — в размере 1 400 000 кал/ч. Теплопередача конвекцией и теплопроводностью равняется, следовательно, 1 659 900 кал/ч. Для остальных ходов действительно вычисленные ранее цифры.

Коэффициент теплопередачи конвекцией и теплопроводностью в 1-м ходу:

$$\frac{1\,659\,900}{71,5 \cdot 822,5} = 28,2 \text{ кал/м}^2 \text{ ч. } ^\circ\text{C}.$$

Коэффициент теплопередачи конвекцией и теплопроводностью во 2-м ходу:

$$\frac{422800}{56,6 \cdot 369} = 20,1 \text{ кал/м}^2 \text{ ч. } ^\circ\text{C}.$$

Коэффициент теплопередачи конвекцией и теплопроводностью в 3-м и 4-м ходах:

$$\frac{317\,500}{75,2 \cdot 219} = 19,15 \text{ кал/м}^2 \text{ ч. } ^\circ\text{C}.$$

Отсюда следует, что и чрезвычайно высокой нагрузке 1-м хода от лучеиспускания прибавляется еще очень существенная нагрузка за счет теплопроводности и конвекции.

Доля лучеиспускания во всей теплопередаче составляет:

$$\frac{1400000}{3800200} = 36,9\%.$$

V. ТЕРМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОДЫ И ВОДЯНОГО ПАРА. ¹

Обозначения.

γ'	кг/л	— удельный вес жидкости,
γ''	кг/м ³	— " " пара,
v'	л/кг	— объем жидкости,
v''	м ³ /кг	— " " пара,
p	кг/см ² а.м. абс.	— давление пара,
t_a	°C	— температура испарения,
t_n	°C	— " пара,

¹ Подробные данные о парах воды приводятся в книге: А. А. Радциг, Формулы, таблицы и диаграммы для водяного пара, 3-е изд., Ленинград, 1931. Прим. ред.

t_n	°C	— температура воды,
i'	кал/кг	— теплосодержание жидкости,
i''	"	— " пара,
$i'_{н.п}$	"	— " насыщенного пара,
$i''_{п.п}$	"	— " перегретого пара,
$i''_{пер}$	"	— теплота перегрева пара,
r	"	— теплота испарения.

В настоящее время в качестве рабочего тела в паровых котлах применяется почти исключительно вода. Лишь в самое последнее время был поставлен ряд опытов с другими веществами, которые обладают в некоторых отношениях более выгодными термическими и термодинамическими свойствами, нежели вода и водяной пар; из числа таких веществ можно назвать ртуть, окись дифенила ($C_6H_5)_2O$, сернистую кислоту SO_2 и аммиак NH_3 . Впрочем, если не считать воды, некоторое практическое значение в парокотельном деле получила только ртуть, и то ее роль по сравнению с ролью воды совершенно ничтожна. Таким образом, первое место среди всех теплоносителей, применяемых в паротехнике, пока бесспорно принадлежит воде.

По сравнению со всеми другими веществами, которые могут быть использованы для получения пара, вода обладает целым рядом существенных преимуществ. Первым и наиболее важным является то обстоятельство, что вода встречается почти повсеместно на земном шаре в больших количествах и притом в таком состоянии, которое хотя лишь редко допускает непосредственное использование ее в паровом котле, но соответствующей обработкой (очисткой) может быть все же так видоизменено, что производство пара пойдет без особых трудностей и перебоев.

Термические свойства воды также представляются в целом ряде отношений весьма благоприятными. При средних давлениях вода может быть с успехом применяема как для силовых, так и для отопительных целей и сравнительно очень хорошо используется в области вакуума. Некоторыми недостатками, свойственными воде, являются только ее низкие температуры кипения при высоких давлениях. Действительно, как известно, наивысшая достижимая при критическом давлении (225 атм.) температура кипения воды составляет лишь 374° С. Если же принять во внимание, что при современном состоянии техники применение в котлах и паровых машинах пара с температурой 400—450° не представляет никаких затруднений, то становится совершенно понятным стремление ввести в практику вещества с более высокими температурами испарения, применение которых несомненно обеспечило бы значительное повышение термического к. п. д. паровых машин. Перегрев водяного пара до очень высоких температур, несмотря на все большое значение, которое он имеет с производственно-технической точки зрения, представляется в чисто термодинамическом отношении лишь весьма скромным паллиативом, как это можно легко видеть из общеизвестной диаграммы «температура—энтропия» (диаграмма T-S). Точно так же и в химической промышленности нередки случаи, когда необходимые весьма высокие температуры нагрева не могут быть достигнуты путем применения воды и насыщенного пара даже самых высоких давлений.

Тем не менее все эти отдельные частные случаи являются все же исключениями и, как таковые, только подтверждают общее правило, которое может быть сформулировано следующим образом: *из числа всех теплоносителей вода является: 1) наиболее дешевым, 2) почти повсеместно распространенным в неограниченных количествах и 3) в области средних и низких давлений термодинамически наиболее выгодным рабочим телом; поэтому как в настоящее время, так и в ближайшем будущем она есть и останется основным рабочим телом для паровых котлов и паровых машин.*

Если нагревать воду в открытом сосуде, т. е. при неизменном атмосферном давлении (1 атм. абс.), то температура ее поднимается до 100° С; затем начинается испарение, которое, при непрерывном подводе тепла, продолжается до тех пор, пока вся вода не испарится. В течение всего процесса испарения температура остается равной в точности 100° С и не повышается даже при самом усиленном подводе тепла. Интенсивность, напряженность подвода тепла влияет только на скорость процесса испарения.

Если же нагревать воду в закрытом сосуде, позаботившись предварительно о том, чтобы пар не мог из него уходить, то давление в сосуде будет возрастать по мере увеличения количества образующегося пара, так как удельный объем пара больше удельного объема воды. Однако с повышением давления возрастает, в свою очередь, и температура воды; поэтому при повышенных давлениях пара воду можно нагревать до температур много больших

100° С, причем каждому давлению пара отвечает вполне определенная температура испарения и повысить ее нельзя ни при каких обстоятельствах. Если бы, напротив, мы начали нагревать воду при некотором пониженном давлении (вакууме), то она закипела бы уже при температуре меньше 100° С, например при давлении 0,5 атм. абс. она закипела бы при 80,9°; если вакуум поддерживается все время, то никакой, даже самый усиленный подвод тепла не сможет повысить эту температуру. Из всего сказанного следует, что между давлением и температурой испарения существует определенная зависимость, представленная на рис. 36 кривой p . Из рисунка видно, что вначале температуры испарения резко возрастают с давлением. При 1 атм. абс. $t_n = 100^\circ$, а при 10 атм. абс. уже 180° С. Постепенно, однако, прирост уменьшается (кривая идет более полого или, как говорят, «ложится»), пока при 225 атм. абс. не достигается так называемая критическая температура (374° С), при которой вода переходит в пар без какой-либо затраты внешней теплоты.

На том же рис. 36 представлена зависимость объема пара v'' от температуры испарения. Из рисунка видно, что при очень высоких температурах испарения, т. е. при больших давлениях пара, удельный объем пара очень мал, но что с уменьшением температуры он возрастает;

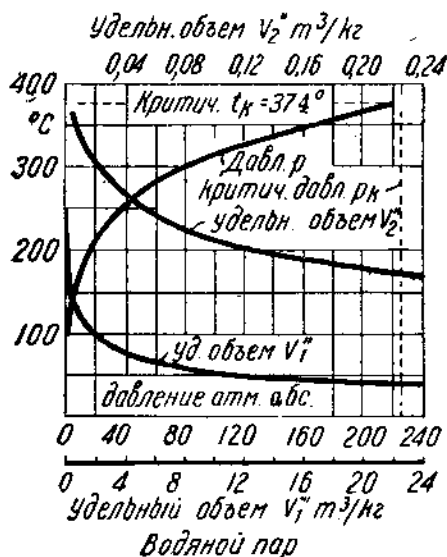


Рис. 36.

Давление пара p и удельные объемы воды v' и пара v'' в зависимости от температуры испарения t_n .

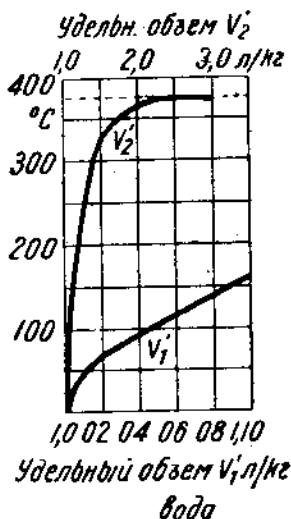


Рис. 37.

возрастание это идет вначале медленно, а затем все ускоряясь. В то время как при 200° v_1'' еще очень мал (0,12 м³/кг), при 100° v_1'' уже равен 2, а при 50° — даже 14 м³/кг. При температурах ниже 40° v'' становится столь большим, что вообще уже не может быть изображен на рис. 36 в выбранном масштабе. В противоположность этому, удельный объем воды v' возрастает с температурой (рис. 37). При критической температуре объемы воды и пара одинаковы, а именно 0,0031 м³/кг или 3,1 л/кг (рис. 36 и 37). Отсюда следует, что удельные веса (величины, обратные удельным объемам) с увеличением температуры уменьшаются для воды и увеличиваются для пара. Один литр воды, весящий при 0° С почти ровно 1 кг, при критической температуре весит только $\frac{1}{3,1} = 0,323$ кг = 323 г. Из этого вытекает тот чрезвычайно важный факт, к сожа-

лению, еще далеко не всегда учитываемый в должной мере, что при применении пара под давлением вообще и пара высокого давления в особенности удельные веса и объемы воды весьма и весьма отличаются от весов и объемов при атмосферном давлении (1 атм. абс.).

При пользовании рис. 36 и 37 представляется целесообразным применять кривые v_1' и v_1'' для определения объемов при низких температурах (0—170°) и кривые v_2^* и v_2'' — при высоких температурах.

Пример 1. Вода испаряется при 60° С. Требуется определить соответствующую величину давления пара, а также удельные объемы пара и воды.

Из рис. 36 имеем для 60° $p = 0,2$ атм. абс., далее $v'' = 7,7$ м³/кг (кривая v_1''). Из рис. 37 имеем: $v' = 1,017$ л/кг (кривая v_1').

Пример 2. Вода испаряется при 250°C . Требуется найти p, v'' и v' . Из рис. 36 имеем: $p = 40,5$ атм. абс. и $v'' = 0,05$ м³/кг (кривая v_2''); из рис. 37 $v' = 1,26$ л/кг (кривая v_2').

Пример 3. Необходимо найти температуру испарения и объемы пара и воды, отвечающие давлению в 100 атм. абс. Из рис. 36 получаем $t = 310^{\circ}$ (кривая p) и $v'' = 0,0185$ м³/кг (кривая v_2''); из рис. 37 $v' = 1,46$ л/кг (линия v_2').

Зная зависимость давлений от температур испарения, с одной стороны, и зависимость удельных объемов от этих же температур — с другой, можно установить весьма важную зависимость объемов от давления, представленную на рис. 38—40 для воды и пара.

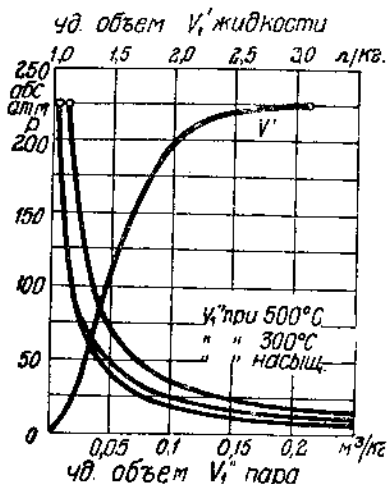


Рис. 38. Область давлений от 225 до 10 атм. абс.

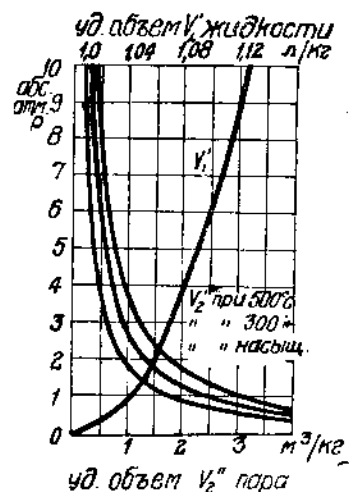


Рис. 39. Область давлений от 10 до 1 атм. абс.

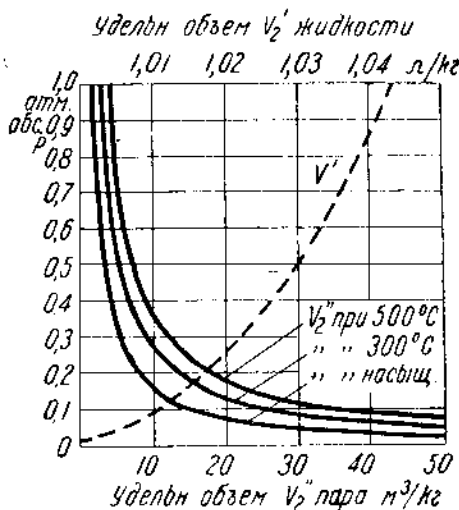


Рис. 40. Область давлений от 1 до 0 атм. абс.

Рис. 38—40. Диаграммы «давление — объем» для воды v' , насыщенного пара и перегретого пара v'' .

среднего давления, то сразу же станет ясным, как значительно благодаря этому уменьшаются все размеры трубопроводов и машин при той же их мощности.

Приведенные на этих же рисунках кривые «давление — объем» для перегретого пара показывают, что объемы перегретого пара много больше объемов насыщенного пара того же давления. Исчисленная в процентах величина расхождения особенно велика при очень высоких и очень низких давлениях; при средних давлениях (от 50 до 20 атм. абс.) она меньше.

Чрезвычайно интересный характер имеет также кривая «давление — объем» для воды (рис. 38—40). Увеличение объема меньше всего в области средних давлений, в области очень низких давлений оно значительно больше, и, наконец, оно наиболее велико в области высоких давлений вблизи критической точки.

Пример 1. Каковы будут объемы насыщенного и перегретого пара при 50 атм. абс?
Из рис. 38 мы имеем:

насыщенный пар	$v'' = 0,040 \text{ м}^3/\text{кг}$
перегретый пар при 300°С	$v'' = 0,047 \text{ "}$
" " " 400° "	$v'' = 0,060 \text{ "}$
" " " 500° "	$v'' = 0,071 \text{ "}$

Пример 2. Было найдено, что объем перегретого пара при 300°С равен $2 \text{ м}^3/\text{кг}$. Определить соответственное давление.

Пользуясь рис. 39, получаем $p = 1,32 \text{ атм. абс.}$

Пример 3. При каком давлении объем воды вдвое больше, чем при 0°С ?

Из рис. 38 имеем для $v' = 2p = 199 \text{ атм. абс.}$

Наряду с давлением, объемом и температурой наибольший интерес представляет *теплосодержание* воды и водяного пара в зависимости от температуры и давления. Зависимости это представлены на рис. 41 и 42.

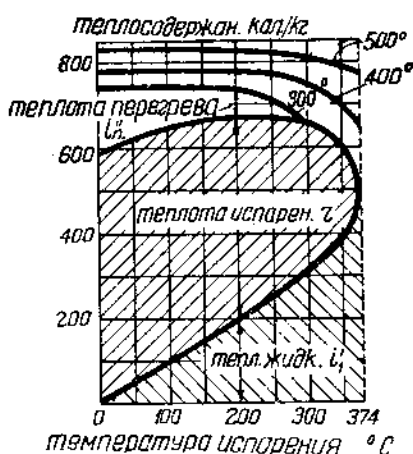


Рис. 41.

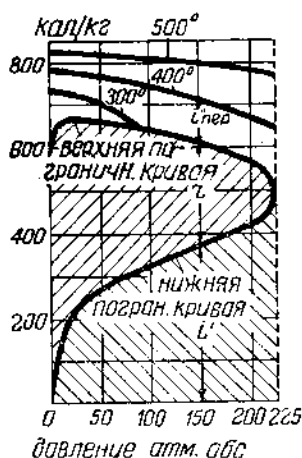


Рис. 42.

Рис. 41 и 42. Теплосодержание i в зависимости от температуры испарения и давления.

i' — теплота жидкости; r — теплота испарения; $i''_{\text{н.п.}} = i' + r$ — теплосодержание насыщенного пара; $i''_{\text{пер}}$ — теплота перегрева; $i''_{\text{п.п.}} = i''_{\text{н.п.}} + i''_{\text{пер}}$ — теплосодержание перегретого пара.

Теплоемкость c_p воды нормальной температуры равна достаточно точно и неизменно единице, т. е. повышению температуры на 1°С отвечает подвод тепла, равный 1 кал/кг . Нижняя пограничная кривая на рис. 41, т. е. линия температуры испарения, представляет собою вначале прямую, и число единиц тепла почти в точности равно числу градусов температуры. Однако уже при 200°С прямолинейный характер кривой нарушается; теплоемкость становится больше, т. е. для повышения температуры на 1°С необходимо уже подвести количество тепла больше, чем 1 кал/кг , и пограничная кривая загибается вверх, встречаясь в критической точке с верхней пограничной кривой, характеризующей теплосодержание насыщенного пара. Верхняя пограничная кривая поднимается примерно до 220°С сначала скоро, а потом все медленнее, затем идет почти совсем горизонтально и, наконец, при более высоких температурах начинает опускаться сначала медленно, а потом все скорее к критической точке, которой соответствует теплосодержание 501 кал/кг . Часть площади чертежа, расположенная под нижней пограничной кривой, является областью теплоты жидкости; плоскость, расположенная между обеими пограничными кривыми, есть область теплоты испарения, и плоскость над верхней пограничной кривой — область перегрева пара. Таким образом, для любой температуры испарения (рис. 41) и для любого давления пара (рис. 42) теплоты жидкости и испарения могут быть отсчитаны непосред-

ственно, как соответствующие ординаты. На обоих рисунках, кроме того, нанесены теплосодержания перегретого пара ($i''_{п.п.}$) при различных температурах.

П р и м е р. Для 60 атм. абс. и 400° С имеем, согласно рис. 42, теплоту жидкости $i' = 257$ кал/кг, теплосодержание насыщенного пара $i''_{п.п.} = i' + r = 667$ кал/кг и $i''_{п.п.} = i''_{п.п.} + i''_{пер} = 768,5$ кал/кг.

Отсюда теплота испарения определится в количестве $r = 667 - 257 = 410$ кал/кг, а теплота перегрева $i''_{пер} = 768,5 - 667 = 101,5$ кал/кг.

Чрезвычайно важной с практической точки зрения представляется переменность отношения $\frac{i'}{r}$ в зависимости от давления. Тогда как при обычных (в прежнее время) давлениях в 10—20 атм. абс. теплота жидкости играет по сравнению с гораздо большей теплотой испарения лишь второстепенную роль, при переходе к высоким и высшим давлениям пара картина совершенно меняется. Примерно при 96 атм. абс. i' и r равны друг другу. При еще более высоких давлениях к воде приходится подводить теплоты жидкости больше, чем теплоты испарения. В критической точке $r = 0$ и $i' = i'' = 501$ кал/кг.

Отсюда можно сделать заключение, представляющее большой интерес для практической эксплуатации котельных установок, что подогрев питательной воды при работе с паром высокого

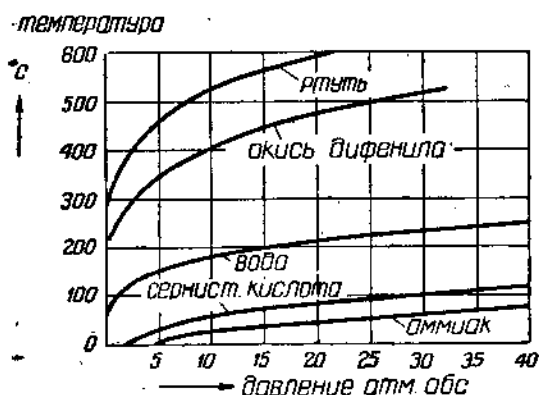


Рис. 43. Давления пара и температуры испарения различных веществ.

давления имеет много большее значение и гораздо сильнее влияет на производительность котла, нежели при средних давлениях. Большей частью экономайзер даже приблизительно не может справиться с подогревом воды, и поэтому, чем дальше, тем все больше и больше приходится переходить к многоступенчатому подогреву с помощью отъемного пара, так как только таким путем можно достичь нагрева питательной воды вне котла до температуры, близкой к температуре испарения.

Для оценки экономичности применения пара высокого давления очень большое значение имеет тот факт, что теплосодержание перегретого пара высокого давления меньше теплосодержания

пара среднего или низкого давления, но той же самой температуры; в случае насыщенного пара теплосодержание возрастает до 24 атм. абс., после чего также начинает снижаться.

Рис. 36—42 выявляют целый ряд интересных зависимостей и показывают все наиболее важные закономерные соотношения для водяного пара гораздо лучше и яснее, чем общепотребительные «Таблицы для водяного пара». Последние, разумеется, совершенно незаменимы для точных расчетов; для большинства же практических задач диаграммы наших рисунков являются не только вполне достаточными, но даже и предпочтительными в виду их гораздо большей, по сравнению с таблицами, наглядности.¹

Общезвестные диаграммы TS и IS (температура — энтропия и теплосодержание — энтропия), незаменимые для выявления и быстрого определения тепловых перепадов, коэффициентов полезного действия и т. п. термодинамических моментов, не имеют практического значения для эксплуатации паровых котлов, а потому можно ограничиться лишь упоминанием о них. Точно так же нет никакой необходимости рассматривать здесь столь исключительно важный для термодинамики вопрос об энтропии.

Сравнение термических свойств воды со свойствами других рабочих тел представляет, напротив, известный интерес и быть может не лишено практического значения для будущего парокотельной техники. Рис. 43 показывает, что ртуть и многократно за последнее время упо-

¹ Из числа таблиц для водяного пара на первое место следует поставить «Tabellen und Diagramme für Wasserdampf» von Knoblauch, Raisch und Hauser, изд. Oldenbourg, München und Berlin, 1923; далее — «Neue Tabellen und Diagramme für Wasserdampf» von Mollier, изд. Springer, Berlin, 1929 (6 Auflage). [См. выноску на стр. 85. Прим. ред.]

минавшаяся в литературе окись дифенила¹ имеют при тех же температурах испарения гораздо меньшие давления, нежели вода, а их критические температуры гораздо выше таковой для воды; поэтому их применение в области высоких температур представляется выгодным в термическом отношении. Необходимо, moreover, отметить, что в условиях вакуума, практически достижимого в конденсаторе паровой турбины (около 0,04 атм. абс.), температуры этих веществ все еще столь высоки, что экономичное их использование в силовых машинах связано с последовательным включением паровой машины (работающей на водяном паре). В Америке сейчас уже находится в эксплуатации несколько таких машин с двумя рабочими телами («бинарных»), работающих в пределах высоких температур на ртути и в пределах низких температур — на воде. Пары ртути получают в специальных котлах. Две остальные кривые на рис. 43 показывают изменение температур испарения аммиака и сернистой кислоты в зависимости от давления; вещества эти, в противоположность ртути, могут найти применение только в области низких температур. Для парокотельного дела они не представляют поэтому практического интереса.

VI. ТЕПЛОВЫЕ ПОТЕРИ В УСТАНОВИВШЕМСЯ СОСТОЯНИИ.

Обозначения.²

V (v)	кал. (%)	— тепловые потери, считая на количество тепла, подведенного с 1 кг топлива,
V_d (v_d)	"	— общие потери с теплотой отходящих газов,
V_{r_1} (v_{r_1})	"	— потери с теплотой сухих отходящих газов,
V_{r_2} (v_{r_2})	"	— потери с теплотой влажных отходящих газов,
V_{r_3} (v_{r_3})	"	— потери с теплотой испарения влажных отходящих газов,
V_n (v_n)	"	— общие потери от химической неполноты горения,
V_{n_1} (v_{n_1})	"	— потери от присутствия окиси углерода в отходящих газах,
V_{n_2} (v_{n_2})	"	— потери от присутствия метана в отходящих газах,
V_{v_3} (v_{v_3})	"	— потери от присутствия водорода в отходящих газах,
V_o (v_o)	"	— общие потери в очаговых остатках,
V_{o_1} (v_{o_1})	"	— потери от недожога топлива в очаговых остатках,
V_{o_2} (v_{o_2})	"	— потери с теплотой очаговых остатков,
V_k (v_k)	"	— потери с летучим коксом,
V_c (v_c)	"	— потери с сажей,
V_x (v_x)	"	— потери лучеиспусканием, конвекцией и теплопроводностью,
B кг, т		— количество сожженного топлива,
R "		— количество воды,
Q_o кал/кг		— теплотворная способность очаговых остатков,
t_o °C		— температура очаговых остатков.

1. Потери с теплотой отходящих газов.

Общие соображения. Вообще говоря, потери с отходящими газами составляют наибольшую статью тепловых потерь котла. При нецелесообразной конструкции котла и плохом ведении-топки они могут составить до 30—40% от общего количества всего подведенного тепла, а в некоторых случаях даже еще больше.³ Поэтому потерям с отходящими газами необходимо уделять особое внимание. Нередко с помощью самых простых мероприятий здесь удастся достичь значительного снижения расхода топлива. Этим объясняется, что наибольшее число достижений, полученных в рационально ведущихся в теплотехническом отношении предприятиях, приходится именно на эту статью потерь. Экономия достигается здесь путем целесообразной конструкции ходов котла, боровов и дымовых труб, путем установок добавочных устройств, аккумулирующих тепло (перегреватели, экономайзеры, воздухоподогреватели), путем инстинктивирования кочегаров и постоянного контроля процесса горения (определение содержания CO_2 , температуры отходящих газов и т. п.).

¹ Правильнее — дифениловый эфир; его химическая формула: $C_6H_5 - O - C_6H_5$. Литература: D o w, Mechanical Engineering, 48, 815, 1926; R u s s, Die Wärme, 49, 625, 1926; P r a e t o r i u s, VDI-Zeitschrift, 71, 189, 1927; L o s c h g e, Arch. f. Wärme-wirtschaft, 9, 75, 1928. Согласно новейшим исследованиям дифениловый эфир непригоден для работы котлов и машин по причинам эксплуатационного характера.

² Кроме обозначений, уже применявшихся в предыдущих разделах (см. стр. 42, 65 и 85).

³ В частности при плохом обслуживании печей и топок столь высокие значения потерь не составляют большой редкости.

Необходимо, однако, сразу же указать здесь на то обстоятельство, что *потери с тепловой отходящих газов никогда не могут быть устранены полностью*. В частности, при котлах с естественной тягой, — а именно с таковой работает большинство средних и мелких установок, — для создания необходимой тяги потребна определенная температура отходящих газов у входа (т. е. у основания) в дымовую трубу (обычно 120—150° С). Теплота сухих и влажных отходящих газов, вылетающих в дымовую трубу, а также вся теплота испарения влажных газов таким образом пропадает без всякой пользы. Кроме того во всех без исключения случаях, а в особенности при топках с колосниковыми решетками, приходится работать с некоторым избытком воздуха, так как при теоретически наивыгоднейшем количестве воздуха (т. е. при отсутствии избытка последнего) горение в ряде точек оказалось бы в действительности неполным, что обусловило бы появление или увеличение потерь от недожога в очаговых остатках и от химической неполноты горения (образование СО); потери же эти, как мы это увидим дальше, значительно больше соответствующего выигрыша в тепле. Поэтому, даже при очень хорошем горении, необходимо считаться с величиной потерь от 7 до 10%; исходя из этого, представляется возможным провести различие между *устраняемыми* и *неустраняемыми* потерями с отходящими газами.¹ В противовес этому некоторые другие виды потерь котла, как например потери от неполноты горения, с провалом и выгребом и т. д., при современном уровне развития топочной техники могут быть устранены практически полностью. Руководитель производства должен стремиться, поэтому, по возможности совершенно уничтожить устраняемые потери, неустраняемые же свести к практически достижимому и экономически приемлемому минимуму.

Определение потерь с теплотой отходящих газов, называемых в дальнейшем для краткости просто потерями с отходящими газами, на первый взгляд представляется очень несложным. Если V_r — количество дымовых газов в м³ на 1 кг топлива, $(t_d - t_{воз})$ — разность температур отходящих (дымовых) газов и воздуха и $C_{ср}$ — средняя теплоемкость 1 м³ дымовых газов в интервале температур $(t_d - t_{воз})$, то можно составить следующее уравнение:

$$V_d = V_r (t_d - t_{воз}) \cdot C_{ср}, \quad (24)$$

дающее потери в кал/кг топлива, или уравнение:

$$v_d = \frac{V_r \cdot (t_d - t_{воз}) \cdot C_{ср}}{Q} \cdot 100, \quad (24a)$$

дающее потери в процентах от теплотворной способности.²

Температура и теплотворная способность могут быть установлены путем прямых измерений; трудность заключается в определении количества дымовых газов в м³/кг и средней теплоемкости. В предыдущих отделах уже указывались крайнее разнообразие и разнородность составов топлива, указывались также различные возможности полного или неполного горения и прочие факторы, существенным образом влияющие как на количество дымовых газов, так и на их теплоемкость. Приведенные в отделе «Горение» формулы и графики (рис. 13, 14, 17, 21 и 22) позволяют определять, хотя и приближенно, искомые величины, если только известны теплотворная способность или элементарный анализ топлива, с одной стороны, и точный состав дымовых газов — с другой; последний определяется посредством аппарата Орса или какого-либо другого анализатора дымовых газов.

Необходимо, однако, здесь же отметить, что даже самые точные измерения и подсчеты не свободны от ошибок. Точно так же, как на основании элементарного анализа не представляется возможным сделать определенное заключение относительно теплотворной способности, так и анализ газов не может служить абсолютно точным критерием для оценки и характеристики процесса горения; подобно тому как определение теплотворной способности какого-либо топлива, даже при самом тщательном отборе пробы, дает только более или менее достоверное *среднее* значение, так и анализ дымовых газов, совершенно независимо от точности примененных измерительных приборов, не может дать абсолютно правильных результатов.

¹ Разумеется, при современном состоянии техники. Граница между *устраняемыми* и *неустраняемыми* потерями смещается по мере развития топочной техники все больше и больше в сторону первых.

² В зависимости от того, ведется ли расчет с высшей или низшей теплотворной способностью, вместо Q подставляют либо Q_H , либо Q_N .

Процесс горения необычайно сложен и даже в наиболее простых своих формах далеко еще не выяснен полностью. Характеристика топлива, даже в случае, например, углей из одной и той же шахты, нередко чрезвычайно различна. Сюда присоединяются еще, во-первых, переменные влияния погоды и, во-вторых, большая или меньшая влажность воздуха, поступающего в топку, — влажность, нередко меняющаяся в котельных с минуты на минуту и поэтому различно сказывающаяся на составе отходящих газов. Короче говоря, имеется очень большое число непрерывно меняющихся факторов, а наши возможности охватить и учесть их все разом очень ограничены. Поэтому определение потерь, коэффициента полезного действия и теплового баланса котельной установки много труднее, чем при иных аналогичных исследованиях, в виду чего и достижимая здесь степень точности не слишком высока.

Поэтому *первой и наиболее важной предпосылкой* устранения источников этих ошибок при всех исследованиях котлов является *тщательнейшее измерение и вдумчивый анализ всех факторов, как-либо влияющих на горение и производство пара*. Все цифры, полученные в результате замеров, должны являться действительно настоящими средними величинами. Математическая обработка полученных результатов, напротив, имеет лишь второстепенное значение; в подавляющем большинстве случаев применение приближенных методов даст достаточно точные результаты, ибо ошибки, возникающие при пользовании этими методами, обычно меньше ошибок, допускаемых в процессе самого опыта или испытания.

Исходя из этой точки зрения, я привожу в настоящем и последующих разделах целый ряд графиков и диаграмм, которые, хотя и дают абсолютно правильные результаты лишь при соблюдении вполне определенных предположений, но, тем не менее, значительно облегчают производственному использованию полученных им данных. Для более точных расчетов, например при приемных испытаниях, могут быть применены точные формулы, помещенные в дополнении в конце книги.

Потери с отходящими газами состоят, в свою очередь, из нескольких отдельных частей, которые целесообразно определять порознь. Отходящие газы состоят (в случае полного горения) из углекислоты (CO_2), кислорода (O), азота (N) и незначительных количеств сернистого газа (SO_2), с одной стороны, и из паров воды (H_2O) — с другой. Последние образуются частью вследствие испарения содержащейся в топливе воды, частью вследствие горения имеющегося в топливе водорода; кроме того и сам воздух, поступающий в топку, содержит большие или меньшие количества водяных паров. Так как свойства паров в корне отличаются от свойств обычных газов, то представляется безусловно целесообразным различать эти две разновидности отходящих газов (так называемые сухие и влажные отходящие газы). Тогда потери с отходящими газами распадутся на три части, которые следует строго разграничивать друг от друга:

1. Потери с теплотой сухих отходящих газов V_{r_1}
2. " " " влажных " " V_{r_2} (теплота перегрева)
3. " " " испарения воды V_{r_3}

При всех подсчетах с низшей теплотворной способностью потери V_{r_3} отпадают совершенно, так как здесь содержание влаги в топливе учтено уже самой теплотворной способностью.

Потери с теплотой сухих отходящих газов. Эти потери, как то следует из уравнения (24), пропорциональны разности температур $(t_x - t_{\text{воз}})$ и средней теплоемкости $C_{p_{\text{cp}}}$. Эта последняя, впрочем, непостоянна, а, в свою очередь, есть функция температуры и состава газа (рис. 22). Далее, потери точно также пропорциональны содержанию углерода C_0 в топливе (сгоревшего в CO и CO_2), причем необходимо иметь в виду, что всегда некоторая доля фактического содержания углерода $C' = C - C_0$ теряется при горении (в очаговых остатках, с сажей, летучей золой и т. п.). Наконец, как это следует из уравнений горения, рассмотренных в разделе III, объем также зависит от состава газов. Уравнения потерь V_{r_1} либо, соответственно, v_{r_1} имеют следующий вид:

$$V_{r_1} = \frac{C_0}{0,538 (k_1 + k_2 + ch)} C_{p_{\text{cp}}} (t_x - t_{\text{воз}}) \text{ кал/кг, } ^1 \quad (25)$$

$$v_{r_1} = \frac{C_0}{0,538 (k_1 + k_2 + ch)} C_{p_{\text{cp}}} (t_x - t_{\text{воз}}) \frac{100}{Q_n} \% \quad (25a)$$

¹ Первый множитель выражает собою количество сухих дымовых газов; он выводится с помощью уравнений горения.

Можно представить эти уравнения графически, что и сделано на рис. 44, дающем потери V_{r_1} и v_{r_1} в зависимости от разности температур и, в частности, при полном сгорании для различных содержаний углекислоты (k_1). Если же, напротив, горение неполное, т. е. если в отходящих газах содержится еще окись углерода (k_2) или метан (ch), то наклонные прямые дают общее содержание собственно газообразных продуктов горения в процентах: $k_1 + k_2 + ch$. Так как содержание углерода в топливах колеблется очень значительно, то цифры, нанесенные у левой оси ординат, не отнесены к какому-либо определенному содержанию C_0 , но являются лишь относительными величинами, которые следует умножать на число процентов, отвечающее данному содержанию C_0 .

Рис. 44 позволяет легко определить тепловые потери, если только известны содержание C , состав сухих дымовых газов и температура отходящих газов. Две последние величины должны

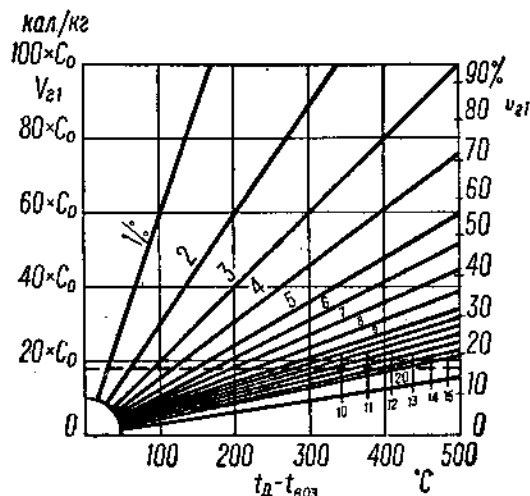


Рис. 44. Потери с теплотой сухих отходящих газов V_{r_1} (v_{r_1}) в зависимости от разностей температур отходящих (дымовых) газов и воздуха ($t_d - t_{воз}$) для различных составов дымовых газов.

V_{r_1} — потери в кал/кг; v_{r_1} — потери в процентах высшей теплотворной способности. Наклонные прямые (от 1 до 20%) показывают при полном сгорании содержание CO_2 , равное k_1 , при неполном сгорании — содержание CO_2 , CO и CH_4 , равное $k_1 + k_2 + ch$.

Пример. При содержании сгораемого углерода $C_0 = 70\%$, при полном сгорании $k_1 = 7\%$ и $(t_d - t_{воз}) = 100^\circ C$ находим: $V_{r_1} = 18 \cdot 70 = 1260$ кал/кг и $v_{r_1} = 17\%$.

отходящими газами и влияния различных факторов на величину таковых. Совершенно очевидна важность высокого содержания CO_2 (k_1), с одной стороны, и незначительной температуры отходящих газов — с другой. Так, например, при температуре отходящих газов $500^\circ C$ и $k_1 = 5\%$ потери с отходящими газами составят не менее 57%, т. е. более половины всего паливного количества тепла бесполезно теряется с теплоемкостью сухих топочных газов. Содержание CO_2 от 5 до 6% при температуре отходящих газов $300^\circ C$ встречается довольно редко в небольших котельных установках без перегревателей, экономайзеров, регистрирующих измерительных приборов и т. п., особенно в случае неудовлетворительного обслуживания и надзора. При этом получаются потери от 28 до 35%. Если учесть, что при мало-мальски удовлетворительном ведении топки и использовании отходящих газов за котлом в экономайзерах и возду-

быть определены посредством измерения при каждом опыте; вообще говоря, их следует определять по возможности регулярно также и при нормальной работе котельной установки. Напротив, содержание C очень часто неизвестно, так как нередко производится одно только определение теплотворной способности топлива без его элементарного анализа. В этом случае можно определить потери приближенным, но достаточно точным способом, так как содержание C , как это видно из рис. 11, довольно строго пропорционально теплотворной способности. Кривая C , жирно обозначенная на рис. 11, нанесена на основании большого числа химических анализов и соединяет точки, отвечающие полученным таким образом средним значениям. Можно видеть, что эта кривая довольно точно совпадает со средней пунктирной кривой. Однако, если это так, то представляется возможным дать на рис. 44 потери V_{r_1} также и в процентах (v_{r_1}), вследствие чего при известной разности температур и известном составе дымовых газов можно отсчитать потери сразу же без всяких пересчетов.

Такая шкала, подразделенная в процентах теплотворной способности, нанесена на правой оси ординат, исходя из предположки, что из общего содержания углерода C сгорает $C_0 = 0,9 C$.¹ Благодаря этому получается очень наглядная картина потерь с

¹ Предположка $C_0 = 0,9 C$ довольно точно отвечает реальным условиям горения и приблизительно правильна для всех нормальных котельных топок.

² В тех случаях когда температура воздуха примерно $0^\circ C$, можно, не делая большой ошибки, пользоваться при расчетах просто величиной t_d вместо $(t_d - t_{воз})$.

холодогогрева-телях можно без труда получить среднее содержание CO_2 от 12 до 14% и температуру газов за подогревателем около 150°C , чему отвечает величина потерь с отходящими газами от 7 до 8%, то становится совершенно ясным, какие значительные количества тепла можно сберечь с помощью нередко совершенно незначительных конструктивных видоизменений и хорошего контроля.

Рис. 44 вполне точен для целей определения абсолютной величины тепловых потерь $V_{\text{г}}$ в кал/кг при известном содержании C_0 (левая ось ординат); процентная величина потерь с отходящими газами $v_{\text{г}}$, относимая к высшей теплотворной способности, действительна только при условии соблюдения изображенной на рис. 11 пропорциональности C и $Q_{\text{в}}$ и приемлемости равенства $C_0 = 0,9 C$. При наличии таких топлив, для которых эти предпосылки не действительны, необходимо соответственно пересчитать величины $v_{\text{г}}$. Далее следует еще раз подчеркнуть, что в качестве величины C_0 следует брать не процентное весовое количество на 1 кг топлива, а действительно сгоревшее в CO_2 и CO . Если потери чисто C в очаговых остатках, в летучем коксе и т. п. неизвестны, то при хорошем ведении тонки можно принимать их равными приблизительно 8 — 10%, что примерно приводит к цифре $C_0 = 0,9 C$.

Потери с теплотой влажных отходящих газов. Эти потери $V_{\text{г}}$ — вообще незначительны, и при высококалорийных углях ими можно большей частью полностью пренебречь. Напротив, при сильно влажных углях (бурые угли) и при топливах, очень богатых водородом, эти потери могут оказаться иной раз чрезвычайно большими, в частности — в случае высокой температуры отходящих газов.

Для определения потерь с теплосодержанием водяного пара необходимо прежде всего установить теплоемкость водяного пара.¹

На рис. 21 показана средняя теплоемкость $\bar{C}_{\text{ср}}$ (считая на 1 м^3). Однако, здесь нам надо знать среднюю теплоемкость $c_{\text{ср}}$ (отнесенную к 1 кг), каковая, по топочным опытам Гольборна, Генинга (Holborn, Henning) и др. составляет при 0° — 0,462, в интервале от 0° до 150° — 0,464, в интервале от 0° до 300° — 0,468 и в интервале от 0° до 500° — 0,473. Следовательно, приращения теплоемкости в пределах температур, представляющих интерес при рассмотрении потерь с отходящими газами, малы, а потому могут быть без всяких опасений не приняты во внимание. В качестве средней величины принимаем $c_{\text{ср}} = 0,465$. Так как из 1 кг топлива образуется всего $9H + W$ кг водяного пара,² то потери с теплосодержанием водяного пара в кал/кг и в процентах, при температуре отходящих газов $t_{\text{г}}$ и температуре топлива $t_{\text{т}}$, составляют:

$$V_{\text{г}} = 0,465 \cdot \frac{9H + W}{100} (t_{\text{г}} - t_{\text{т}}) \text{ кал/кг}, \quad (26)$$

$$v_{\text{г}} = 0,465 \cdot \frac{9H + W}{100} (t_{\text{г}} - t_{\text{т}}) \cdot \frac{100}{Q_{\text{в}}} \% \quad (26a)$$

Уравнения (26) и (26a) действительны как для полного, так и для неполного сгорания, поскольку в последнем случае образуется только окись углерода. Если же, напротив, в газах присутствуют также метан и водород, то формулы значительно усложнятся.³

Потери $V_{\text{г}}$ и $v_{\text{г}}$ представлены графически на рис. 45 и 46, которые, точно так же как и уравнения (26) и (26a), действительны для сгорания только в CO_2 и CO .

Процентная величина потерь $v_{\text{г}}$ может быть представлена очень наглядно и удобно для практических нужд (рис. 46), если использовать зависимость теплотворной способности от содержания влаги, изображенную на рис. 11.

¹ Теплоту жидкости воды при этом учитывать не приходится, так как при том незначительном парциальном давлении водяных паров, которое имеется в топочном пространстве, вся вода испаряется немедленно, т. е. при температуре топлива $t_{\text{т}}$. Следовательно, остается только различать теплоту перегрева и теплоту испарения. Их сумма дает общее теплосодержание водяного пара.

² См. уравнения горения на стр. 43 — 44. 8 кг водорода соединяются с 1 кг кислорода, образуя 9 кг воды. Таким образом из H весовых частей водорода образуется $9H$ весовых частей воды.

³ См. Приложение I, п. 10.

Так как содержание водорода в большинстве топлив колеблется от 1 до 3%, составляя, следовательно, в среднем 2%, то в левой части (А) рис. 46 даны потери v_{22} для $H = 2\%$ в зависимости от разности $t_x - t_z$ при различных содержаниях влаги W . Это дает возможность непосредственно отсчитывать величины v_{22} . При необходимости определения процентной величины потерь и для топлив с другим содержанием H (большим или меньшим 2%) пользуются вспомогательным графиком (В), отсчитывая на нем величину v_{22} для $t_x - t_z = 500^\circ \text{C}$ и перенося последнюю на левый график (А) так, как это показано пунктиром для приводимого числового примера.

Таким образом, в то время как рис. 45 дает абсолютно точные значения V_{22} , с помощью рис. 46 можно получить правильные цифры для v_{22} только в том случае, если соблюдена пропорциональность между теплотворной способностью и влажностью, изображенная на рис. 11. Величины v_{22} на рис. 46 отнесены к высшей теплотворной способности. Если в отходящих

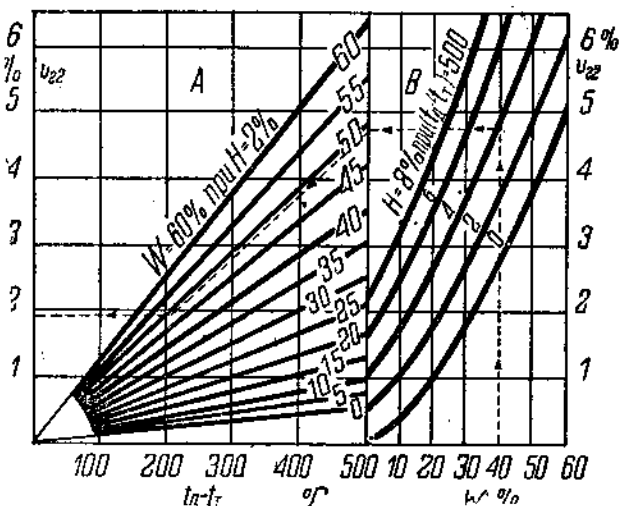
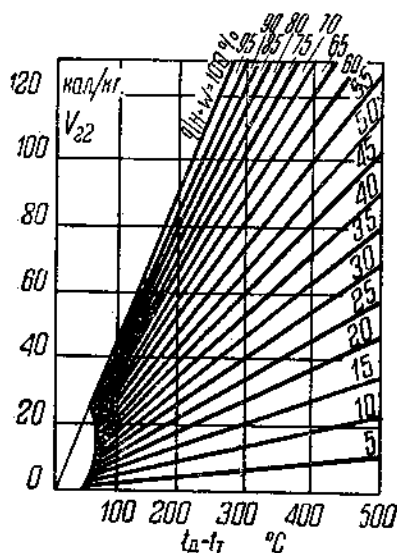


Рис. 45. Потери в кал/кг (V_{22}). Рис. 46. Потери в процентах высшей теплотворной способности (v_{22}).

Рис. 45 и 46. Потери с теплоемкостью водяного пара V_{22} (v_{22}) для различных содержаний влаги W и водорода H в топливе в зависимости от разности температур ($t_x - t_z$). Пример. Для $H = 4\%$, $W = 40\%$ и $t_x - t_z = 200^\circ \text{C}$ получаем, следуя по пунктиру на диаграмме, $v_{22} = 1,32\%$.

газах присутствуют также и иные, лишь не полностью сгоревшие составные части (метан, водород и т. п.), то кривые приводят к слишком высоким значениям потерь, и притом тем более высоким, чем больше содержание S топлива, а также содержание ch и h в отходящих газах. В случае каменных углей, которые уже сами по себе дают незначительные количества влажных отходящих газов, а следовательно также и незначительные потери V_{22} , можно совершенно пренебречь последними, особенно при неполном горении и высоком содержании ch и h .¹ В случае бурых углей с 1% ch цифры преувеличены приблизительно на 6—8%, а с 1% h — приблизительно на 3—5%.

При влажном воздухе необходимо учесть также теплоту перегрева водяных паров, содержащихся в воздухе. Если воздух, приходящийся на 1 кг топлива, содержит в себе d кг водяных паров, то, полагая среднюю теплоемкость пара равной приблизительно 0,465, можно определить величину дополнительных потерь из следующего выражения:

$$V'_{22} = 0,465 d (t_x - t_{\text{воз}}) \text{ кал/кг.} \quad (26b)$$

Эту потерю следует прибавить к потерям, определенным с помощью рис. 45.

¹ Вообще говоря, в отходящих газах каменноугольных топок содержится большей частью только следы водорода и метана.

Потери с теплотой испарения воды. Эта статья потерь ($V_{г_1}$), не учитываемая вовсе при пользовании нижней теплотворной способностью, чрезвычайно велика при сильно влажных топливах. В противоположность обоим вышерассмотренным видам потерь $V_{г_1}$ и $V_{г_2}$, потери $V_{г_1}$ не зависят ни от теплоемкости ни от разности температур, а только от состава топлива и отходящих газов (т. е. от влажности) и в некоторой мере также от температуры загружаемого топлива. Так как большей частью не представляется возможным использовать за котлом теплоту испарения влажных отходящих газов, то приходится считать, что вся теплота испарения целиком является потерей.

Величина потерь с теплотой испарения $V_{г_1}$ или $v_{г_1}$ определяется с помощью одного из следующих простых уравнений:

$$V_{г_1} = 595 \frac{9H + W}{100} \text{ кал/кг}, \quad (27)$$

$$v_{г_1} = 595 \frac{9H + W}{100} \cdot \frac{100}{Q_s} \%. \quad (27a)$$

Эти уравнения действительны для сгорания в CO_2 и CO ; если же в отходящих газах присутствуют также метан или водород, то следует пользоваться уравнением, приве-

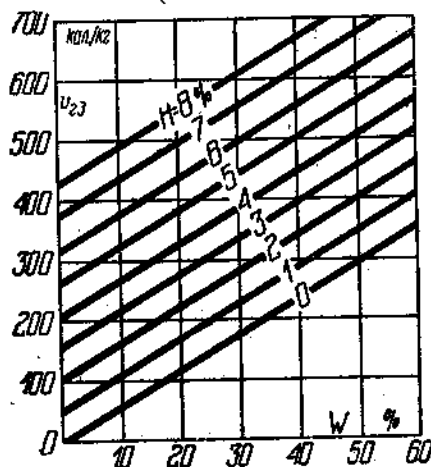


Рис. 47. Потери в кал/кг ($V_{г_1}$).

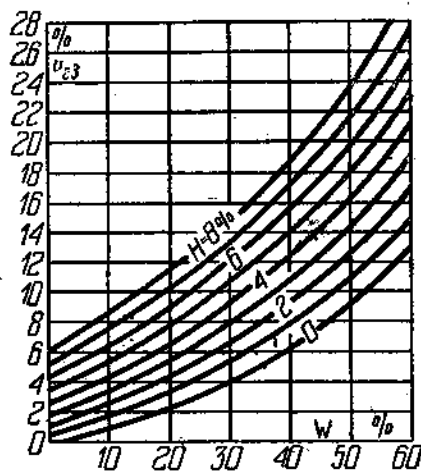


Рис. 48. Потери в процентах высшей теплотворной способности ($v_{г_1}$).

Рис. 47 и 48. Потери $V_{г_1}$ ($v_{г_1}$) в отходящих газах с теплотой испарения воды, образующейся при горении, в зависимости от влажности W при различных содержаниях H .

денным в Приложении.¹ Рис. 47 показывает, какие большие количества тепла бесполезно расходуются на испарение воды в случае высокого содержания влаги и водорода в топливе. А так как, согласно рис. 11, теплотворная способность уменьшается с увеличением влажности, в то время как, согласно рис. 47, абсолютная величина потерь в кал/кг возрастает, то становится вполне очевидным, что процентная величина потерь с отходящими газами $v_{г_1}$ (отнесенная к высшему пределу теплотворной способности) будет возрастать с увеличением влажности еще резче, чем абсолютные потери $V_{г_1}$; это можно без труда усмотреть из рис. 48. Ясно, что при очень влажном топливе и высоком содержании водорода приходится считаться с исключительно большими величинами потерь; так например при 50% H_2O и 4% H получаем $v_{г_1} = 20,5\%$.

На рис. 47 и 48 общие затраты тепла на испарение 1 кг воды в точке положены равными общепринятой (также и при подсчетах нижней теплотворной способности из высшей) величине 595 кал., что отвечает температуре топлива 0°C . При больших отклонениях, например, при

¹ См. Приложение I, п. 10.

очень высоких или низких температурах топлива значения, заимствованные из рис. 47 и 48, подлежат соответственному пересчету. Так как, однако, температура топлива нередко значительно выше 0° , то следовательно теплота испарения, а вместе с ней и потери V_{r_1} , либо соответственно v_{r_1} , должны уменьшиться. Так, например, при температуре топлива 20° теплота испарения составляет уже только 584,3 кал/кг, а при 40° — 573,5 кал/кг. Поэтому при точных расчетах следует уменьшать величины, отсчитанные на рис. 47 и 48, согласно ниже-следующей таблице:

При температуре топлива	0° C	снижение	= 0	%
"	"	5° C	= 0,5	%
"	"	10° C	= 0,9	%
"	"	15° C	= 1,25	%
"	"	20° C	= 1,8	%
"	"	25° C	= 2,25	%
"	"	30° C	= 2,7	%
"	"	35° C	= 3,15	%
"	"	40° C	= 3,62	%
"	"	45° C	= 4,10	%
"	"	50° C	= 4,55	%

Вместе с тем, рис. 47 и 48 относятся только к случаям полного сгорания или сгорания в окис углерода; если в отходящих газах присутствуют водород или метан, то это служит доказательством того, что только часть содержащегося в топливе водорода сгорела в H_2O , а значит, и потери V_{r_1} (либо соответственно v_{r_1}) будут меньше, чем это следует из соответствующей кривой H . И здесь также сохраняется в силе сказанное ранее относительно V_{r_1} : кривые дают слишком большие величины потерь, и притом тем большие, чем выше содержание C топлива и содержания h и sh отходящих газов. В случае каменных углей с малым содержанием влаги, уже сами по себе незначительные потери становятся еще меньше вследствие высокого содержания C , и потому почти всегда, ими можно пренебречь; в случае бурых углей 1% sh приводит также к величинам, преувеличенным на 6—8%, а 1% h — к величинам, преувеличенным на 3—5%. Если желательно определить потери вполне точно, то следует воспользоваться уравнениями, выведенными из формул горения.¹

Общие потери с отходящими газами. Если определены три частных статьи потерь V_{r_1} , V_{r_2} и V_{r_3} , или же процентные величины потерь v_{r_1} , v_{r_2} и v_{r_3} , то общие потери с отходящими газами будут:

$$V_A = V_{r_1} + V_{r_2} + V_{r_3} \text{ кал/кг,}$$

$$v_A = v_{r_1} + v_{r_2} + v_{r_3} \text{ \%}.$$
(28)

При пользовании низшей теплотворной способностью Q_n потери V_{r_1} , либо соответственно v_{r_1} , как это уже было указано ранее, отпадают. Кроме того значения v_{r_2} , определенные с помощью рис. 44—46, относящихся к высшей теплотворной способности, подлежат в этом случае соответственному пересчету.

Так как частичные потери зависят от совершенно разнородных факторов, то не только целесообразно, но большей частью даже необходимо определять их отдельно. В частности при расчетах с высшей теплотворной способностью для правильного понимания процесса горения и для оценки того, какие именно потери могут быть снижены и какие неизбежны, совершенно необходимо *определять все три частичные потери порознь*. Почти во всей известной нам до сего времени литературе можно встретить приближенные уравнения для определения общей потери с отходящими газами V_A и графики, непосредственно дающие величину V_A для определенных сортов угля, без какого бы то ни было обозначения отдельных составных частей V_{r_1} , V_{r_2} и V_{r_3} . Метод этот, правда, удобен, но нередко весьма неточен, и помимо этого от пользования им следует отказаться уже по одному тому, что он ведет к чисто механической работе, без участия мысли.

Приведенные выше графики позволяют совершенно точно определять все три потери как при полном, так и при неполном горении (поскольку в последнем случае имеет место образование только окиси углерода) любых жидких и твердых топлив. Они пригодны поэтому почти

¹ См. Приложение I, п. 10.

во всех встречающихся на практике случаях. Только при присутствии в отходящих газах водорода и метана пользование графиками приводит к слишком большим величинам, которые частично могут быть легко исправлены, а иногда просто оставлены без внимания. Для целей точных научных исследований необходимо пользоваться уравнениями, помещенными в Приложении.

Для газообразных топлив точно так же можно графически представить потери вполне аналогичным образом. Так как, однако, в настоящее время значение газообразного топлива для парокотельного дела еще не очень велико, то пришлось отказаться от помещения в книге этих графиков, в виду крайней ограниченности места. Поэтому потери с отходящими газами при газообразном топливе определяются с помощью уравнений, помещенных в Приложении.¹

Для того чтобы вполне наглядно показать применение вышеприведенных уравнений и графиков для твердых топлив сделаем здесь несколько примеров.

Пример 1. В топке сжигается рядовой бурый уголь, теплотворная способность которого, определенная калориметрически, оказалось $Q_u = 2775$ кал/кг. Уголь имеет состав:

$$C = 28,4; H = 2,2; O = 7,9; S = 1,4; W = 54,4; A = 5,7.$$

В топке $C_0 = 0,9C = 25,5$ сгорает в CO_2 и CO ; анализ дымовых газов дает $k_1 = 11\%$, $k_2 = 3\%$; измерение температур дает $t_x = 200^\circ C$, $t_r = 20^\circ C$, $t_{воз} = 20^\circ C$. Требуется определить низшую теплотворную способность и величину потерь с отходящими газами.

Низшая теплотворная способность будет:

$$Q_u = 2775 - 600 \cdot \frac{9H + W}{100} = 2775 - 600 \cdot \frac{19,8 + 54,4}{100} = 2330 \text{ кал/кг.}$$

Из рис. 44 получаем для $k_1 + k_2 = 14\%$ и $t_1 - t_{воз} = 180^\circ C$

$$V_{r_1} = 8 C_0 = 8 \cdot 25,5 = 204 \text{ кал/кг,}$$

$$v_{r_1} = 8,1\%.$$

Точный расчет дает:

$$v_r = \frac{204}{2775} \cdot 100 = 7,35\%, \text{ считая на } Q_u;$$

$$v_{r_1} = \frac{204}{2330} \cdot 100 = 8,75\%, \text{ считая на } Q_u.$$

Из рис. 45 и 46 получаем для $9H + W = 74,2$ и $t_r - t_r = 180^\circ C$

$$v_{r_2} = 62 \text{ кал/кг и } v_{r_2} = 2,1\%.$$

Точный расчет дает:

$$v_{r_2} = \frac{62}{2775} \cdot 100 = 2,26\%, \text{ считая на } Q_u;$$

$$v_{r_2} = \frac{62}{2330} \cdot 100 = 2,65\%, \text{ считая на } Q_u.$$

Из рис. 47 и 48 получаем для $H = 2,2$ и $W = 54,4$

$$V_{r_3} = 440 \text{ кал/кг и } v_{r_3} = 15,4\%.$$

Точный расчет дает:

$$v_{r_3} = \frac{440}{2775} \cdot 100 = 15,85\%, \text{ считая на } Q_u.$$

Общие потери с отходящими газами составят, следовательно:

$$V_d = 204 + 62 + 440 = 706 \text{ кал/кг,}$$

$$v_d = \frac{706}{2775} = 25,4\%, \text{ считая на } Q_u.$$

(Приближенный подсчет $v_d \approx 8,1 + 2,1 + 15,4 = 25,6\%$.)

$$V_d = 204 + 62 = 266 \text{ кал/кг,}$$

$$v_d = \frac{266}{2330} = 11,4\%, \text{ считая на } Q_u.$$

¹ См. Приложение I, п. 10.

Этот пример показывает, насколько значительной при известных обстоятельствах может быть разница в величинах потерь с отходящими газами в зависимости от того, считать ли их на высшую или на низшую теплотворную способность. Далее из примера следует, что применение рис. 44, 46 и 48, для определения потерь v_{r_1} , v_{r_2} и v_{r_3} , выраженных в процентах, приводит к результатам, лишь очень незначительно отклоняющимся от точных величин, и что, следовательно, получаемая при этом точность совершенно достаточна для подавляющего большинства практических исследований.

Пример 2. С тем же углем, что и в первом примере, производится второй опыт, при котором имеют место те же самые температуры t_{λ} , t_r и $t_{\text{воз}}$, те же самые величины k_1 и k_2 , но кроме того в дымовых газах содержится еще 0,5% ch и 2% h .

Каковы будут в этом случае потери с отходящими газами?

Из рис. 44 получаем для $k_1 + k_2 + ch = 14,5\%$ и для $t_{\lambda} - t_{\text{воз}} = 180^\circ \text{C}$

$$V_{r_1} = 7,8 \cdot C_0 = 7,8 \cdot 25,5 = 199 \text{ кал/кг},$$

$$v_{r_1} = 7,9\%.$$

Точный расчет дает:

$$v_{r_1} = \frac{199}{2775} = 7,21\%, \text{ считая на } Q_b;$$

$$v_{r_1} = \frac{199}{2330} = 8,55\%, \text{ считая на } Q_n.$$

Пользуясь рис. 45 — 48, получаем те же величины, что и в примере 1. Так как, однако, эти рисунки дают для 1% ch величины, большие действительных приблизительно на 6 — 8% и для 1% h — на 3 — 5%, то следует уменьшить полученные величины (учитывая присутствие 0,5% ch и 2% h) на круг на 10%. Тогда получаем:

$$V_{r_1} = 62 - 6,2 = 55,8 \text{ кал/кг},$$

$$v_{r_2} = \frac{55,8}{2775} = 2,02\%, \text{ считая на } Q_b,$$

$$v_{r_2} = \frac{55,8}{2330} = 2,4\%, \text{ считая на } Q_n,$$

$$V = 440 - 44 = 396 \text{ кал/кг},$$

$$v_{r_3} = \frac{396}{2775} = 14,25\%, \text{ считая на } Q_n.$$

Точный расчет с помощью уравнений, приведенных в Приложении, ¹ дает почти совершенно такие же результаты: $V_{r_1} = 195$, $V_{r_2} = 55$, $V_{r_3} = 397$ кал/кг.

Отсюда общие потери с отходящими газами составят:

$$\left. \begin{aligned} V_{\lambda} &= 199 + 55,8 + 396 = 650,8 \text{ кал/кг} \\ v_{\lambda} &= \frac{650,8}{2775} = 23,4\% \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{считая} \\ \text{на } Q_b \end{array}$$

$$\left. \begin{aligned} V_{\lambda} &= 199 + 55,8 = 254,8 \text{ кал/кг} \\ v_{\lambda} &= \frac{254,8}{2330} = 10,9\% \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{считая} \\ \text{на } Q_n \end{array}$$

В этом случае, следовательно, потери с отходящими газами несколько меньше, чем в примере 1; потери же от неполноты горения, наоборот, как это будет видно из последующего подсчета, ² много больше.

2. Потери от химической неполноты горения.

¹ Потери с отходящими газами, в более широком смысле этого слова, включают в себя наряду с потерями через теплосодержание дымовых газов нередко еще и вторую, несколько не менее существенную, статью потерь, а именно: потери от химической неполноты горения, с одной стороны, и потери с уносом — с другой. Можно было бы, как оно иногда и делается, подразделять эти потери на обе вышеупомянутые части. Однако с практической точки зрения представляется более правильным, — а потому здесь мы и поступим именно так, — понимать под «потерями от химической неполноты горения» только собственно и о т е р и в г а з а х, которые можно определить посредством точного газового анализа, в то время как

¹ См. Приложение I, п. 10.

² См. стр. 104.

потери с частицами твердого топлива в газовом потоке (сажа, летучий кокс) определяются, вообще говоря, с помощью механических методов измерения. Об этих последних потерях речь будет лишь в следующем разделе.

В противоположность потерям с теплом (теплосодержанием) отходящих газов, потери от химической неполноты горения V_n безусловно устранимы во всякой упорядоченно работающей котельной. Появление больших количеств несгоревших газов всегда указывает на нарушение нормального процесса горения либо во всем топочном пространстве в целом, либо в отдельных его местах. Поэтому, в применении ко всякой хорошо работающей установке последующие рассуждения, в сущности говоря, просто излишни, ибо технический контроль должен быть организован таким образом, чтобы потери этого рода могли устраняться немедленно, если вообще они когда-либо появляются в результате неудачного ведения топки. Тем не менее, нижеследующие рассуждения и графические изображения являются весьма полезными при оценке потерь, могущих возникнуть вследствие плохого или невдумчивого обслуживания и недостаточного контроля; более того, эти соображения и изображения являются предостережением и напоминанием о необходимости постоянно уделять особое внимание именно данному виду потерь и заботиться о том, чтобы всегда во всех точках топки происходило химически полное, совершенное горение.

Из числа несгоревших газов чаще всего встречается окись углерода, которая образуется вследствие неполного сгорания C с O в CO . Как мы уже указывали ранее, количество тепла, освобождающегося при сгорании 1 кг C в CO , составляет 2440 кал., тогда как при сгорании в CO_2 тепла освобождается в три с лишним раза больше, а именно 8140 кал.; из одного этого уже видно, какие колоссальные количества тепла теряются бесполезно, когда более или менее значительная часть топлива сгорает неполностью.

Неполное сгорание имеет место большей частью при недостаточной подаче воздуха, так как при этом кислорода нехватает для полного сгорания. Следовательно, слишком малый избыток воздуха всегда является признаком того, что не все газы сгорают полностью, и так как, вместе с тем, содержание CO_2 в отходящих газах (k_1) является в свою очередь критерием избытка воздуха (ср. рис. 16), то вообще можно сказать, что слишком высокое содержание CO_2 , представляясь благоприятным с чисто теоретической точки зрения, нецелесообразно вследствие неизбежного при этом образования CO . Так, например, как правило, при всех топках с решетками не следует повышать содержание CO_2 более 12 — 14%, хотя теоретически достижимое максимальное содержание k_{1max} колеблется в зависимости от качества угля между 18 и 20% (ср. рис. 19).

Необходимо, однако, упомянуть здесь об одном очень широко распространенном заблуждении, а именно что незначительное содержание CO_2 служит доказательством полного, совершенного сгорания. При нецелесообразной конструкции топки и неумелом ведении огня, напротив, очень легко может случиться, что в каких-либо местах очага имеется очень значительный избыток воздуха, тогда как в других местах углерод сгорает только неполностью. Если затем не происходит дополнительного сгорания, например при сильно снижающейся температуре топочных газов вследствие значительной теплоотдачи, то в результате на уходящие из котла дымовые газы имеют после перемешивания незначительное содержание CO_2 и вместе с тем все же и некоторое содержание CO . Аналогичные условия создаются также и в том случае, когда в ходах котла после топочного пространства происходит присос воздуха, уменьшающий процентное содержание CO_2 , которое может быть само по себе довольно значительно. Из этого вытекает тот важный факт, что *содержание CO_2 , замеренное за котлом, не является критерием полноты или неполноты горения*. Поэтому следует настоятельно рекомендовать производить прямое измерение CO .

Если содержание CO_2 и CO определено измерением, то потери могут быть отсчитаны непосредственно из рис. 49. Здесь так же, как и в рис. 44, необходимо для получения фактической потери в кал/кг помножить абсолютные значения V_{n1} , отложенные на левой шкале ординат, на содержание C_0 . Если, например, топливо имеет содержание C , равное 80%, из коих сгорает 90%, то получаем, что

$$C_0 = 0.9 \cdot 0.8 = 0.72 = 72\%$$

и что, следовательно, числовое значение, найденное из рис. 49 для определенных величин k_1 и k_2 , надо помножить на 72.

Если содержание C_0 в топливе неизвестно, что случается очень часто, то можно воспользоваться, правда, только приблизительно верной шкалой у правой ординаты;

шкала эта построена на основании изображенной на рис. 11 зависимости содержания C от высшей теплотворной способности и в предположении, что $C_0 = 0,9 C$. Таким путем можно непосредственно отсчитать процентную потерю v_{H_2} для любого топлива (отнесенную к высшей теплотворной способности). Так в вышеприведенном примере получаем $v_{H_2} = 9,5\%$.

Что касается точности рис. 49, то значения V_{H_2} абсолютно правильны, если только правильны значения k_1 , k_2 и C_0 , тогда как значения v_{H_2} , так же как и на рис. 47 и 48, точны только в том случае, когда имеет место изображенная на рис. 11 закономерная зависимость между Q_{H_2} и C и когда $C_0 = 0,9C$. В противном случае отсчитанные величины подлежат пересчету. Если вести расчет с низшей теплотворной способностью, точно так же необходимо пересчитывать значения v_{H_2} . Для практических целей точность, при этом достигаемая, вообще говоря, совершенно достаточна, тем более, что абсолютная точность вследствие неизбежных ошибок измерения не достижима.

Для производственника важно то, что рис. 49 дает ему представление о величине потерь при неполном горении. Вполне отчетливо видно, что высокие значения k_2 всегда обуславливают потери и что, кроме того, они тем выше, чем меньше k_1 . Так, например, потери для $k_2 = 3\%$ при $k_1 = 8\%$ — больше чем вдвое по сравнению с тем случаем, когда $k_1 = 20\%$. Этот на первых порах ошеломляющий эффект содержания CO_2 объясняется просто тем, что дело идет здесь о процентных значениях. При малом k_1 абсолютная величина неполностью сгоревшего углерода, разумеется, много выше, чем при большом k_1 .

Ранее мы уже видели, что потери могут возникнуть не только при горении углерода, но и вследствие неполного сгорания водорода. Чем выше содержание водорода в топливе, тем большее значение могут приобрести эти потери, прежде всего уже потому, что в результате неполного сгорания C и H образуется метан (CH_4), обладающий по сравнению с окисью углерода гораздо большей теплотворной способностью. Эти обстоятельства являются вместе с тем причиной, по которой ранее уже упоминавшиеся графики отходящих газов по Оствальду и Зейферту (Ostwald, Seufert) часто приводят к очень неточным результатам, ибо эти графики учитывают только неполное сгорание в CO .

Во всяком случае следует иметь в виду, что во всех твердых топливах содержание H по сравнению с содержанием C очень незначительно, так что при неполном сгорании содержание CH_4 в отходящих газах точно так же будет незначительным по сравнению с содержанием CO .

Потери вследствие неполного сгорания с образованием метана V_{H_2} и v_{H_2} для различных величин k_1 изображены на рис. 50, в точности отвечающем рис. 49, также только для высшей теплотворной способности. Из рисунков видно, что 1% ch производит тот же эффект, что и 3,1% k_2 . Так как обычно приходится встречаться только с малыми значениями ch , то на рис. 50 потери показаны лишь для $ch = 0 - 1\%$. Если в каком-либо исключительном случае повелось бы определять более высокие значения, то можно определить потери из рис. 49 для того же числа процентов k_2 и затем помножить полученные цифры на 3,1.

В отношении точности рис. 50 сохраняет силу сказанное ранее о рис. 49: левая шкала ординат дает точные, а правая только приближенные результаты.

В противоположность несгоревшему углероду, который не встречается в газообразном состоянии, а потому и не подлежит рассмотрению в этом разделе, чистый водород встречается в отходящих газах наряду с CO и CH_4 . Обусловленные им потери также могут быть очень значительны, как это видно из рис. 51, в отношении точности которого сохраняет силу сказанное выше по поводу рис. 49 и 50. Рис. 51 также относится к высшей теплотворной способности.

Положение усложняется, когда потери от химической неполноты горения обусловлены не каким-либо одним, а сразу несколькими газами. Если, например, в отходящих газах присутствуют CO , CH_4 и H , то при желании получить точное значение потерь нельзя просто суммировать цифры, полученные из рис. 48 — 50, но необходимо пользоваться уравнениями, помещенными в Приложении. Порядок величины ошибок, возникающих при простом суммировании трех отдельно определенных величин, иллюстрируется для нескольких частных примеров кривыми a , a_1 , a_2 , b и b_1 на рис. 49. В некоторых случаях, особенно когда присутствуют одновременно все три газа, ошибка может оказаться довольно значительной (от 10 до 20%), причем в процентах она тем выше, чем больше значения k_2 , ch и h . В целях общей ориентировки,

вообще говоря, можно суммировать все три отдельные величины и вычисленную таким образом общую цифру потерь помножить на 0,85. Получаемая при этом точность в большинстве случаев совершенно достаточна.

В заключение следует еще вкратце указать, что величина потерь от химической неполноты горения изменяется в зависимости от того, положена ли в основу расчета высшая или низшая теплотворная способность. В то время как при сгорании в CO нет никакой разницы (CO имеет только одну теплотворную способность), при наличии CH_4 и H_2 , наоборот, приходится учитывать, что оба эти газа имеют различные величины Q_v и Q_n . Теплоты горения обоих этих веществ известны нам из уравнений горения: CH_4 обладает теплотой горения или, что то же самое, высшей теплотворной способностью в 9480 кал/кг, а H_2 — 3050 кал/кг.

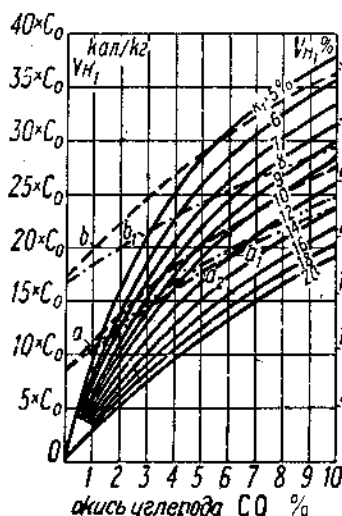


Рис. 49. Сгорание только в CO_2 и CO .

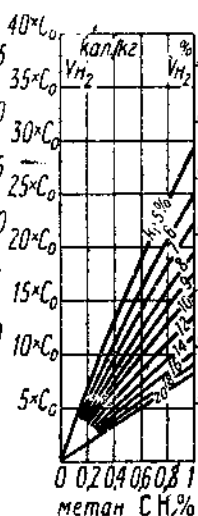


Рис. 50. Сгорание только в CO_2 и CH_4 .

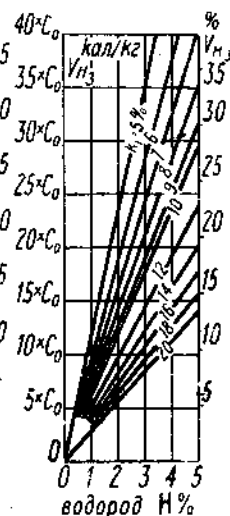


Рис. 51. Сгорание только в CO_2 , кроме того несгоревшие водородные частицы в отходящих газах.

Рис. 49 — 51. Потери от неполноты сгорания отходящих газов для различных содержаний CO_2 (k_1). V_n в кал/кг, v_n в процентах, считая на Q_n .

a — кажущиеся потери при 1% k_1 (или 3% k_1) и 20% k_1 для различных содержаний k_2 (подставлены в рис. 48 из рис. 49 или 50).

a_1 — действительные потери при 1% k_1 и 20% k_1 .

a_2 — действительные потери при 3% k_1 и 20% k_1 .

b — кажущиеся потери при 1% k_1 , 3% k_1 и 20% k_1 для различных содержаний k_2 (подставлены в рис. 48 из рис. 49 и 50), b_1 — действительные потери.

Низшие же теплотворные способности равны, соответственно, 8516 и 2568 кал/кг. Таким образом, при пользовании низшей теплотворной способностью получаются значения V_n и V_{n_1} , уменьшенные в процентном выражении для CH_4 на $\frac{9480 - 8516}{9480} = 10\%$ и для H_2 на $\frac{3050 - 2568}{3050} = 15,8\%$. Поэтому в тех случаях, когда расчет ведут с низшей теплотворной способностью, необходимо уменьшать величины потерь V_n и V_{n_1} , отсчитанные на рис. 50 и 51, соответственно либо на 10, либо на 15,8%.

Наиболее ценным в приведенных выше рисунках является то, что они дают представление о том, насколько значительно могут возрасти потери в результате неразумного ведения оття. На практике нередко случается, что неустраиваемые потери с теплотой отходящих газов, несмотря на свою большей частью довольно значительную величину, оказываются все же менее, чем устранимые потери от химической неполноты сгорания отходящих газов.

Пример 1. Требуется определить потери от химической неполноты сгорания для примера 1, рассмотренного на стр. 99.

Для $k_1 = 11\%$ и $k_2 = 3\%$ имеем из рис. 49:

$$V_{H_2} = 12,5 \quad C_0 = 12,5 \cdot 25,5 = 320 \text{ кал/кг}, \\ v_{H_2} = 11,5\%.$$

Точный расчет¹ дает:

$$v_{H_2} = \frac{320}{2775} = 11,5\%, \text{ считая на } Q_H, \\ v_{H_2} = \frac{320}{2330} = 13,72\%, \text{ считая на } Q_H.$$

Потери от неполноты горения, следовательно, больше общих потерь с теплотой отходящих газов, отнесенных к Q_H , которые по данным примера 1 на стр. 99 составляют только 11,4%.

Пример 2. Требуется определить потери от химической неполноты горения для примера 2, рассмотренного на стр. 100.

Для $k_1 = 11\%$, $k_2 = 3\%$, $ch = 0,5\%$ и $h = 2\%$ имеем из рис. 49 — 51 следующие величины (считая на Q_H):

$V_{H_2} =$	320 кал/кг	$v_{H_2} = 11,5\%$
$V_{H_2} = 7,8 \cdot C_0 = 7,8 \cdot 25,5 = 200$	"	$v_{H_2} = 7,2\%$
$V_{H_2} = 11 \cdot C_0 = 11 \cdot 25,5 = 281$	"	$v_{H_2} = 10,1\%$
	801 кал/кг	28,8%

В виду того, однако, что суммирование трех потерь, как это указывалось выше, дает итоговую потерю, большую действительной приблизительно на 15%, действительные потери от химической неполноты горения равны примерно:

$$V_{H_2} = 801 \cdot 0,85 = 682 \text{ кал/кг}, \\ v_{H_2} = 24,5\%.$$

Точный подсчет, произведенный с помощью уравнений, помещенных в Приложении дает следующие цифры:

$$V_{H_2} = 664 \text{ кал/кг}, \\ v_{H_2} = 24\%.$$

Отклонение, как видим, незначительно.

Если вести расчет на низший предел теплотворной способности, то частичные потери V_{H_2} и V_{H_2} изменяются, и, в частности, V_{H_2} уменьшается приблизительно на 10%, а V_{H_2} — приблизительно на 15,8%. Следовательно $V_{H_2} = (320 + 180 + 237) \cdot 0,85 = 625 \text{ кал/кг}$, и

$v_{H_2} = \frac{625}{2330} = 26,8\%$. Точный расчет, произведенный с помощью уравнений, приведенных в Приложении, дает $V_{H_2} = 616 \text{ кал/кг}$ и $v_{H_2} = 26,4\%$. Таким образом и здесь отклонение очень незначительно.

Заслуживает быть отмеченной также и в этом случае чрезвычайно большая величина потерь от химической неполноты горения: они почти одинаковы с общими потерями с теплотой отходящих газов, найденными для примера 2 на стр. 100.¹

3. Потери от недожога топлива в очаговых остатках.

В предшествующих разделах мы уже не раз указывали на то, что из всего углерода C , содержащегося в топливе, сгорает только некоторая часть его, которую мы обозначили C_0 . Остаток $C' = C - C_0$ состоит из части C'_1 , содержащейся в золе и шлаках, и из частей C'_2 и C'_3 , содержащихся в летучем коксе и в саже.

При топках с нормальными колосниковыми решетками, вообще говоря, преобладают потери углерода C'_1 в золе; при пылеугольных топках, а также нередко и при топках с решетками с нижним дутьем для низкосортных топлив, напротив, C'_2 и C'_3 достигают иной раз очень крупной величины.

Потери от недожога топлива в очаговых остатках возникают потому, что, во-первых, мелкие несгоревшие частицы угля проваливаются сквозь прозоры решетки и, во-вторых, потому, что другие частицы обволакиваются шлаками и удаляются при выгребании последних. Провал сквозь решетку зависит, с одной стороны, от ее конструкции и, с другой стороны, от рода угля (величина кусков, прочность и т. д.), тогда как вторая часть потерь в очаговых

¹ По формулам, приведенным в Приложении I, п. 11.

остатках зависит прежде всего и главным образом от свойств угольной золы. Так, например, если точка плавления золы низка, то зола становится в топке жидкой, обволакивает частицы угля, затем, попадая в задние, более холодные зоны решетки, снова затвердевает и препятствует таким образом сгоранию; напротив, при высокой точке плавления золы уголь, как правило, может сгорать полностью. Отсюда следует, что высокая точка плавления золы является желательной уже по чисто теплотехническим соображениям.¹

При нормальных топках потери от недожога топлива в очаговых остатках малы по сравнению с потерями с теплоотходящих газов. При правильном ведении огня и приспособлении методов работы к роду топлива и конструкции решетки, если только обстоятельства не скла-

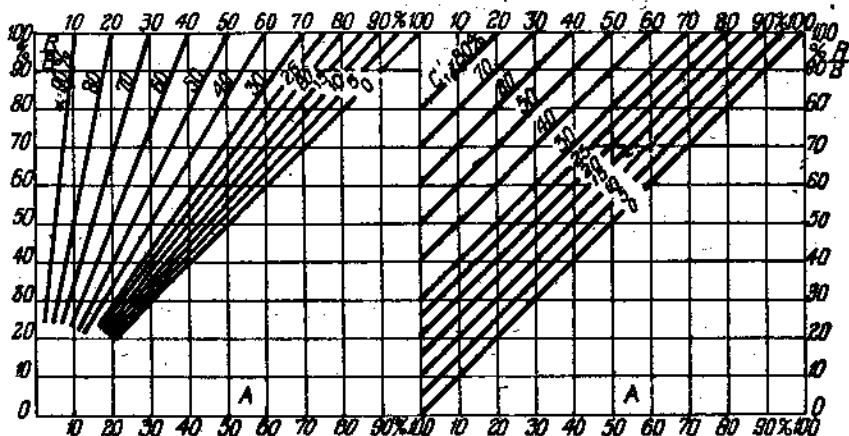


Рис. 52, 53.

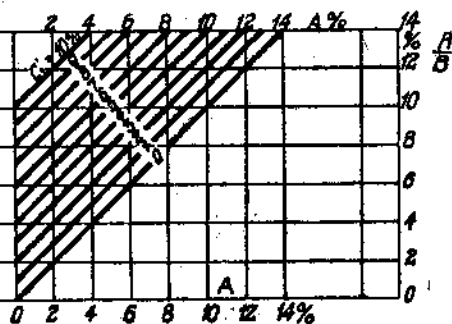


Рис. 54, 55.

Рис. 52 — 55. Отношение $\frac{R}{B}$ (количества очаговых остатков к количеству топлива) в зависимости от золосодержания A топлива для различных значений α (горючее в очаговых остатках) и C'_1 (потери углерода).

дываются почему-либо особенно неблагоприятно, вполне возможно удерживать эти потери в пределах 2—3%. Часто можно даже совершенно уничтожить их.

Определение потери в очаговых остатках V_{o_1} производится различными способами. Если известны весовые части несгоревшего углерода C'_1 , то, принимая во внимание, что 1% $C = 0,01$ кг обладает теплотворной способностью около 81 кал., получаем следующие простые соотношения:

$$V_{o_1} = C'_1 \cdot 81 \text{ кал./кг}, \quad (28)$$

$$v_{o_1} = \frac{C'_1 \cdot 8100}{Q} \%. \quad (28a)$$

Так как, однако, C'_1 нельзя определить прямым измерением, то представляется целесообразным определять V_{o_1} , исходя из других, легко измеряемых величин.

¹ Ранее мы уже указывали на эксплуатационные недостатки углей с низкими точками плавления золы (высокая напряженность решеток и кладки, закупорка, уменьшение подачи воздуха и т. д.).

При всяком испытании котла (безусловно целесообразно делать это и при текущем эксплуатационном контроле) определяется количество топлива B и соответствующее ему количество золы R за определенный промежуток времени, например, за 1 час, за 1 сутки и т. п.

Если бы в очаговых остатках совершенно не содержалось ничего горючего, то отношение $\frac{R}{B}$ было бы в точности равно процентному золосодержанию A угля. Поскольку же в очаговых остатках содержится что-либо горючее, $\frac{R}{B}$ должно быть больше A . Соотношение между $\frac{R}{B}$, A и горючими составными частями золы α (в процентах всех очаговых остатков R) представлено на рис. 52 и 53. Если две из этих трех величин измерены, можно, пользуясь этими рисунками, непосредственно отсчитать третью. Так как при многих более точных опытах определяются B , R , A и α , то рис. 52 и 53 могут служить одновременно также и для контроля замеров.

Если же эти величины определены, то можно сразу же отсчитать на рис. 54 или 55 соответствующее содержание C_1' , которое представлено в зависимости от величины $\frac{R}{B}$ и A .

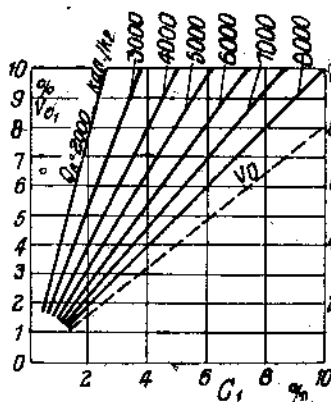


Рис. 56.

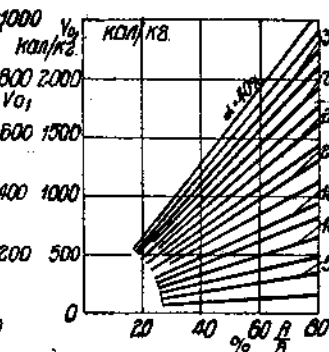


Рис. 57.

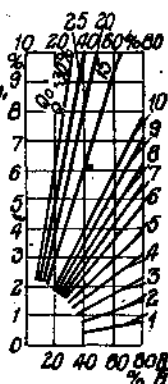


Рис. 58.

Рис. 56. Потери от недожога в очаговых остатках V_{o_1} (в кал/кг) и V_{o_1} (в %) в зависимости от потерь углерода C_1'' для различных значений теплотворной способности.

Рис. 57 и 58. Потери от недожога в очаговых остатках V_{o_1} (в кал/кг) и v_{o_1} (в %) в зависимости от отношений: $\frac{R}{B}$ для различных значений α (горючее в очаговых остатках) и $\frac{Q_0}{Q}$ (теплотворная способность очаговых остатков к теплотворной способности топлива).

При высокосортных топливах с малым золосодержанием A и малым отношением $\frac{R}{B}$ целесообразно пользоваться вычерченными в увеличенном масштабе графиками нижних рисунков (53 и 55), а при низкосортных топливах — рис. 52 и 54. Потери V_{o_1} , либо — соответственно — v_{o_1} , могут быть после этого легко вычислены из уравнений (28) и (28а) или отсчитаны прямо с помощью рис. 56. V_{o_1} , впрочем, может быть отсчитано также и непосредственно из $\frac{R}{B}$ и α (рис. 57).

Рис. 56 показывает, что в некоторых случаях, а именно у топлив с малой теплотворной способностью, V_{o_1} становится очень значительным.

Рис. 52 и 57, позволяющие очень удобно определять все величины, важные для характеристики потерь в очаговых остатках, точны лишь при предположении, что в очаговых остатках из горючих веществ содержится один только углерод. Обычно так оно и бывает, ибо летучие водородистые составляющие горючей массы угля удаляются задолго до того, как будет достигнута точка плавления золы. Однако, в частности при низкосортных, малощелочных топливах (угли малой прочности, угольная мелочь, землистые бурые угли), бывает и так, что

некоторая часть топлива проваливается сквозь решетку еще до того, как оно успеет отдать свои летучие составные части, так что зола в таких случаях часто содержит еще и водород, а иногда даже и воду, перешедшую из топлива. В таких случаях вышеуказанный метод является лишь приблизительно верным. Для целей точного определения целесообразно экспериментальное установление теплотворной способности золы (Q_0). Тогда потери V_{o_1} , v_{o_1} вычисляются из простых уравнений:

$$V_{o_1} = Q_0 \cdot \frac{R}{B} \text{ кал/кг} \quad (29)$$

или

$$v_{o_1} = \frac{Q_0}{Q} \cdot \frac{R}{B} \cdot 100\% \quad (29a)$$

Здесь Q — теплотворная способность топлива. Из рис. 58 можно получить потери v_{o_1} для различных значений $\frac{Q_0}{Q}$. В уравнения и рисунки для v_{o_1} можно подставлять для Q и Q_0 как низшую, так и высшую теплотворные способности в зависимости от того, на какую из этих двух величин рассчитывается тепловой баланс.

Наконец, следует еще указать на то, что для многих котельных топок провал вообще не должен рассматриваться как потеря, так как частицы угля, проваливающиеся сквозь прозоры решетки, попадают не в зольник, а в отдельное пространство, из которого их время от времени выгребают и снова забрасывают непосредственно в топку. В этом случае вообще нет надобности учитывать провал, даже и при производстве точных опытов, если только позаботиться о том, чтобы в конце и в начале опыта в отдельном пространстве, куда падают частицы непрогоревшего топлива, находились совершенно одинаковые количества угля; еще лучше, если и в начале и в конце опыта в этом пространстве вовсе не будет угля.

4. Потери тепла от нагрева очаговых остатков.

Потери эти, вообще говоря, очень незначительны, и поэтому — по крайней мере при высококалорийных топливах и хороших топочных устройствах — ими можно большей частью пренебречь. Если учесть, что в пределах тех температур, о которых здесь вообще может идти речь, теплоемкость шлака равна приблизительно 0,18 — 0,24, а угля — приблизительно 0,20, то даже при высоких температурах очаговых остатков получаются лишь очень незначительные тепловые потери, которые для хороших углей составляют много менее 1% их теплотворной способности. Определение же столь незначительных потерь, как правило, лишено всякого смысла, так как даже при очень точно поставленных испытаниях котлов необходимо считаться с ошибками от одного до нескольких процентов.

Совершенно иная картина получается при низкосортных и отбросных топливах, которые, с одной стороны, обладают очень низкой теплотворной способностью, а с другой — большей частью имеют также высокое золосодержание. Если, например, сжигается отбросное топливо с содержанием золы в 70% и высшей теплотворной способностью 1000 кал/кг, а зола, которая, допустим, составляет 75% от веса всего поданного топлива, удаляется с температурой t_0 , приблизительно равной 300° С, то при температуре воздуха $t_{воз} = 10^\circ \text{С}$ и $C_{ср} = 0,2$ потери составляют:

$$V_{o_2} = 0,75 (300 - 10) \cdot 0,2 = 43,3 \text{ кал/кг},$$

$$v_{o_2} = \frac{43,3}{1000} = 4,33\%.$$

Отсюда видно, что при известных условиях и эти потери также могут получить серьезное практическое значение. Поэтому как раз при сжигании очень малоценных топлив необходимо уделять особое внимание максимальному использованию теплосодержания очаговых остатков. Рис. 59 представляет потери V_{o_2} для различных значений $(t_0 - t_{воз})$.

И здесь также можно относить значения v_{o_2} к низшей или к высшей теплотворной способности, в зависимости от того, какой именно предел теплотворной способности положен в основу теплового баланса.

5. Потери с уносом и сажей.

При сжигании топлива только некоторая часть остатков последнего переходит в зольники; правда, у большинства топок с решетками часть эта очень велика. Другая часть осаждается в ходах котла, на обмуровке, в перегревателях и экономайзерах, в боровых и в дымовой трубе в виде летучей золы, летучего кокса и сажи; третья часть захватывается отходящими газами и выносятся ими из дымовой трубы, загрязняя воздух и осаждаясь на землю вне котельной. Эти два последних вида «летучих» остатков, так же, впрочем, как и «твердые» остатки в зольниках, состоят частью из негорючих веществ (летучая зола), никак, следовательно, не влияющих на баланс тепла, частью же из неполностью сгоревших частиц угля (летучий кокс) и из чистого углерода (сажа). Таким образом, при неподходящих топливах и топках, а также и при плохом ведении огня, вследствие этих летучих остатков тоже могут возникнуть значительные тепловые потери. Вообще же, несравненно более серьезны и чреватые опасными последствиями те эксплуатационные затруднения, те перебои производства и т. п., которые могут возникнуть вследствие оседания этих остатков на обмуровке и на поверхностях нагрева; вопрос этот будет рассмотрен далее более подробно.

В противоположность рассмотренным до сих пор различным видам потерь, потери с летучими остатками почти совершенно не поддаются точному измерению. Даже если удастся оса-

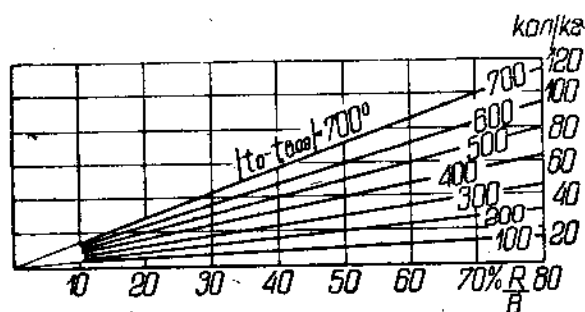


Рис. 59. Потери с ошутимой теплотой очаговых остатков V_0 , (в ккал/кг) в зависимости от величины отношения $\frac{R}{D}$ для различных разностей температур $(t_{\text{газ}} - t_{\text{ост}})$.

дить на фильтрах перед дымовой трубой большую долю частиц золы и угля, взвешенных в дымовых газах, и определить их количество и теплотворную способность, или же если с помощью особых измерительных приборов забираются пробы газов из дымоходов, то все же нет никакой возможности сделать какие-либо заключения относительно количества, оставшихся ранее на обмуровке, в ходах котла, в борове и т. д. Критерий для суждения об этой части потерь можно получить только в том случае, если подвергнуть качественному и количественному исследованию и определению остатки, извлекаемые наружу при чистке отдельных частей котельной

установки, производимой во время более продолжительных остановок котла, и пересчитать величину найденных таким путем потерь на период работы котла.

Цифровая обработка данных аналогична таковой для твердых остатков. Если количество летучих остатков и содержание горючего в них или их теплотворная способность определены измерением, либо оценены на основании наблюдений, то можно воспользоваться рис. 52—58 предыдущего раздела для определения потерь V_k и V_c ; можно также вычислить потери углерода C'_2 и C'_3 . Это последнее определение важно постольку, поскольку оно позволяет вычислить величину C_0 действительного сгоревшего количества углерода по формуле:

$$C_0 = C - (C'_1 + C'_2 + C'_3). \quad (30)$$

Несмотря на то, что потери с уносом и сажей схожи по своей сущности, в основе их возникновения лежат большей частью совершенно различные причины. В то время как сажа образуется преимущественно при недостатке воздуха вследствие несгорания летучих составных частей, основной причиной потерь с уносом являются обычно, наоборот, высокий избыток воздуха и сильная тяга. В особенности при топках с нижним дутьем и при применении измельченных углей мельчайшие твердые частицы угля подхватываются сильной тягой и покидают топочное пространство в несгоревшем виде. Также и при пылеугольных топках величина потерь с уносом может оказаться, при известных условиях, довольно значительной, в особенности тогда, когда пыль крупна, а время, в течение которого она находится в топочном пространстве, недостаточно для полного сгорания. Из рис. 31 следует, что необходимая продолжительность горения тем выше, чем крупнее частицы угля. При крупной

угольной пыли точное пространство должно быть поэтому больше, а скорость газа меньше, чем при тонкоразмолотой пыли.

Величина потерь с сажей зависит отчасти от рода топлива и конструкции топки, но главным образом от правильности обслуживания работы топки, от правильности ведения огня. Длиннопламенные угли, т. е. топлива с высоким содержанием летучих составных частей, склонны к образованию сажи в большей мере, чем короткопламенные, негазовые угли. Если топочное пространство слишком мало и слишком низко, то находящиеся в нем летучие составные части, прежде нежели они успевают сгореть, претерпевают на сравнительно холодных поверхностях нагрева резкое внезапное охлаждение ниже температуры воспламенения и покидают топочное пространство в виде сажи. Преимущественно же сажа образуется при недостатке воздуха, например при внезапном дросселировании шиберов. Далее, при топках с ручной загрузкой образование сажи обычно много сильнее, чем при механических топках, ибо в первых лишь очень редко достигается равномерное горение. Если только кочегар не изменяет мгновенно положения шиберов, то при каждом забросе топлива периодически возни-

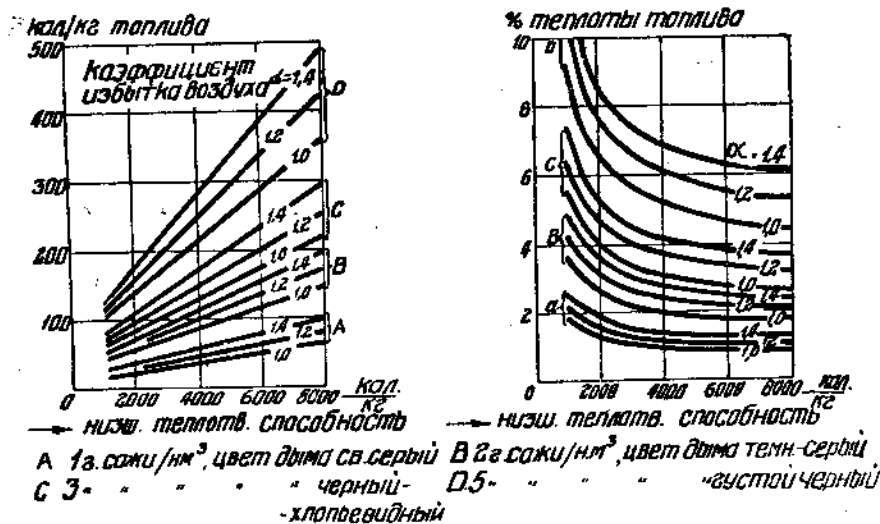


Рис. 60. Потери с сажей V_c (в кал/кг) и v_c (в %), в зависимости от низшей теплотворной способности, для различных коэффициентов избытка воздуха.

кает недостаток воздуха, ведущий к неполному горению и к образованию сажи. Если же, напротив, топочное пространство и топливо хотя бы в некоторой степени соответствуют друг другу (высокие топочные пространства при газовых углях) и если топка обслуживается правильно, то при любых топливах можно почти полностью предотвратить образование сажи.

Унос содержит наряду с лишенными газа твердыми частицами углерода большей частью также значительные количества золы; в противоположность этому сажа является почти чистым углеродом с теплотворной способностью около 8100 кал/кг. Содержание сажи может быть примерно оценено по виду дыма, выходящего из дымовой трубы и представляющего либо бесцветным, либо светлосерым, темносерым, либо, наконец, черным и хлопьевидным. В первом случае дымовые газы практически свободны от сажи; при светлосером дыме можно считать, что количество сажи не превышает $1-2 \text{ г/м}^3$, при темном дыме $2-3$ и при хлопьевидном 3 г/м^3 (иногда, впрочем, больше). При каменных и бурых углях потери с сажой выражаются цифрами, сопоставленными в таблице 13 и на рис. 60.¹

Отсюда видно, что при одинаковом содержании сажи в дымовых газах абсолютная потеря (V_c) для бурого угля много меньше, а относительная потеря (v_c), отнесенная к теплотворной способности, наоборот, значительно больше. Кроме того ясно видна сильная зависимость от избытка воздуха.

¹ Потери приведены в зависимости от нижней теплотворной способности, ибо между таковой и объемом дымовых газов существует простое и определенное взаимоотношение (см. рис. 14).

ТАБЛИЦА 13.
Тепловые потери с сажей.

	Теплотворная способность, Q_n кал/кг	Коэффициент избытка воздуха α	Объем дымовых газов V_r м ³ /кг	V_c			v_c		
				1 м ³ /кг	2 м ³ /кг	3 м ³ /кг	1 м ³ %	2 м ³ %	3 м ³ %
Каменный уголь	8 000	1,2	10,50	85	170	255	1,06	2,12	3,18
		1,4	12,15	98,5	195	292,5	1,23	2,46	3,69
		1,6	13,85	112	225	336	1,40	2,80	4,20
	7 000	1,2	9,30	75,3	150,6	225,9	1,07	2,14	3,21
		1,4	10,85	88	176	264	1,25	2,51	3,76
		1,6	12,35	100	200	300	1,43	2,86	4,29
Бурый уголь	3 500	1,2	5,45	44,1	88,2	132,3	1,26	2,52	3,78
		1,4	6,25	50,6	101,2	151,8	1,44	2,89	4,34
		1,6	7,10	57,5	115	172,5	1,64	3,28	4,92
	2 500	1,2	4,32	35	70	105	1,40	2,80	4,20
		1,4	4,95	40	80	120	1,60	3,20	4,80
		1,6	5,57	45	90	135	1,80	3,60	5,40

Поэтому цвет дымовых газов, выходящих из дымовой трубы, являясь некоторым критерием величины тепловых потерь на 1 м³ газа, не позволяет все же судить о величине потерь на 1 кг угля. Для установления также и этих последних, необходимо знать количество дымовых газов на 1 кг топлива.

Как это видно из таблицы 13 и рис. 60, потери могут оказаться при известных условиях довольно значительными. Далее следует иметь в виду, что высокое содержание сажи в дымовых газах почти всегда связано с высокими же потерями от неполноты горения и что помимо этого сильное сажеобразование вредно как в гигиеническом, так и в целом ряде других отношений. Поэтому всегда надо добиваться безусловного устранения именно этого вида потерь.

6. Потери лучеиспусканием и теплопроводностью.¹

В то время как все рассмотренные нами до сего времени виды потерь в большей или меньшей мере зависят от горения и метода ведения огня в топке и, следовательно, могут быть в крайнем случае хотя бы частично, уменьшены инструктированием и надзором за работой персонала котельной, — потери лучеиспусканием и теплопроводностью совершенно независимы от обслуживания. Этим последним потерям до сего времени не уделялось почти совершенно никакого внимания отчасти потому, что величина их обычно не переоценивалась, а отчасти также и потому, что безукоризненное их определение является делом в высшей степени кропотливым и утомительным и требует очень много времени. Поэтому в большинстве опубликованных в литературе описаний испытания котлов встречается общепринятый термин *потери, определенные по разности*, или *остаточные потери*. Определенно подвергались потери с теплотой отходящих газов, потери от неполноты сгорания — химической и механической — газов и очаговых остатков, к. п. д. котельной установки, а величина, недостающая для сведения теплового баланса, просто обозначалась *остаточными потерями* или *потерями по разности*.

Нет надобности подчеркивать, что такой способ исследования, несмотря на всю свою простоту, никоим образом не может быть назван образцовым. С одной стороны, при таком методе отсутствует возможность какого бы то ни было контроля достоверности и правильности результатов опыта или испытания, с другой стороны, остаточные потери отнюдь не идентичны с потерями лучеиспусканием и теплопроводностью, так как в них содержатся, кроме того,

¹ Иначе говоря, потеря от охлаждения обмуровки котла. *Прим редактора.*

и все ошибки, допущенные при определениях различных видов потерь и к. п. д. При всяком испытании, на основании которого можно было бы построить действительно достоверный тепловой баланс, совершенно необходимо, чтобы все без исключения потери, а следовательно и потери лучеиспусканием и теплопроводностью, определялись возможно более точно посредством соответствующих измерений. Только в этом случае и возможно составить представление о действительной точности метода измерений и оценить те ошибки, которые могли возникнуть при производстве отдельных замеров. И только идя таким путем, можно судить о количествах тепла, теряющихся вследствие лучеиспускания и теплопроводности.

Непосредственное определение потерь лучеиспусканием и теплопроводностью путем измерения возможно, правда, только приближенно. Большие трудности представляет уже само определение многогранной поверхности, имеющей чрезвычайно неправильные формы: стоит только вспомнить о многочисленных присоединенных вспомогательных приборах и аппаратах, трубопроводах, вентилях и т. п.; сюда следует отнести еще различный в каждом данном месте характер температурного поля, повсеместно различные потоки воздуха, обусловливаемые конвекцией, порывами ветра и т. п., и, наконец, то обстоятельство, что часть тепла, которую можно только приближенно оценивать, уходит в землю. Тем не менее, с помощью тщательных измерений, которые должны быть поставлены на всех характерных участках поверхностей котла, можно определить и эти потери с той же самой степенью точности, как и все остальные потери котла.¹

С другой стороны, однако, экспериментальное определение потерь лучеиспусканием и теплопроводностью обладает одним очень большим достоинством, которое, в большинстве случаев, с избытком окупает недостаток, заключающийся в трудности и кропотливости измерений, именно — почти полной независимостью от всех условий опыта. Одно единственное исследование, тщательно и целесообразно проведенное в один прием, с учетом и регистрацией всех условий опыта и различных побочных явлений, позволяет установить совершенно неизбывные признаки данного котла; всякий повторный опыт, проведенный при тех же температурных и аэродинамических условиях в котельной, неизбежно привел бы, если откинуть влияние нагрузки, к той же самой цифре потерь. Если же проделан хотя бы один единственный опыт, то, исходя из полученной таким образом точки характеристической кривой, можно для любых иных условий определить чисто расчетным путем характеристическую кривую потерь на всем ее протяжении. Таким образом, если при определении всех прочих потерь котла совершенно неизбежен постоянный контроль и постоянные проверочные измерения и подсчеты, то при определении потерь лучеиспусканием и теплопроводностью достаточен один единственный, правда, довольно трудный опыт.

Чрезвычайно значительное различие, существующее между потерями лучеиспусканием и теплопроводностью, с одной стороны, и между потерями с теплотой отходящих газов, на провал и выгреб, вследствие неполноты горения и т. д. — с другой, заключается в том, что первые зависят почти исключительно от конструкции котла, тогда как на вторые влияют конструкция, род топлива и ведение огня в топке.

В связи с этим следует упомянуть кратко еще об одной особенности потерь лучеиспусканием и теплопроводностью, которая будет рассмотрена более подробно в одном из дальнейших разделов, а именно — в сильной зависимости от продолжительности периода работы и смещения во времени далеко за момент остановки котла. В то время как все остальные виды потерь прекращаются в тот момент, когда котел выводится из работы, эти потери продолжают еще нередко в течение многих часов, а иногда даже нескольких суток. При растопке котла, наоборот, они начинаются не сразу, а обычно только много часов спустя, — именно тогда, когда внешняя поверхность котла приобретает температуру, превышающую таковую окружающего воздуха. Поэтому для определения действительных потерь котла в условиях длительной, непрерывной работы необходимо выждать достижения *состояния равновесия* (установившегося состояния), при котором количество тепла, отдаваемого поверхностью, в точности равно количеству тепла, подводимому к поверхности изнутри, и только после этого приступать к испытанию.

Наконец следует указать еще на то, что абсолютные потери ($\dot{V}_L$) лишь незначительно зависят от нагрузки, тогда как выраженные в процентах (v_L) зависят от нее в очень большой мере. Эти важные зависимости также будут рассмотрены в дальнейшем более подробно.

¹ См. Praetorius, Die Strahlungs- und Zeitungsverluste, Arch. f. Wärmewirtschaft, 6, 284, 1925; 7, 18 и 77, 1926.

Для величины V_x и v_x не представляется возможным привести здесь, подобно тому как это было сделано выше для других видов потерь, определенные закономерные зависимости и соответственные формулы, ибо факторы, влияющие на эти потери, слишком многочисленны и разнородны. Не представляется также возможным графически изобразить потери лучеиспусканием и теплопроводностью, так как при этом пришлось бы составить весьма большое число отдельных графиков, которые не столько облегчили бы задачу определения потерь, сколько запутали бы ее. Потери зависят:

1) от общей поверхности котла, включая сюда все связанные с котлом части и устройства, воспринимające тепло изнутри, а также соответствующий участок поверхности земли (фундамент);

2) от внутренней поверхности топки и ходов котла, поскольку таковая отдает тепло наружу путем теплопроводности;

3) от внутреннего и наружного коэффициентов теплопередачи, которые в свою очередь зависят от скоростей газов и воздуха, от лучистой теплоотдачи и от разностей температур;

4) от коэффициентов теплопроводности тех отдельных материалов, из которых сооружена котельная установка;

5) от толщины стенок котла.

Так как факторы, перечисленные в пунктах 2—5, определяют собой температуру внешней поверхности и так как таковая может быть установлена измерением, то обычно из нее и исходят. Тогда часовая потеря с каждого отдельного участка поверхности определится следующими уравнениями:

$$V_x' = F' \alpha_2' (\theta_2' - t_2') \text{ кал/ч}, \quad (31)$$

$$v_x' = \frac{F' \alpha_2' (\theta_2' - t_2')}{Q} \cdot 100\%, \quad (31a)$$

где F' — величина исследуемого участка поверхности в м^2 , α_2' — наружный (внешний) коэффициент теплоотдачи на данном участке, θ_2' — температура внешней поверхности, t_2' — температура окружающего воздуха и, наконец, Q — теплотворная способность топлива. Если

теперь исследовать большое число характерных участков поверхности и определить величины, входящие в уравнение (31), то можно определить общую потерю; для этого, учтя процентную долю соответствующих участков поверхности, надо предварительно вычислить средние значения из отдельных частичных величин. Если, например, для 25% всей поверхности найдено $\alpha_2' = 4$, для 50% всей поверхности $\alpha_2' = 5$ и для последних 25% $\alpha_2' = 8$, то среднее значение будет

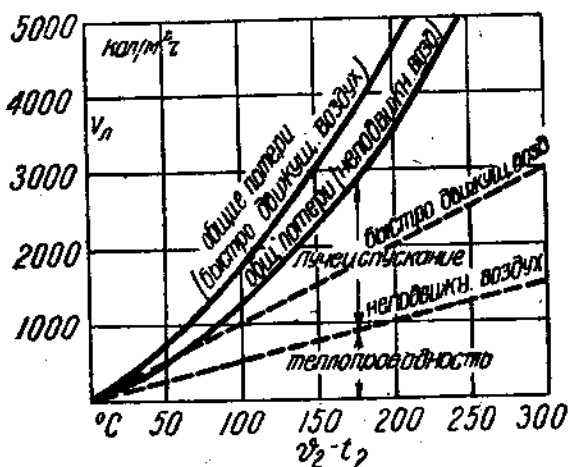
$$\alpha_{2cp} = \frac{25\alpha_2' + 50\alpha_2'' + 25\alpha_2''' =}{25 \cdot 4 + 50 \cdot 5 + 25 \cdot 8} = 5,5.$$

Подобным же образом вычисляют θ_{2cp} и t_{2cp} и затем находят общие потери:

$$V_x = F \alpha_{2cp} (\theta_{2cp} - t_{2cp}) \quad (32)$$

$$v_x = \frac{F \alpha_{2cp} (\theta_{2cp} - t_{2cp}) \cdot 100}{Q} \quad (32a)$$

Рис. 61. Потери лучеиспусканием и теплопроводностью V_x , отнесенные к 1 м^2 поверхности, в зависимости от разности температур $(\theta_2 - t_2)$.



Потери лучеиспусканием и теплопроводностью могут быть очень значительными даже и при сравнительно хорошей тепловой изоляции; правильность этого утверждения доказывается моими исследованиями, проведенными на водотрубном котле.¹

Рис. 61 показывает, как сильно возрастают тепловые потери с увеличением разности температур $(\theta_2 - t_2)$, в частности вследствие лучеиспускания, впрочем, лишь незначительно

¹ См. выноски на стр. 111.

сказывающегося при низких температурах поверхностей. Точно так же ясно видно влияние скорости движения воздуха. Поэтому следует уделять величайшее внимание хорошей изоляции всех тех частей котла, к которым изнутри подводятся значительные количества тепла; в особенности это необходимо в связи с потерями, возникающими при перерывах в работе котла, которые будут отдельно рассмотрены нами далее. Кроме того всегда необходимо следить за тем, чтобы скорость движения воздуха вдоль стенок котла и топки была возможно минимальной.

VII. КОЭФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ УСТАНОВИВШЕГОСЯ СОСТОЯНИЯ.

Обозначения. ¹

$D_{к,т}$	— количество произведенного пара,		
D_1	— расход пара на вспомогательные механизмы в самой котельной,		
D_2	— расход пара на сажеобдувочные аппараты, водоочистители и т. п.,		
N квт	— полезная мощность,		
$\eta_{к,т}$, η_1 , η_2 , η_n %	— частичные к. п. д. котла, перегревателя, экономайзера, воздухоподогревателя (отнесенные к всему количеству тепла, подведенному к котлу),		
$\eta'_к$, η'_1 , η'_2 , η'_n %	— индивидуальные к. п. д. котла, перегревателя, экономайзера, воздухоподогревателя (отнесенные к количеству тепла, подведенному к данной части агрегата),		
ϵ_k , ϵ_1 , ϵ_2 , ϵ_n %	— коэффициенты доброкачественности котла, перегревателя, экономайзера, воздухоподогревателя (отнесенные к количеству тепла, использованному в данной части агрегата),		
$\eta_{общ}$ %	— общий к. п. д.		
$I_{воз_1}$	кал.	— теплосодержание воздуха до воздухоподогревателя	} считая на 1 кг топлива
$I_{воз_2}$	»	» после »	
I_1	»	» дымовых газов до перегревателя	
I_2	»	» » после »	
I_3	»	» » до экономайзера	
I_4	»	» » после »	
I_5	»	» » до воздухоподогревателя	
I_6	»	» » после »	
i'_1	кал/кг	» воды до экономайзера	
i'_2	»	» после »	

1. Общий коэффициент полезного действия котла.

Коэффициент полезного действия котла, как уже указывалось ранее, есть отношение использованного тепла ко всему подведенному теплу. Это последнее обычно совпадает с теплотворной способностью топлива, ² которая лучше всего определяется калориметрически. Напротив, количество использованного тепла приходится определять специальными измерениями. Задачей топки парового котла является нагревание воды в котле и превращение ее в пар; в отдельных случаях она служит также и для целей нагревания питательной воды или воздуха в подогревателях, обогреваемых теплотой дымовых газов. В большинстве случаев, однако, последняя побочная задача может рассматриваться как некоторый «внутренний процесс» (далее это будет пояснено более подробно).

Определение количества тепла, подведенного за определенный промежуток времени к воде котла, является сравнительно легкой задачей. Для этого нужно только знать, во-первых, количество воды, поданной за данный промежуток времени, и ее температуру и, во-вторых, давление и температуру пара. Необходимо, следовательно, определить каким-либо градуированным водомером количество воды W , с помощью двух термометров — температуры питательной воды t'_n и пара t_n и, наконец, с помощью манометра — давление пара p . После этого, пользуясь таблицами водяного пара, либо рис. 41, определяют теплосодержания питательной воды i' и пара i'' и находят количество переданного тепла из выражения:

$$Q = (i'' - i') \cdot W. \quad (33)$$

Необходимо однако заметить, что теплота, подведенная к воде, и фактически использованная не вполне равнозначны. Происходит это прежде всего потому, что вследствие неплотностей на пути от водомера до котла может иметь место утечка воды; далее, если предохрани-

¹ Кроме ранее уже примененных обозначений, см. стр. 42, 65, 85 и 91.

² Иногда в топку подводится еще добавочная теплота, например теплота нагретых горючих газов или нагретого добавочного воздуха.

тельные клапаны травят пар, то нередко возникают значительные потери, и, наконец, вполне возможно, что цифра теплосодержания пара, заимствованная из таблиц для водяного пара, не будет точно отвечать действительным условиям; поскольку полученный пар может быть в большей или меньшей степени влажным. Это происходит нередко не только при насыщенном, но даже и при перегретом паре, ибо в перегревателе сильно перегревается некоторая часть пара, тогда как остальная часть остается влажной.

При определении общего к. п. д. котла в качестве использованного тепла следует принимать количество тепла, содержащееся в паре при выходе его из котла в трубопровод. При тщательном проведении опыта уравнение (33) является достаточным в подавляющем большинстве случаев; в частности, во время опыта надо следить за тем, чтобы на трубопроводе для питательной воды между водомером и котлом не было абсолютно никаких неплотностей (в противном случае необходимо измерить и вычислить потери воды), чтобы котел не травил пар и, наконец, чтобы пар, выходящий из котла, был сухим (иначе необходимо устроить осушитель пара и вычисть выделенную в нем воду). Во всех случаях целесообразно контролировать измерения воды измерениями пара или, что еще лучше, измерениями конденсата за машинами и нагревательными аппаратами.

Коэффициент полезного действия выразится, таким образом, следующей формулой:

$$\eta_{\text{общ}} = \frac{D(i'' - i')}{BQ} \cong \frac{W(i'' - i')}{BQ}. \quad (34)$$

Здесь D означает количество пара, произведенного за время испытания котла, равное при соблюдении вышеназванных предпосылок количеству воды W , B — количество топлива, сожженного за тот же период времени, и Q — теплотворная способность топлива. В зависимости от того, ведется ли расчет с высшей или низшей теплотворной способностью, в уравнение (34) подставляют либо $Q_{\text{в}}$, либо $Q_{\text{н}}$. Для теплосодержания пара имеем следующие соотношения: при насыщенном паре

$$i'' = i'_n = i'_n + r$$

и при перегретом паре

$$i'' = i''_n = i'_n + r + i''_{\text{пер}}.$$

Здесь i'_n , r и $i''_{\text{пер}}$ — известные из рис. 41 и 42 величины теплоты жидкости, теплоты испарения и теплоты перегрева.

Определенный таким образом коэффициент полезного действия есть к. п. д. равновесия, или, иначе говоря, к. п. д. установившегося состояния, потому что он был установлен во время опыта, при котором котел работал с неизменной нагрузкой в состоянии равновесия или, что то же самое, в установившемся состоянии. Под таковым понимают состояние, при котором процессы горения и теплопередачи не изменяются; это бывает тогда, когда котел работает непрерывно столько времени, что больше в нем уже не возникает никаких добавочных потерь, связанных с разогревом, и когда нагрузка его не меняется за все время испытания.

2. Частичные коэффициенты полезного действия.

До сего времени котел рассматривался как одно целое, независимо от того, простой ли это котел для насыщенного пара, без всяких дополнительных устройств, или современный котел для перегретого пара с перегревателем, экономайзером, воздухоподогревателем и т. п. При этом в основу расчета общего к. п. д. клалось теплосодержание питательной воды перед экономайзером и теплосодержание пара за перегревателем, конечно, при условии наличия этих аппаратов. Далее, до сего времени при установлении количества подведенного тепла учитывалась только теплотворная способность топлива. Таким образом получался коэффициент полезного действия котла, включая в последний и все дополнительные теплотехнические устройства.

Однако могут быть и такие случаи, когда требуется исследовать котел только как парогенератор или же определить к. п. д. отдельных побочных устройств котельной установки. Наиболее характерной в каждом данном случае величиной является отношение количества тепла, использованного в соответствующем отдельном устройстве, к количеству тепла, подведенному ко всему котлу в целом.

Обозначим через:

i'_1	(кал/кг)	теплосодержание воды до экономайзера,
i'_2	»	» после »
i''_n	»	пара до перегревателя,
i''_n	»	» после »
$I_{воз.}$	»	воздуха после воздухоподогревателя (считая на 1 кг топлива),

Тогда получаются следующие выражения к. п. д.:
для котла в отдельности

$$\eta_k = \frac{D (i''_n - i'_2)}{B (Q + I_{воз.})} \cong \frac{W (i''_n - i'_2)}{B (Q + I_{воз.})}, \quad (35)$$

для перегревателя

$$\eta_n = \frac{D (i''_n - i''_n)}{B (Q + I_{воз.})} \cong \frac{W (i''_n - i''_n)}{B (Q + I_{воз.})}, \quad (36)$$

для экономайзера

$$\eta_o = \frac{W (i'_2 - i'_1)}{B (Q + I_{воз.})}, \quad (37)$$

для воздухоподогревателя

$$\eta_s = \frac{I_{воз.}}{Q}. \quad (38)$$

При этом сделано предположение, что теплосодержание воздуха перед воздухоподогревателем $I_{воз.} = 0$, т. е. все к. п. д. и теплосодержания отнесены к температуре воздуха 0° . Далее предположено, что в котле производится совершенно сухой пар и что в перегревателе пар только перегревается. Если же пар еще влажен, то количество тепла, используемого в самом котле, становится соответственно меньше, а количество тепла, используемого в перегревателе, который в этом случае помимо перегрева пара еще подсушивает некоторую часть последнего, — соответственно больше.

Таким образом при вычислении всех частичных к. п. д. в качестве подведенного тепла следует учитывать теплосодержание как топлива (теплотворная способность такового), так и воздуха, подаваемого для горения, тогда как при определении общего к. п. д. котла с воздухоподогревателем берется одна только теплотворная способность топлива, ибо подогрев воздуха является сам по себе «внутренней» составляющей процесса горения. Так, например, легко можно себе представить, что воздух, как это нередко и бывает на практике, подогревается только уже в самом топочном пространстве (например при воздушном охлаждении стенок топочного пространства). Становится совершенно очевидным, что в качестве подведенного тепла следует брать только теплотворную способность топлива, ибо только благодаря ей воздуху сообщается теплота. Принципиально же, впрочем, ничего не изменится и в том случае, если перенести подогрев воздуха из собственно топочного пространства в пространство, занимаемое отходящими газами, и нагревать воздух теми же, но тем временем сильно уже охладившимися топочными газами.

Если желательно определить общий к. п. д., исходя из частичных к. п. д., то необходимо помнить, что теплота используется только в самом котле, в экономайзере и в перегревателе. В воздухоподогревателе теплота утилизируется лишь косвенным образом, ибо она снова подводится к котлу и используется там, так же как и поданное топливо, только частично. Необходимо, следовательно, различать к. п. д. воздухоподогревателя η_s от его *полезного эффекта* η_{s_1} , влияющего на величину общего к. п. д. Полезный эффект определяется из выражения:

$$\eta_{s_1} = \eta_n (\eta_k + \eta_o + \eta_n). \quad (39)$$

Общий коэффициент полезного действия будет, следовательно,

$$\begin{aligned} \eta_{общ} &= \eta_k + \eta_o + \eta_n + \eta_{s_1} = \eta_k + \eta_o + \eta_n + \eta_n (\eta_k + \eta_o + \eta_n) = \\ &= (1 + \eta_n) (\eta_k + \eta_o + \eta_n). \end{aligned} \quad (40)$$

Мы уделили всем этим соотношениям так много внимания из тех соображений, что при определении понятия к. п. д. очень часто возникает большая путаница. Как ни просто основное определение понятия коэффициента полезного действия (отношение использованного тепла к подведенному), все же нередко при наличии не совсем обычных условий нахождение частных к. п. д. оказывается крайне затруднительным. Всегда следует прежде всего установить картину теплового потока в отдельных частях котла, после чего обычно уже не трудно выяснить к. п. д. и полезный эффект каждой отдельной части всего агрегата.

Вообще же необходимо иметь в виду следующее:

1. При эксплуатационных испытаниях большей частью определяют общий к. п. д. котла, для чего следует пользоваться уравнением (34). Необходимая для этого предпосылка сводится к тому, чтобы экономайзер, перегреватель и воздухоподогреватель (поскольку они, конечно, вообще имеются) являлись составными частями только одного данного котла.

2. При приемных испытаниях и составлении точного теплового баланса часто оказывается необходимым определить один какой-либо или же все частичные к. п. д. То же самое бывает необходимым, когда экономайзер, перегреватель и т. д. принадлежат одновременно нескольким котлам и когда, следовательно, количество воспринимаемого ими тепла зависит не только от одного испытуемого котла, или когда воздух, подогретый в воздухоподогревателе, расходуется не только на поддержание горения, но и для других целей (для отопления, высушивания и т. п.). Для определения частичных к. п. д. следует пользоваться уравнениями (35) — (38).

3. Под подведенным теплом, применительно к определению общего к. п. д., следует понимать только теплоту топлива, ибо подогрев воздуха является «внутренним» процессом. Теплосодержание воздуха должно быть присчитано к подведенному теплу только в том случае, когда воздух подогревается вне котла, например отходящими газами промышленных печей. Напротив, при определении всех частичных к. п. д. (за исключением к. п. д. самого воздухоподогревателя) подведенным теплом считается сумма теплотворной способности топлива и теплосодержания воздуха, подаваемого для горения.

3. Относительные коэффициенты полезного действия.

Частичные коэффициенты полезного действия, определяемые уравнениями (35) — (38), относятся ко всему подведенному теплу. Они характеризуют только полезную мощность и экономичность отдельных составных частей котла, но не степень использования тепла в них самих. Наиболее характерным для потерь, возникающих в отдельных частях, является отношение количества использованного тепла к теплу, *израсходованному непосредственно в этой же самой части установки*, — отношение, которое в дальнейшем мы будем называть относительным коэффициентом полезного действия. Если обозначить через

I_1	кал/кг)	— теплосодержание топочных газов	до перегревателя	} считая на 1 кг топлива
I_2	"	"	после перегревателя	
I_3	"	"	до экономайзера	
I_4	"	"	после экономайзера	
I_5	"	"	до воздухоподогревателя	
I_6	"	"	после "	

то получим следующие выражения для относительных к. п. д.:

$$\epsilon_n = \frac{D(i_n'' - i_n'')}{B(I_1 - I_2)} \cong \frac{W(i_n'' - i_n'')}{B(I_1 - I_2)}, \quad (41)$$

экономайзера

$$\epsilon_2 = \frac{W(i_2' - i_1)}{B(I_3 - I_1)}, \quad (42)$$

воздухоподогревателя

$$\epsilon_n = \frac{I_{воз.}}{I_5 - I_6}. \quad (43)$$

Относительный к. п. д. самого котла большей частью не представляется возможным определить непосредственно, ибо, как правило, перегреватель устанавливается в ходах котла, вследствие чего количество тепла, подводимого к котлу как к таковому, может быть установлено только с помощью довольно сложных измерений и подсчетов. Напротив, вполне возможно

определить относительный к. п. д. совместно для котла и перегревателя, для чего нужно только предварительно установить значение теплосодержания отходящих газов за котлом, т. е. либо перед экономайзером, либо перед воздухоподогревателем (I_2 либо I_3). Тогда получаем

$$\varepsilon_{\kappa + \pi} = \frac{D(i_{\pi}'' - i_2')}{B(Q - I_3)} \approx \frac{W(i_{\pi}'' - i_2')}{B(Q - I_3)}, \quad (44)$$

Определение относительного к. п. д. отдельных частей котельной установки важно потому, что этим путем можно установить величину возникающих в процессе теплопередачи потерь вследствие неплотностей обмуровки и от лучеиспускания и теплопроводности. Определение теплосодержаний от I_1 до I_6 производится, как это уже указывалось в предыдущих разделах, путем измерения температур газов t_x и нахождения расчетным путем объема газов V_x в м³/кг, а также средней теплоемкости $C_{\text{ср}}$ на основании общего уравнения:

$$I = V_x C_{\text{ср}} (t_x - t_{\text{воз}}).$$

В заключение следует указать еще на то обстоятельство, что и относительный к. п. д., взятый в отдельности, не является сам по себе вполне достаточным критерием для оценки работы котла или какого-либо теплообменного аппарата. Вполне мыслим, например, такой случай, когда экономайзер, будучи совершенно герметически уплотненным относительно внешнего пространства и обладая лишь очень незначительными потерями от лучеиспускания и теплопроводности, в то же самое время настолько имеет загрязненные поверхности нагрева, что теплопередача и нагрев воды в нем крайне малы, а температуры отходящих газов за ним почти столь же высоки, как и до него. Следовательно, хотя ε очень высоко, η будет очень низко. Поэтому *использование тепла характеризуется одновременно и относительным коэффициентом и коэффициентом полезного действия.*

4. Индивидуальные коэффициенты полезного действия.

Кроме частичного к. п. д. и относительного к. п. д., можно установить еще третью сравнительную величину, являющуюся непосредственным мериллом хорошей работы той или иной отдельной части, а именно *индивидуальный коэффициент полезного действия*. Последний представляет собою отношение количества тепла, использованного в данной отдельной части, к количеству тепла, подведенному к ней же. Таким образом для каждой отдельной части устанавливается относительная величина, по смыслу своему соответствующая общему к. п. д. котла.

Уравнения для определения различных индивидуальных к. п. д. имеют следующий вид:

$$\eta_{\kappa}' = \frac{D(i_{\pi}'' - i_{\pi}')}{BI_1} \approx \frac{W(i_{\pi}'' - i_{\pi}')}{BI_1}, \quad (45)$$

$$\eta_{\pi}' = \frac{W(i_2' - i_1')}{BI_3} \quad (46)$$

$$\eta_{\pi}' = \frac{I_{\text{погр}}}{I_3}. \quad (47)$$

Если в результате загрязнения поверхностей нагрева теплопрохождение уменьшается, то индивидуальные к. п. д. становятся меньше. Они являются, следовательно, мериллом суммы всех потерь, возникающих в соответствующей отдельной части котельного агрегата, тогда как относительный к. п. д. отдельной части характеризует только ее непосредственные, прямые потери, но не потери с отходящими газами.

Все три ранее рассмотренные относительные величины: частичный к. п. д., относительный к. п. д. и индивидуальный к. п. д. очень часто определяются при испытаниях котельных установок и могут служить для характеристики таковых. Все эти три величины различаются только знаменателями соответствующих дробей, как это не трудно видеть из уравнений (35) — (47). Числитель не изменяется и выражает собою количество использованного тепла. В выражении для частичного к. п. д. знаменатель представляет собою общее количество тепла, подведенного к котлу, в индивидуальном к. п. д. — количество тепла, подведенного к соответствующей отдельной части агрегата, и в относительном к. п. д. — количество тепла, израсходованного в соответствующей отдельной части агрегата.

5. Коэффициент полезного действия топки и коэффициент полезного действия поверхности нагрева.

В одном из предшествовавших разделов мы уже указали, что только в исключительно редких случаях представляется возможным разграничить друг от друга эти два коэффициента полезного действия.¹ Чем большую долю всей вообще поверхности нагрева составляют лучевоспринимающие (радиационные) поверхности нагрева, тем в большей мере к. п. д. топки зависит от к. п. д. поверхности нагрева, и тем труднее отделить эти два к. п. д. друг от друга. Кроме того ранее уже указывалось, что как раз наибольшая статья потерь (потери с отходящими газами) зависит как от ведения топки, так и от теплопередачи, ибо потери с отходящими газами могут увеличиваться, с одной стороны, вследствие возрастания избытка воздуха, т. е. вследствие неблагоприятных условий горения, а с другой стороны — вследствие загрязнения поверхности нагрева.

При некоторых исследованиях разделение одного общего к. п. д. котла на два к. п. д., и именно на к. п. д. топки и к. п. д. поверхности нагрева, представляется все же целесообразным, в особенности если дело идет об установлении некоторых потерь такого рода, которые зависят либо только от топки, либо только от поверхности нагрева. В частности это относится к сравнительным испытаниям, напр., к тем случаям, когда необходимо установить характер влияния, оказываемого на к. п. д. котла загрязнением поверхностей нагрева, увеличивающимся по мере работы котла. Для этого через более значительные промежутки времени повторно проводится ряд опытов в совершенно одинаковых условиях. Если сравнить затем друг с другом величины коэффициентов полезного действия, установленные в результате вышеуказанных опытов, то получают приемлемые данные лишь при особо благоприятных условиях. В большинстве же случаев, даже при весьма тщательном проведении испытаний, оказывается невозможным регулировать работу топки таким образом, чтобы получились совершенно одинаковые потери с очаговыми остатками, сажой, летучим коксом и т. д. Поэтому для получения действительно пригодных сравнительных цифр необходимо исключить влияние всех факторов, зависящих от ведения огня в топке, и учитывать потери только поверхностей нагрева, ибо ведь только они и являются мерилем загрязненности.

На счет топки должны быть отнесены потери от недожога топлива в очаговых остатках, от неполноты горения, от уноса и сажи, а также потери вследствие лучеиспускания и теплопроводности со стенок топочного пространства и, наконец, потери с отходящими газами в той мере, в которой они обусловлены избытком воздуха; что же касается потерь поверхностей нагрева, то к таковым относятся потери с теплотой отходящих газов и вследствие лучеиспускания и теплопроводности в ходах котла. Если обеспечить одинаковость содержания CO_2 при всех сравнительных испытаниях, то можно, не делая большой ошибки, причислить все (общие) потери с отходящими газами к потерям поверхностей нагрева; вычислив же к. п. д. поверхности нагрева, можно вполне надежно и точно установить влияние загрязнения.² Обратно, мыслимы также и такие случаи, когда дело идет о чисто топочных испытаниях, при которых, следовательно, должны быть элиминированы потери поверхностей нагрева и определены к. п. д. топки.

6. Экономический коэффициент полезного действия установившегося состояния.

Некоторая часть действительно произведенного и имеющегося за котлом тепла расходуется в различных приспособлениях, необходимых для работы котельной установки. Эта часть произведенного тепла не является поэтому, с общэкономической точки зрения, «полезной энергией», так как она израсходована на «внутренние» нужды котельной установки. К таковым относятся между прочим расход энергии на питательные насосы, на приводы решеток, на очистку воды, при пылеугольных топках, кроме того значительный расход энергии на сушила и мельницы, расход пара на чистку поверхностей нагрева котла и подогревателей (сажеобдывочные аппараты), тепловые потери при удалении из котла котельной накипи и т. д. Так как между котлом как таковым и к. п. д. насосов, угольных мельниц и т. д. нет никакой прямой зависимости и так как кроме того очень часто вспомогательные машины имеют электрический привод и большей частью обслуживают сразу целую группу котлов, то эти потери энергии

¹ См. стр. 36.

² См. Praetorius, Vergleichsversuche mit verschiedenen Russbläsern. Arch. f. Wärme-wirtschaft, 10, 187, 1929. Проблемы, только намеченные здесь, подробно рассматриваются в этой статье.

не подлежат учету даже при научных опытах, приемных испытаниях и т. п. Если же, однако, исследуются экономичность и фактическая полезная производительность для какого-либо одного котла или целой котельной установки, то необходимо учитывать эти дополнительные расходы, достигающие иногда очень значительной величины (в частности, на подготовку угля при топках для пылевидного топлива, на работу насосов при котлах высокого давления и т. д.). Далее совершенно очевидно, что при сравнительных испытаниях решеток с ручной и решеток с механической заброской, топок с решетками и топок для пылевидного топлива и т. п. необходимо учитывать при расчетах увеличение затрат на расход энергии для механических решеток и пылеугольных топок.

Если предположить, что средняя мощность всех вспомогательных машинных устройств для котла составляет N квт., что среднее потребление пара машинами составляет D_1 кг/квт.-ч. и что, кроме того, за время испытания (z часов) для сажеобдувочных аппаратов, для очистки воды, для удаления накипи и т. д. израсходовано еще D_2 кг пара, то экономический к. п. д. будет

$$\eta_{\text{эконом}} = \frac{D(i'' - i') - ND_1 \cdot z - D_2}{BQ} \quad (48)$$

Этот к. п. д. определяют лишь в очень редких случаях, что совершенно неправильно, ибо только он и дает экономически верный сравнительный масштаб и ясную картину фактически полезной мощности котельной установки. Очень выгодным с чисто термической точки зрения оказывается часто баланс, являющийся далеко не столь благоприятным экономически, если только произвести учет расхода пара для всех вспомогательных устройств; нередко также котел с высоким термическим к. п. д. имеет экономический к. п. д., много меньший, чем котел с незначительным вспомогательным оборудованием, обладающий значительно худшим термическим к. п. д. А какая польза от «высококачественного» котла, который хотя и производит пар с незначительными термическими потерями, но затем снова поглощает большую долю этого же пара в своих собственных вспомогательных устройствах.

VIII. ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС УСТАНОВИВШЕГОСЯ СОСТОЯНИЯ.

После того как установлены потери котла, с одной стороны, и полезная производительность котла — с другой, можно составить так называемый тепловой баланс, дающий ясную

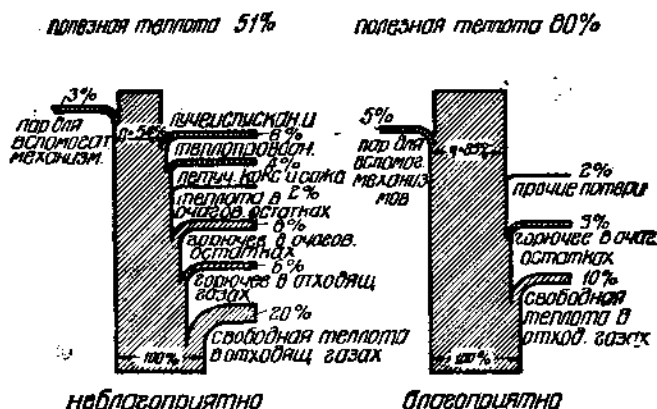


Рис. 62.

Рис. 63.

Рис. 62 и 63. Благоприятный тепловой баланс (современный, хорошо обслуживаемый котел) и неблагоприятный тепловой баланс (устаревший, плохо обслуживаемый котел).

потерь теплопроводностью и лучеиспусканием, обеспечивается надежный контроль правильности опыта и, во-вторых, потому — а это важнее — что только путем сравнения отдельных потерь можно установить, какие еще существуют возможности улучшений и на что именно надлежит обратить особое внимание, чтобы повысить экономичность. Очень часто для улучшения к. п. д. проводятся такие мероприятия, которые наверно не были бы предприняты, если бы

на основании точного теплового баланса была заранее нарисована картина того, насколько ничтожны возможности сбережений по сравнению с общим количеством расходуемого тепла. И, наоборот, многие потери оставляются без внимания, хотя очень часто они могут быть весьма сильно сокращены с помощью самых простых и дешевых средств, и это только потому, что не имеется ясного представления об их величине и об их значении для всего теплового хозяйства в целом.

Тепловой баланс в немногих, легко обозримых цифрах дает наглядную картину всего теплового хозяйства котла.

В таблице 5 уже была приведена схема теплового баланса.¹ В дополнение к этому следует только указать, что в соответствии со сказанным в предыдущем разделе к. п. д. может быть еще по желанию расчленен на частичные или индивидуальные к. п. д. котла, перегревателя, экономайзера и воздухоподогревателя и что целесообразно учитывать также и те потери, которые возникают вследствие расхода пара во вспомогательных устройствах [см. уравнение (48)].

Еще более наглядную картину теплового хозяйства котельной установки дает график теплового потока (рис. 62 и 63). Из рассмотрения графиков можно заключить, что даже у котлов, работающих в очень благоприятных условиях (рис. 63), потери все еще довольно значительны и что в более старых и плохо обслуживаемых котельных установках, какие в настоящее время встречаются еще очень часто, теряются весьма большие количества тепла частью с отходящими газами, частью с очаговыми остатками, частью вследствие лучеиспускания и теплопроводности (рис. 62).

IX. ТЕПЛОВЫЕ ПОТЕРИ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ ПЕРЕРЫВАХ В РАБОТЕ.*

Обозначения.³

$V_{\text{доп}}$ ($v_{\text{доп}}$) кал. (%) — общие дополнительные потери, возникающие при перерывах в работе.

$V_{\text{доп}_1}$ ($v_{\text{доп}_1}$)	»	»	потери от внешнего охлаждения,
$V_{\text{доп}_2}$ ($v_{\text{доп}_2}$)	»	»	потери от внутреннего остывания,
$V_{\text{доп}_3}$ ($v_{\text{доп}_3}$)	»	»	дополнительные потери при растопки и пуске,
$V_{\text{доп}_4}$ ($v_{\text{доп}_4}$)	»	»	дополнительные потери при выключении,
$V_{\text{норм}}$ ($v_{\text{норм}}$)	»	»	общие потери при установившемся состоянии =

$$= V_d + V_k + V_o + V_k + V_c + V_x$$

K — характеристический индекс, равный отношению средних часовых потерь лучеиспусканием и теплопроводностью за период перерыва в работе к часовым потерям лучеиспусканием и теплопроводностью в установившемся состоянии.

1. Общие потери и их последствия.

Все выше рассмотренные тепловые потери относились к котлу, находящемуся в состоянии равновесия или, иначе говоря, в установившемся состоянии. Так как при всех приемных испытаниях принципиально с полным к тому основанием предписывается достижение состояния равновесия, то повсеместно укоренилось мнение, что работа котла в эксплуатационных условиях может быть охарактеризована получаемым при этих испытаниях коэффициентом полезного действия установившегося состояния. Конечно, обычно допускалось некоторое снижение «парадного к. п. д.», установленного в результате приемного испытания, ибо, само собою разумеется, в условиях нормальной работы никогда не может быть достигнута благоприятная обстановка исключительно тщательно проведенного и проконтролированного опыта. Тем не менее, громадная разница, нередко существующая между парадным к. п. д. и действительным эксплуатационным к. п. д., оставалась все же неразъясненной. Опытные исследо-

¹ См. стр. 37.

² Вопросы, затронутые в этом отделе, разбираются подробно у Мееровича Э. С., Эксплуатация центральных электрических станций, гл. VI, Москва, 1928. Прим. ред.

³ Кроме обозначений, уже применявшихся в предыдущих разделах, см. стр. 42, 65, 85, 91 и 113.

вания проблемы растопки и пуска, проведенные первоначально мною¹ и впоследствии Эбелем (Ebel),² Шумахером (Schuhmacher),³ Шликке (Schlicke)⁴ и др., далее цифровые подсчеты Штейна (Stein)⁵ и Фёля (Föhl)⁶ показали с полной очевидностью, чем преимущественно обуславливается вышеупомянутое расхождение: большими потерями, возникающими вследствие ежедневных перерывов в работе.⁷

В течение большей части рабочего времени котлы в большинстве случаев не находятся в установленном состоянии. Почти все мелкие и средние установки работают в одну смену, т. е. от 8 до 10 часов, так что в течение 14 — 16-часового перерыва котлы либо совершенно стоят, либо работают в некоторой мере вхолостую, причем в их топках поддерживается малый огонь, достаточный только для покрытия потерь. Однако даже и в тех производствах, где работа идет круглые сутки, без перерывов, некоторая часть котлов нередко выводится ночью из работы, ибо расход пара в ночные смены обыкновенно незначителен. В особо неблагоприятных условиях работают пиковые котлы больших силовых станций, так как обычно они находятся в действии лишь в течение немногих часов в сутки, когда пики нагрузки максимальны, в остальное же время стоят в резерве. Потери, рассматриваемые в этом разделе, имеют, следовательно, крупное значение для подавляющего большинства находящихся в работе котлов.

Чем же объясняются потери от перерывов в работе? Просто тем, что котел — это большой блок, состоящий из кладки, железных частей и значительного объема воды, обладающий способностью к накоплению (аккумулированию) очень больших количеств тепла, которые ночью отдаются без всякой пользы. Следовательно, чем больше теплоаккумулирующая способность котла и чем большими возможностями обладает он в смысле отдачи тепла наружу (большая поверхность, высокие температуры стенок и т. п.), а также чем продолжительнее перерыв в работе, тем больше должны быть потери от таких перерывов.

Потери из-за перерывов в работе сказываются в ежедневном увеличенном расходе угля на растопку котла. Обычно приходится начинать растапливать котел еще за много часов до начала работы, и количество тепла, подведенного за это время, без остатка расходуется на покрытие потерь от охлаждения кладки, воды в котле, трубопроводов и, наконец, самих производственных машин и аппаратов. Расходуемые на это большие количества тепла, которые приходится записать как чистые потери, были уже ранее установлены Гильомом (Guillaume).⁸ Расход угля на растопку знает, хотя бы приблизительно, всякий руководитель производства. Даже при более мелких котлах (от 100 до 300 м²) этот расход составляет обычно от 1 до 2 т высокосортного угля.

Напротив, до самых последних лет вообще совершенно не было известно то в высшей степени важное обстоятельство, что *потери, связанные с растопкой, являются только некоторой и притом нередко весьма малой частью общих потерь от перерыва в работе, и что котел достигает состояния равновесия лишь спустя много часов после начала работы, а при непродолжительных периодах работы и вовсе его не достигает.* Он находится в это время в состоянии «разгона» или «пуска», т. е. некоторая часть подводимого тепла продолжает расходоваться на покрытие потерь от перерыва в работе. В отличие от потерь при растопке целесообразно обозначать эти потери как *потери при пуске.*

Общие потери при растопке и пуске определяются проще всего посредством специального опыта, причем этот опыт начинается в момент растопки и может быть закончен через некоторое время после достижения состояния равновесия. При этом оказывается, что к. п. д. в периоды растопки и пуска непрерывно меняется, в противоположность состоянию равновесия, при котором он остается постоянным. Вначале он равен нулю, так как первые подводимые количества тепла вообще бесполезно не расходуются. Постепенно он возрастает, сначала довольно быстро, затем все медленнее до тех пор, пока, спустя некоторое время, он не достигнет значения к. п. д. установившегося состояния. С этого момента он остается постоянным до тех

¹ Arch. f. Wärmewirtschaft, 6, 29 и 284, 1925; 7, 18 и 77, 1926; далее Die Wärme, 48, 417, 1925; 50, 167 и 833, 1927.

² Die Wärme, 41, 160, 1925; Arch. f. Wärmewirtschaft 7, 229, 1926.

³ Die Wärme, 50, 724, 1927.

⁴ Die Wärme, 50 602, 1927.

⁵ Regelung und Ausgleich in Dampfanlagen. Verlag J. Springer, Berlin, 1926.

⁶ Arch. f. Wärmewirtschaft, 8, 385, 1927.

⁷ Обзор опытов, проведенных за последние годы, имеется в статье Barth'a, Die Wärme, 52, 701, 1929.

⁸ VDI-Zeitschr., 59, 263, 1915.

пор, пока незадолго до окончания работы он не начинает снова падать вследствие прекращения работы решеток. Период времени от момента снижения к. п. д. и до конца работы пазовым периодом выключения.

Ход такой характеристической кривой коэффициента полезного действия представлен на рис. 64, позволяющем очень наглядно обозреть весь тепловой баланс котла во время растопки, пуска и выключения. Рис. 64 был составлен по данным опытов, проведенных мною на

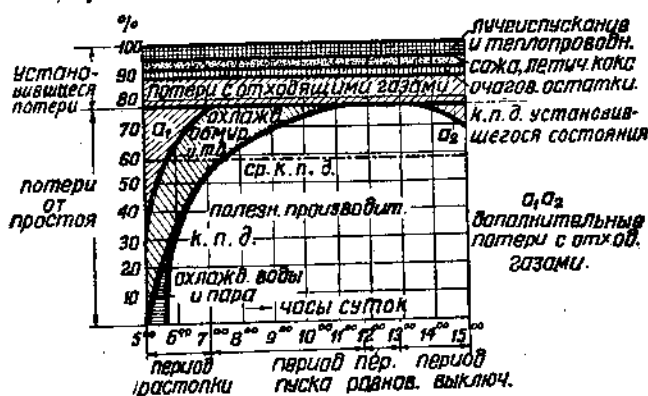


Рис. 64 Тепловой баланс котла в периоды растопки, пуска, равновесия и выключения.

водотрубном котле с наклонными трубками, с поверхностью нагрева в 240 м² и рабочим давлением в 10 атм. мал., причем опыт относился к 8-часовому периоду работы (10-часовому, если считать и период растопки). Не трудно видеть, что установившийся к. п. д. равен 78%, тогда как к. п. д. по окончании растопки составляет всего лишь 53%, и что состояние равновесия достигается лишь по прошествии примерно 5 часов работы. В то время как потери, ограниченные горизонтальными прямыми, являются установившимися потерями, большие заштрихованные площади ниже горизонтали, соответствующей 78%, представляют собою потери при растопке, пуске и выключении котла.

Рис. 64 совершенно отчетливо показывает громадное влияние потерь, обусловленных перерывом в работе на тепловой баланс котла. Но следует еще иметь в виду, что установившиеся потери в период растопки должны быть присчитаны опять-таки к потерям от охлаждения, так как

ведь при непрерывной работе период растопки отпал бы вообще, и что кроме того во время пуска (в результате увеличенной затраты топлива) установившиеся потери превышают эти же потери при непрерывной работе. ¹ На рис. 65 представлено действительное соотношение потерь, обусловленных остановкой $V_{доп}$ и нормальных потерь $V_{норм}$ (под $V_{норм}$ понимаются установившиеся потери при непрерывной работе). Из него видно, что $V_{доп}$ много больше $V_{норм}$, т. е. что сумма потерь от охлаждения значительно больше суммы нормальных потерь в установившемся состоянии.

Необходимо, впрочем, сразу же указать, что этот в высшей степени интересный и несколько даже ошеломляющий результат моих исследований не является каким-либо общим положением, хотя еще и сейчас он является вполне справедливым в отношении многих котельных установок. ² Дальше мы увидим, что путем применения соответствующих мероприятий

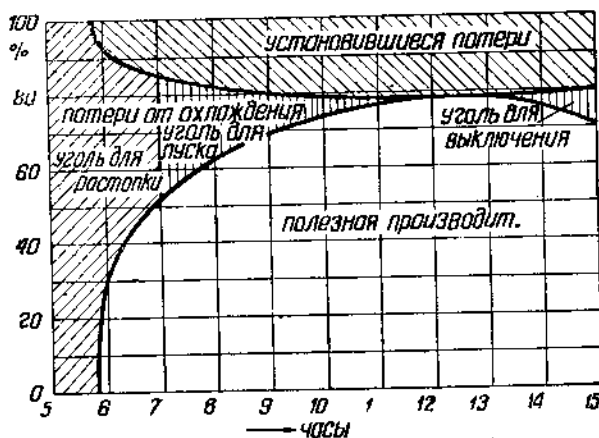


Рис. 65. Установившиеся потери и потери от охлаждения в зависимости от времени работы.

¹ См. далее пункт 4 «Дополнительные потери при растопке и пуске» на стр. 127.

² Исследованный котел, как это видно из величины к.п.д. установившегося состояния, равного 78%, никоим образом не может считаться неудовлетворительным в термическом отношении. В частности, внешние потери от охлаждения были сравнительно малы благодаря хорошей изоляции.

можно настолько снизить потери от охлаждения, что они становятся много меньше нормальных потерь. Таким образом, хотя и нельзя непосредственно обобщить полученные из опыта цифровые результаты, можно все же на основании рис. 64 и 65 составить представление о зачастую поразительно большой величине потерь от охлаждения.

Еще яснее и отчетливее можно сделать это, если сравнить общие потери от охлаждения с рассмотренными в одном из предшествовавших разделов отдельными статьями потерь при установившемся состоянии (рис. 66). Для того чтобы продемонстрировать также и чисто экономические следствия, наряду с потерями, приведенными в процептах, показаны еще и потери угля в денежном выражении. Совершенно ясно видно, какое громадное значение могут иметь потери от охлаждения для экономичности работы котельной установки. Отсюда в отношении всех котлов, работающих с перерывами, вытекает тот важный вывод, что часто гораздо важнее предпринять меры к уменьшению потерь от охлаждения, нежели улучшить «парадный» к. п. д. путем снижения установившихся потерь, влияние которых на общий тепловой баланс часто очень невелико. Тот же рис. 66 показывает, насколько значительны могли бы быть сбережения, достигнутые в исследованной мною установке в результате проведения некоторых простых и недорогих улучшений (лучшая изоляция, исправление шиберов, регулирующих тягу).

Очень интересны также опыты Эбеля с котлами различных конструкций, во время которых были отдельно установлены потери при растопке и при пуске. Эбель показал в частности, что все котлы с выносными топками, т. е. с большой охлаждающей поверхностью, имеют потери при пуске, значительно превышающие (в некоторых случаях вдвое) расход угля для растопки, что ясно видно из рис. 67. Из этого следует тот также крайне важный факт, что

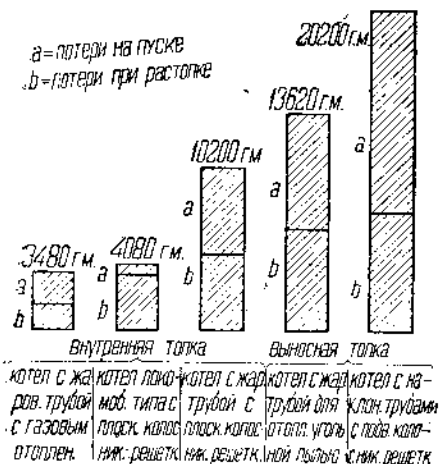


Рис. 67. Потери при расстоянии и потери при пуске для котлов различных конструкций (по Эбелю).

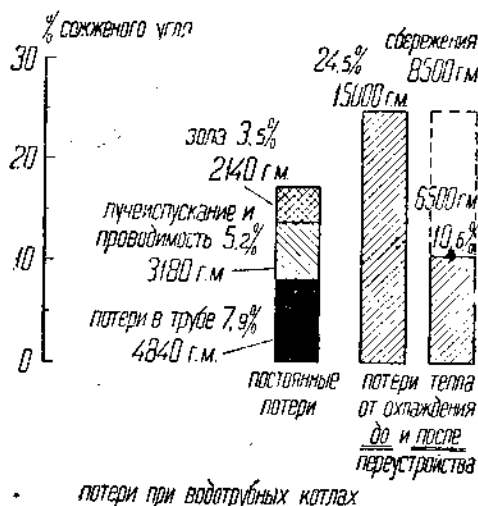


Рис. 66. Тепловые потери в процентах сожженного угля в герм. марках/год при годовом производстве пара в 1500 т и 8-часовой работе в сутки.

	герм. мар. рас- ходуется на уголь	
$\varphi_d = 7,5\% =$	4 800	} установленные потери- $\varphi_{\text{пор}} = 16\% =$ = 10 240 герм. мар. потери от охлаждения до переделки потери от охлаждения после переделки
$\varphi_{\text{л}} = 5\% =$	3 200	
$\varphi_{\text{остаток}} = 3,5\% =$	2 240	
$\varphi_{\text{доп}} = 24,5\% =$	15 700	
$\varphi_{\text{доп}} = 10,5\% =$	6 730	
Сбережения 14% =		8 970

расход угля для растопки в очень многих случаях отнюдь не может служить критерием для оценки действительной величины потерь от охлаждения.

Опыт растопки и пуска дает, правда, возможность составить ясное представление о величине общей потери от перерыва в работе, но по об отдельных потерях, сумма которых составляет общую потерю. Между тем определение этих отдельных потерь чрезвычайно важно в практическом отношении, ибо знание их является первой предпосылкой для сокращения потерь от охлаждения. Экспериментальная растопка позволяет определить потери от охлаждения только косвенным образом, ибо, собственно говоря, с ее помощью определяется всего лишь увеличение расхода тепла, обусловленное покрытием потерь от охлаждения.

Для того чтобы непосредственно определить потери от охлаждения, нужно выяснить всю дина-

мику самого процесса охлаждения в ее зависимости от времени и пространства и исследовать и изучить котел во время перерыва в работе.

Проведенные мною опыты, касавшиеся как перерывов в работе, так и периодов растопки, пуска, равновесия и выключения, показали, что общая потеря $V_{\text{доп}}$ состоит из четырех частичных потерь, а именно:

- 1) потеря от внешнего охлаждения $V_{\text{доп}_1}$,
- 2) потеря от внутреннего остывания $V_{\text{доп}_2}$,
- 3) дополнительных потерь при растопке и пуске $V_{\text{доп}_3}$,
- 4) дополнительных потерь при выключении $V_{\text{доп}_4}$.

Рассмотрим теперь вкратце каждую из этих потерь в отдельности.

2. Потери от внешнего охлаждения.

Уже при рассмотрении потерь лучеиспусканием и теплопроводностью указывалось, что из всех потерь только они одни не связаны с периодом работы, но происходят также и во время перерывов. Вся поверхность непрерывно излучает тепло в ночные часы, и, между прочим, как это показали многочисленные опыты, количества

излучаемого тепла (у большинства котлов) почти не меняются. Аккумулирующая способность толстых стен, состоящих из кирпичной кладки, котла и воды в барабанах котла, водяных камерах или секциях и т. д. настолько велика, что даже при очень продолжительных перерывах в работе средние часовые потери оказываются лишь немного меньше, чем во время работы. У котлов, которые во время работы не достигают полностью состояния равновесия — а это как раз и имеет место в большинстве производств с односменной работой, — температуры поверхностей стенок даже еще значительно возрастают в течение нескольких первых часов по окончании работы, а вместе с ними — растут и потери от внешнего охлаждения. Лишь в последующие часы периода остановки они постепенно спадают до величины меньшей, нежели во время работы. Так, например, при 16-часовом перерыве средняя величина часовых потерь от внешнего охлаждения составила, по моим наблюдениям, примерно около 90% часовых потерь лучеиспусканием и теплопроводностью во время работы. Таким образом, если, например, потери лучеиспусканием и теплопроводностью в течение 8-часового периода работы составляют, считая в процентах общего расхода угля, 3%, то величина потерь от внешнего охлаждения во время перерыва окажется значительно большей, ибо эти последние потери имеют место в течение вдвое большего промежутка времени, а именно

$$V_{\text{доп}} = 2 \cdot 3 \cdot 0,9 = 5,4\%.$$

Отсюда следует, что потери от внешнего охлаждения, вообще говоря, могут оказаться очень

внушительными. Впрочем, необходимо подчеркнуть здесь еще раз, что нет никакой возможности привести цифры, действительные для любых случаев, так как эти потери зависят от слишком большого числа разнородных факторов. Все же можно установить следующие общие положения: потери от внешнего охлаждения тем выше,

- 1) чем больше внешняя поверхность всего котла;
- 2) чем выше средняя температура поверхности, либо чем больше соответственная разность температур поверхности и воздуха;
- 3) чем сильнее движение воздуха в котельной (высокие коэффициенты теплопередачи);
- 4) чем больше теплоаккумулирующая способность котла (большие массы кладки и воды).

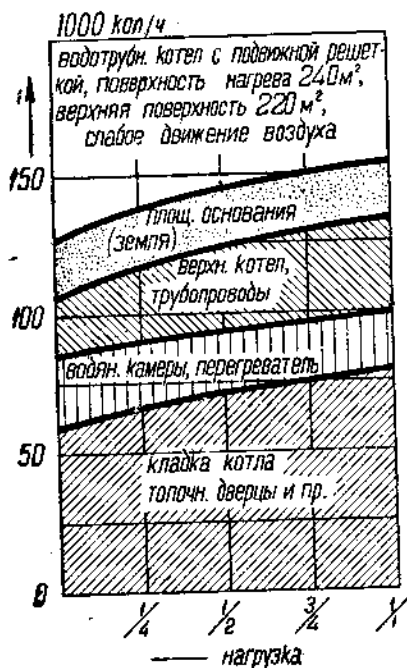


Рис. 68. Тепловые потери водотрубного котла (с поверхностью нагрева 240 м²) вследствие внешнего охлаждения в установившемся состоянии. Во время не слишком продолжительных остановок (приблизительно до 20 час.) эти потери изменяются лишь незначительно.

Таким образом особо важное значение для всех котлов, работающих с частыми остановками, имеют хорошая изоляция кладки (обмуровка), малая поверхность, слабое движение воздуха в котельной (закрытые в ночные часы окна и двери) и, наконец, небольшая масса (наивозможно тонкие стенки, минимальное водосодержание), тем более, что выполнение первых трех вышеуказанных условий способствует снижению потерь лучеиспусканием и теплопроводностью также и во время работы. Что касается массы, то уменьшение ее, вообще говоря, снижает аккумулирующую способность, но одновременно с этим улучшает теплопередачу, вследствие чего потери, в конечном счете, опять возрастают. Во избежание этого, особенно при тонких стенках и незначительном водосодержании, следует уделять исключительное внимание качеству тепловой изоляции. Точно так же и из чисто эксплуатационных соображений следует избегать слишком сильного охлаждения воды, так как, в противном случае, период растопки бесцельно затягивается. Рис. 68, изображающий случай, заимствованный из практики, показывает, как именно потери от внешнего охлаждения распределяются по отдельным частям поверхностей котельной установки. В заключение заметим еще, что и все остальные части в котельной, как, например, водоочистительное устройство, дымовые трубы и т. д., точно так же охлаждаются во время перерывов в работе и что поэтому по отношению к ним действительно все сказанное выше относительно самого котла.

3. Потери от внутреннего остывания.

Несмотря на довольно значительную величину, которой нередко достигают потери от внешнего охлаждения, они все же, как это доказываются опытами, проведенными в производственной обстановке с разнообразнейшими котлами, большей частью оказываются значительно меньше другого вида потерь, а именно — потерь от внутреннего остывания. Эти последние возникают вследствие того, что во время перерывов в работе дымовая труба засасывает значительные количества холодного воздуха, проникающего в топочное пространство через многочисленные неплотности (топочные дверцы, прозоры колосников, смотровые глазки и т. п.). При этом происходит охлаждение внутренних горячих стенок топочного пространства и поверхностей нагрева с одновременным нагреванием самого воздуха, который затем поступает через неплотности в шибере, регулирующем тягу, в боров и оттуда в дымовую трубу. При сильной тяге, развиваемой высокой дымовой трубой, таким путем теряются весьма значительные количества тепла.

В ночные часы остывает не только сам котел, но также и дымоходы, экономайзеры и воздухоподогреватели, и, наконец, сама дымовая труба. Так как при растопке дымовые газы на своем пути через дымоходы к дымовой трубе повсюду соприкасаются с сильно остывшими стенками, то они, разумеется, быстро охлаждаются и часто оказываются неспособными создать необходимую тягу; поэтому при растопке, а нередко также и в период «разгона» или пуска котла, приходится широко открывать шибера для тяги и работать с высокими температурами отходящих газов, т. е. с повышенными потерями в отходящих газах.¹ Вследствие этого потери от остывания влияют еще и косвенным образом на процесс растопки и вызывают, во всяком случае частично, дополнительные потери на растопку, о которых речь будет идти в следующем разделе.

Наконец здесь же следует указать на тяжкие производственно-технические последствия внутреннего остывания. Вполне понятно, что они влияют на процесс горения гораздо более непосредственным образом, чем потери от внешнего охлаждения. Холодные внутренние стенки затрудняют введение котла в работу, так как вследствие интенсивного лучеиспускания к стенкам горение протекает в невыгодных условиях, температуры горения низки, а теплоотдача к более удаленным поверхностям нагрева — незначительна. В результате растопка требует много времени. Сюда присоединяются еще вредные напряжения, возникающие в обмуровке и частях котла вследствие непрерывных колебаний температуры. Как известно, большинство веществ более чувствительно к колебаниям температуры, нежели к высоким температурам; поэтому те сроки службы обмуровки и частей котлов, работающих с перерывами, как правило, меньше сроков службы непрерывно работающих котлов, несмотря на то, что число часов работы последних несравненно больше.

По всем этим причинам необходимо стремиться к наивозможному снижению потерь от внутреннего остывания. Так как они зависят исключительно от степени неплотности, то необходимо уделять величайшее внимание тщательному закрытию всех отверстий по окончании

¹ См. также стр. 127 и след.

работы и в первую очередь закрытию шиберов тяги. Если только к тому имеется возможность, следует ставить между дымовой трубой и котлом несколько заслонок, которые, сразу же после того как огонь потушен, должны быть закрыты и все время находиться под надзором в отношении их плотности.¹

В термическом отношении процесс внутреннего остывания заключается в следующем. В период работы внутренние стенки котла постепенно воспринимают температуру омывающих их топочных газов. До тех пор пока котел отапливается, нет никаких потерь; напротив, часть внутренних поверхностей непрерывно воспринимает тепло и отводит его наружу.

Однако после остановки котла температура в топочном пространстве и в ходах падает, во-первых, вследствие непрерывного отвода тепла наружу и, во-вторых, вследствие действия тяги в дымовой трубе, в результате которой через каждое, даже самое маленькое отверстие в шибере отсасывается горячий воздух, а на его место через неплотности в топочных дверцах, у колосниковых решеток и т. д. притекает холодный воздух.² Под конец внутреннее пространство охлаждается настолько, что теплота даже в некоторой мере переходит обратно из обмуровки внутрь и подогревает притекающий воздух. Точно так же и водяные трубки, внутренние

стенки водяных камер, решетка и другие железные части отдают большую часть своего тепла воздуху.

Вполне аналогичные процессы происходят также в борове, в экономайзере (поскольку этот последний находится в борове, что нередко встречается во многих более старых и мелких котельных установках) и в дымовой трубе, правда, с известными смещениями во времени. В то время как внутреннее остывание боровы начинается еще до остановки котла (и именно потому, что с постепенным дросселированием шиберов температура отходящих газов снижается, вызывая постепенное охлаждение, стенок боровы), средняя температура экономайзера сначала возрастает, ибо вследствие выключения питательных насосов прекращается

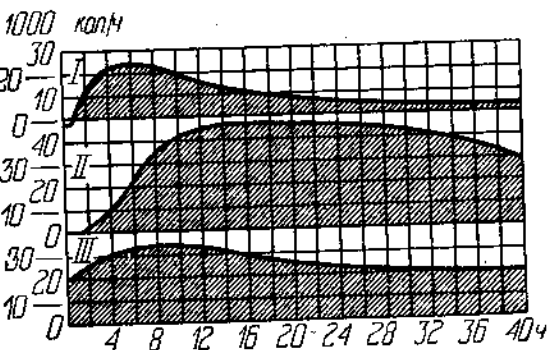


Рис. 69. Внутреннее остывание полностью нагруженного водотрубного котла с поверхностью нагрева в 240 м² в зависимости от времени остановки.

I. Котел. II. Дымовая труба. III. Боров.

циркуляция воды. Следовательно, и тут количество аккумулированной теплоты вначале возрастает. С другой стороны, отходящие газы в экономайзере охлаждаются поэтому меньше, и внутреннее остывание дымовой трубы замедляется.

Опыты подтвердили эти соображения. На рис. 69 представлены часовые потери от внутреннего остывания для котла, дымовой трубы и боровы в зависимости от времени остановки. Остывание экономайзера протекает подобно остыванию котла.

Определение потерь от внутреннего остывания, разумеется, крайне затруднительно и не может претендовать на безусловную точность. Оно может быть произведено либо непосредственно путем измерения в нескольких точках температур поверхности внутренних стенок, температуры воздуха и скорости воздуха в дымовой трубе, либо косвенно — путем определения количества тепла, оттекающих наружу, и общего количества всего тепла, аккумулированного к концу работы.

Внутреннее остывание получается в этом последнем случае как разность. Этот второй метод верен однако только тогда, когда измерения могут быть доведены до практически полного охлаждения.

¹ Очень хорошо зарекомендовала себя в качестве запорного органа тяговая заслонка системы Штобер; см. стр. 263—264.

² В первое время после остановки котла температуры стенок топочного пространства обычно возрастают, вероятно потому, что вследствие закрытия шиберов воздушное охлаждение всегда несколько пористой обмуровки очень резко уменьшается. В то время как в период работы котла в топочном пространстве по большей части бывает пониженное давление, и следовательно, воздух засасывается через пористые стенки, после закрытия шиберов давления уравниваются, а значит, отпадает и воздушное охлаждение. См. Eberle, Arch. f. Warmewirtschaft, 9, 133, 1928.

4. Дополнительные потери при растопке и пуске.

Помимо непосредственных потерь от охлаждения, внешнего и внутреннего, при самой растопке возникают еще дополнительные потери. Ранее уже указывалось, что установившиеся потери при растопке также должны быть присчитаны к потерям от охлаждения, так как при непрерывной работе растопка вообще не имеет места. Кроме того, однако, сюда присоединяются еще большие количества дополнительных

потерь с отходящими газами и очаговыми остатками. Как видно из рис. 70, содержание CO_2 в отходящих газах вначале равно нулю, т. е. через дымоход проходит только воздух. Постепенно содержание CO_2 увеличивается, оставаясь, однако, в течение всего периода растопки значительно меньшим нормального содержания CO_2 , и достигает своей максимальной величины лишь по истечении примерно двухчасового периода пуска. Рис. 64 показывает, насколько значительны могут быть эти потери. Кроме всего этого потери с очаговыми остатками при растопке нередко больше, чем при нормальной работе; точно так же и потери с летучим коксом, вследствие необходимой вначале сильной тяги в топочном пространстве. Величина всех этих потерь в высокой степени зависит от качества обслуживания. Умелый котелар, хорошо знакомый со всеми особенностями своего котла, сумеет добиться нормальной работы топки гораздо скорее и с гораздо меньшими потерями, чем неопытный котелар. Вид кривой CO_2 на рис. 70 свидетельствует, например, о довольно плохом ведении огня. При лучшем обслуживании установившееся состояние топки могло бы быть достигнуто без сомнения гораздо раньше.

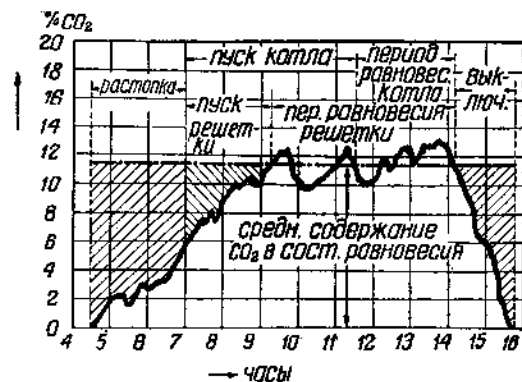


Рис. 70. Содержание CO_2 в отходящих газах при растопке, пуске, выключении, а также во время состояния равновесия. Эксплуатационный опыт, проведенный с механической (цепной) решеткой, работающей на рурском орешке.

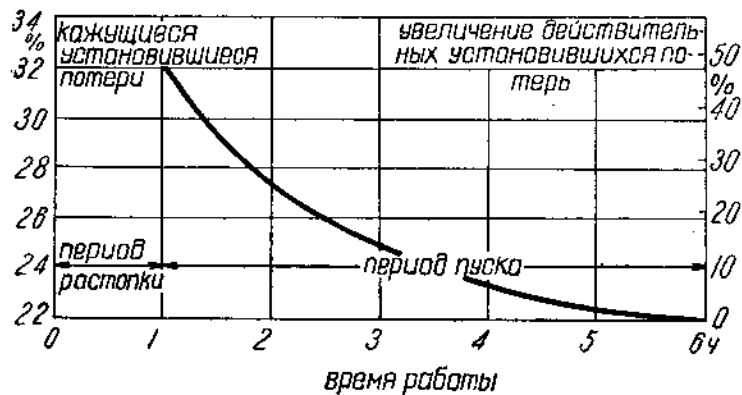


Рис. 71. Кажущиеся установившиеся потери в процентах теплоты топлива и повышение установившихся потерь в процентах (по отношению к действительным установившимся потерям, равным 22%) во время пуска.

рис. 63, к. п. д. равен только 53%) будет в $\frac{78}{53} = 1,47$ раза больше, чем в установившемся состоянии при к. п. д. равном 78%. Поэтому и установившиеся потери, процентно постоянные и составляющие 22%, будут в соответствии с повышенным расходом угля абсолютно больше, а именно примерно на 47%, чем при действительно установившемся состоянии.¹ Таким образом

¹ Между расходом угля и потерями в установившемся состоянии не существует строгой пропорциональности, так как некоторые потери, например потери лучеиспусканием и теплопроводностью, остаются почти неизменными. Более подробно об этом см. следующий раздел «Влияние степени нагрузки и ее колебаний».

«кажущиеся установившиеся потери» составляют в данном случае к началу работы примерно $22 \cdot 1,47 = 32,4\%$. Увеличение потерь объясняется, следовательно, просто более высоким расходом угля. На рис. 71 представлена кривая, характеризующая кажущиеся установившиеся потери и процентное увеличение действительных установившихся потерь. Из рисунка следует, что в течение всего периода пуска возникают еще дополнительные потери, которые, правда, в последние часы весьма невелики. Уменьшение этих потерь может быть достигнуто только при условии более крутого подъема кривой к. п. д., т. е. при условии укорочения продолжительности периодов растопки и пуска. Более же крутой подъем кривой к. п. д. может быть непосредственно достигнут путем уменьшения внутренних и внешних потерь от охлаждения.

5. Дополнительные потери при выключении котла.

В отношении этой части потерь от охлаждения действительно, как правило, все сказанное выше по поводу дополнительных потерь при растопке и пуске. При выключении вследствие остановки решеток точно так же возникают увеличенные потери с отходящими газами и с очаговыми остатками, величина которых опять-таки в высокой степени зависит от умелости кочегара. При целесообразном ведении огня и правильном обслуживании решетки и пиберов можно добиться сравнительно хорошего выгорания последнего слоя топлива, без того, чтобы при этом возникали чрезмерно большие потери с отходящими газами. Впрочем, почти никогда не удается избежать того, чтобы часть твердой массы топлива, содержащей углерод, не осталась на решетке в негоревшем состоянии.

6. Характеристический индекс.

Потери вследствие перерывов в работе, которые, как мы видели, состоят из четырех главных частей, зависят от такого большого числа факторов, что они неизбежно чрезвычайно различны в зависимости от местных условий; поэтому их приходится определять для каждой отдельной установки от случая к случаю. Хотя сколько-нибудь достоверное определение отдельных потерь и связано с громоздкими и не совсем простыми измерениями, все же — в виду исключительно большого значения потерь от охлаждения для экономичности работы котельной установки — следует настоятельно рекомендовать каждому руководителю производства составить с помощью точных измерений ясную картину размеров общих потерь и четырех частных потерь, каждой в отдельности. Такие исследования приводят большей частью к неожиданным результатам в отношении величины потерь от охлаждения; вместе с тем затраченный труд большей частью очень быстро окупается, так как благодаря полученным при испытании данным можно добиться очень больших сбережений путем даже незначительных улучшений и изменений. Сбережения, представленные на рис. 66, составляющие в год 8970 герм. марок, были, например, достигнуты на исследованной мною же котельной установке посредством внесения лишь очень незначительных изменений, почти без каких бы то ни было материальных затрат.

Несмотря на значительные конструктивные и эксплуатационные различия отдельных котлов, можно все же найти не имеющий размерности, отвлеченный *характеристический индекс*, легко определяемый в каждом предприятии и дающий довольно точную и наглядную картину величины отдельных потерь. Если определить, с одной стороны, с помощью обычного испытания при установившемся состоянии потери лучеиспусканием и теплопроводностью V_{λ} в единицу времени (в кал/ч) и с помощью опыта растопки и пуска общие потери от охлаждения $V_{\text{доп}}$ — с другой, и если разделить затем последнюю величину на число часов охлаждения (при перерыве в 16 часов, например $V'_{\text{доп}} = \frac{V_{\text{доп}}}{16}$), то отношение величин $\frac{V'_{\text{доп}}}{V_{\lambda}}$ даст характеристический индекс K , имеющий очень большое значение для оценки обеих главных потерь $V_{\text{доп}}$ и V_{λ} , т. е. потерь от внешнего охлаждения и от внутреннего остывания. Вытекает это из следующих обстоятельств.

Ранее уже указывалось, что часовые потери V_{λ} лучеиспусканием и теплопроводностью в установившемся состоянии лишь немного превышают часовые потери $V_{\text{доп}}$ от охлаждения, по крайней мере во всех тех случаях, когда речь идет о сравнительно кратких перерывах в работе. При условии, что продолжительность перерыва в работе колеблется между 8 и 20 часами, можно, не рискуя впасть в сколько-нибудь существенную ошибку, утверждать для любой конструкции котла, что сумма потерь $V_{\text{доп}}$ от внешнего охлаждения и дополнительных потерь

$V_{\text{доп}}$ возникающих при растопке и пуске, а также $V_{\text{доп}}$, считая на 1 час остановки, численно приблизительно равна потерям от лучеиспускания и теплопроводности тоже за час работы:

$$V'_x \cong V'_{\text{доп}_1} + V'_{\text{доп}_3} + V'_{\text{доп}_4} \quad (49)$$

При этом, правда, предполагается, что в результате правильного обслуживания потери $V_{\text{доп}_1}$ и $V_{\text{доп}_3}$ сведены к возможному минимуму (такого рода предпосылка является вполне естественной в отношении всякого хорошо управляемого производства). Вышеупомянутый характеристический индекс K является, следовательно, не только отношением часовых потерь в период остановки к установившимся потерям лучеиспусканием и теплопроводностью, но также и приближенным отношением общих (суммарных) часовых потерь в период остановки к сумме отдельных потерь, за исключением потери от внутреннего остывания:

$$K \cong \frac{V'_{\text{доп}}}{V'_{\text{доп}_1} + V'_{\text{доп}_3} + V'_{\text{доп}_4}} \quad (50)$$

Если, например, характеристический индекс окажется равным 2, то это значит, что общие потери вдвое больше суммы трех частичных потерь и что, следовательно, потери от внутреннего остывания количественно равны вышеупомянутой сумме трех остальных потерь. При $K = 3$ потери от внутреннего остывания будут примерно в 2 раза больше суммы остальных потерь от охлаждения, при $K = 5$ — примерно в 4 раза больше и т. д. Обобщая вышесказанное, можно установить следующее положение: *характеристический индекс K минус единица равен (приблизленно) отношению потерь от внутреннего остывания ко всем остальным потерям от охлаждения.*

$$\left. \begin{aligned} K-1 &\cong \frac{V'_{\text{доп}}}{V'_{\text{доп}_1} + V'_{\text{доп}_3} + V'_{\text{доп}_4}} - 1 \cong \frac{V'_{\text{доп}_2}}{V'_{\text{доп}_1} + V'_{\text{доп}_3} + V'_{\text{доп}_4}} \cong \\ &\cong \frac{V_{\text{доп}_2}}{V_{\text{доп}_1} + V_{\text{доп}_3} + V_{\text{доп}_4}} \end{aligned} \right\} \quad (51)$$

Для большинства исследованных мною и Эбелем котлов получается характеристический индекс $K = 2-2,5$ при перерывах в работе от 8 до 24 часов как правило. Следовательно, можно считать, что *потери от внутреннего остывания являются наибольшими из всех частичных потерь.* Очень

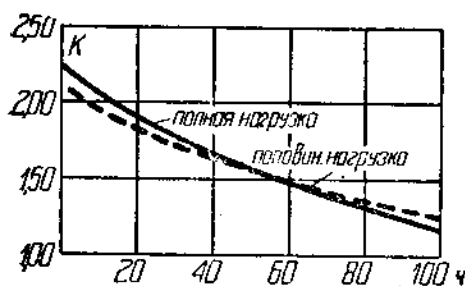


Рис. 72. Зависимость характеристического индекса K (отношение потерь в период остановки к потерям от охлаждения) от продолжительности перерыва в работе.

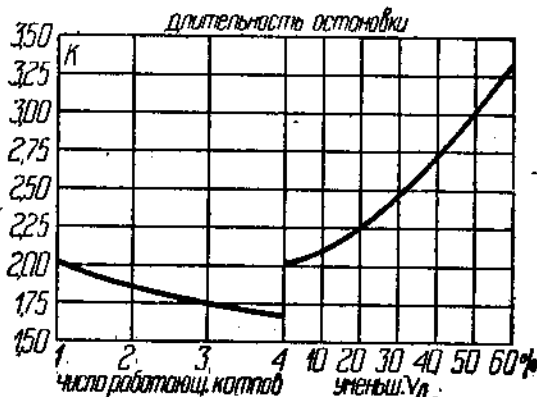


Рис. 73 и 74. Зависимость характеристического индекса от числа находящихся в работе котлов и от уменьшения потерь лучеиспусканием и теплопроводностью при установившемся состоянии (v_x).

часто они гораздо больше, чем все остальные потери от охлаждения вместе взятые. Разумеется, все это является довольно грубым приближением, которое однако же даст некоторое представление о величине потерь от внутреннего остывания для большинства производств. Характеристические кривые, построенные мною на основании экспериментальных данных и изображенные на рис. 72, 73 и 74, показывают, насколько значительные изменения может претерпевать характеристический индекс в зависимости от продолжительности перерыва

в работе, от числа работающих котлов и от процентного уменьшения потерь лучеиспусканием и теплопроводностью.¹

7. Влияние числа котлов.

Здесь следует упомянуть вкратце еще об одном обстоятельстве, которому до сих пор не уделяется достаточного внимания. В случае работы нескольких котлов, имеющих общие дымоход и дымовую трубу, потери от охлаждения каждого котла значительно меньше, чем когда этот же самый котел работает в отдельности сам по себе. Происходит это потому, что обычно очень большие потери от охлаждения и остывания дымохода и дымовой трубы, почти не зависящие от числа находящихся в работе котлов, распределяются в этом случае между несколькими котлами; одни только потери от охлаждения собственно котла остаются всегда неизменными. Этим обстоятельством объясняется также и снижение характеристического индекса с увеличением числа находящихся в работе котлов (рис. 73).

В связи со всем вышеизложенным укажем здесь еще на одно широко распространенное заблуждение, а именно на убеждение, что потери от охлаждения дымовой трубы не оказывают никакого влияния на тепловое хозяйство котельной, ибо теплота, накопленная в дымовой трубе, все равно уже потеряна для производства. Это однако совершенно неверно. Все тепло, отданное дымовой трубой во время перерыва, должно быть затем снова восполнено во время работы. Холодная дымовая труба сильно охлаждает отходящие газы и увеличивает потерю тяги. Так как, однако, в топке необходима определенная тяга, то потерю тяги приходится восполнять повышением температуры отходящих газов. Это служит причиной того, что при растопке и пуске часто температуры отходящих газов бывают более высокими, чем в состоянии равновесия. Только после того, как и дымовая труба придет в состояние теплового равновесия, температуры отходящих газов достигают своих наименьших и наиболее выгодных значений. Таким образом известная тепловая изоляция дымовой трубы, достигаемая выбором плохо проводящих тепло строительных материалов, представляется совершенно обоснованной и может дать существенную экономию тепла.

8. Аккумуляция тепла в обмуровке и в прочих частях котельной.

Неоднократно уже указывалось, что действительной причиной больших потерь в периоды перерывов в работе являются очень значительные количества тепла, аккумулярованные во всей массе обмуровки котла, дымовой трубы, борова и т. д., затем — в железных частях, в котельной воде и, наконец, также в почве под котлом. Котел, в котором не происходило бы никакого аккумулярования тепла (что, разумеется, практически невозможно), становился бы сразу же после остановки холодным и не отдавал бы тепла во время перерывов ни наружу, ни через дымовую трубу.

Насколько значительными могут оказаться количества тепла, аккумулярованные в состоянии равновесия, даже в сравнительно небольшом котле с поверхностью нагрева в 240 м², видно из табл. 14, содержащей цифры, полученные мною в результате детальных исследований. Из нее видно, что большие количества тепла воспринимаются прежде всего обмуровкой котла, борова и дымовой трубы. Необходимо указать еще, что прочие части котельной, как, например, водоочистительное устройство, цистерны с питательной водой и кладка самой котельной, также обладают значительной теплоаккумулирующей способностью. Все эти части также отдают во время перерывов большую часть накопленного в них тепла, которое затем должно быть возмещено при каждом введении котла в работу.

На рис. 75 нанесены кривые охлаждения в зависимости от продолжительности остановки. Из рисунка следует, что при нормальной продолжительности остановки от 8 до 16 часов отдается только некоторая часть тепла. Для полного охлаждения требуется обычно несколько дней. Наибольшая теплоотдача имеет место в первые часы и дни; затем, как это следует из отдельных кривых, она постепенно уменьшается все больше и больше. Для иссле-

¹ Другая числовая величина, так называемое «время потерь», была впервые предложена Ф е л е м (Föhl, Arch f. Wärmewirtschaft, 8.386, 1927); он обозначает ею то число часов работы при полной нагрузке, при котором расход угля отвечает тепловым потерям 24-часового периода остановки. По данным моих опытов время потерь составляет в среднем около 2 часов, при котлах с небольшой обмуровкой и незначительным водяным пространством — примерно от 1,2 до 1,5 часа, при плохо изолированных котлах с неплотными шиберами — нередко 3 часа и более.

ТАБЛИЦА 14.

Количества тепла, аккумулированные в котельной, при одном водотрубном котле с поверх нагрева в 240 м²

Части паро- производящей установки	Отдельные части и материал	Вес т	Полная на- грузка 1000 кал.	Половинная нагрузка 1000 кал.	Меньше, чем при полной нагрузке		Часовые потери от охла- ждения непосредственно после окончания работы	
					1000 кал.	%	Полная нагр. 1000 кал.	Половинн. нагр 1000 кал.
1. Котел	Обмуровка	89	6 012	5 450	562	9		
	Железные части . . .	18,5	651	640	11	1,6		
	Вода	15	2 350	2 350	0	0		
	Почва	80	600	570	30	5		
	Итого	192,5	9 613	9 010	603	6,25	150	142
2. Дымовая труба	Верхнее строение .	500	8 850	7 350	1 500	17		
	Фундамент и почва .	400	4 360	3 552	808	18,5		
	Итого	900	13 210	10 902	2 308	17,5	116,9	97
3. Боров и экономайзер	Обмуровка и почва .	765	6 300	4 850	1 450	23		
	Экономайз { железо	11	190	162	28	14,7		
	вода	3,5	300	270	30	10		
	Итого	779,5	6 790	5 282	1 508	22,2	53	40,9
4. Очистка воды	Железные части . . .	2,1	10	10	0	0		
	Вода	44	2 200	2 138	62	2,8		
	Итого	46,1	2 210	2 148	62	2,8	36	35
5. Водохра- нильщик	Обмуровка и почва .	175	1 400	1 380	20	1,4		
	Вода	38,3	2 230	2 200	30	1,4		
	Итого	212,3	3 630	3 580	50	1,4	15,9	15,7
6. Котельная	Наружная кладка и крыша	450	800	768	32	4		
	Внутренняя кладка .	261,5	865	830	35	4,1		
	Машины, трубопро- воды и пр.	62	107	100	7	6,4		
	Итого	773,5	1 772	1 698	74	4,18	22	21,5
7. Прочие	Остаточный уголь " шлаки	0,5	1 000	920	80	9,2		
	Остаточные газы и воздух	1,1	26	22	4	18		
	Итого	1,6	1 026	942	84	8,2	40	36,7
	Всего	2 905,5	38 251	33 562	4 689	12,25	433,8	388,8

дованного мною котла в течение первых 16 часов остановки, т. е. в течение перерыва нормальной продолжительности, при 8 часах работы в сутки, терялось в среднем от 15 до 20% всего аккумулированного тепла.

Из вышесказанного следует, что наряду с уменьшением потерь от внешнего охлаждения посредством хорошей тепловой изоляции, а также потерь от внутреннего остывания посредством уплотнения неплотных шиберов, существует еще одно весьма действительное мероприятие для снижения потерь в периоды перерывов в работе: сокращение аккумулирующей

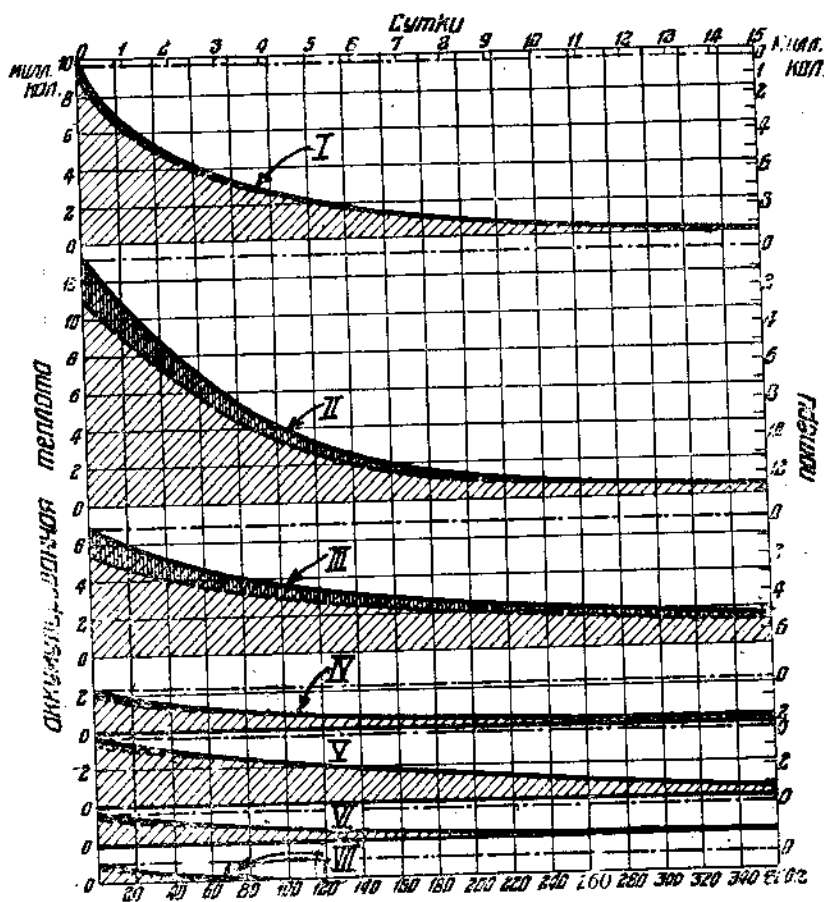


Рис. 75. Накопление тепла и потери от охлаждения в котельной.

I — котел; II — дымовая труба; III — борос и экономайзер; IV — водоочистительное устройство; V — водохранилище для питательной воды; VI — котельная; VII — прочее (остающиеся уголь, шлаки, газы, воздух в котельном помещении и т. д.); пунктирные кривые относятся к половинной нагрузке котла.

способности котла и прочих частей котельной. Правда, мероприятие это по большей части может быть проведено только во вновь сооружаемых установках, но иногда также и при капитальном ремонте или перестройке. При этом, однако, следует помнить об одном весьма важном принципиальном положении: уменьшение аккумулирующей способности не должно влечь за собой увеличения теплопроницаемости, так как в противном случае преимущество окажется купленным за счет гораздо более крупных недостатков. Поэтому теплоаккумулирующая масса должна быть, насколько это возможно, заменена легкими теплоизолирующими материалами. Если бы, например, для уменьшения аккумуляции тепла оказалось желательным заменить кирпичную стенку топочного пространства толщиной 50 см — другой, более тонкой стенкой, то отнюдь нельзя просто снять один ряд кирпичей, так как при этом значительно увеличились бы температуры поверхностей, а вместе с ними также и потери лучеиспусканием и теплопроводностью. В виду этого, напротив, необходимо заменить слой кирпичей более тонким слоем легкой и обладающей малой аккумулирующей способностью изоляционной массы,

чтобы теплопроницаемость всей стенки топочного пространства в целом не только не увеличилась, но по возможности стала бы даже меньше прежней.

Следующий, в настоящее время еще совершенно недостаточно используемый путь уменьшения аккумуляции тепла заключается в том, чтобы по возможности максимально приблизить слой тепловой изоляции к горячей зоне, поместив его, например, между шамотной и кирпичной кладкой обмуровки топки. Благодаря очень большому перепаду температуры в изолирующем слое этим достигается то, что наружная кладка имеет лишь весьма невысокую температуру, а следовательно, и аккумулирует лишь незначительные количества тепла. Теплопроницаемость же всей стенки в целом ни в какой мере не изменяется при размещении изоляции в середине толщи стенки.

Рис. 76 наглядно показывает только что сказанное. Тепловой поток является наивыгоднейшим и аккумуляция тепла — наименьшей для правого рисунка: кладка без всякой изоляции. Зато внешняя температура очень высока, и тепловые потери лучеиспусканием и тепло-

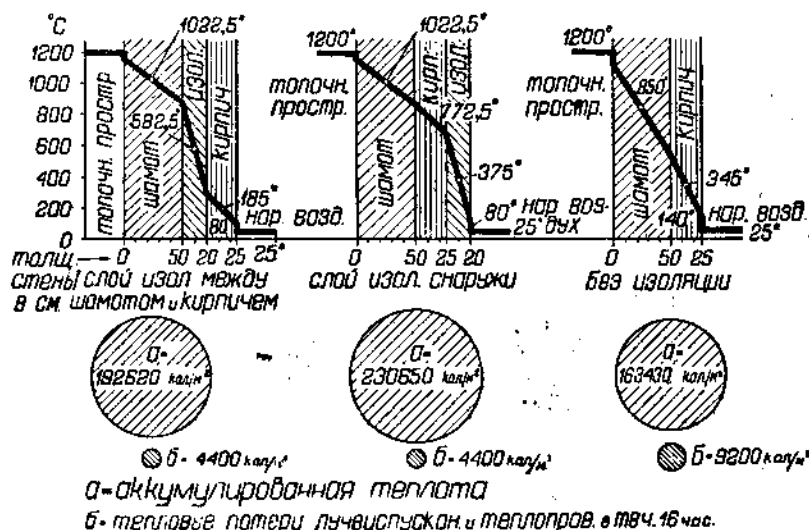


Рис. 76. Распределение температур в стенке топочного пространства и тепловые потери лучеиспусканием, теплопроводностью и вследствие аккумуляции тепла.

проводностью больше чем вдвое по сравнению с двумя другими случаями. При внешнем расположении изоляции, как это показано на среднем рисунке, потери лучеиспусканием и теплопроводностью, правда, незначительны, но аккумуляция тепла велика. Напротив, при расположении изоляции между шамотной и кирпичной кладкой (левый рисунок) потери лучеиспусканием и теплопроводностью малы, так же как и аккумуляция тепла. Это последнее решение задачи является поэтому безусловно наивыгоднейшим. Если исходить из 8 часов работы в сутки и, соответственно, 16-часового перерыва в работе и принять уменьшенное аккумулярованное тепло за время перерыва в размере 15% (что, вообще говоря, соответствует обычным практическим условиям), то для каждого из трех только что рассмотренных примеров получатся цифры, приведенные в таблице 15.

ТАБЛИЦА 15.

Тепловые потери лучеиспусканием и теплопроводностью, а также вследствие уменьшения аккумулярованного тепла, считая на 1 м² стенки топочного пространства (см. рис. 76).

	Потери лучеиспусканием и теплопроводностью во время работы 8 ч. кал/м ²	Уменьшение количества аккумулярованного тепла во время перерыва в работе 16 ч. кал/м ²	Общая потеря 24 ч. кал/м ²
1. Без изоляции	8 · 9 200 = 73 600	0,15 · 163 430 = 24 500	98 100
2. Внешняя изоляция	8 · 4 400 = 35 200	0,15 · 230 650 = 34 600	69 800
3. Внутренняя изоляция	8 · 4 400 = 35 200	0,15 · 192 620 = 28 900	64 100

9. Заключение.

Мы убедились таким образом, как сильно влияют потери от охлаждения на тепловое хозяйство всех установок, работающих с перерывами. Вопросы, с этим связанные, были рассмотрены нами особенно подробно потому, что до настоящего времени в специальной литературе им не уделялось достаточного внимания. Особенно большое значение эти потери имеют как раз для мелких и средних установок, ибо таковые почти все сплошь работают только от 8 до 10 часов в сутки, имея перерыв соответственно от 16 до 14 часов. Так как обычно наружная температура ночью ниже, чем днем во время работы, то потери от охлаждения возрастают особенно сильно. В виду того, однако, что потери от охлаждения могут быть значительно снижены посредством очень простых и большей частью недорогих мероприятий, каждому производственнику следовало бы обратить особое внимание именно на этот род потерь котла.

Х. ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ НАГРУЗКИ И ЕЕ КОЛЕБАНИЙ.

1. Общие соображения.

В предыдущих разделах все время настойчиво подчеркивалась имеющая глубокий принципиальный смысл разница между установившимся состоянием, с одной стороны, и периодами

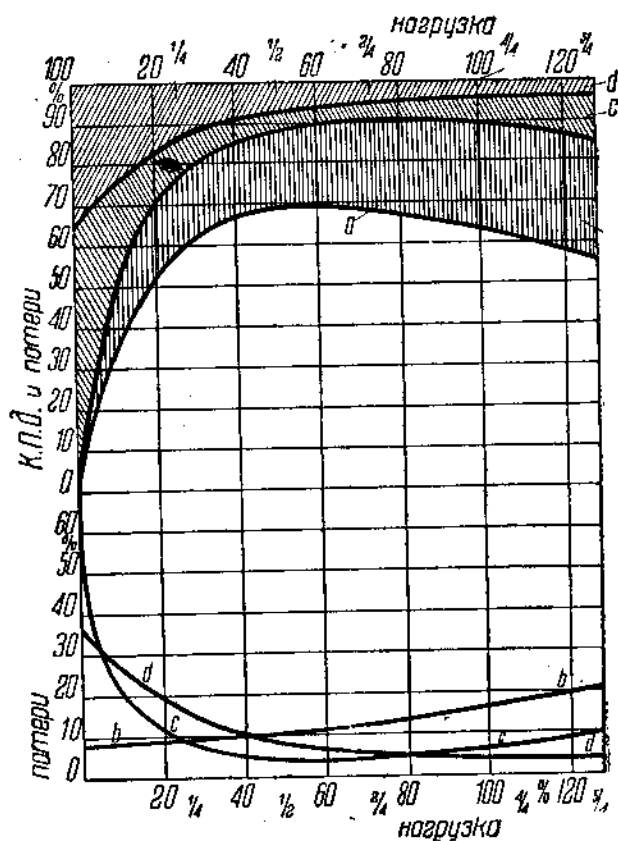


Рис. 77. Тепловой баланс и тепловые потери в зависимости от нагрузки котла.

а — к. п. д.; б — потери с теплотой отходящих газов; в — потери вследствие механической и химической неполноты горения очаговых остатков и отходящих газов; г — потери лучеиспускающим и теплопроводностью.

остановки, растопки, пуска и выключения — с другой; теперь же следует рассмотреть еще один фактор, точно так же весьма сильно влияющий на коэффициент полезного действия и на потери — изменение нагрузки. Даже если котел, пройдя сквозь периоды растопки и пуска той или иной продолжительности, достиг состояния равновесия, все еще нельзя сказать, что в течение дальнейшей работы он будет продолжать оставаться в этом самом состоянии равновесия. Всякое изменение нагрузки нарушает установившееся равновесие, смещает тепловой баланс, повышает или понижает к. п. д. Подобно всем другим машинам и аппаратам каждый котел также имеет свою *нагрузочную характеристику*. Как можно изобразить графически к. п. д. и весь тепловой баланс в зависимости от времени растопки и пуска, так же можно представить к. п. д., тепловой баланс и тепловые потери в зависимости от степени нагрузки котла (рис. 77).¹ Однако к рис. 77 полностью относится сказанное раньше по поводу рис. 64: оба сохраняют значение только для одного вполне определенного котла и могут быть распространены на другие котлы лишь при соблюдении известных предположений. На-

¹ Нагрузка котла дается обычно как функция его полезной производительности, т. е. функция количества пара, произведенного в течение 1 часа на 1 м² поверхности нагрева, или, при более точных подсчетах, как функция количества тепла, переданного 1 м² поверхности нагрева в течение 1 часа. В противоположность этому напряжение решетки и топочного пространства относят к расходу тепла или угля.

грузочная характеристика каждой отдельной котельной установки различается в зависимости от конструкции котла, от рода топки и от характера эксплуатации. Так как, однако, влияние степени нагрузки и ее колебания, подобно влиянию потерь от охлаждения, имеет весьма большое значение для экономичности работы котельной, то следовало бы во всех случаях определять нагрузочную характеристику котла. Ибо только в этом случае мы будем в состоянии устранить или уменьшить различные недочеты котла и максимально экономично организовать его работу.

2. Влияние степени нагрузки.

Представленная на рис. 77 кривая *a* для коэффициента полезного действия действительна, если и не совсем в точности, то хотя бы приближенно, почти для всех котлов. Подобно большинству других машин котлы также проектируют таким образом, чтобы наивыгоднейший к. п. д. получался примерно между половиной и полной нагрузкой. При этом под полной нагрузкой понимается такое напряжение поверхности нагрева, которое является вполне допустимым для котла в условиях его непрерывной длительной работы. Так как большинство котлов, в целях обеспечения известного внутреннего резерва, работает не с полной нагрузкой, то, очевидно, что в большинстве случаев работа их будет протекать в условиях наивыгоднейшего к. п. д. Хотя, как правило, при очень малых нагрузках потери с отходящими газами (кривая *b*) лишь незначительны (отходящие газы при выходе из котла имеют при этом лишь низкие температуры), зато потери лучеиспусканием и теплопроводностью (кривая *d*), выраженные в процентах, возрастают очень сильно. Ниже некоторой определенной нагрузки это относительное увеличение потерь сказывается так сильно, что кривая к. п. д. резко снижается. Наоборот, при высокой нагрузке процентная величина потерь с отходящими газами возрастает, а потери лучеиспусканием падают; и здесь также при переходе через некоторую критическую точку увеличение потерь с отходящими газами вызывает более или менее резкое падение кривой коэффициента полезного действия.

Остальные потери котла зависят от нагрузки в меньшей степени. Во всяком случае, при очень высоких нагрузках потери с очаговыми остатками и уносом вследствие повышенной скорости решетки (при механических цепных решетках), с одной стороны, и усиленной тяги — с другой, также большей частью довольно высоки (кривая *c*), в то время как при очень низкой нагрузке обычно возникают весьма большие потери с очаговыми остатками, так как уголь частично совсем не сгорает; точно также при этом может легко возникнуть недостаток воздуха (вследствие сильного дросселирования тяги), в результате чего являются высокие потери от неполноты горения и сажей. Однако и при очень высокой нагрузке вследствие большой толщины слоя топлива легко возникают потери от неполноты горения и потери с сажей, чем и объясняется вид кривой *c* на рис. 77. Сумма потерь от недожога в очаговых остатках и в газах довольно велика главным образом при очень низких, но кроме того также и при высоких нагрузках. Наивыгоднейшие значения получаются при средних нагрузках.

Сильная зависимость лучистых потерь от степени нагрузки объясняется тем, что температуры поверхностей обмуровки, барабанов котла и т. д. почти одинаковы как при высокой, так и при низкой нагрузке, так что абсолютная величина потерь V_d лишь очень мало изменяется при любых нагрузках (рис. 78). Так как, однако, расход угля меняется приблизительно пропорционально нагрузке (кривая *b*), то очевидно, что процентные потери v_d должны очень сильно зависеть от степени нагрузки.

То же самое можно сказать и в отношении потерь от охлаждения, которые обуславливаются преимущественно лучеиспусканием и теплопроводностью (внешнее охлаждение и внутреннее остывание). Поэтому процентная величина потерь от охлаждения u сильно нагружен-

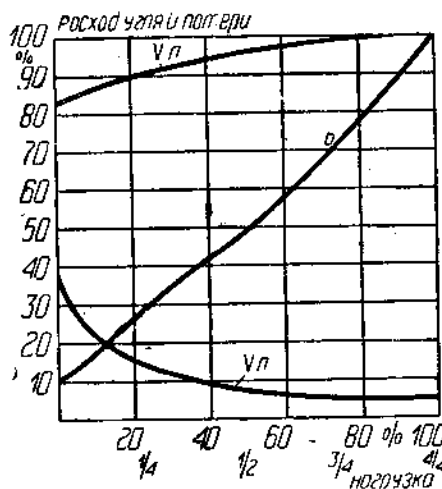


Рис. 78. Расход угля и потери лучеиспусканием и теплопроводностью в зависимости от степени нагрузки котла.

ных котлов всегда много меньше, чем у слабо нагруженных. Известно ведь также, что два незначительно нагруженные котла, вместе взятые, расходуют угля на растопку несравненно больше, чем один сильно нагруженный котел, развивающий ту же мощность, что и первые два котла совместно. Поэтому во всех работающих с перерывами предприятиях рекомендуется *работать с возможно меньшим числом сильно нагруженных котлов*, так как могущее получиться вследствие этого некоторое снижение установившегося к. п. д. (рис. 77) мало по сравнению с большим выигрышем угля для растопки и пуска.

Необходимо остановиться здесь еще на одном факте другого рода. Если отходящие газы еще используются за котлом в экономайзерах и воздухоподогревателях, то к. п. д. последних возрастает с увеличением нагрузки котла даже и тогда, когда к. п. д. котла уже падает. Это объясняется тем, что теплопередача в подогревателях, использующих теплоту дымовых газов, возрастает с увеличением температуры отходящих газов за котлом. Меньший к. п. д. котла компенсируется, следовательно, в известной мере более высоким к. п. д. подогревателя. Точно так же и к. п. д. перегревателя возрастает большей частью даже и при увеличении нагрузки сверх полного ее значения.

Поэтому, исходя из требований теплового хозяйства, следует рекомендовать высокую нагрузку котла. Вместе с тем, разумеется, должны быть учтены и соображения эксплуатационного порядка. В случае если бы в результате высокой нагрузки возросли расходы на под-

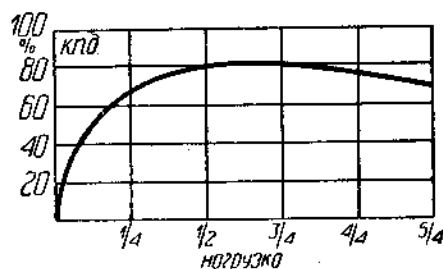


Рис. 79. Благоприятная нагрузочная характеристика котла. (Пологая кривая к. п. д.)

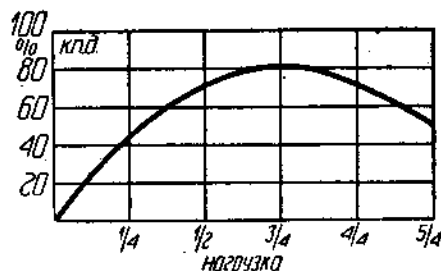


Рис. 80. Неблагоприятная нагрузочная характеристика котла. (Круто поднимающаяся и падающая кривая к. п. д.)

правку и ремонт, а срок службы сократился, то улучшения теплового порядка могли бы оказаться совершенно аннулированными. Всегда следует избегать длительной перегрузки котла.

Наконец необходимо упомянуть еще о том, что наиболее благоприятной является та нагрузочная характеристика, при которой кривая к. п. д. идет горизонтально в пределах возможно большего интервала нагрузок и спадает лишь постепенно как при низких, так и при высоких нагрузках (рис. 79). Характеристика, представленная на рис. 80, является, наоборот, невыгодной, неблагоприятной; даже самое незначительное отклонение от нормальной нагрузки сразу же очень сильно сократило бы экономичность работы котла. Такие характеристики к. п. д. допустимы (если только вообще возможно говорить об их допустимости) лишь для таких котлов, которые работают с неизменной нагрузкой, например для котлов, работающих параллельно с аккумуляторами Рутса, или же для котлов для основной нагрузки электростанций. Многочисленные опыты, проведенные на новейших котельных установках, показали, что характеристические кривые к. п. д. целесообразно построенных и хорошо обслуживаемых котлов имеют довольно пологий вид в пределах практически важного нагрузочного интервала (приблизительно от $1/4$ до $1/2$ нагрузки).¹

Весьма важный вопрос о влиянии степени нагрузки на величины общего расхода и удельных расходов (на 1 кг пара) в связи с затратами на капитал мы рассмотрим несколько ниже.²

3. Влияние колебаний нагрузки.

При постепенных изменениях нагрузки к. п. д. и потери котла изменяются в соответствии с характеристическими кривыми, представленными на рис. 77. При внезапных и сильных колебаниях нагрузки могут, напротив, создаться совсем иные и притом гораздо более невыгодные условия. Если, например, державшаяся до этого большая нагрузка внезапно спадет, то котел

¹ См. между прочим Granberg, Arch. f. Wärmewirtschaft, 9, 69, 1928; Eberle, Die Wärme, 51, 219, 1928; Koeniger, Arch. f. Wärmewirtschaft, 10, 243, 1929.

² См. стр. 142 и след.

большой частью оказывается не в состоянии немедленно же привести толщину слоя топлива, скорость решетки, силу тяги и т. д. в соответствие с новыми условиями. Аккумулированное в топочном пространстве тепло не может найти себе полезного применения. В первое время продолжается образование избыточного пара, который, в случае недопустимости повышения давления в котле, спускается через предохранительные клапаны. Правда, путем дросселирования воздуха быстро достигается уменьшение количества производимого тепла; однако же при этом легко возникает недостаток воздуха, следствием чего является появление высоких потерь от неполноты горения. Наоборот, при внезапном увеличении нагрузки легко могут возникнуть большие потери с теплотой отходящих газов, ибо воздух, подаваемый в увеличенных количествах, не находит вначале на решетке достаточно топлива.

Высокие потери вследствие изменений степени нагрузки и вследствие сильных колебаний нагрузки возникают, следовательно, во-первых, из-за инерции и аккумулирующей способности топок и, во-вторых, из-за невозможности для кочегара сразу же уследить за всеми колебаниями и принять должные в каждом отдельном случае мероприятия. Поэтому такие потери являются неустрашимыми при многих видах топок и вообще во всех случаях, когда процесс горения регулируется обслуживающим персоналом. Топка тем легче приспосабливается к колебаниям нагрузки, чем меньше ее аккумулирующая способность, т. е. чем тоньше ее стенки и чем меньше общая масса обмуровки, железных частей и т. п. Далее, сам котел тем легче воспринимает броски нагрузки, чем больше его водосодержание и допустимы для него повышение и понижение давления.

Другими, притом еще более совершенными, средствами снижения потерь, вызываемых колебаниями нагрузки, являются упомянутое уже параллельное соединение с аккумуляторами Рутса, установка аккумуляторов постоянного давления, автоматическая регулировка топки и установка добавочного отопления (угольная пыль, нефть или газ), которое при бросках нагрузки может быть немедленно же введено в действие и при неожиданном падении нагрузки сразу же опять выключено. Вообще говоря, чисто пылеугольные, нефтяные и газовые топки, а также и современные механические решетки высокой производительности очень эластичны и воспринимают довольно быстро даже очень сильные и внезапные колебания, не вызывая при этом значительных дополнительных потерь.¹

Насколько значительными могут в некоторых случаях оказаться потери вследствие колебаний нагрузки, видно из опытов, проведенных Йоссе (Josse).² Опыты эти производились на водотрубном котле с вертикальными трубками, с поверхностью нагрева в 332 м² и с цепной решеткой. Сначала было произведено испытание котла при равномерной нагрузке, причем получились довольно постоянные давления в котле, содержание CO₂ и к. п. д., равный 83%. Второе испытание того же котла было проведено в обстановке сильно и внезапно колеблющейся нагрузки, причем очень значительно изменялись также и давление пара и содержание CO₂, так что к. п. д. оказался равным только 67,5%. Тепловой баланс показывает, что потери, обусловленные колебаниями нагрузки, были почти так же велики, как и общие установившиеся потери, хотя во время обоих опытов котел обслуживался одинаково тщательно. Подобные же высокие потери вследствие колебаний нагрузки были установлены и при других эксплуатационных испытаниях; так, например, исследование котлов шведского сахарорафинадного завода в Гетеборге, работающих с большими и внезапными колебаниями нагрузки, дало средний эксплуатационный к. п. д. в 61%. После установки аккумулятора Рутса котлы смогли работать с совершенно равномерной нагрузкой, благодаря чему средний эксплуатационный к. п. д. возрос до 71,5%. На рис. 81 представлены результаты двух проведенных мною сравнительных испытаний,³ при которых один и тот же котел работал сперва с равномерной, а затем с колеблющейся нагрузкой. Ясно видно, что при колеблющейся нагрузке потери с отходящими газами были на 5,5% больше, чем при равномерной нагрузке; причиной этому является меньшее в первом случае среднее содержание CO₂ и (временами) появление неустрашимого CO (вследствие дросселирования тяговых шиберов при слабой нагрузке).

¹ Ср. опыты Кенигера (Koeniger), проведенные на четырех различных топках с решетками при очень сильных колебаниях нагрузки. При этом были достигнуты почти постоянные и притом высокие к.п.д. (см. Arch. f. Wärmewirtschaft, 9, 274, 1928, и 10, 243, 1929). Впрочем, не следует забывать, что в эксплуатационных условиях никогда не достигаются результаты, полученные в обстановке тщательно контролируемых опытов. При колебаниях нагрузки всегда следует считаться с увеличением тепловых потерь.

² См. Arch. f. Wärmewirtschaft, 2, 147, 1921.

³ См. Arch. f. Wärmewirtschaft, 10, 111, 1929.

Хотя, как уже указывалось ранее, в последнее время и удастся строить котлы и топки настолько эластичными, что колебания нагрузки могут быть восприняты без появления значительных потерь, все же не следует забывать, что подавляюще большая часть работающих в настоящий момент котлов еще совсем не обладает такой эластичностью. Установка добавочного отопления, в виду слишком малых топочных пространств, большей частью неосуществима. Однако даже и при вполне современных, очень эластичных топках часто не удастся избежать высоких потерь, ибо, как правило, всегда приходится считаться с недостаточно совершенной работой кочегара. Благоприятные результаты тща-

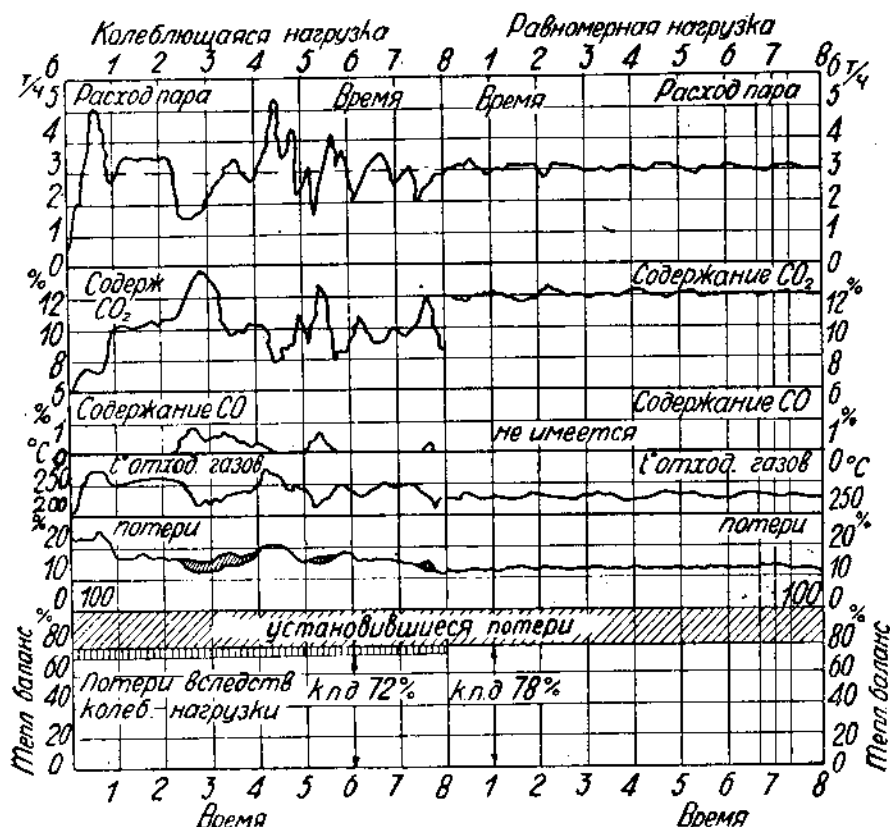


Рис. 81. Расход пара, содержание CO_2 , содержание CO , потери с теплотой сухих отходящих газов, а также от неполноты сгорания, и тепловой баланс при колеблющейся и равномерной нагрузках. (Результаты двух сравнительных испытаний, проведенных на водотрубном котле с ценной решеткой.)

..... средние значения при колеблющейся нагрузке.
Кривая среднего расхода пара при колеблющейся нагрузке действительна для нагрузки при испытаниях с равномерной нагрузкой.
Заштрихованная площадь, прилегающая к кривой потерь, обозначает потери от неполноты сгорания.

тельно проведенного опыта, во время которого все процессы горения, а также все воздействия на топку находятся под непрерывным и неослабным наблюдением, вовсе еще не доказывают, что котел будет столь же выгодно длительно работать в эксплуатационных условиях, когда, как известно, отсутствует тот непрерывный контроль, которым характеризуется всякое испытание.

Наконец, необходимо еще отметить, что большие и внезапные колебания нагрузки предъявляют очень высокие требования к материалам котла и топки. Неизбежными следствиями этого являются большие расходы на ремонт, частые перебои в работе и краткий срок службы обмуровки, колосников и кипятильных трубок.

Таким образом, основные, принципиальные положения как теплового хозяйства, так и эксплуатационной техники говорят за то, что возможность длительной работы котла с постоянной нагрузкой должна рассматриваться как в высшей степени положительное обстоятельство.

При этом не только устраняются все вышеперечисленные недостатки, но нередко, кроме того, может быть еще достигнута значительная экономия на зарплате, ибо обслуживание равномерно нагруженных котлов почти совершенно не требует затраты труда, так что один кочегар может вполне свободно обслуживать несколько котлов.

XI. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЙ КОЭФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ.

Парадный коэффициент полезного действия, устанавливаемый на основании данных тщательных испытаний в условиях установившегося состояния, имеет для теплового хозяйства котельной лишь очень второстепенное значение, ибо в реальных эксплуатационных условиях состояние равновесия достигается крайне редко. Большинство установок работает с ежедневными перерывами. Поэтому наряду с потерями в установившемся состоянии в них имеют место еще большие потери от охлаждения. Непрерывные колебания нагрузки, частично наступающие весьма неожиданно, вызывают дальнейшие дополнительные потери и сокращают величину среднего к. п. д. Сюда присоединяется еще то обстоятельство, что даже в хорошо управляемых предприятиях во время нормальной производственной работы обслуживающий персонал работает не так напряженно, как во время специальных опытов, когда ведение огня находится под неусыпным надзором и все процессы горения контролируются непрерывными измерениями. Более или менее крупные и мелкие перебои в паропроизводящей и паропоглощающей установках так же неизбежны, как и ошибки обслуживания, допускаемые при непредвиденных происшествиях. Все эти обстоятельства влияют на величину среднего эксплуатационного к. п. д., которая поэтому в подавляющем большинстве случаев значительно меньше величины парадного к. п. д. В конечном счете, однако, экономичность характеризуется именно эксплуатационным к. п. д., а не каким-либо другим. *Парадный к. п. д.* является масштабом *производительности котла в особо благоприятных условиях*, тогда как *эксплуатационный к. п. д.* является, напротив, масштабом *действительной производительности*, развиваемой в условиях продолжительной работы.

Никогда нельзя забывать об этом принципиальном различии. Так, например, вполне *возможно* и мною уже неоднократно подтверждено целым рядом эксплуатационных опытов, что котел с высоким парадным к. п. д. будет работать в условиях практической службы менее экономично, нежели котел с худшим парадным к. п. д., но зато отличающийся большей приспособляемостью к колебаниям нагрузки и меньшими потерями от охлаждения.

Под эксплуатационным к. п. д. понимают отношение количества тепловой энергии, использованной в течение некоторого продолжительного периода работы, к количеству тепловой энергии, суммарно затраченной за тот же промежуток времени. Удобнее всего он находится по данным тщательно поставленной производственной статистики, как средняя величина для месячного или годового периода; для определения его служит формула, аналогичная формуле к. п. д. установившегося состояния, а именно:

$$\eta_{\text{экспл}} = \frac{D(i'' - i')}{BQ}$$

с той только разницей, что в этом случае в качестве D и B надлежит подставлять суммарные количества произведенного за месяц или год пара и топлива, израсходованного в тот же период времени.

Из рис. 64 и относящегося к нему примера мы могли уже видеть, что даже *суточный* эксплуатационный к. п. д. был на целых 19% меньше установившегося к. п. д. (59% по сравнению с 78%). При этом были учтены потери от охлаждения только 16-часового перерыва. Если же эксплуатационный к. п. д. был бы определен для более продолжительного периода службы, то под влиянием обычного 36-часового перерыва от субботы до понедельника,¹ под влиянием колебаний нагрузки во время работы и прочих вышеупомянутых факторов использование тепла еще значительно ухудшилось бы, так что, например, в рассмотренном примере эксплуатационный к. п. д. получился бы вряд ли больше чем $\eta_{\text{экспл}} = 55\%$.

Задача, стоящая перед теплотехником на производстве, заключается в том, чтобы исключить все неблагоприятные влияния и достичь средних эксплуатационных к. п. д., возможно более приближающихся к установившимся к. п. д., определенным с помощью точных исследований.

¹ Имеются в виду германские условия.

То, что путем соответствующих мероприятий можно почти во всех без исключения случаях решить эту задачу, доказывается рядом работ, опубликованных в специальной литературе за последние годы.¹ Однако действенность мероприятий будет обеспечена только в случае точного знания всех особенностей котельной установки, проведения эксплуатационных испытаний, непрерывного контроля работы всей котельной установки в целом и немедленного устранения всех перебоев и недостатков в процессе работы.

ХП. ИСПАРИТЕЛЬНАЯ СПОСОБНОСТЬ.

В одном из предыдущих разделов² уже указывалось, что испарительная способность, т. е. отношение количества произведенного пара к количеству сожженного угля, нередко используется как практически легко определяемая величина, пригодная для оценки полезного эффекта котельной установки. Без сомнения, она является весьма уместной во всех случаях, когда дело идет о том, чтобы дать некоторую общую оценку экономичности производства пара. Необходимо, однако, подчеркнуть здесь еще раз, что, при точных испытаниях она никогда

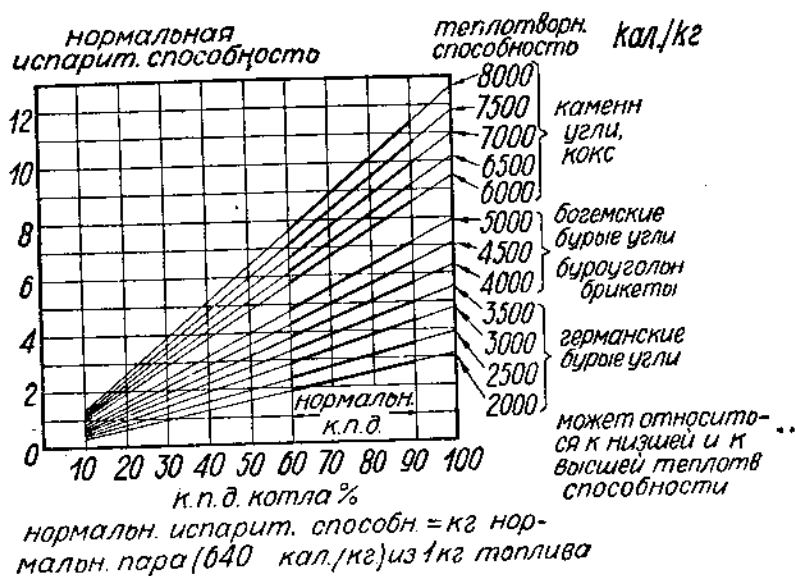


Рис. 82. Соотношение между нормальной испарительной способностью и коэффициентом полезного действия.

не может заменить коэффициента полезного действия, ибо не учитывает различий в теплотворной способности угля, которые зачастую бывают очень велики. В текущей эксплуатационной статистике, однако, испарительная способность никогда не должна была бы отсутствовать, так как изменения ее величины сразу же сигнализируют об изменении либо полезного эффекта котельной установки, либо теплотворной способности угля. Ее непрерывное определение, которое, кстати сказать, не представляет никаких затруднений и не требует затрат почти никакого труда, облегчает, следовательно, весьма существенным образом контроль над производством.

Различают, как мы уже видели ранее, действительную испарительную способность $e_d = \frac{D}{B}$ и нормальную испарительную способность $e_n = \frac{D}{B} \cdot \frac{i'' - i'}{640}$, из коих последняя относится к «нормальному пару» (насыщенный пар 1 атм. абс., 100° С). Нормальная испарительная способность несколько более неудобна для определения, но зато она даст более точную картину производительности котла, ибо не зависит от переменного теплосодержания пара. Для

¹ См. между прочим: Frank und Wutzkowski, Ein erfolgreicher Dampfkesselumbau, VDI-Zeitschr., 69, 801. Eberle, Betriebswirkungsgrad und Auskühlverlust von Dampfkesseln, Arch. f. Wärmewirtschaft, 9, 133, 1928.

² См. стр. 40 и 41.

целей же эксплуатационной статистики совершенно достаточно знания действительной испарительной способности.

Аналогично тому, как приходится различать установившийся и эксплуатационный коэффициенты полезного действия, должно делать различие также и между испарительными способностями, определенными при установившихся состояниях, и такими, которые являются средними величинами за более или менее продолжительный период эксплуатации, следовательно, уже включают в себе влияния всех потерь, в том числе и потерь, обусловленных перерывами в работе, колебаниями нагрузки и т. д. Практически преимущественное значение из числа вышеупомянутых имеет испарительная способность последнего рода, ибо она, по самой своей сути, является статистической величиной, каковая пригодна не столько для оценки производительности котельной установки (для этого гораздо более пригоден к. п. д.), сколько для характеристики действительно развиваемой мощности, а также и экономичности.

Подсчет испарительной способности на основании замеренных и заимствованных из эксплуатационной статистики цифр настолько прост, что нет никакой надобности прибегать здесь к помощи графического метода. Напротив, очень ценно иметь возможность графически определять соотношения между к. п. д. и обеими испарительными способностями. Решение этой последней задачи дано на рис. 82 и 83. Из рис. 83 видно, что действительная испарительная способность всегда немного меньше нормальной и именно тем меньше, чем выше перегрев. При нормальных значениях к. п. д. (от 60 до 90%) величины нормальной испарительной способности колеблются для каменных углей между 6 и 11, для германских бурых углей между 2 и 5. Таким образом, если известна теплотворная способность угля и определена нормальная испарительная способность, то можно, пользуясь рис. 82, сразу же найти к. п. д. Если же определена только действительная испарительная способность, то для установления (с помощью рис. 83) величины к. п. д., надо знать еще температуру пара.

Пример. Расход угля в котельной установке в течение месяца составил 250 т, количество произведенного пара 1800 т. Определить эксплуатационный к. п. д. установки, если низшая теплотворная способность угля 7000 кал/кг, а температура пара 300° С.

Действительная испарительная способность будет $e_d = \frac{1800}{250} = 7,2$. Из рис. 83 для $e_d = 7,2$ и $Q_n = 7000$ кал/кг получаем $\eta_{\text{экспл}} = 73\%$.

ХIII. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЙ ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС.

Лишь после того как установлены эксплуатационный к. п. д. и все потери в установившемся состоянии, потери при колебаниях нагрузки и вследствие перерывов в работе, можно установить эксплуатационный тепловой баланс, дающий ясную картину экономичности работы котла, правда, постольку, поскольку речь идет о расходах только на топливо. Представляется целесообразным устанавливать такой общий баланс периодически и выяснять путем сравнения с ранее установленными балансами, улучшились ли или ухудшились условия и где именно следует искать главные потери. Отсюда можно затем заключить, какие именно пружины следует нажать в первую очередь для улучшения использования тепла. На рис. 84 представлен такой эксплуатационный тепловой баланс в форме графика теплового потока. Из него видно, что в рассматриваемом примере наибольшие потери возникают вследствие охлаждения. Надо полагать, что для большинства котельных установок, работающих с перерывами, действительны аналогичные условия. В этом случае, следовательно, надо уделять внимание прежде всего

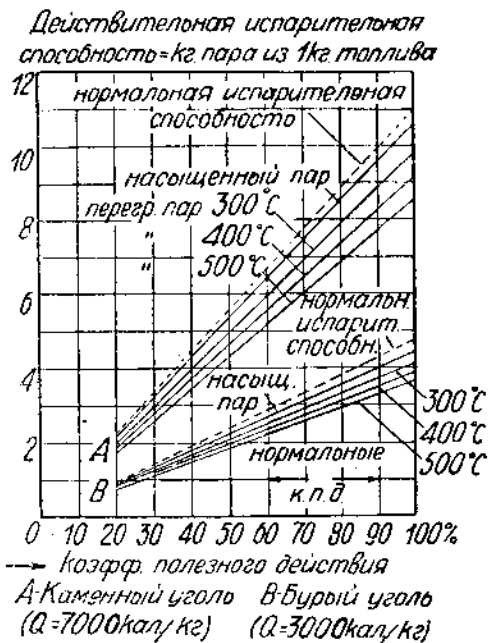


Рис. 83. Соотношение между действительной испарительной способностью и коэффициентом полезного действия.

уменьшению потерь от охлаждения. Из рис. 85 можно усмотреть, насколько выгоднее складывается тепловой баланс в условиях непрерывной работы котельной установки.

ХIV. ЭКОНОМИЧЕСКИЙ БАЛАНС.

Последним звеном цепи экономических исследований является экономический баланс. Расходы на топливо являются только частью общих производственных расходов, иногда частью большой и решающей, а иногда и совсем малозначащей. Эти два характерных случая пред-

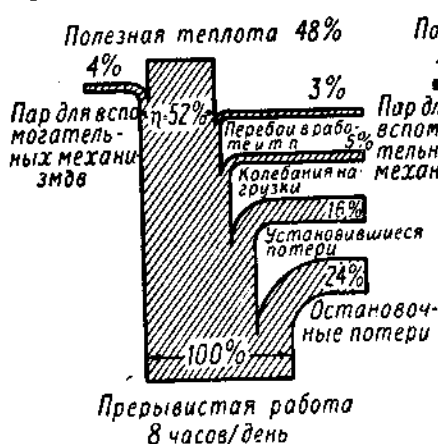


Рис. 84.

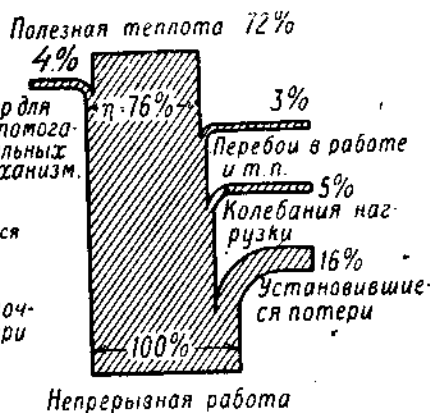


Рис. 85.

Рис. 84 и 85. Тепловой баланс котла при 8 часах работы в сутки и котла, работающего непрерывно.

ставлены на рис. 86 и 87. На рис. 86 изображен баланс непрерывно работающей котельной установки, в каком случае расходы на топливо, естественно, имеют большое влияние на общую экономичность. Рис. 87 начерчен, напротив, в предположении очень плохого исполь-

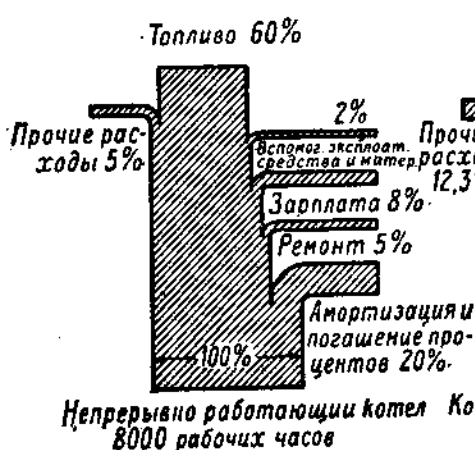


Рис. 86. Экономический баланс котла с высокой постоянной нагрузкой и высоким числом часов годового использования.

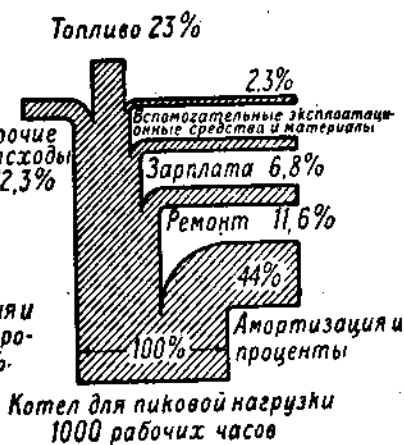
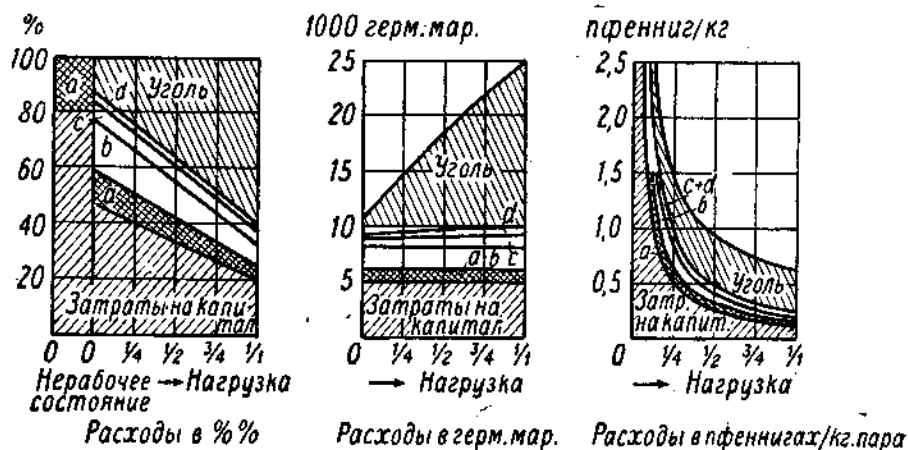


Рис. 87. Экономический баланс котла с низкой нагрузкой и малым числом часов годового использования.

зования установки, например, в предположении пиковой силовой установки, работающей лишь несколько часов в сутки. Несмотря на то, что эта установка — в виду длительных и частых перерывов в работе, а также сильных и внезапных колебаний нагрузки — работает термически крайне невыгодно, улучшения теплехозяйственного порядка принесли бы только очень немого пользы, ибо доля расходов на топливо в общих расходах в процентном отношении крайне незначительна (23%). В этом случае было бы по меньшей мере столь же важно сократить сравнительно крупные расходы на ремонт, точно так же обуславливаемые многочисленными

перерывами в работе и колебаниями нагрузки. Особенно ценно было бы, однако, если бы удалось снизить весьма высокие в процентном отношении расходы на амортизацию и процентные отчисления. При уже существующих установках это, разумеется, невозможно. При приобретении же новых котлов и вспомогательных устройств (перегревателей, подогревателей и т. п.) это соображение имеет решающее значение. Малоиспользуемые установки должны быть прежде всего дешевы, и дешевый котел с низким к. п. д. большей частью предпочтительнее высококачественного, но дорогого котла. Вообще говоря, во многих случаях, как мы это еще увидим дальше, для покрытия кратковременных пиков нагрузки гораздо экономичнее применять не котлы, а другие устройства, как, например, аккумуляторы Рутса; ибо их приобретение обходится много дешевле.

Коэффициент годовой загрузки зависит, однако, не только от числа часов годового использования, но также и от степени нагрузки. Если сравнить, например, два котла с одинаковым временем использования, из которых один нагружен в среднем на половину, а другой полностью, то окажется, что расход угля во втором случае вдвое больше, чем в первом, тогда как расходы по процентам и амортизации в обоих случаях одинаковы.



для 4 милл. кг пара при полной нагрузке
 а-Общие накладные расходы б-Зарплата с-Ремонт д-Эксплуатационные расходы (кроме угля)

Рис. 88. Процентное соотношение расходов.

Рис. 89. Общий расход.

Рис. 90. Удельный расход.

Рис. 88—90. Влияние нагрузки на общий расход.

Исключительно большое влияние нагрузки ясно видно из рис. 88, 89 и 90. В случае резервного котла, находящегося только под парами, идущего, следовательно, до известной степени на холостом ходу (нагрузка—нуль), процентная доля расходов на уголь не играет, как это видно из рис. 88, почти никакой роли. Впрочем, влияние затрат на капитал даже приблизительно не так велико, как в случае неотопливаемого резервного котла (левая часть рис. 88), ибо и при холостом ходе неизбежны расходы на зарплату, на ремонт и на эксплуатационные нужды; все же и при этом почти 50% общего расхода падает на проценты и амортизацию. С увеличением нагрузки процентная доля капитальных затрат по отношению к общему расходу падает примерно в той же мере, в которой возрастает доля расходов на топливо. С повышением нагрузки общий расход, в виду увеличения расхода угля, естественно возрастает (рис. 89). Удельный общий расход, т. е. расход на 1 кг пара, напротив, падает с повышением нагрузки (рис. 90) очень значительно, ибо влияние затрат на капитал становится все менее ощутительным. В то время как в рассматриваемом примере (рис. 90) общий расход при $\frac{1}{4}$ -нагрузке составляют еще 1,5 пфеннига/кг, при $\frac{1}{2}$ нагрузке он все еще составляет 0,9 пфеннига/кг, а при $\frac{1}{4}$ нагрузке уже только 0,6 пфеннига/кг, т. е. на 60% меньше, чем при $\frac{1}{4}$ нагрузке, — все это, разумеется, при том непеременимом условии, что в резерве нет больше никаких других котлов, ибо в противном случае следовало бы присчитать сюда же затраты на капитал для остальных резервных котлов.

Все эти обстоятельства приводят к тому, что по экономическим соображениям следует стремиться к максимальному сокращению резерва (вообще говоря, безусловно необходимого) и к применению в качестве резервных котлов возможно более дешевых конструкций, вне зависимости от высоких к. п. д.

Каким именно образом теплотехнические усовершенствования могут повлиять на экономичность двух различно нагруженных котельных установок, показывает нижеследующий пример.

Пример. С помощью установки экономайзера расходы на топливо могут быть снижены на 10%. Какой будет процент экономии (при учете всех расходов), если допустить, что в одном случае котельная установка работает в среднем с $\frac{1}{4}$ нагрузкой, а в другом — с полной?

Из рис. 88 находим, что расходы на уголь составляют 23% при $\frac{1}{4}$ нагрузке и 60% при $\frac{1}{2}$ нагрузке. Следовательно, экономия в 10% на расходах на уголь составит при $\frac{1}{4}$ нагрузке только 2,3%, при $\frac{1}{2}$ нагрузке — уже целых 6% от общего расхода.

Если теперь предположить еще, что полностью нагруженная котельная установка работает непрерывно, тогда как установка, нагруженная только на $\frac{1}{4}$, работает 8 часов в сутки, то для мало загруженной установки общая экономия определится в размере всего $\frac{2,3}{8} = 0,2875\%$.

Из примера следует, что теплотехнические усовершенствования важны прежде всего для тех котлов, которые работают непрерывно с высокой нагрузкой.

ПРАКТИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ.

ГЛАВА ПЕРВАЯ.

СОСТАВНЫЕ ЧАСТИ КОТЕЛЬНОЙ.

В предыдущей части подробно рассмотрены явления, происходящие при сжигании горючего и передаче теплоты; возникающие при этом потери и, наконец, аналитические и графические методы определения всех величин, имеющих значение для оценки котельной установки с точки зрения тепловой экономики. В настоящей части речь будет идти уже о частях самой парообразовательной установки.

Мы ставим перед собой лишь задачу дать краткий и общий обзор многочисленных конструкций топок и котлов и коснуться наиболее употребительных способов подачи угля, подготовки воды, удаления золы и т. д. В конструктивные подробности мы вдаваться не будем, так как в литературе можно найти целый ряд ценных трудов, разбирающих конструктивные детали паровых установок.

Эксплуатационного инженера, для которого в первую очередь предназначена эта книга, общие конструктивные вопросы интересуют лишь постольку, поскольку они могут оказывать существенное влияние на основные процессы парообразования и приводить к достижению важных эксплуатационных преимуществ. В дальнейшем изложении мы и постараемся особо учитывать обе эти отправные точки зрения. Наконец, мы покажем, какие успехи достигнуты за последние годы в устройстве топок, паровых котлов и т. д. и в каком направлении идет их дальнейшее развитие. К важнейшим задачам руководителя эксплуатацией, распоряжающегося хотя бы и старыми котельными установками, принадлежит внимательное наблюдение за всеми новинками в области устройства топок и котлов, так как в случае реконструкции или сооружения новых установок он должен обладать необходимыми знаниями, чтобы избрать для своего предприятия наиболее подходящее и экономичное устройство.

1. ТОПКИ.

1. Разнообразие типов топок.

В первой части мы видели, как многообразны в физическом и химическом отношении разные виды топлива, сжигаемого в топках паровых котлов. Они встречаются частью в твердом, частью в жидком или даже в газообразном агрегатном состоянии; их теплотворная способность колеблется, примерно, между 1000 и 12000 кал/кг, содержание воды в них бывает, примерно, от 1 до 65%, содержание золы, примерно, от 1 до 80%. Твердое топливо может иметь вид кусков, весом в несколько килограммов, и может представлять собой тончайшую пыль, проходящую сквозь частые сита. Некоторые горючие материалы обладают твердостью стекла, другие носят рыхлый, землистый характер, иные состоят почти исключительно из твердого углерода, иные же — главным образом из летучих составных частей. Чрезвычайное разнообразие применяемых видов топлива обуславливает такое же разнообразие устройства топок. Вполне очевидно, что не может быть никакой «универсальной топки», которая одинаково годилась бы для всех видов горючего. Если в последнее время в конструкциях топок и наблюдается стремление обеспечить возможность разностороннего их применения, для того чтобы при необходимости перехода на другое топливо можно было

пользоваться той же тонкой, то все же этому стремлению поставлены известные пределы. Всегда будет необходимо существование целого ряда разных конструкций, так как без этого нельзя говорить об экономичном использовании топлива. В основном мы должны различать *колосниковые точки* для кускового топлива, с одной стороны, и *пылевые, нефтяные и газовые точки* — с другой. Среди колосниковых топок следует рассматривать отдельно *точки для каменного угля и точки для бурого угля*, так как значительное различие между этими двумя наиболее часто применяемыми¹ видами топлива требует соответствующего различия и в конструкции топок. Кроме того следует различать *точки с ручной подачей и механические точки*. Наконец, следует упомянуть еще о разных специальных конструкциях и, прежде всего, о приобретающих в последнее время все большее значение *добавочных топках*.

2. Колосниковые точки.

Если не касаться пока топок для угольной пыли, то во всех остальных топках для твердого горючего характерно наличие колосниковой решетки, имеющей две главные задачи: удерживать сжигаемое топливо и в то же время подводить через многочисленные зазоры между колосниками необходимый для горения воздух. Обе эти задачи находятся в некотором взаимном противоречии, так как для хорошего расположения сжигаемого угля, особенно мелкокускового и совсем мелкого, необходимы возможно более узкие зазоры в решетке, тогда как для подвода достаточного количества воздуха часто бывают нужны более широкие щели. Для толщины слоя угля также существуют зависящие от крупности кусков пределы, так как при слишком большой толщине слоя вводимый для сжигания воздух встречает большое сопротивление и не может проникать сквозь слой горючего в достаточном количестве.

Для преодоления этого затруднения обычно вместо естественной тяги, создаваемой при помощи дымовой трубы, применяют искусственную тягу и соответственным повышением давления вентилятора компенсируют увеличенное сопротивление угольного слоя. Но тут возможна другая опасность, а именно та, что при мелком топливе и неравномерной толщине слоя самые мелкие частички угля будут увлечены сильной струей воздуха и покинут топочное пространство прежде, чем успеют сгореть. Это приводит к неприятным последствиям в виде высоких потерь от неполного сгорания, образования уноса и загрязнения котельных дымоходов, борова и дымовой трубы.

Отсюда ясно, что в зависимости от рода топлива необходимы различные устройства колосниковых решеток и что применение нижнего дутья не всегда целесообразно. Вообще говоря, можно констатировать, что с помощью нижнего дутья почти всегда удается достигнуть более высокой производительности колосниковой решетки, однако часто лишь за счет ухудшения коэффициента полезного действия и сильного загрязнения. Лишь в последнее время удалось создать точки с нижним дутьем, пригодные и для мелкокусковых углей.

Горизонтальные колосниковые решетки с ручной загрузкой и точки с механическим забрасыванием горючего. В качестве точки для каменного угля в прежнее время применялась почти исключительно неподвижная горизонтальная колосниковая решетка с ручной загрузкой. В настоящее время ее еще можно встретить лишь при мелких котлах, а также при большинстве котлов с жаровыми трубами. Она состоит из ровных или изогнутых колосников или колосниковых плит, причем в новейших конструкциях колосники иногда делают полыми для охлаждения их воздухом или водой. Эти точки пригодны не только для высокосортного каменного угля, но и для брикетов, кокса, дерева, торфа, а в известных случаях и для угольных отбросов и низкосортных бурых углей. При обслуживании их свежий уголь вручную забрасывают спереди в небольших количествах. В этой части точки уголь освобождается от газообразных составных частей, после чего его равномерно распределяют по всей поверхности горящего слоя в направлении к заднему концу точки.

Важнейшим преимуществом горизонтальной колосниковой решетки с ручной загрузкой является ее малая первоначальная стоимость. Расходы на эксплуатацию и содержание в общем также невысоки, так как точка не имеет движущихся частей, а износ при нормальной нагрузке и хорошем обслуживании невелик. Зато коэффициент полезного действия такой точки обычно весьма низок. Большие потери от несгоревших остатков неизбежны, так как невозможно равномерное удаление шлаков. Равным образом, обычно весьма высоки потери в отходящих газах и потери от неполного сгорания, так как даже при тщательном обслуживании

¹ В Германии. Прим. ред.

высота слоя горючего никогда не может быть вполне равномерной, вследствие чего в некоторых местах образуется значительный избыток воздуха, в других же — недостаток воздуха. Кроме того производительность горизонтальных колосниковых решеток с ручной загрузкой сравнительно мала. При расчетах можно исходить в общем из напряжения колосниковой решетки в 80 или, самое большее, 120 кг/м² в час при хорошем каменном угле. Правда, при пользовании нижним дутьем можно еще повысить напряжение, но тогда обычно получается низкий коэффициент полезного действия. Наконец, и величина колосниковой решетки ограничена, так как при большой ширине решетки уже невозможна тщательная ручная загрузка. Для больших котлов горизонтальная колосниковая решетка с ручной загрузкой поэтому не годится.

В современных котельных топках такую колосниковую решетку, в виду ее малой производительности и плохого коэффициента полезного действия, применяют редко. Даже в котлах с жаровыми трубами все чаще устраивают механические топки. Горизонтальная колосниковая решетка с ручной загрузкой оправдывается в наше время только при очень малых размерах и малом напряжении.

Известное усовершенствование плоской колосниковой решетки с ручной загрузкой представляют так называемые топки с механическим забрасыванием горючего, в которых топливо загружается на решетку при помощи лопаток или метательных колес, устроенных так, что дальность забрасывания и величина забрасываемой порции периодически меняются. Такие топки иногда успешно применяются и для

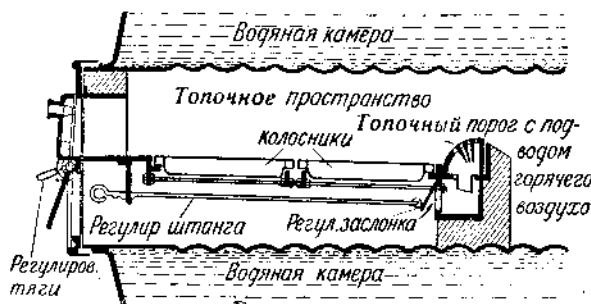


Рис. 91. Внутренняя топка жаротрубного котла с горизонтальной колосниковой решеткой, снабженная топочным порогом с подводом горячего воздуха.

наклонных колосниковых решеток. Сгорание в них значительно лучше, чем в топках с ручной загрузкой, так как топливо распределяется более равномерно. Однако высокие потери в остатках горючего не устранимы и при этих топках. Кроме того для достижения хорошего сжигания необходима возможно большая равномерность величины кусков.

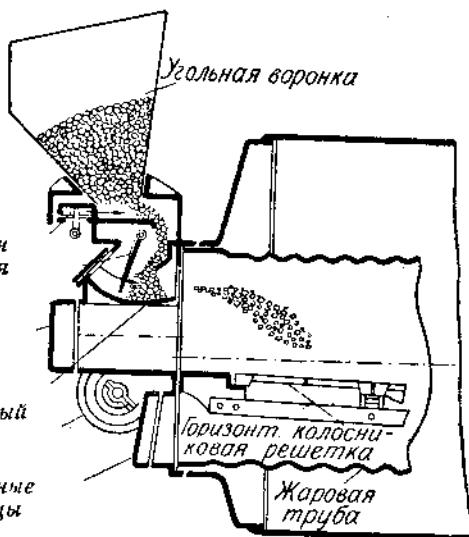


Рис. 92. Метательная топка в жаротрубном котле.

Рекомендуется также устройство на заднем конце топки порога, особенно в топках с нижним дутьем, так как могущий образоваться в них унос ударяется о порог и сгорает. На рис. 91 изображена внутренняя топка с горизонтальной колосниковой решеткой и порогом для исправления движения горячего воздуха, на рис. 92 — топка с механическим забрасыванием топлива.

Особую разновидность горизонтальной колосниковой решетки представляет изображенная на рис. 93 дутьевая колосниковая решетка, состоящая из колосниковых лотков, в передние отверстия которых введены паровые сопла. С помощью этих пароструйных сопел воздух засасывается в точно регулируемом количестве; затем он равно-

мерно распределяется по всей решетке, благодаря тому, что свободное поперечное сечение решетки уменьшается к заднему концу. Накопившийся эксплуатационный опыт показывает, что при этой топке можно достигнуть значительного повышения производительности и что в ней можно сжигать с хорошим коэффициентом полезного действия все виды горючего, в том числе и весьма низкосортные.¹ Недостатком является довольно высокий расход пара, иногда достигающий 4% всего образуемого количества его. Кроме того при этих топках, как и при всех неподвижных горизонтальных колосниковых решетках, обычно неизбежны большие потери в остатках.

Цепные колосниковые решетки и решетки с движущимися колосниками. Значительный прогресс топливной техники ознаменовало собой введение цепных колосниковых решеток и решеток с движущимися колосниками, которые до сих пор являются в Германии наиболее распространенными и в общем наиболее целесообразными колосниковыми топками. Колосники в них укреплены друг за другом на поперечных осях, причем отдельные ряды образуют бесконечную, снабженную прозорами для дутья, ленту, медленно движущуюся на двух цепных валиках. Таким образом, половина решетки всегда находится вне топочного пространства и охлаждается, в то время как находящаяся в топке часть принимает падающее на нее спереди через особую воронку горючее и передвигает его все дальше по мере его сгорания. Топливо поводится непрерывно, остатки же горения сзади падают с решетки в зольник. Благодаря тому, что подачу горючего, равно как и скорость решетки, можно точно регулировать, решетку с движущимися колосниками можно быстро приспособлять к любой степени нагрузки котла.

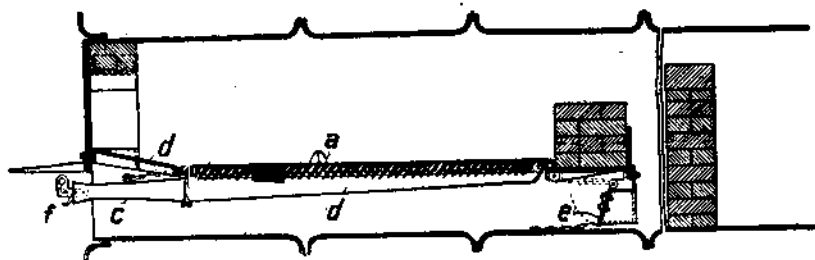


Рис. 93. Дутьевая топка в жаротрубном котле.

a — колосники; b — колосниковые оси; c — труба с соплом; d — шуровочная планка; e — дверцы для очистки; f — сопло.

Различие между цепными колосниковыми решетками и решетками с движущимися колосниками носит чисто конструктивный характер. Решетка с движущимися колосниками в своей более новой конструкции представляет то большое эксплуатационное преимущество, что колосники можно легко менять. Поэтому, если во время работы требуется вставить новые колосники, это может быть произведено быстро, тогда как у цепной решетки смена колосников отнимает значительно больше времени, что иногда может повлечь за собой неприятные нарушения эксплуатации. В виду этого в последнее время чаще применяют решетки с движущимися колосниками. Впрочем, в некоторых случаях и теперь отдадут предпочтение несколько более эластичной, т. е. более выгодной с точки зрения топливной техники, цепной колосниковой решетке.¹

Преимущества цепной колосниковой решетки и решетки с движущимися колосниками перед неподвижной горизонтальной колосниковой решеткой с ручной загрузкой чрезвычайно велики. Точное регулирование количества сжигаемого горючего и скорости передвижения решетки, а в новейших конструкциях — и подвода воздуха при пользовании нижним дутьем, приводит, помимо значительного упрощения обслуживания, к возможности вполне равномерного и совершенного сжигания с малым избытком воздуха. Потери в остатках обычно также весьма малы, особенно при хорошем воздушном затворе на заднем конце, и, наконец, производительность решетки значительно выше, чем у неподвижных горизонтальных колосниковых решеток. В среднем, можно рассчитывать на напряжение решетки в 100—130 кг/м² ч. при сжигании высокосортного каменного угля (т. е., примерно, на 10—20% больше, чем у обыч-

¹ См. Arch. f. Wärmewirtschaft, 6, 299, 1925, и 7, 264, 1926.

² См. Grupp, Die Wärme, 50, 766, 1927.

новенных горизонтальных колосниковых решеток). Впрочем, в новых топках высокой производительности уже достигнуты длительной эксплуатации напряжения более $300 \text{ кг/м}^2 \text{ ч.}$ при сжигании высокосортных жирных и тощих углей, до $400 \text{ кг/м}^2 \text{ ч.}$ — при полукоксе и до $650 \text{ кг/м}^2 \text{ ч.}$ — при отбросах дерева и торфе.¹

Решетка с движущимися колосниками в последние годы значительно усовершенствована, прежде всего — в силу конкуренции быстро развивающегося применения пылеугольных топок. В настоящее время эта решетка конструктивно так хорошо разработана, что не уступает топкам для угольной пыли в отношении производительности, коэффициента полезного действия и приспособляемости к колебаниям нагрузки. Далее, в последнее время удалось создать такие топки, в которых можно сжигать почти все виды горючего, от антрацита до торфа, в том числе кокс и полукокс, древесные отбросы, брикеты для бурого угля, а в случае надобности — и бурый уголь с большим содержанием влаги.²

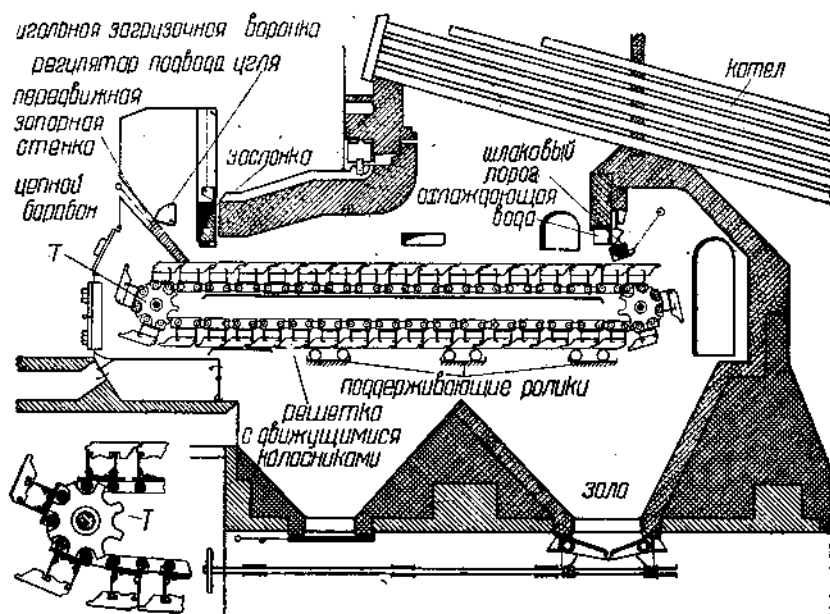


Рис. 94. Колосниковая решетка с движущимися колосниками, с длинным отражательным сводом, нижним топочным пространством и качающимся порогом.

Существенными этапами этого прогресса являются, прежде всего, все более совершенная конструктивная разработка топок с движущимися колосниками и нижним дутьем, устраиваемых теперь с несколькими воздушными зонами, далее — введение подогрева воздуха, который в современных колосниковых топках можно доводить приблизительно до 200° , устройство по бокам решетки особых защитных приспособлений для предупреждения осаждения шлаков (например кляздящиеся колосниковые решетки Штейнмюллера и боковые охлаждающие решетки Дюрра), хороший воздушный затвор в конце решетки посредством охлаждаемых водой съемников, подпорные маятники (качающиеся задержки) или пороги (из которых особенно пригодным оказался порог Штейнмюллера), устройство механических штурвальных приспособлений для определенных сортов угля, которые вследствие своей неоднородности дают в слое горючего прогары (конструкции «Нибо и Ниссен» и «Ганомат»), и, наконец, что важнее всего, рациональное устройство топочной камеры. В то время как раньше, особенно для тощих углей, применяли длинные и низкие отражательные своды (правда, обеспечивавшие хорошее воспламенение, но вследствие высоких температур подверженные весьма сильному и быстрому

¹ См. Birkner, Die Wärme, 50, 728, 1927; далее — Отчет Союза по надзору за паровыми котлами в Дортмундском округе об опытах над новой поясной колосниковой решеткой Штейнмюллера с движущимися колосниками; Schulte, Arch. f. Wärmewirtschaft, 10, 97, 1929.

² См. Berner, Die Wärme, 52, 68, 1929.

износу), в современных конструкциях удалось путем целесообразного и точно регулируемого подвода воздуха обходиться при трудно воспламеняющемся горючем совсем коротким сводом, а при жирных углях — и вовсе без *отражательного свода*. Вместо применявшегося раньше кирпичного свода, в настоящее время все чаще применяют плоские *подвесные перекрытия*, которые благодаря своей горизонтальности более равномерно излучают теплоту на поверхность горючего, отчего повышается равномерность сгорания и напряжения колосниковой решетки. Дальнейшее преимущество подвесных перекрытий заключается в том, что при помощи сменных кирпичей их можно быстрее и дешевле ремонтировать, чем сводчатые перекрытия, в которых приходится разрушать и делать заново всю кладку. Введение подвесных перекрытий дало также возможность строить весьма широкие (6 м и более) топки с движущимися колосниками, благодаря чему в настоящее время топки этого рода можно применять и к очень большим котлам.

Чрезвычайно важным правилом для топок с движущимися колосниками, — правилом, в прежнее время соблюдавшимся редко, является устройство *высокого топочного пространства*. Богатое газом топливо требует для полного сгорания получающихся

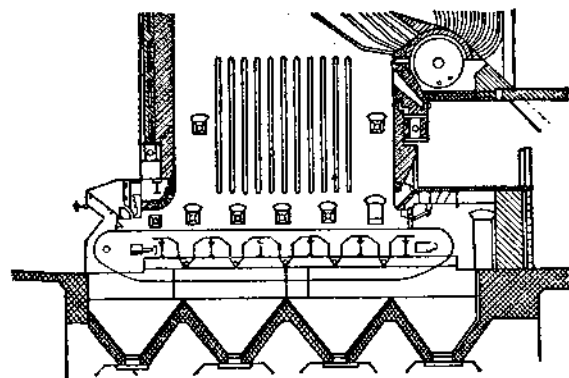


Рис. 95. Зональная топка Штейнмюллера с движущимися колосниками, с коротким отражательным сводом, высокой топочной камерой, топочным порогом и проходом для обслуживания над концом решетки.

при сухой перегонке газов высокого пространства, бедному же газом горючему высокое топочное пространство необходимо для смягчения охлаждающего действия поверхности нагрева на поверхность горючего. Низкое топочное пространство не только создает плохие условия для развития пламени (неполное сгорание, образование сажи), но и влечет за собой высокое напряжение строительных материалов, сильное загрязнение котельных дымоходов и малую производительность поверхности колосниковой решетки и поверхности нагрева. В большинстве случаев даже в старых котельных установках имеет смысл, поскольку это допускает высота котельного помещения, поднять котлы и этим повысить топочные пространства, которые в старых установках почти всегда слишком низки.

Конструктивное развитие топок с движущимися колосниками, которого мы здесь можем коснуться лишь в общих чертах, иллюстрируется рис. 94 и 95. На рис. 94 изображена такая топка с длинным отражательным сводом и низким топочным пространством. Рис. 95 показывает современную зональную топку Штейнмюллера с движущимися колосниками и движим дутьем, с очень коротким отражательным сводом и высоким топочным пространством. Эта конструкция имеет то преимущество, что кочегар может следить за всем процессом горения через окошки с площадки для обслуживания, расположенной над концом решетки. В случае надобности он может отсюда удобно шуровать слой топлива. При таком устройстве можно допустить весьма большую ширину колосниковых решеток, так как все части топки легко доступны кочегару. Наконец, уменьшая промежуток между двумя соседними котлами, который ради удобства наблюдения и шуровки делали довольно большим, можно достигнуть существенной экономии площади.

Производительность и коэффициент полезного действия, достигнутые с этой новой зонной топкой в результате длительных испытаний, можно видеть на таблице 16.

Весьма благоприятные результаты получены также при пользовании другими современными топками высокой производительности с движущимися колосниками, примером чего могут служить конструкции фирм Вальтер, Нибо и Ниссен и др.

Колосниковые решетки для каменного угля с проталкиванием вперед. неподвижные горизонтальные колосниковые решетки и решетки с движущимися колосниками, представляют собой два важнейших типа чисто горизонтальных топок. Для подлежащих теперь рассмотрению колосниковых решеток с проталкиванием вперед, с проталкиванием назад и с нижней подачей обычно необходим определенный наклон. Впрочем, для каменного угля и для его отбросов необходимость наклона не так ярко выражена, как для

Результаты испытаний крупнокамерного котла Штейнмюллера (раб. давление 13,5 атм. ман., поверхность нагрева 183 м²) с зонкой толстой сажущимися колосниками (поверхность решетки 6,05 м²) и проходом для обслуживания над конком решетки.
(По опытам Союза надзора за паровыми котлами Дортмундского горного округа.)

	Окончательные официальные данные										Предварительные данные испытаний					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
№ испытания	24	IX	IX	IX	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
День испытания (том: 1928)	IX	IX	IX	IX	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Длительность испытания	445	391	460	419	375	328	451	409	325	379	381	438	234	250	383	
Горючее	жарный	орешек	IV	кокс.	мелочь	полукокс	руан.	топный	топный	топный	угольная пыль	топ. руан.	полукокс	жарный	ореш. IV	
Влага	3,53	3,87	3,48	17,40	16,18	31,43	4,30	7,06	12,14	—	—	—	—	—	—	
Зла	6,47	6,40	6,45	9,21	9,02	14,06	6,71	10,12	10,77	—	—	—	—	—	—	
Легучие составные части	22,58	22,40	22,63	2,60	3,00	13,21	21,22	9,98	9,53	28	28	10	15	15	22	
Плотная теплопровод.	7 373	7 348	7 385	5 553	5 632	3 934	7 328	6 852	6 250	6 450	6 550	7 450	5 600	5 600	7 860	
Пронзвод. котла 1	136,8	63,59	88,19	57,53	30,20	56,56	78,84	81,44	51,27	79,7	73,3	64,3	50,1	53,6	54,3	
Пронзв. колосн. решетки	121,2	216,0	313,5	268,8	145,7	386,2	292,4	313,5	229,0	277	281	237	221	240	180	
Коэффициент пол. действия 2	79,77	77,67	73,79	74,78	71,26	72,10	71,22	73,62	69,32	76,0	77,0	73,6	78,7	77,2	79,6	

1 Отнесено к нормальному давлению (640 кал/кг) и температурам питательной воды за экономайзером, примерно, от 100 до 140°.

2 Вследствие слишком малой поверхности нагрева (154 м²) экономайзера опытного котла в обусловленных этих больших потерях (от 12 до 18%), в дымовой трубе коэффициенты полезного действия были сравнительно малы. Потери от вылучения, по причине малых размеров котла, также были очень высокими (от 5 до 9%). При прочих равных условиях коэффициенты полезного действия при котле с поверхностью нагрева в 500 м² и достаточно большим экономайзером были бы приблизительно на 10% выше.

рассматриваемых ниже колосниковых решеток для специального сжигания бурых углей. Топки с проталкиванием вперед в Германии почти не получили распространения, тогда как в Америке они пользуются большой популярностью. На рис. 96 изображена одна из наиболее распространенных американских топок этого типа — стокер Рони (Roney) компании Вестингауз. Наверху видны толкательные плиты, которые сначала толкают горючее на шуровочную плиту. Отсюда уголь падает на наклонно расположенные колосниковые плиты, поддерживаемые посредством зубчатых реек в непрерывном сотрясении. Топка замыкается составленным из плит корытом, из которого выгоревший шлак удаляется путем опрокидывания корыта. Эта топка, работающая при естественной тяге, имеет большие преимущества перед неподвижными горизонтальными колосниковыми решетками, так как, подобно топкам с движущимися колосниками, загрузка горючего и удаление золы происходят в ней автоматически, сгорание достигается хорошее, а потери в остатках малы. Но как горючее для таких топок годится только газовый уголь с безвредным шлаком. При жидком шлаке наблюдаются частые нарушения работы и неизбежен быстрый износ.

У применяемого иногда и в Германии стокера Доби (Добу), представляющего собой горизонтальную колосниковую решетку с проталкиванием вперед, колосниковые плиты неподвижны и снабжены отверстиями,

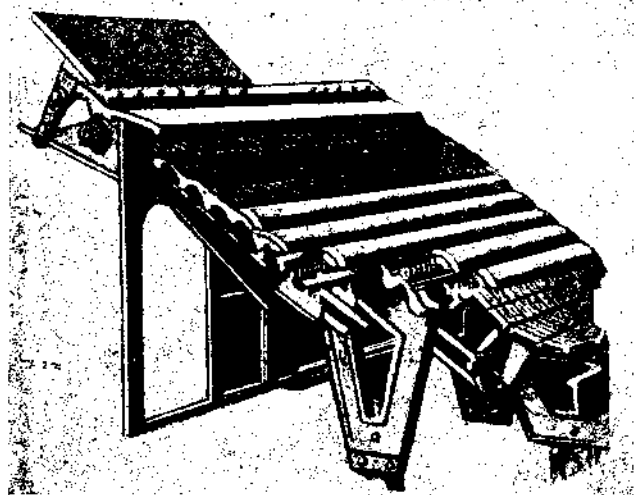


Рис. 96. Стокер «Рони», компании Вестингауз.

через которые в топку поступает тонкими струями нижнее дутье. Другая часть необходимого для сгорания воздуха направляется сверху, под углом на слой угля. Механическое питающее приспособление подает падающее из бункера горючее в топку, одновременно шурует последнюю и очищает сопла от осевшего на них шлака. Шлак приходится удалять так же, как при обыкновенной горизонтальной колосниковой решетке.

Существует еще целый ряд разновидностей топок рассматриваемого типа. Сюда относятся, между прочим, горизонтальные колосниковые топки, в которых подача достигается не особыми толкающими приспособлениями, а самими колосниками, движущимися возвратно-поступательно. При движении

части колосников назад горючее продвигается на значительное расстояние и остается на новом месте, пока очередные колосники отходят обратно.

О сильно распространившейся за последнее время в Германии механической ступенчатой колосниковой решетке для бурых углей мы поговорим позднее.

Топки с проталкиванием назад. Во всех топках с движущимися колосниками и топках с проталкиванием вперед горючее подается в одном направлении, т. е. от переднего конца топки к заднему. Это имеет некоторые отрицательные стороны, так как в передней части решетки может оказаться недостаток воздуха, тогда как на конце решетки, где уголь в значительной степени уже выгорел, часто наблюдается невыгодный для процесса горения избыток воздуха. В появившейся лишь несколько лет назад изготовляемой заводом Dügg решетке Мартина (рис. 97) этот недостаток устранен благодаря тому, что проталкивание направлено назад, тогда как уголь, так же как и в других механических колосниковых решетках, подается спереди. Цель такого устройства заключается в том, чтобы нижняя половина горящего слоя непрерывно подавалась вверх, в то время как верхняя половина соскальзывает назад к также движущейся взад и вперед шлаковой решетке. Так должен происходить постоянный кругооборот угольного слоя до его полного сгорания.¹ Свежеподводимый уголь тогда же

¹ Достигается ли действительно этот кругооборот — представляется сомнительным. Во всяком случае создается интенсивное, способствующее воспламенению и сгоранию перемешивание вновь подводимого и уже горящего угля.

смешивается с раскаленным и в значительной степени уже выгоревшим углем, благодаря чему почти мгновенно воспламеняется.

Решетка Мартина, подобно решетке высокой производительности с движущимися колосниками, пригодна почти для всех сортов угля. Она имеет то преимущество, что вследствие непрерывного кругооборота угля достигается довольно равномерное напряжение всей поверхности решетки, и таким образом среднее напряжение решетки может быть весьма велико. Данные об эксплуатации этих решеток превосходны.¹

Топки с нижней подачей. В то время как в Германии для более крупных водотрубных котлов применяют почти исключительно топку с движущимися колосниками, в Америке с давних времен более значительную роль играли топки с нижней подачей горючего, называемые также «стокерами».²

Котлы всевозможных размеров, включая котлы-гиганты с поверхностью нагрева в несколько тысяч кв. метров, и теперь снабжают в большинстве случаев топками с нижней подачей. В Германии же этими топками пользуются только для котлов с жаровыми трубами и мелких водотрубных котлов. Для более крупных котельных единиц их стали применять лишь в последнее время.³

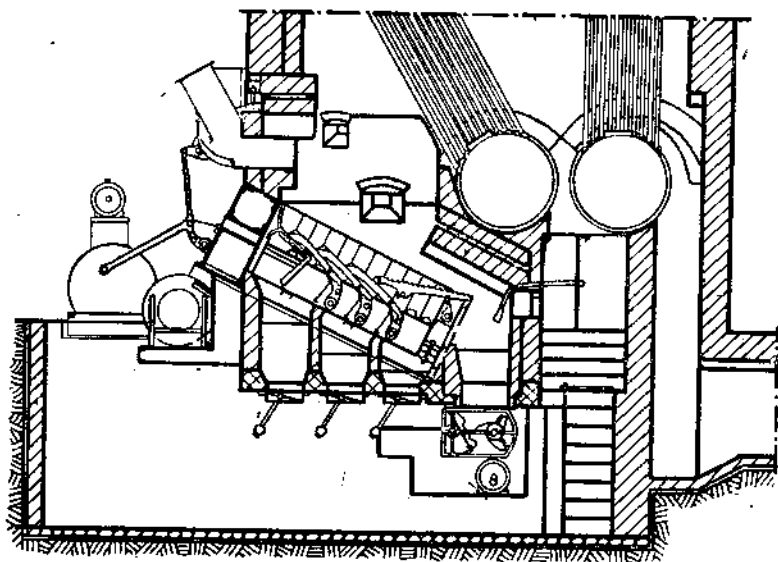


Рис. 97. Решетка Мартина с проталкиванием горючего назад.

Причина предпочтения, оказываемого в Германии решеткам с движущимися колосниками, та, что новейшие конструкции топок с такими решетками, как уже упомянуто, пригодны почти для всех видов горючего, тогда как топки с нижней подачей, вообще говоря, оправдались только при газовых углях с тугоплавким шлаком.⁴ Во всяком случае, топки с нижним дутьем имеют большие преимущества перед топками с движущимися колосниками и, вероятно, в ближайшие годы приобретут в Германии большое значение.⁵

Топки с нижней подачей характеризуются тем, что свежее горючее продвигается поршневым толкачом или шнеками под горящий слой. При этом прежде всего из угля возгоняются газы, которые тотчас же воспламеняются под действием зоны горения.

В зависимости от устройства, стокеры можно разделить на две группы. Признаком первой группы являются неподвижные боковины лотков и движущиеся элементы на дне лотков, тогда как у второй группы дно лотка ровное и неподвижное, а продвижение горючего берут на себя подвижные боковины. К первой группе принадлежит большинство известных американских

¹ См. Feuerung, 4,40, 1928.

² Стокерами называют не только топки с нижней подачей, но также и топки с проталкиванием горючего вперед.

³ См. Kaiser, Zeitschr. des Bayer. Rev. Vereins, 33, 153 и 159, 1929.

⁴ Такого большинство американских углей.

⁵ См. статью Н. А. Семеновко, Обзор последних достижений в области топок с нижней подачей. «Тепло и сила», № 3, 1929. Прим. ред.

конструкций, например стокер Тейлора и стокер Вестингауза с нижней подачей. Ко второй же группе принадлежит пользующийся большим распространением и в последнее время испытанный также в Германии стокер Рили (Riley).

Широко распространенную конструкцию представляет собой изображенный на рис. 98 стокер Вестингауза, состоящий из ряда параллельных лотков, спереди примыкающих к общему бункеру для загрузки угля. Лотки отделены один от другого длинными решетками с соплами. Уголь, подаваемый поршнем из бункера в лотки, медленно продвигается движущимися частями на дне лотков вверх и назад и затем распространяется широким слоем на решетках с соплами, сквозь которые входит нижнее дутье. Движущиеся элементы на дне лотков приводятся в действие системой стержней, связанных с упомянутым поршнем и помещающихся под дном лотков в дутьевых камерах. Решетки с соплами состоят из наложенных одна на другую колосниковых плит, в совокупности образующих ступенчатую наклонную поверхность. В конце концов, уголь попадает на расположенную за главной решеткой шлаковую решетку, которая для обеспечения полного сгорания снабжена также соплами. Шлак разламывается и удаляется двумя дробильными валками.

Стокер Рили (рис. 99) тоже имеет поршень, продвигающий уголь из бункера на решетку. Решетки с соплами расположены здесь в общем так же, как в стокере Вестингауза, и поддерживаются боковинами лотка. Но поступательное движение угля по решетке достигается в этой топке встречным движением каждой пары смежных боковин, тогда как дно лотка остается неподвижным. Боковины снабжены соплами для дутья и без посредства какого-либо механизма приводятся в движение прямо от крейцкофа питающего поршня, причем цапфы крейцкофа охватывают ведущие и направляющие тяги боковин. Топка снабжена простым приспособлением, позволяющим присоединять и выключать боковины, а также изменять величину хода.

Подробные испытания, произведенные на центральной силовой станции Франкен с первыми установленными в Германии стокерами Рили,¹ показали, что эти топки работают хорошо при сжигании углей, имеющих более 12% летучих составных частей и точку плавления золы не ниже 1250° (лучше 1350° и выше). Содержание влаги также не должно превышать нормы в 10—15%, а содержание золы должно быть не более 20%. Это ограничение применимости топки газовыми, сухими и не слишком зольными углями, несомненно, представляет собой недостаток этого стокера по сравнению с современными топками с движущимися колосниками, на которых можно беспрепятственно сжигать почти все сорта углей.²

Главные преимущества топок с нижним дутьем следующие: более быстрая приспособляемость топки к колеблющимся нагрузкам, высокая производительность в виду допустимости большой толщины слоя горючего, устранение непрочного зажательного свода и, наконец, большой коэффициент полезного действия при всяких нагрузках, так как благодаря возможности изменять скорость движения горючего и подвод воздуха можно при всякой нагрузке достигнуть равномерного распределения горючего. Недостатки по сравнению с решетками, имеющими движущиеся колосники, сводятся к уже упомянутому ухудшению действия при топках и обильно шлакующих углях, а также к более быстрому изнашиванию решетки, постоянно подвергающейся действию пламени. Далее, особенно при сильном наклоне решетки, большие количества угля иногда внезапно сползают, вследствие чего толщина слоя горючего становится неравномерной, и образуются невыгодные для сгорания условия. В новых типах этот недостаток устранен конструктивными мерами. Вследствие толстого слоя горючего во всех топках с нижней подачей необходимо и нижнее дутье.

Для мелких водотрубных котлов и котлов с жаровыми трубами разработаны особые конструкции, так называемые одноретортные топки, которые нашли большое применение в Германии. Наиболее известны конструкции фирм «Бамаг» и «Нибо и Ниссен». На рис. 100 изображена такая топка (конструкция «Нибо и Ниссен»), имеющая только один расположенный посреди топочной камеры лоток, через который поступает горючее.

Нижнее дутье подводится сквозь колосники, которые частью подвижны, частью неподвижны. С обеих сторон решетки помещены шлаковые плиты, а под ними—длинные воронки для шлака.

¹ См. Kaiser, Der neue Riley-Stoker im Grosskraftwerk Franken. Zeitschr. d. Bayer. Rev. Vereins, 33, 153 и 159.

² Интересные подробности о преимуществах и недостатках решеток с движущимися колосниками и стокеров содержит работа Мааса (Maas) и полемика по поводу нее с Шульте (Schulte), см. Arch. f. Wärmewirtschaft, 10, 318, 1929.

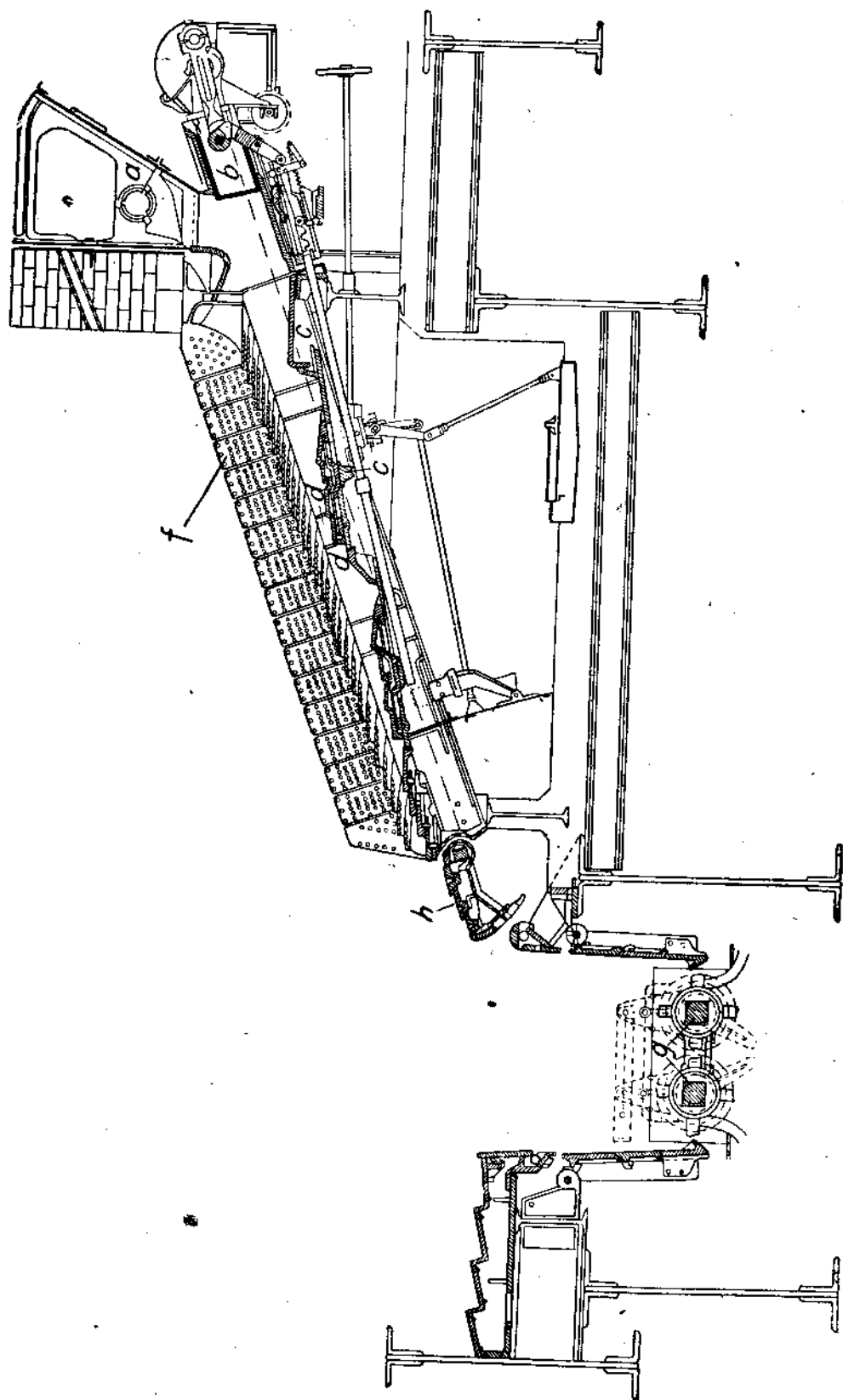


Рис. 98. Стокер «Вестингауз» с несколькими лотками (разрез по лотку).

а — котел; б — приводной поршень; в — толкатель; д — поперечные трубки; е — воздухоуравнительные трубки; ф — полая плита с воздушными каналами; г — дробильные

Неподвижные и механические ступенчатые колосниковые решетки. Рассмотренные до сих пор виды колосниковых решеток предназначены преимущественно для сжигания каменного угля разных сортов, а также для кокса, полукокса, дерева, отбросных топлив и т. д. Но для часто применяемого на топливо, особенно в Германии, рудничного бурого угля с высоким содержанием влаги эти решетки почти не применяют. Для этого вида горючего пользуются

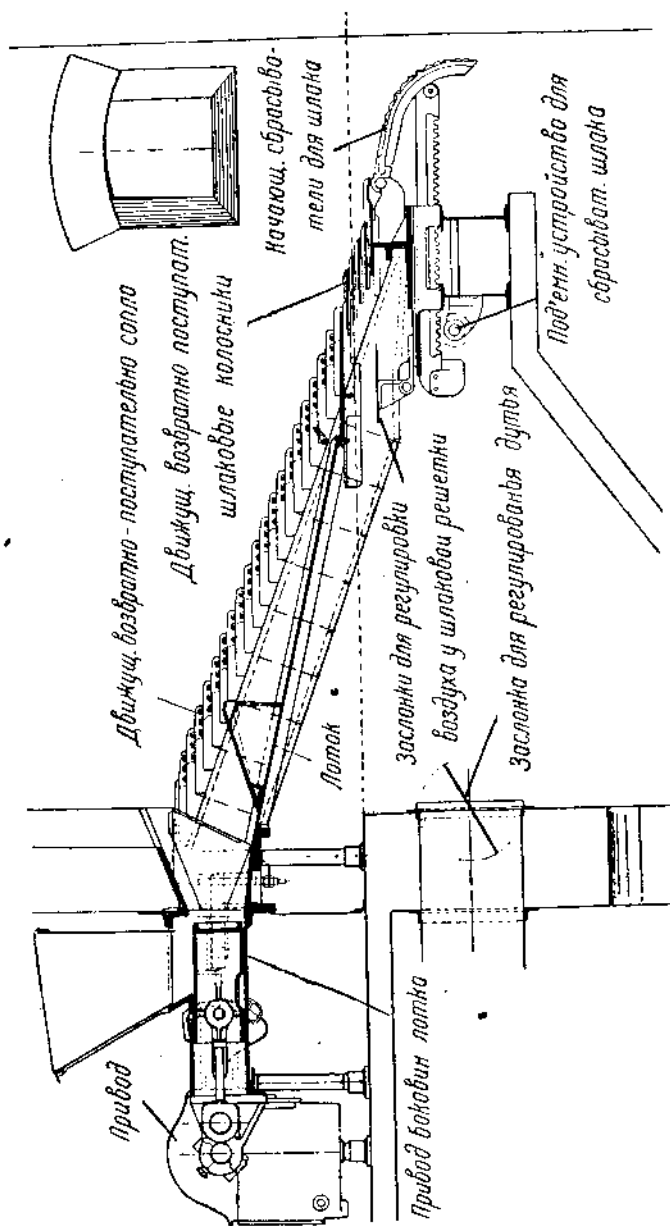


Рис. 99. Стокер «Ризин».

почти везде двумя специальными конструкциями: ступенчатой колосниковой решеткой и лотковой колосниковой решеткой. Обе эти конструкции уже стары, но за последние годы подверглись значительному усовершенствованию. Особенно важно изменение конструкции топочной камеры, подобное изменению, введенному для топок с движущимися колосниками (значительная высота топочного пространства и значительное расстояние между поверхностью нагрева и решеткой). Кроме того введены особые устройства для предварительной подсушки сырого топлива в передней части топки, и, наконец, введена механизация решетки. В некоторых топках (так называемых «полугазовых») уголь выделяет летучие уже в загрузочной шахте. Газы, содержащие окись углерода, поступают оттуда в топочное пространство, где смешиваются с избыточным воздухом и сгорают.

У ступенчатой решетки вся поверхность колосников расположена наклонно, примерно под углом естественного откоса горючего (от 15 до 28°). Название «ступенчатая колосниковая решетка» показывает, что отдельные ряды колосников размещены один над другим подобно ступеням. Неподвижная ступенчатая решетка имеет передне-

подвижной горизонтальной решеткой то большое преимущество, что горючее автоматически передвигается кривизну и что остатки горения легко могут быть удаляемы с нижнего конца. Вследствие непрерывного движения с слоя горючего в этих топках допустима кроме того гораздо большая толщина слоя топлива, чем при горизонтальных колосниковых решетках. В виду этого ступенчатая колосниковая решетка очень хороша для сырых рыхлых (землистых) бурых углей, которые приходится сжигать высоким слоем, чтобы достигнуть обильной для каменного угля производительности котла. При неподвижных ступенчатых колосниковых решетках можно без опасений доводить напряжение решетки до 350 кг/м² ч. и даже выше.

Недостатком ступенчатой колосниковой решетки является малая доступность ее заднего конца; на ней нельзя поэтому сжигать обильно шлакующиеся угли, требующие частого шурования. Кроме того надо считаться с возможностью того, что горячее сыплет слишком быстро или обрушится, отчего его слой потеряет равномерность и получатся высокие потери в остатках. Поэтому в последнее время ступенчатые колосниковые решетки почти всегда конструируют так, чтобы угол наклона их можно было изменять в целях приспособления топки к особенностям горючего. Несмотря на это, у большинства неподвижных ступенчатых колосниковых решеток не удастся полностью устранить возможность неравномерной загрузки и неравномерного сжигания, а также сравнительно высоких потерь в остатках.

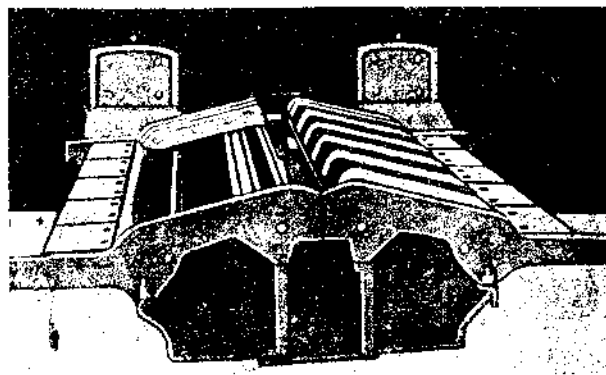


Рис. 100. Одноретортная топка с нижней подачей, конструкции «Нибо и Ниссен».

Напряжение ступенчатой колосниковой решетки, как и у большинства топок для каменного угля, можно повысить применением нижнего дутья. У передней части решетки во всех новых топках устраивают шахту для подсушки топлива

и отгонки от него газов, а у нижнего конца решетки — короткую, горизонтальную шлаковую решетку (которую можно вытаскивать и опрокидывать).

Интересную новую конструкцию ступенчатой колосниковой решетки представляет собой топка Кейльмана и Фелькера — с обратным отводом газа (рис. 101). Уголь падает через разгороженную во многих местах шахту на решетку, поступающая на нее уже довольно сильно подогретым и подсушенным. Для достижения равномерной загрузки решетки часть горячих газообразных продуктов горения отводится из последней и самой горячей части топки обратно в ее переднюю часть, благодаря чему достигаются очень быстрое выделение газов и воспламенение горючего; одновременно задняя часть решетки разгружается за счет остальной поверхности решетки.

На рис. 101 можно видеть высокое топочное пространство, имеющее особенно важное значение при богатых газами бурых углях.

Возможно более равномерной загрузки всей поверхности колосниковой решетки (равномерная загрузка решетки не только уменьшает изнашивание колосников и удлиняет срок их службы,

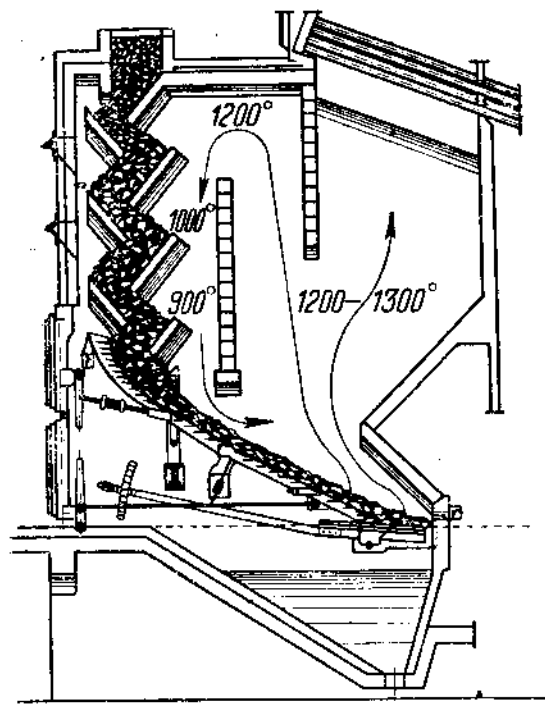


Рис. 101. Ступенчатая колосниковая решетка с обратным отводом газов, конструкции «Кейльман и Фелькер».

но и существенно повышает среднюю производительность решетки) можно достигнуть и другим способом, а именно: механическим движением колосников при сравнительно малом наклоне решетки. Механическое движение колосников почти необходимо при особенно крупных котлах, так как при большой ширине колосниковой решетки кочегар лишен возможности

повсюду разбивать и шуровать горячее для обеспечения правильного хода топки. К этому присоединяется еще одно весьма важное обстоятельство, говорящее в пользу механических топок: неравномерность свойств горючего. Для того чтобы неподвижная ступенчатая колосниковая решетка работала с хорошим коэффициентом полезного действия, угол ее наклона должен быть установлен соответственно углу естественного откоса горючего. В противном случае уголь застревает, или же топка оказывается перегруженной. Если свойства горючего постоянно колеблются в довольно широких пределах, то для достижения хорошего хода топки следовало бы постоянно менять наклон решетки, что довольно затруднительно, особенно при большой площади решетки, и поэтому редко когда выполняется с необходимой тщательностью. При механической ступенчатой колосниковой решетке все колебания в свойствах горючего можно выравнивать, регулируя проталкивание топлива в топке вперед. Если, наконец, принять еще во внимание, что в топке с неподвижной ступенчатой колосниковой решеткой при шуровке пламя легко может выбросить на кочегара, чего при механической ступенчатой решетке не может случиться, и что механическая колосниковая решетка обладает гораздо большей приспособляемостью к внезапным и сильным колебаниям нагрузки, то станет ясно, что механические топки

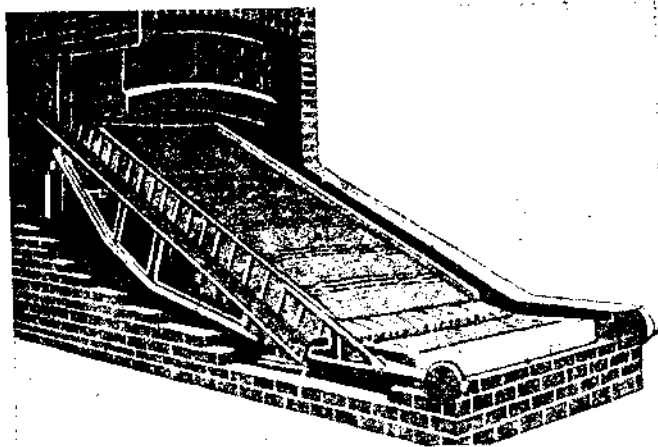


Рис. 102. Механическая ступенчатая колосниковая решетка, конструкции «Бабкок и Вилькок».

во многих случаях заслуживают предпочтения, особенно при крупных котлах, хотя бы стоимость обзаведения ими, равно как и расходы на содержание в исправности, и были значительно выше.

В последние годы появился целый ряд разных конструкций ступенчатых колосниковых решеток, испытанных уже в практической работе. Для примера опишем топку «Бабкок и Вилькок» (рис. 102). Она составлена из рядов колосниковых элементов, вставленных попеременно в подвижную и неподвижную рамы. Это разделение на подвижные и неподвижные ряды имеет то преимущество, что при нем сильно уменьшается про-

валивание угля. Провал угля по обеим сторонам решетки устраняется с помощью упруго подпертых боковин, образующих плотный затвор, отделяющий решетку от кладки. Воздух подводится с помощью регулирующих отверстий у фронта топки, а подвод горючего — с помощью заслонки, приводимой в действие с места кочегара. Подвижная колосниковая рама ходит на роликах, катящихся по направляющим рельсам, и приводится посредством эксцентрика от электромотора, непосредственно соединенного с передаточным механизмом. Величина хода подвижных рядов колосников уменьшается по направлению к концу решетки, благодаря чему достигается накопление топлива, соответствующее его выгоранию, а вместе с тем и равномерная нагрузка решетки. К ступенчатой решетке примыкает шлаковая решетка с проталкиванием назад, на которой остатки горючего разрыхляются и окончательно выгорают. Выгоревшее топливо попадает после этого на опрокидывающуюся решетку и от времени до времени спускается в шлаковую камеру.

Разные конструкции механических ступенчатых колосниковых решеток отличаются одна от другой прежде всего числом плит, служащих для продвижения горючего. Существуют вполне механизированные решетки, у которых неподвижные и движущиеся плиты чередуются по всей длине решетки. Другие решетки в общем неподвижны и имеют такие плиты для проталкивания горючего лишь в отдельных местах. Чем более механизирована колосниковая решетка, тем выше у нее коэффициент полезного действия и производительность (примерно до 500 кг/м² ч.), но тем выше также и расходы на первоначальное обзаведение и содержание в исправности.

Особенно интересна в конструктивном отношении оправдавшаяся особенно в применении к мелким котлам топка с проталкиванием вперед, известная под названием «топки Кьюма» фирмы Топф и с-я, в Эрфурте, в которой колосниковое полотно составлено из качающихся элементов,

соединенных между собой неподвижными промежуточными плитами. Благодаря свободному соединению качающихся и промежуточных плит заземление совершенно устраняется. Волнообразное движение качающихся плит приводит к волнообразному движению и горячего, вследствие чего частицы угля неоднократно переворачиваются и равномерно продвигаются вперед. Изменяя ход качающихся плит и число их качательных движений, решетку легко можно приспособлять ко всяким колебаниям нагрузки.

Лотковые колосниковые решетки. При решетках этого типа горючее загружается не спереди, а поступает в лоткообразную решетку через расположенные сбоку загрузочные шахты. Уголь подсушивается и отчасти выделяет летучие уже в этих шахтах. Затем он воспламеняется на самой колосниковой решетке и под действием собственного веса автоматически опускается дальше, так как одновременно проникающие из загрузочных шахт богатые окисью углерода газы подвергаются полному сжиганию в топочном пространстве, подобно тому как это происходит в «полугазовых» топках на ступенчатых колосниковых решетках. Удаление шлаков производится

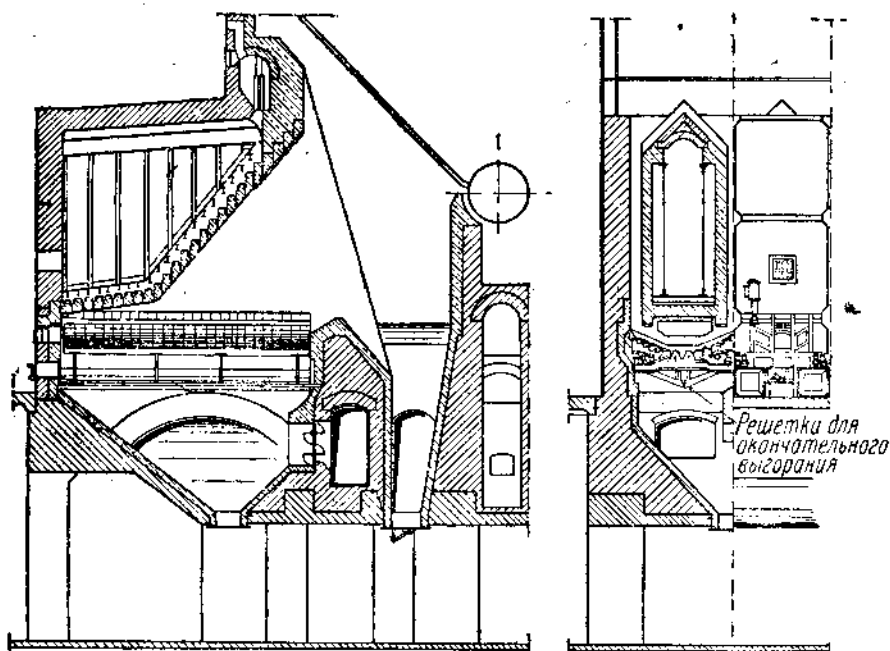


Рис. 103. Четырехкамерная лотковая колосниковая решетка, конструкции «Френкель и Фибан».

из нижней части лотка, обычно в начале колосниковой решетки, при помощи особых, имеющих вид колосников, шибберов, в более же крупных лотковых колосниковых решетках - при помощи поворотных заслонок или механических приспособлений, действующих по всей длине решетки. При этом для достижения полного сгорания под решеткой, предназначенной собственно для горения, располагают особые колосниковые решетки для окончательного догорания.

Лотковые колосниковые решетки имеют, особенно в применении к более малым котлам, то преимущество перед ступенчатыми колосниковыми решетками, что они занимают меньше места. Кроме того потери в остатках при хорошем обслуживании у них, в общем, меньше, чем у ступенчатых решеток. Недостатком же являются более высокие требования, предъявляемые ими к обслуживающему персоналу, так как при этих топках часто приходится с помощью шуровки помогать сползанию горячего и, таким образом, заботиться о равномерности слоя горящего топлива.

Лотковые колосниковые решетки в больших котлах и при высоком напряжении топки также снабжают в последнее время механическими приспособлениями для продвижения горячего и разделяют всю решетку, в зависимости от величины котла, на несколько камер. На рис. 103 изображена колосниковая решетка с проталкиванием топлива вперед, системы «Френкель и Фибан». Под шлаковой решеткой помещена еще особая решетка для окончательного догорания. Камеры широко открываются в сторону поверхности нагрева и устроены так, что под поверх-

ностью нагрева получается еще большее общее топочное пространство, обеспечивающее полное сгорание. С такими решетками достижимы без затруднений напряжения решетки приблизительно до $500 \text{ кг/м}^2 \text{ ч.}$

Заключение. Несмотря на большое разнообразие конструкций колосниковых решеток, за последние годы нельзя не заметить некоторого единства в ходе их развития. Сказанное выше о решетках с движущимися колосниками справедливо и в отношении всех остальных колосниковых топок: важнейший прогресс представляют собой высокие топочные пространства и равномерность напряжения решетки, достигаемая точным регулированием подвода горючего и воздуха. Приспособляемость топки к колебаниям нагрузки также тесно связана с возможностью простого и быстрого регулирования подвода как воздуха, так и горючего. Здесь на первое место выступают топки с нижним дутьем, получающие все большее распространение и дающие возможность существенного повышения производительности. В последнее время использованы и некоторые выгодные особенности топок для пылевидного угля, например охлаждение кладки посредством омываемых водой поверхностей нагрева и, далее, сильное вихревое движение газобразных продуктов горения, достигаемое вдуванием над решеткой воздуха через особые сопла.¹

Наконец, все более заметно стремление широко механизировать процесс сжигания в топке и освободить обслуживающий персонал от чисто ручной работы. Последним звеном в этой цепи является автоматическая регулировка хода горения, на которой мы впоследствии остановимся подробнее.²

3. Пылеугольные топки.

Топка для пылевидного угля получила за последние годы в Германии неожиданное развитие. Несмотря на большие технические затруднения, которые вначале пришлось преодолеть (в Германии часто сжигается пыль бурых углей, с которой в других странах еще не было опыта), она чрезвычайно быстро вошла в заводскую практику и в эти последние годы оказывала значительное прямое и косвенное влияние на котлостроение.

Топки для пылевидного угля особенно хороши в применении к крупным котлам. Их преимущества перед большинством колосниковых топок, а именно независимость от сорта горючего, высокий коэффициент полезного действия, превосходная регулируемость, простота обслуживания, быстрая приспособляемость к внезапным пикам, быстрая растопка — сказываются тем явственнее, чем больше размеры котла, так как именно при больших котлах и встречаются затруднения при обслуживании большинства колосниковых топок. Впрочем, опубликованные за последнее время в Америке отчеты³ доказывают, что при особо благоприятных условиях пылевые топки могут экономично работать и при малых котлах. В Германии также существуют небольшие установки, уже несколько лет успешно работающие с топками для пылевидного угля.⁴

¹ См. Power, 64, 446, 1926; 65, 159, 446, 1927. Arch. f. Wärmewirtschaft, 7, 266, 1926.

² В дополнение к данным о напряженности решетки для различных сортов топлива, приведенным у Преториуса, сообщаем некоторые данные относительно советских топлив (взяты из книги Р. Г. Грановского, Котельные установки, 60—61. Ленинград, 1930).

Подмосковный курной уголь:

Орех (20 — 50 мм)	250 — 300 $\text{кг/м}^2 \text{ ч.}$
Мелочь —	200 — 250 $\text{кг/м}^2 \text{ ч.}$

(на разных решетках — с небольшими отклонениями от этих цифр).

Донецкий каменный уголь «ПЖ»

на механических переталкивающих решетках «Каблиц» с холодным вентиляторным дутьем	180 — 200 $\text{кг/м}^2 \text{ ч.}$
на цепных решетках «Бабкок и Вилькокс» с холодным вентиляторным дутьем	120 — 150 $\text{кг/м}^2 \text{ ч.}$
на механических решетках с нижней подачей топлива (стокеры) типа «Riley» или «Taylor» на высококаменных каменных углях с горячим дутьем (до 300°)	300 $\text{кг/м}^2 \text{ ч.}$

Машинноформовочный торф и гидроторф (на шахтно-цепных топках проф. Т. Ф. Манарьева. 500 — 1000 $\text{кг/м}^2 \text{ ч.}$

Прим. ред.

³ См. между прочим Mechanical Engineering, 49, 1177, 1927.

⁴ См., напр., Holz er, Arch. f. Wärmewirtschaft, 9, 519, 1928.

Даже при небольших котлах с жаровыми трубами в последнее время стали применять пылеугольные топки, помещая перед котлом особые сжигательные камеры. В последнее время удалось сжигать угольную пыль даже без таких сжигательных камер, прямо в жаровых трубах.¹

Решающее значение в вопросе об экономичности имеет стоимость подготовки горючего. Если угольную пыль можно дешево получить извне или если при подготовке на своем заводе не нужна подушка, а помол производится в хорошо используемых индивидуальных мельницах, то отопление пылевидным топливом может оказаться экономичным даже для водотрубных и жаротрубных котлов самых малых размеров.

Подготовка угольной пыли. Подготовка производится, в общем, следующим образом. Рудничный уголь, особенно содержащий крупные и неправильной формы куски, предварительно дробят в вальцовых мельницах на более мелкие куски с длиной ребра в 15—20 мм; затем, при значительном содержании влаги, высушивают в паровых или газовых сушилах и, наконец, размалывают в мельницах.

Сушка. Паровая сушка представляется наиболее экономичной для всех предприятий, располагающих достаточным количеством мягкого пара. При наличии больших количеств горючих отходящих газов от печей или котельных топок, может оказаться экономичной и сушка отходящими газами, тогда как сушку посредством газообразных продуктов горения можно рекомендовать лишь в особых случаях, ибо этот способ в общем значительно дороже других. Сушка значительно удорожает подготовку, так как требует дорогих устройств и поглощает много теплоты. Поэтому для изготовления горючей пыли лучше всего годятся угли с малым содержанием влаги, вообще не требующие сушки, т. е. в первую голову тощие угли, а среди последних, в свою очередь, тощий мелкий уголь, так как он не требует и предварительного дробления, да и сами расходы на размол сравнительно невелики. Кроме того мелкий уголь обычно значительно дешевле крупного, так как на большинстве колосниковых решеток его нельзя сжигать с удовлетворительным коэффициентом полезного действия. С другой стороны, весьма влажные угли, например низкосортный рудничный бурый уголь, иногда удается обращать в пыль с хорошим экономическим успехом, когда установка для выработки угольной пыли находится близко от копей, что объясняется более низкой стоимостью перевозки просушенной пыли по сравнению с влажным рудничным углем.

Размол. Высушенный и обычно уже довольно мелкозернистый уголь направляется в особую мельницу, обращающую его в пылевидное состояние. Чем суше уголь, тем выше будет производительность и тем ниже расход энергии в мельнице. В каждом отдельном случае приходится решать, оправдывает ли, при угле со сравнительно низким содержанием влаги, меньший расход энергии в мельничной установке обзаведение сушильным устройством. При весьма влажном угле, как уже сказано выше, предварительная сушка необходима, так как без нее мельница работала бы плохо, расходуя очень много энергии, или же, в конце концов, засорилась бы и вообще перестала действовать. До какой степени мелкости следует размалывать уголь, это также вопрос экономики. Изготовление очень мелкой пыли удорожает процесс подготовки, но зато улучшает свойства пыли с точки зрения техники сжигания.

Мельницы для угля разделяют на четыре большие группы (рис. 104): ² ударные мельницы, к которым принадлежат лопастные мельницы, центробежные мельницы, характерными

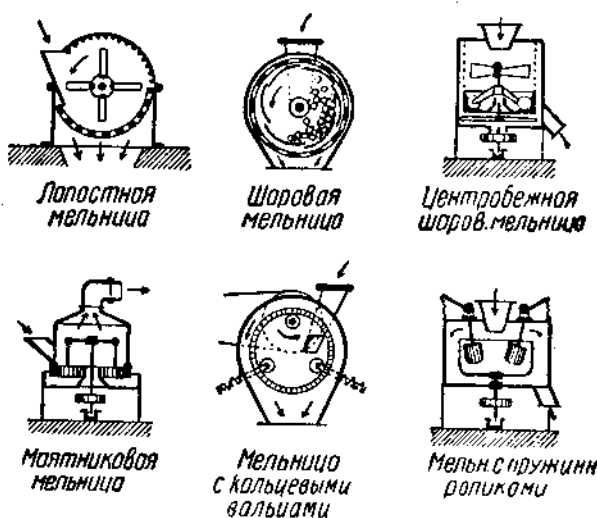


Рис. 104. Различные конструкции мельниц для размолла угля.

¹ См. J a g o s c h e k, Braunkohle, 27, 221, 1928, и Die Wärme, 51, 107, 1928; далее K a s p e r s, Arch. f. Wärmewirtschaft, 10 6, 1929.

² Терминология принята по Р. Г. Г р а н о в с к о м у, Котельные установки, стр. 524. *Прим. перев.*

примерами каковых являются центробежная шаровая мельница и маятниковая мельница, *тяжелые мельницы*, например обыкновенная шаровая мельница, и, наконец, *пружинные мельницы*, например мельницы с кольцевыми вальцами и пружинными роликами. Быстроходные ударные мельницы, которые дешевы и занимают мало места, особенно пригодны для средних и мелких установок, главным образом для предприятий, в которых мельницы непосредственно связаны с котлами. Самые известные и распространенные из мельничных устройств, мельницы Рэймонда и Фуллера, принадлежат к числу центробежных мельниц. В мельнице Фуллера (рис. 105) подсушенный и размолотый уголь просеивается в «циклоне», и все крупные частицы возвращаются в мельницу, тогда как мелкая пыль и пыль, отсосанная из сушильного аппарата и просеянная в другом циклоне, поступают в бункер для угольной пыли.

В последнее время конструктивная разработка так называемых тихоходных мельниц, например трубчатой мельницы, работающей тяжелою, достигла такого совершенства, что эти мельницы даже в средних и мелких установках не уступают пользовавшимся раньше предпочтением быстроходным мельницам. Одна из новых трубчатых мельниц, типа Гумбольдт, например,

имеет только треть своей прежней длины, благодаря чему она занимает теперь не больше места, чем быстроходная мельница. Преимуществами всех тихоходных мельниц являются их высокая надежность в работе, меньшее по сравнению с быстроходными мельницами изнашивание и более простой уход.

Уголь можно размалывать на своем заводе в центральных установках или в индивидуальных мельницах. Какой способ экономичнее, — зависит всецело от местных условий. Для малых установок, работающих с перерывами, заслуживают почти исключительного предпочтения более дешевые индивидуальные мельницы, которые, впрочем, за последнее время хорошо зарекомендовали себя и на крупных американских силовых станциях.¹

Доставка. При расположении подготовительной установки поблизости от

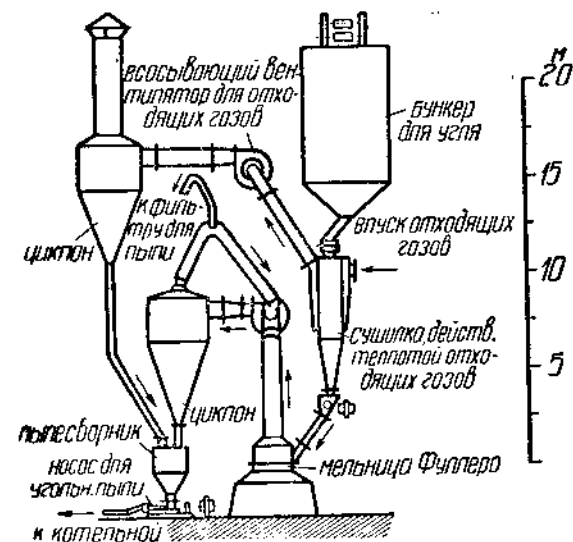


Рис. 105. Схема установки для размолота угля в пыль, с мельницей Фуллера.

котельной доставка угольной пыли производится по трубопроводам при помощи сжатого воздуха, особых насосов для угольной пыли или шнеков. Если же подготовительная установка находится при копах, то необходим вывозной транспорт до места потребления и именно в специальных вагонах, так как перевозка в обыкновенных товарных вагонах не только технически затруднительна и не экономична в силу высоких потерь, но и чрезвычайно опасна в виду легкой воспламеняемости пыли.

Экономичнее ли покупка угольной пыли или же подготовка рудничного угля на месте потребления, зависит, главным образом, от условий эксплуатации. Для малых заводов, которые плохо могут использовать собственную подготовительную установку, приобретение готовой пыли обычно оказывается более экономичным, несмотря на высокий фрахт. То же самое можно сказать и о случае очень влажного рудничного угля (мы имеем в виду бурый уголь). С другой стороны, для крупных предприятий в большинстве случаев выгоднее приобретение рудничного угля и подготовка его на месте потребления.²

Сжигание угольной пыли. Конструктивные требования. В конструктивном отношении тонка для угольной пыли коренным образом разнится от всех видов колосниковых топок.

¹ См. между прочим Power, 67, 178, 1928.

² См. Förderreuther, Selbstvermahlung oder Bezug brennfertigen Kohlenstaubes. Arch. f. Wärmewirtschaft, 9, 93, 1928.

Она скорее приближается к нефтяным и газовым топкам, так как все сжигание происходит в свободном пространстве, и смесь горючего и воздуха вводится в топочную камеру через горелки. Отсюда сразу же вытекают главнейшие требования, предъявляемые в этих топках к горючему и к устройству сжигательных камер. Горючее должно быть настолько мелким, чтобы оно до полного сгорания могло висеть в пространстве, не опускаясь на дно топочной камеры; последняя же должна быть настолько велика, чтобы в течение заданного времени угольные частички могли полностью сгореть.

Таким образом, здесь в еще большей степени, чем в колосниковых топках, высокая топочная камера является первой предпосылкой хорошего и полного сгорания. Однако, если превысить известную меру, то дальнейшее увеличение высоты топки становится невыгодным, так как топка будет занимать много места, а ее сооружение обойдется дорого. Поэтому в последние время стремятся повысить напряжение топочного пространства, т. е. увеличить отнесенное к единице пространства и времени количество развиваемой теплоты. Другими словами, стремятся уменьшить размеры топки и, тем не менее, достигнуть полного сгорания. Это возможно при очень тонком размоле угля, так как частичка угля сгорает тем быстрее, чем больше отношение ее поверхности к весу, т. е. чем меньше она сама. Но и в этом направлении существует экономический предел вследствие повышения одновременно с повышением тонкости помола и расходов на подготовку угля. Самой действительной мерой является тесное смешение угольной пыли с воздухом.

Применяя особые горелки, длинные пути пламени, осуществляемые поворотами газообразных продуктов горения в топочной камере, и целесообразный подвод необходимого для сжигания воздуха, большую часть которого (первичный воздух) обычно еще до горелки смешивают с угольной пылью, тогда как вторая, точно регулируемая часть (вторичный воздух) подводится в горелке или в топочном пространстве, в современных топках для пылевидного топлива удалось достигнуть весьма значительных напряжений топочного пространства (до 300 000 кал/м³ ч., а в вестингарных топках паровозов и пароходов даже значительно выше).

Горелки для угольной пыли. К хорошей горелке для угольной пыли предъявляют следующие требования. При всякой нагрузке она должна давать безупречное сжигание. Должна быть предусмотрена возможность простого и точного регулирования пропорций между воздухом и пылью. Сопротивление движению в самой горелке должно быть мало. И, наконец, возможно меньшая часть металлической поверхности должна подвергаться действию лучеиспускания пламени. Этим требованиям особенно удовлетворяют появившиеся в последние годы разнообразные конструкции короткопламенных взрывых горелок, чаще всего имеющих круглое поперечное сечение и благодаря винтообразным вставкам осуществляющих интенсивное смешение пыли с воздухом.¹

Воздействие на кладку. В виду того, что тесное смешение мелкой угольной пыли с воздухом и точное регулирование подвода горючего и воздуха в этих топках позволяет работать с очень малым избытком воздуха, температура сжигания для большинства сортов угля лежит очень высоко, и поэтому кладка котла подвергается очень сильному напряжению. Это создавало в работе первых пылевых топок большие эксплуатационные затруднения. Приходилось или отказываться от главного преимущества этих топок — малой потери в отходящих газах и работать с повышенным избытком воздуха, или же мириться с сильным изнашиванием кладки, т. е. с высокими расходами на ремонт и частыми перебоими в работе. При высоком напряжении топочной камеры строительные материалы страдают еще больше, и уже это одно побуждает придавать топочному пространству весьма большие размеры.

Стенки с водяным охлаждением. В большинстве современных топок для угольной пыли указанные недостатки устранены тем, что камеры горения полностью или частично окружены поверхностью нагрева. При этом, с одной стороны, благодаря сильному излучению на сравнительно холодные, омываемые водой, части поверхности нагрева понижается температура горения, так что является возможность безопасно работать с очень малым избытком воздуха; с другой же стороны, значительно повышается производительность поверхности нагрева, в то время как размеры котла существенно уменьшаются; наконец, значительно понижаются потери от лучеиспускания и конвекции в топочной камере. Таким образом, устройство в топочных камерах

¹ См. К л а б е р, Wirbelbrenner für Kohlenstaub. Arch. f. Wärmewirtschaft, 9, 121, 1928. Особого внимания заслуживают также разработанная AEG соловая горелка и пульверизационная горелка о-ва «Studiengesellschaft für Kohlenstaubfeuerung auf Lokomotiven». Обе эти горелки очень успешно применялись в последнее время на паровозах; см. в числе прочих источников: K l e i n o w, Glasers Annalen, 102, 45 и 58, 1928; H i n z, Ueber wärmetechnische Vorgänge der Kohlenstaubfeuerung, изд. J. Springer, Берлин, 1928.

охлаждаемых водой стенок представляет собой весьма важный прогресс в котлостроении. В настоящее время стали экранировать даже часть стенок топочной камеры колосниковых топок с целью повысить их производительность и сохранить от разрушения кладку.

Подогрев воздуха. Если поверхность стенок топочных камер целиком закрыть элементами поверхности нагрева, то температура горения иногда может так сильно упасть, что окажется (особенно при низком напряжении топки) ниже температуры воспламенения горючего, а это, в свою очередь, приведет к нарушению процесса горения. Особенно легко это может случиться при тощих углях. В большинстве случаев это нежелательное обстоятельство может быть устранено, сильным подогревом воздуха.

Вообще же при тощих сортах топлива, имеющих высокую температуру воспламенения, поверхности вью нагрева обычно окружают лишь часть топочной камеры, тогда как при сжигании, например, бурых углей стенки можно со всех сторон защитить водяными трубами.

Удаление шлаков и золы. Большие трудности представляло вначале удаление шлака. Тогда как в колосниковых топках лишь сравнительно небольшая часть золы проникает в летучем состоянии в топочное пространство, а большая часть непосредственно с решетки падает в зольник, в топках для угольной пыли вся содержащаяся в горючем зола взвешена в пространстве. Одна часть ее осаждается (вследствие высокой температуры горения—обычно в жидком состоянии) на кладке и быстро разрушает ее. Другая часть увлекается газообразными продуктами горения в дымоходы котла и осаждается в них, уменьшая теплопередачу и засоряя пути для газов. Третья часть улетает вместе с отходящими газами через дымовую трубу, загрязняет внешний воздух и ухудшает санитарное состояние окрестностей.

Весьма важным усовершенствованием, устраняющим по крайней мере часть этих неудобств, является повсеместно применяемая теперь *охлаждающая решетка*, гранулирующая мелкие выделяющиеся из пламени частицы золы, прежде чем они осадят в зольной воронке в виде слежавшихся, трудно удаляемых комьев шлака. Целесообразным направлением пламени (изменением направления топочных газов близ охлаждающей решетки) можно достигнуть того, что на охлаждающей решетке будет оса-

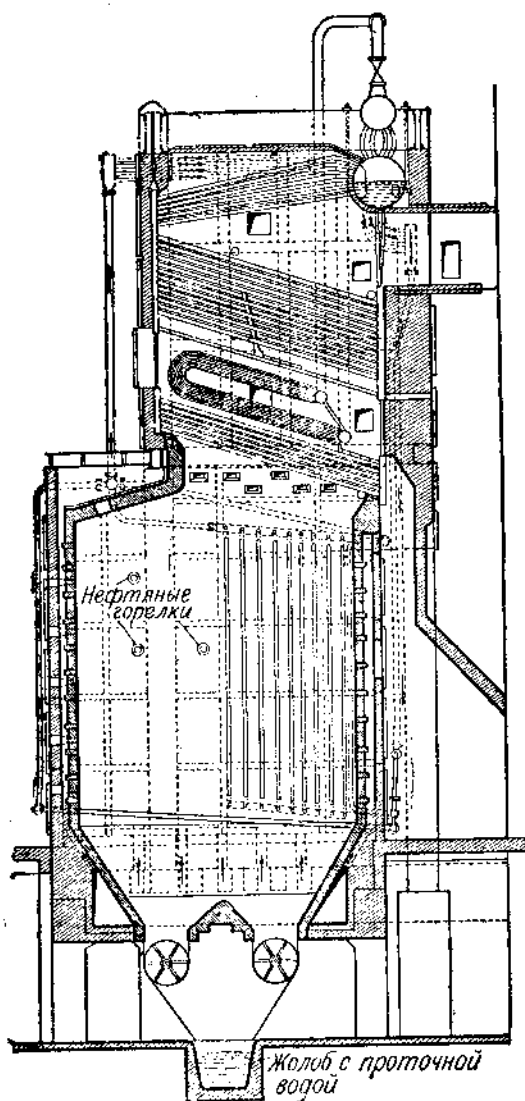


Рис. 106. Топка для бурого пылевидного угля при секционном котле Бабкока с поверхностью нагрева в 2000 м², установленном на центральной силовой станции в Белене.

ждаться большая часть шлака. Для уменьшения все же значительного количества выходящей через дымовую трубу летучей золы в последнее время применяют разные способы очистки газов (отделители золы, основанные на силе тяжести и на центробежной силе, электрические фильтры и т. д.). Впрочем, ни один из этих способов до сих пор нельзя признать вполне удовлетворительным. Осадившаяся в дымоходах котла летучая зола без труда удаляется при помощи сажепродувателей.

Расположение горелок. Чтобы достигнуть возможно более равномерного напряжения топоч-

ного пространства, подвод горячего обычно распределяют на довольно большое число горелок. Этим же достигается возможность широкого регулирования. Горелки чаще всего располагают в верхней части топочной камеры, благодаря чему смесь угольной пыли с воздухом вдувается

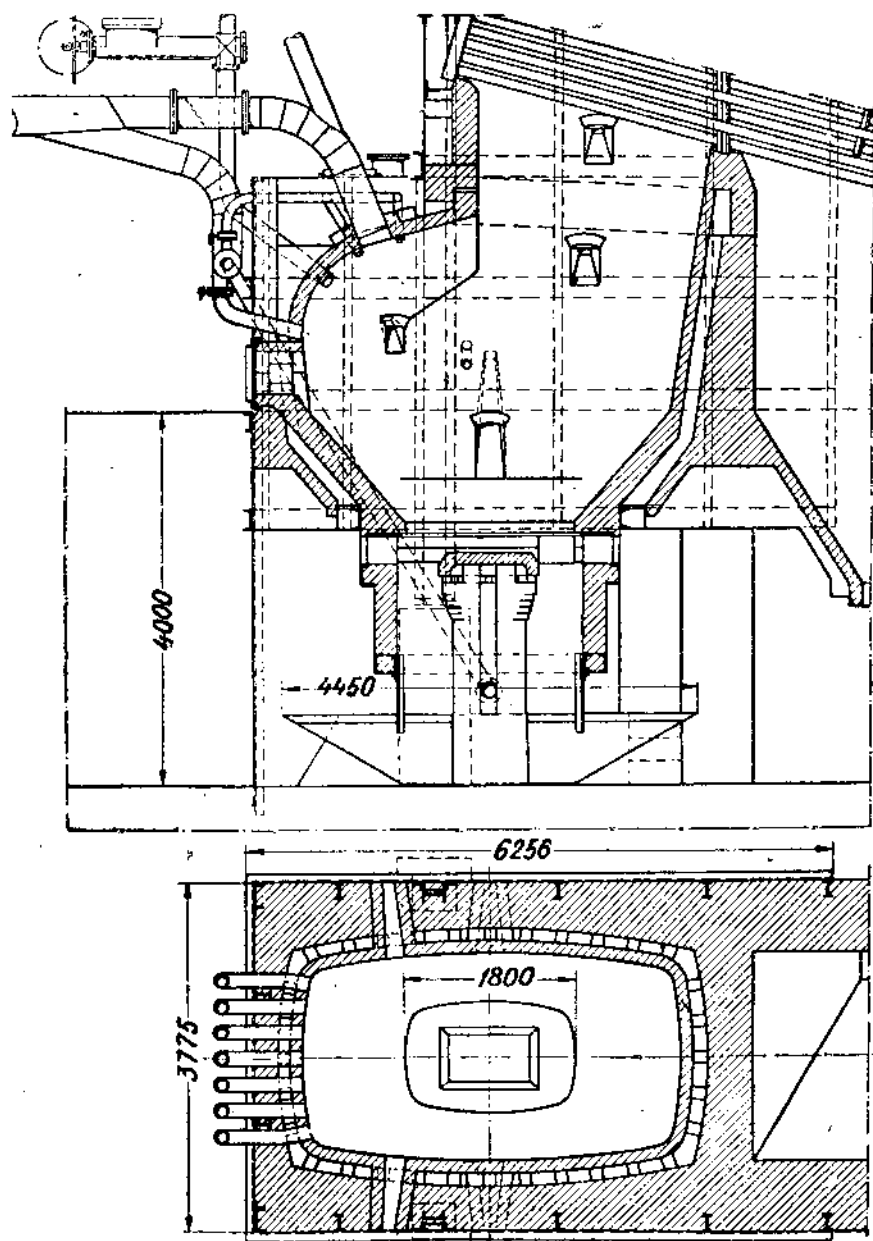


Рис. 107. Топка для пылевидного каменного угля, конструкции «Оранж», при секционном котле Бабюка с поверхностью нагрева в 200 м^2 .

почти вертикально вниз. Вблизи охлаждающей решетки пламя заставляют переменить свое направление дугообразно кверху, причем тяжелые частицы золы отбрасываются вперед. В одной из новых конструкций (экранированный котел Линке-Гофмана) угольную пыль вдувают снизу. При этом происходит двойное изменение направления: горячие газы сначала устремляются наподобие фонтана кверху, затем направляются вниз, окутывая только-что подведенную

пыль, благодаря чему достигается весьма быстрое нагревание пыли и хорошее воспламенение.¹

Конструкции. На рис. 106 изображена одна из самых крупных, построенных до сих пор в Германии топка для угольной пыли, при котле «Бабкок и Вилькоккс» с поверхностью нагрева в 2000 м². Топка предназначена для сжигания пыли бурого угля. На рисунке можно видеть высокую топочную камеру, направленные почти вертикально вниз горелки, охлаждающие решетки и обогреваемую лучеиспусканием поверхность нагрева в задней части топки. На рис. 107 изображена работающая на небольшой текстильной фабрике топка для каменноугольной пыли при котле с поверхностью нагрева всего лишь в 200 м². Внимания заслуживает короткая камера сгорания, воздухонепроницаемо закрытая снизу при помощи водяного затвора, а также шарообразный свод. Здесь нет поверхности нагрева, использующей лучеиспускание.

Экономические перспективы. Краткое рассмотрение важнейших эксплуатационных и теплотехнических принципов и задач, связанных с отоплением каменноугольной пылью, показывает, что существовавшие в этом деле значительные трудности технически преодолены. Насколько успешным окажется отопление угольной пылью в экономическом отношении, об этом еще трудно судить. Бурное вначале развитие теперь несколько приостановилось. В области колосниковых топок сделано многое, чтобы они снова могли сравняться с топками для пылевидного горючего. В зависимости от местных условий, от стоимости самого горючего и его подготовки, от требований эксплуатационных и т. д. более экономичным окажется то одно, то другое решение. Но, в общем, топки для пылевидного горючего, подобно паровым турбинам, пригодятся главным образом для крупных силовых станций, тогда как для средних и малых предприятий колосниковая топка, подобно поршневой паровой машине, всегда сохранит большое значение.

4. Добавочные топки для угольной пыли.

Новейшей и, быть может, наиболее многообещающей формой применения топок для угольной пыли являются «добавочные» топки этого рода. Сущность их заключается в том, что в помощь колосниковой топке как главной приключается вспомогательная пылеугольная топка, причем добавляемая угольная пыль вообще должна покрывать лишь скромную долю (обычно от $\frac{1}{8}$ до $\frac{1}{10}$) всей потребности в тепловой энергии. Назначение добавочной топки состоит, главным образом, в повышении производительности колосниковой топки, и в большинстве случаев цель заключается во временном повышении производительности для покрытия внезапных и кратковременных пиков нагрузки. Кроме того, особенно при сжигании на колосниках бурого угля, добавочная топка имеет задачу компенсировать неравномерность качества этого угля, а также улучшать и ускорять процесс воспламенения при трудно воспламеняющемся горючем.

В зависимости от той задачи, которая преимущественно возлагается на добавочную топку, видоизменяются и конструктивные формы ее выполнения. Там, где дело сводится, главным образом, к улучшению воспламенения и компенсированию разнородности сжигаемого на колосниках угля, пыль чаще всего вдувают у верхней части решетки. Если же задача состоит во временном или длительном повышении производительности, а свободное пространство в топочной камере достаточно высоко, то пыль направляют по такому пути, чтобы она сгорала в верхней части топочной камеры.

Возможность с помощью добавочной топки почти моментально выравнивать большие колебания нагрузки особенно ценна для топок, работающих на буром угле, так как эти топки, особенно неподвижные ступенчатые топки, отличаются значительной инерцией и всегда требуют некоторого времени, чтобы приспособиться к новому уровню нагрузки. То же самое относится и к случаю внезапного и часто меняющегося качества горючего.

В противоположность чистому типу топки для пылевидного горючего, добавочная топка требует меньших расходов на подготовку угольной пыли, так как в ней далеко не требуется столь мелкого размол последней. В чисто пылевых топках при сжигании крупноразмолотой пыли часть пылевых зерен, не успев сгореть, тушится охлаждающей решеткой и падает в шлаковую камеру. Другие же частицы, хотя и преодолевают, в силу своей скорости, силу тяжести и остаются в топочной камере, все же сгорают не полно, так как предоставляемое им для сгорания время недостаточно для полноты сгорания. В добавочной же топке можно удовлетвориться весьма крупноразмолотой пылью, так как тяжелые ее частицы упадут на колосниковую решетку

¹ См. Elektrizitätswirtschaft, 26, 470, 1927, далее, Weber und Konejung, Arch. f. Warmewirtschaft, 10, 87, 1929, фиг. 15.

и догорают на последней. Во многих случаях даже удается полностью сэкономить расходы на подготовку и в качестве добавочного горючего применять штыб или пылевые отбросы. Дальнейшим преимуществом этих топок является легкое и мгновенное воспламенение в них пыли вследствие сильного излучающего действия колосниковой решетки.

Необходимым условием для безукоризненной работы добавочной топки является достаточно большое топочное пространство. В новых установках это обстоятельство можно заранее

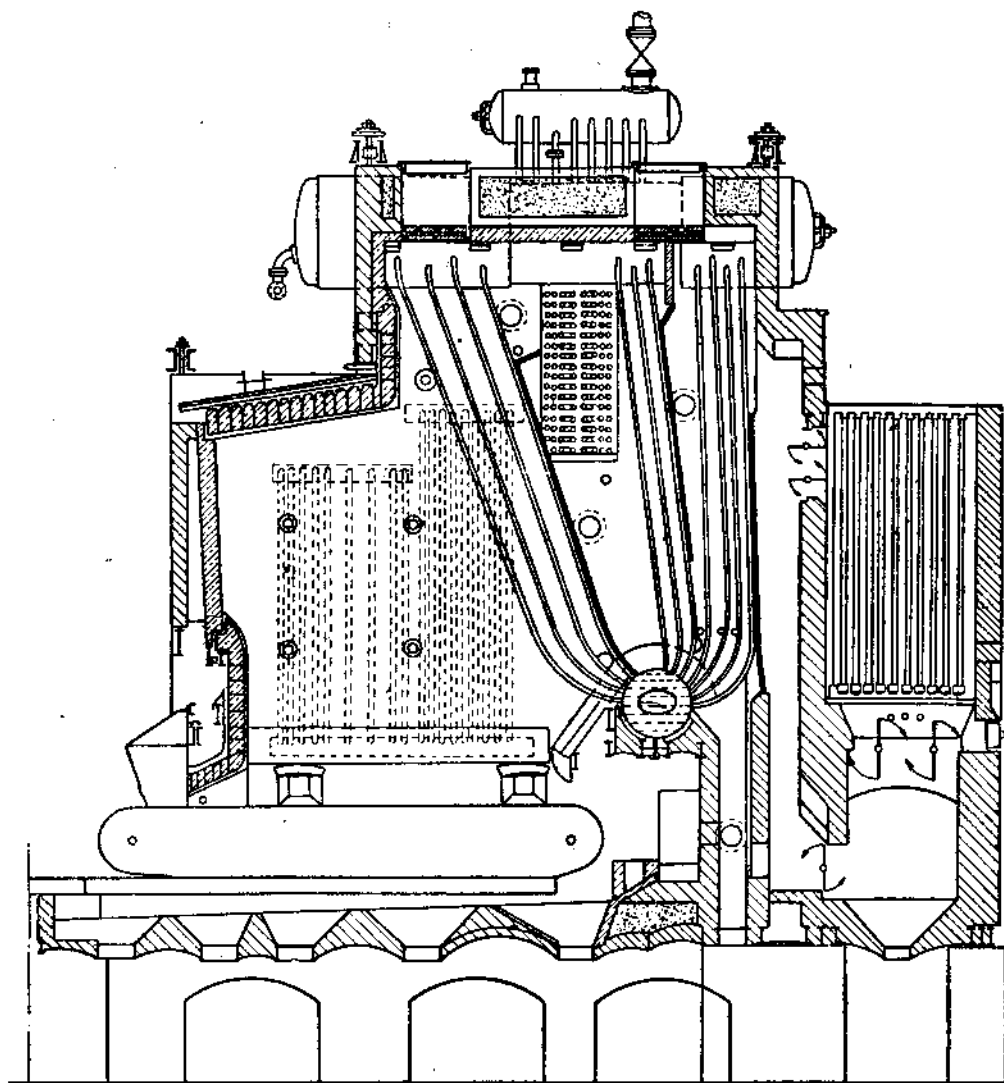


Рис. 108. Колосниковая решетка с движущимися колосниками и добавочной топкой для угольной пыли при вертикально водотрубном котле «Гумбольдт» с поверхностью нагрева в 550 м^2 .

принять во внимание. При перестройке же существующих установок в большинстве случаев требуется увеличение топочной камеры, что, однако, особенно в старых котельных, не всегда возможно, в виду недостатка места.

Таким образом, область применения добавочной топки ограничена. При оборудовании ею старых котельных топок, большей частью слишком низких даже для простой колосниковой решетки, правда, иногда удается достигнуть внезапного повышения производительности, но зато при этом приходится мириться с существенным ухудшением коэффициента полезного действия и быстрым изнашиванием кладки.

На рис. 108 и 109 показаны добавочные топки для угольной пыли: одна — при топке с движущимися колосниками для каменного угля и другая — при ступенчатой топке для бурого угля. В обеих топках при длительной эксплуатации достигнуто повышение производительности от 25 до 30% без значительного ухудшения коэффициента полезного действия.¹

5. Нефтяные и газовые топки.

Отдел о котельных топках был бы не полон, если бы мы не упомянули, хотя бы вкратце, о довольно важных для некоторых отраслей промышленности нефтяных и газовых топках. Нефтяные топки приобрели в особенности значение для судов, а в некоторых случаях применяются также для отопительных установок, для опытных котлов и для покрытия весьма кратковремен-

ных внезапных пиков. Газовые топки широко применяются в металлургической промышленности в коксовых установках, на газовых заводах и т. д.

Вообще говоря, в отношении нефтяных и газовых топок можно руководствоваться такими же принципами, как при пользовании топками для угольной пыли, хотя в зависимости от рода применяемого горючего, от его теплотворной способности, от потребного количества воздуха и т. д. весьма меняется в разных случаях конструкция горелок, топочных камер, расположение горелок, подвод первичного и вторичного воздуха и т. д.

При жидком горючем наиболее важно обеспечение возможно более тесного смешения горючего с воздухом, так как от

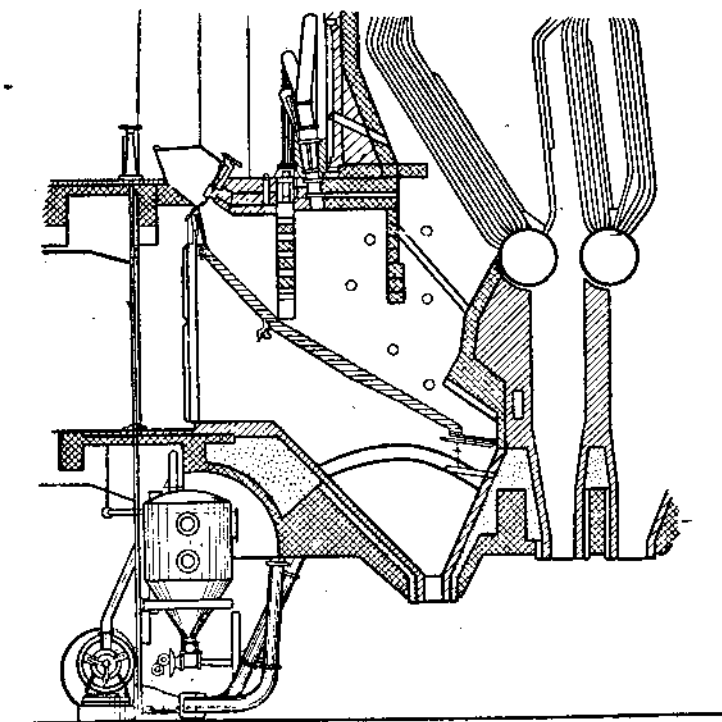


Рис. 109. Ступенчатая колосниковая решетка для бурого угля с добавочной топкой для угольной пыли, конструкции «Гумбольдт».

этого зависит не только коэффициент полезного действия и производительность топки, но также ее надежность в эксплуатации. При неполном распылении на форсунках легко получаются осадки, забивающие их и, таким образом, приводящие к нарушениям работы. Хорошо оправдались форсунки пароструйные и действующие сжатым воздухом. Так как при хорошем распылении можно обходиться весьма малым избытком воздуха, то достигают высоких к. п. д., а равно и весьма высоких температур горения, и поэтому приходится, как и при топках для пылевидного угля, хорошо защищать кладку при помощи систем воздушного или, лучше, водяного охлаждения.

То же можно сказать о топках для богатого газа (коксового, светильного), тогда как наиболее употребительные топки для колошниковых газов и генераторного газа отличаются значительно более низкими температурами горения. В газовых топках недавно стали также применять вихревые горелки со спиральными направляющими поверхностями для тесного смешивания газа и воздуха. В заключение следует заметить, что в последнее время удалось также сконструировать комбинированные топки для газа и угольной пыли, имеющие по срав-

¹ Очень интересные данные об эксплуатации добавочных топок для бурого угля находим в выпуске 15 «Braunkohle», 27, 1928. См. также R a m m l e r, Arch. f. Wärmewirtschaft, 9, 151, 1928.

нению с топками только для угольной пыли то преимущество, что при них можно достигнуть весьма высокого напряжения топочной камеры, так как скорость сгорания газов значительно больше, чем угольной пыли.¹

6. Напряжение колосниковой решетки и топочной камеры.

От напряжения колосниковой решетки и топочной камеры зависят, при данной производительности, размеры топки и занимаемая ею площадь. Повышение напряжения имеет поэтому большое экономическое значение, и крупные достигнутые в последнее время успехи с колосниковыми топками высокой производительности и топками для пылевидного угля заслуживают особого внимания.

С другой стороны, стремление к высокому напряжению колосниковой решетки и топочной камеры не должно приводить к слишком тяжелым условиям работы для материалов топки и котла, так как преимущество уменьшенной стоимости первоначального обзаведения и экономии места будет поглощено более высокими затратами на текущий ремонт и амортизацией. Коэффициент полезного действия топки также значительно падает при длительном форсировании решетки и топочной камеры. Поэтому, как мы уже неоднократно упоминали, топочные пространства колосниковых топок за последние годы даже стали значительно увеличивать.

На таблице 17 дана сводка средних и высших напряжений колосниковой решетки для нескольких наиболее важных видов горючего и типов колосниковых решеток (в $\text{кг}/\text{м}^2 \text{ ч.}$ и $\text{кал}/\text{м}^2 \text{ ч.}$).

Напряжение топочной камеры в современных конструкциях топок еще колеблется в широких пределах. Старые колосниковые топки часто имеют напряжение до $500\,000 \text{ кал}/\text{м}^2 \text{ ч.}$ и больше, в новых топках эту величину берут значительно ниже, иногда сводя ее до $100\,000 \text{ кал}/\text{м}^2 \text{ ч.}$

Напротив, в топках для угольной пыли теперь стремятся повышать напряжение топочной камеры. Большинство работающих в настоящее время топок имеют напряжение около $150\,000 \text{ кал}/\text{м}^2 \text{ ч.}$ В самое последнее время с успехом повышали напряжение до $300\,000 \text{ кал}/\text{м}^2 \text{ ч.}$ ²

Большая успешность опытных топок на судах,³ с достижением напряжения около $600\,000 \text{ кал}/\text{м}^2 \text{ ч.}$ и на паровозах,⁴ где удалось достигнуть напряжения даже свыше $2\,000\,000 \text{ кал}/\text{м}^2 \text{ ч.}$ заставляет ожидать, что и в стационарных установках напряжение может быть еще существенно повышено без чрезмерного изнашивания материалов и понижения коэффициента полезного действия.

ДОПОЛНЕНИЯ РЕДАКТОРА.

Типы топок.

Типы топок, описанные у Преториуса, приспособлены, главным образом, для германских топлив. Советская теплотехника имеет большие достижения в деле выработки типов топок для различных топлив Союза и способов сжигания их. Обзор топок для сжигания антрацита и дров имеется в Материалах к IV Всесоюзному теплотехническому съезду: «Колосниковые решетки и шахтные топки для сжигания дров» («Известия Теплотехнического института», № 2 (35), 1928); «Топки для антрацита» (в том же номере «Известий Теплотехнического института»).⁵ Особенное же развитие получили в СССР топки для низкосортных местных топлив: торфа, подмосковного угля и специальных видов топлив. По вопросам, касающимся сжигания этих топлив, имеется обширная литература, из которой приведем только несколько работ:

Проф. Т. Ф. Макарьев, Сжигание торфа. Труды II Всесоюзного теплотехнического съезда, т. II, вып. 2.

¹ О первых, весьма благоприятно протекавших испытаниях парового котла с тремя жаровыми трубами, снабженного комбинированной топкой для газа и угольной пыли, недавно сообщал Зауэрманн (Sauer mann) — см. Glückauf, 64, 525, 1928, и Arch. f. Wärmewirtschaft, 9, 391, 1928.

² По Крейсингеру (Kreisinger) напряжение топочной камеры в американских топках для угольной пыли при сплошных стенках без охлаждения составляет, примерно, от 100 до 135, при охлаждаемых воздухом стенках — примерно от 135 до 160, а при стенках с водяным охлаждением — примерно от 180 до 312 тысяч $\text{кал}/\text{м}^2 \text{ ч.}$ (см. Power, 67, 958, 1928).

³ См. Engineering, 124, 788 и 791, 1927, Die Wärme, 52, 556, 1929.

⁴ См., между прочим, Kleinow, Glaser's Annalen, 102, 45 и 58, и Hinz, Die wärmetechnischen Vorgänge der Kohlenstaubeuerung, J. Springer, Берлин, 1928.

⁵ По сжиганию антрацита и дров имеется ряд других работ, помещенных в «Известиях Теплотехнического института» и в «Трудах Всесоюзных теплотехнических съездов».

ТАБЛИЦА 17.

Средние напряжения колосниковых решеток для разных видов горючего и разных типов колосниковых решеток.

Наименование топливостояния способ-ность кал/кг	Высота слоя мм	Напряжение решетки		Отношение площади колосниковой решетки к площади поверхности нагрева м ² /м ²
		нормально ¹ кг/м ² ч.	максимально ² кг/м ² ч.	
Антрацит	7 800 — 8 100	60 — 90	130	от 1/30 до 1/50
Каменный уголь	5 800 — 7 500	80 — 150	300	
Каменноугольная мелочь	5 800 — 6 500	150 — 200	230	1/25
Кокс	6 400 — 7 400	80 — 100	130	
Коксовая мелочь	5 800 — 6 500	150 — 200	250	1/25 до 1/35
Полужоже (из каменного угля)	5 500 — 6 500	120 — 150	350	
Богемские бурые угли	4 800 — 5 200	130 — 200	230	1/15 " 1/25
Германские бурые угли	2 000 — 3 500	250 — 400	500	
Брикет бурого угля	4 500 — 5 000	150 — 200	250	1/25 " 1/35
Полужоже (из бурого угля)	4 500 — 5 000	150 — 200	250	
Торф	3 300 — 3 800	160 — 280	300	1/20
Корье	1 300	160 — 280	350	
Каменный уголь на неподвижных горизонт. решетках	около 7 000	80 — 120	150	1/20
Каменный уголь на решетках с вращающимися колосниками	" 7 000	100 — 150	300	
Брикет бурого угля на решетках с вращающимися колосниками	" 4 800	150 — 200	250	1/30 до 1/60
Бурый уголь на неподвижных ступенчатых решетках	2 500	250 — 350	450	
Бурый уголь на неподвижных лотковых решетках	2 500	250 — 400	450	1/15 до 1/20
Бурый уголь на механических решетках	2 500	300 — 400	500	
Антрацит	7 800 — 8 100	60 — 90	130	от 1/30 до 1/50
Каменный уголь	5 800 — 7 500	80 — 150	300	
Каменноугольная мелочь	5 800 — 6 500	150 — 200	230	1/25
Кокс	6 400 — 7 400	80 — 100	130	
Коксовая мелочь	5 800 — 6 500	150 — 200	250	1/25 до 1/35
Полужоже (из каменного угля)	5 500 — 6 500	120 — 150	350	
Богемские бурые угли	4 800 — 5 200	130 — 200	230	1/15 " 1/25
Германские бурые угли	2 000 — 3 500	250 — 400	500	
Брикет бурого угля	4 500 — 5 000	150 — 200	250	1/25 " 1/35
Полужоже (из бурого угля)	4 500 — 5 000	150 — 200	250	
Торф	3 300 — 3 800	160 — 280	300	1/20
Корье	1 300	160 — 280	350	
Каменный уголь на неподвижных горизонт. решетках	около 7 000	80 — 120	150	1/20
Каменный уголь на решетках с вращающимися колосниками	" 7 000	100 — 150	300	
Брикет бурого угля на решетках с вращающимися колосниками	" 4 800	150 — 200	250	1/30 до 1/60
Бурый уголь на неподвижных ступенчатых решетках	2 500	250 — 350	450	
Бурый уголь на неподвижных лотковых решетках	2 500	250 — 400	450	1/15 до 1/20
Бурый уголь на механических решетках	2 500	300 — 400	500	

¹ На прежних колосниковых решетках.² Максимальное напряжение на современных колосниковых решетках высокой производительности, согласно опубликованным результатам испытаний. Эти максимальные значения обнаруживают довольно значительное расхождение отчасти потому, что многие сорта горючего до сих пор еще не испытаны на самых новых и производительных решетках.

Инж. П. И. Елизаров, Торфяные шахтно-цепные топки на ГЭС Электропередача.

Проф. М. М. Щеголев, Сжигание дров и торфа, Москва, 1924.

Проф. А. А. Надежин, Рациональное сжигание дров и торфа. Простые колосниковые решетки и шахтные топки для сжигания торфа. Известия Теплотехнического института, № 2 (35), 1928.

Отчет об опытах сжигания мелочи подмосковного угля на цепных решетках с горячим дутьем на Государственной каширской районной электрической станции. «Известия Теплотехнического института», № 5 (7), 1925.

О различных новейших типах торфяных топок сообщается в брошюре инж. И. С. Мительмана, Четыре районных электростанции на торфе, Москва, 1930.

Мы ограничимся приведением двух примеров топок: одной для дров и одной для торфа. Шахтная топка для дров, спроектированная Теплотехническим институтом (рис. 109а).¹

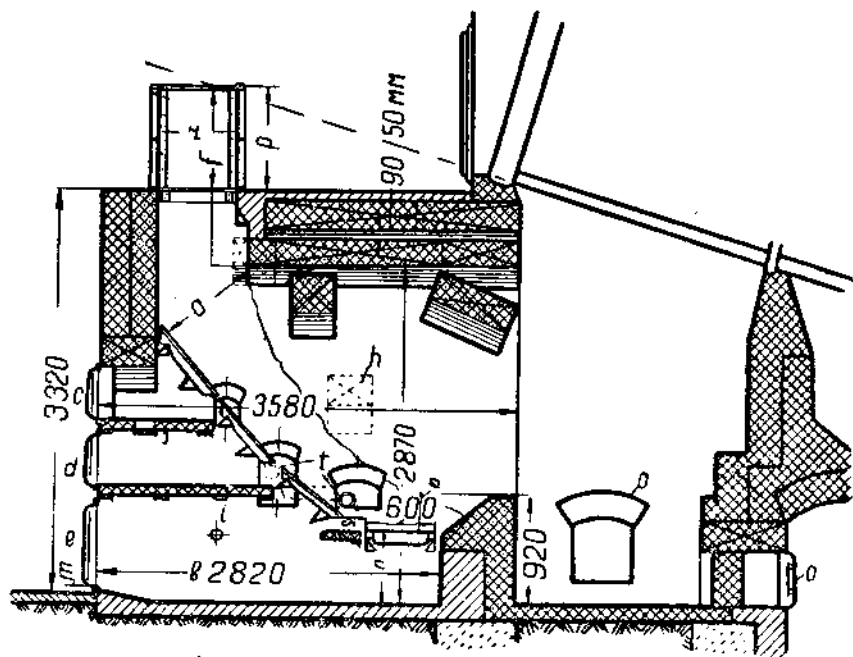


Рис. 109а. Шахтная топка для дров, спроектированная Всесоюзным теплотехническим институтом.

Топка эта является примером топок с уточняющимся слоем топлива и построена для водотрубного котла системы «Фицнер и Гампер» с поверхностью нагрева, равной 306 м². Она спроектирована с возможным переходом на торфяное топливо, причем зоны для ввода воздуха не должны быть переделываемы, а ставятся только колосники и балки, показанные пунктиром (причем балки *l* в случае применения торфа должны охлаждаться водой). Топки этого рода рекомендуется применять в мелких и средних котельных установках при двух и более сменах в сутки для котлов всех систем, при предельной влажности не выше 45—50% и размерами поленьев: $l \leq 1,8$ м; $d \leq 200$ мм.

Шахтно-цепная торфяная топка проф. Т. Ф. Макарьева.²

Топка эта (рис. 109б) состоит из следующих частей: 1) цепной решетки *A* со шлакоснимателями и со всеми относящимися к ней движущими и регулирующими скорость механизмами; 2) шахты *B* с подсушивающими сводками *K*; 3) камеры горения *C*; 4) кирпичных сводков,

¹ «Известия Теплотехнического института», 2(35), 1928.

² Описание и чертеж топки взяты из доклада проф. Т. Ф. Макарьева на II Теплотехническом съезде.

располагаемых между шахтой и камерой горения, из которых нижний *D*, отсекающий, определяет начальную толщину слоя торфа, а верхние образуют ряд отверстий для прохода газов; 5) козырька *K*; 6) добавочной опрокидывающейся решетки.

Топки Т. Ф. Макарьева нашли многочисленные применения в котельных установках СССР. Данные о применении их имеются в сборнике: «Повейший способ сжигания торфа топкой инженера Т. Макарьева», Москва, 1923.

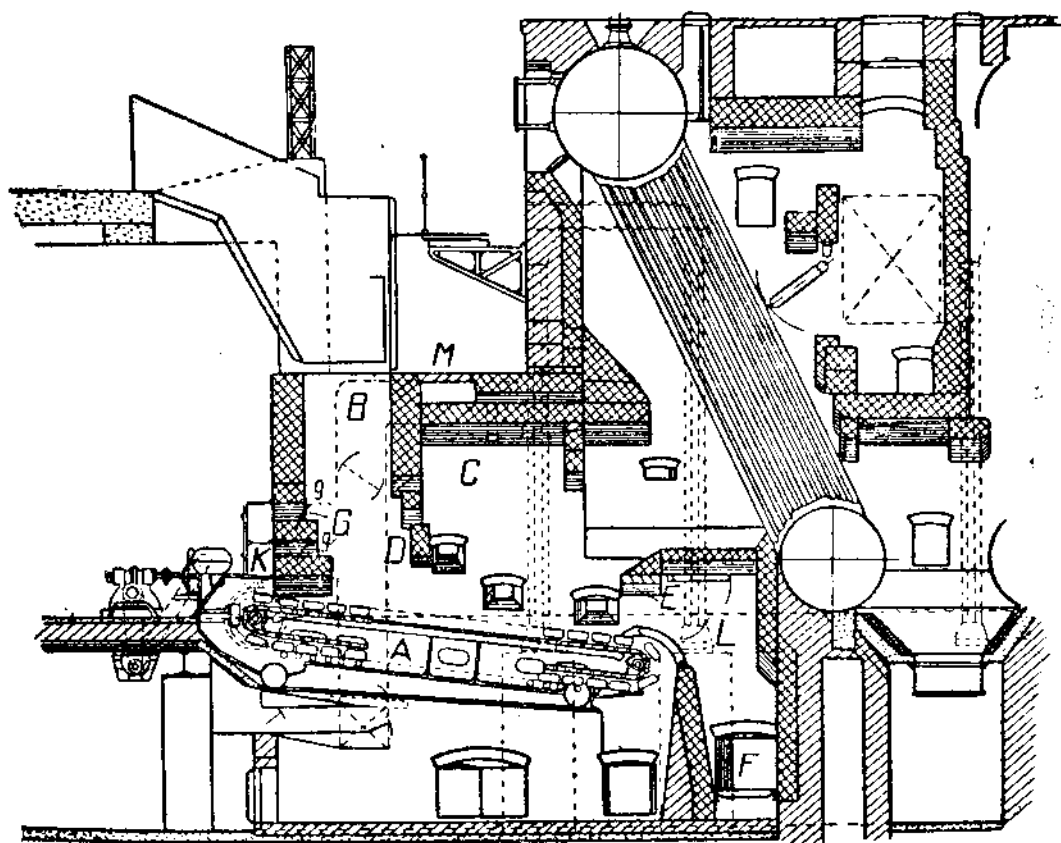


Рис. 109б. Торфянал топка Т. Ф. Макарьева.

A — нижняя решетка; *B* — шахта; *C* — камера горения; *D* — нижний сводок; *E* — козырек; *F* — добавочная решетка; *K* — поддувающие сводки; *L* — скребок для сдвига шлака; *M* — свод.

Пылевидное топливо.

Литература по пылевидному топливу на русском языке довольно значительна, но наш опыт его применения покамест не велик.

Поэтому приводим только отдельные специальные труды:

В л е й б т р е й Г., Топочные устройства для сжигания порошкообразного угля, Москва, 1926.

М ю н ц и н г е р Ф., Пылесожигательные топki в стационарных паровых котлах, Москва, 1926.

Г у д р и ч В. Ф., Пылевидное топливо, Ленинград, 1928.

Подробные и новые сведения по сжиганию порошкообразного топлива имеются в книге Р. Г. Г р а н о в с к и й, Котельные установки, гл. XXXV, Ленинград, 1930. В добавлениях к этой книге приводятся интересные сведения о сжигании топлива во «взвешенном состоянии», т. е. без размола, а только с измельчением до известного предела (см. статью В. Я. Р ы ж к и н а в журнале «Тепло и сила», 6, 1929).

Сведения о применении пылевидного топлива имеются также у М ю н ц и н г е р а, Котельные установки больших силовых станций, отделы X, XV, XVII, XXIV.

II. ПАРОВЫЕ КОТЛЫ.

Для руководителей эксплуатации топка представляет важнейшую часть котельной, так как ее производительность и коэффициент полезного действия зависят не только от конструкции, но, может быть, еще в большей степени от обслуживания. Напротив, положительные и отрицательные качества самих котлов зависят, главным образом, от их конструкции. На их коэффициент полезного действия и производительность можно влиять лишь в направлении надлежащей очистки их поверхности нагрева от накипи и летучей золы.

В виду того, что настоящая книга написана, главным образом, для работающих на производстве, конструктивные вопросы устройства котлов будут затронуты нами лишь кратко. Мы можем здесь дать лишь общий обзор наиболее известных конструкций.

1. Общие сведения.

Величина котла обычно определяется по его поверхности нагрева, т. е. по измеренной со стороны топки площади стенок, омываемых с одной стороны водой, а с другой — газообразными продуктами горения. Котлы всех конструкций имеют водяное пространство и паровое пространство. Чем больше *водяное пространство*, которое во время работы всегда должно быть наполнено водой, тем значительнее (в виду тепловой аккумуляции воды) нечувствительность котла к колебаниям нагрузки, но зато тем больше будет инерция котла при растопке. С этой точки зрения различают котлы с большим водосодержанием (главным образом сюда относятся цилиндрические и жаротрубные котлы) и котлы с малым водосодержанием (котлы с дымогарными трубками и водотрубные котлы).

Паровое пространство, в противоположность водяному пространству не соприкасающееся с горячими газами, имеет назначение по возможности препятствовать увлечению водяных частиц в трубопровод. При помощи особых надстроек (сухопарники или паросборники) и внутренних устройств (отражательные листы, ситообразные заборные трубки) облегчают отделение пара от воды.

Поверхность, разграничивающую водяное и паровое пространство, называют *уровнем воды* или *парообразовательной поверхностью*. От ее величины по отношению к испаряемому в единицу времени количеству воды также зависит содержание в паре влаги. Маленькие парообразовательные поверхности дают высокие «коэффициенты испарения» (1 м^3 пара на 1 м^2 парообразовательной поверхности в 1 час) и обычно большую влажность пара.

Так как питание парового котла никогда не может быть урегулировано настолько точно, чтобы уровень воды всегда оставался на одинаковой высоте, приходится допускать некоторую игру между низшим и высшим уровнями. Пространство, заключенное между обоими предельными уровнями воды, называют *пространством питания*. Для каждой конструкции из соображений безопасности работы котельной установки точно предписан наиболее низкий допустимый уровень воды (все соприкасающиеся с горячими газами части всегда должны быть покрыты водой); самый верхний уровень устанавливается так, чтобы паровое пространство было достаточно велико для предупреждения захлестывания воды в трубопровод.

Два самых важных требования, предъявляемых к хорошему паровому котлу, заключаются в хорошей теплопередаче и энергичной циркуляции воды. От первой зависят производительность и коэффициент полезного действия, а от второй — прежде всего бесперебойность работы и долговечность. Третье важное требование состоит в том, что вода должна полностью отделяться от пара.

Теплопередача. Хорошая теплопередача, как мы уже видели, достигается, с одной стороны, приданием нагреваемым частям большой поверхности, а с другой стороны — при помощи больших разностей температур, большой скорости течения газов и, наконец, малого сопротивления теплопередаче.

Стремление к созданию больших поверхностей привело к расчлениению поверхности нагрева на многочисленные отдельные трубчатые элементы. Так, из старого цилиндрического котла с очень малым отношением поверхности к водосодержанию произошел котел с одной жаровой трубой. Последний затем сменился котлом с несколькими жаровыми трубами, котлом с дымогарными трубками, и, наконец, появился современный котел высокой производительности с многочисленными наклонно и вертикально поставленными водяными трубками.

Повышение теплопередачи путем повышения разности температур между газообразными продуктами горения и водой в котле достигается тем, что заботятся о высокой температуре горения, иногда сильно подогревая воздух и подвергая возможно большую часть поверх

ности нагрева непосредственному действию излучения. Так появились охлаждаемые водой топочные камеры, большие преимущества которых уже разъяснены выше, и — как последнее звено в этой эволюции — так называемые «экраниые котлы».

Повышение теплопередачи посредством увеличения скорости газов привело к сужению последних дымоходов котла, в целях выхода газов со сравнительно большой скоростью. Преобладавший прежде взгляд, что дымоходы в котле следует делать широкими, чтобы газы возможно дольше оставались в них и имели достаточно времени для отдачи содержащейся в них теплоты, на основании новейших исследований оказался неправильным.¹ Но в передней части котла, где еще действует излучение, следует назначать большие поперечные сечения.

Последнее требование — возможно малое сопротивление теплопередаче — вызывает необходимость в постоянном содержании поверхности нагрева чистой от всяких загрязняющих осадков, т. е. от накипи внутри и от сажи на наружной поверхности труб. В конструктивном отношении это сводится к необходимости заботиться о легкой доступности всех частей и о возможности их очистки.

Циркуляция воды. Циркуляция воды необходима как для быстрого продвижения образовавшихся у поверхности нагрева и внутри труб паровых пузырьков, так и для постоянного подвода холодной воды к поверхностям нагрева. Циркуляция должна также предупреждать осаждение на чувствительных частях поверхности нагрева солей или активных газов, всегда содержащихся в больших или меньших количествах в котельной воде, даже при хорошей очистке и дегазации питательной воды. Газы вредны тем, что они разрушают материал котла и ухудшают теплопередачу. Приостановка циркуляции воды может привести к серьезным повреждениям, к перегреву и выпучиванию кипяточных трубок и даже к взрывам. Поэтому во всех конструкциях котлов величайшее значение придается быстрой и обеспеченной при всякой нагрузке циркуляции.

Автоматическая циркуляция воды вызывается тем, что горячая вода и образующиеся паровые пузырьки имеют меньший удельный вес, чем более холодная вода. От этого в водотрубных котлах, например, происходит постоянный подъем воды вдоль поверхности нагрева, тогда как более холодная и более тяжелая вода из верхних барабанов устремляется вниз через необогреваемые или почти необогреваемые циркуляционные трубы.² Для этого необходимо, во-первых, применять трубы большого диаметра, с большими радиусами закруглений и, во-вторых, избегать последовательного соединения нескольких барабанов. Необходимо заботиться о достаточном поперечном сечении для воды, протекающей по подъемным и спускным трубам, а также о достаточно широких соединениях между барабанами.

При большой нагрузке котла и при ее внезапных, толчкообразных изменениях подъем паровых пузырьков происходит весьма энергично, и наблюдается значительное увеличение объема водяного пространства вследствие парообразования. При этом поверхность воды сильно волнуется, так как вода и пар не могут достаточно быстро разделиться. В результате вода увлекается в трубопровод, и образуется влажный пар, иногда оказывающий весьма вредное действие, особенно если им питают паровые машины (удары воды и разрушение труб, клапанов, поршней, уменьшение долговечности турбинных лопаток и т. д.). Правда, если за котлом включен перегреватель, то большая часть увлеченной воды в нем испаряется,³ однако температура перегрева, а с нею и коэффициент полезного действия машин значительно падает. Кроме того водяными каплями в перегреватель, в паропроводы, в машины, в отопительные и варочные аппараты заносятся соли и другие загрязняющие примеси, которые забивают проходы и вследствие этого могут нарушить нормальную работу установки.

В виду изложенного безусловно необходимо производить сухой пар и предупреждать всякое увлечение воды в перегреватель и трубопроводы. В этом отношении весьма полезными оказались особые устройства (отражательные стенки) в верхнем котле, а в некоторой степени также уста-

¹ См., между прочим, Nusselt, Stahl und Eisen, 43, 458, 1923.

² Относительно теории циркуляции воды и новых интересных опытов в этой области см. Schmidt (Данциг), VDI-Zeitschr., 37, 1151, 1929, и Cleve, Arch. f. Warmewirtschaft, 10, 379, 1929, и Forschungsheft, 322.

³ Прим. ред. На русском языке имеются самостоятельные работы о циркуляции проф. В. А. Корякина в Трудах II Теплового технического съезда, т. II, вып. I. См. также А. Г. Короневский, О скорости циркуляции. «Известия Теплового технического института», № 2(62), 1931.

⁴ Данные эксплуатации и испытаний показывают, что в перегревателе весьма часто испаряется только часть воды. Поэтому выходящий из перегревателя пар оказывается отчасти перегретым, отчасти же еще влажным.

новка особых паросборников с водоотделителями. Важно также, чтобы так называемая поверхность парообразования, т. е. свободное для выделения пара водяное зеркало в верхнем котле, было достаточно велико для предупреждения слишком бурного волнения.

Правила, касающиеся материалов и сооружений котлов. В отношении надежности действия котлу предъявляют еще другие требования, прежде всего касающиеся материалов и издаваемые Германской комиссией по паровым котлам под названием «Правила, касающиеся материалов и сооружения». ¹ Особого внимания требует клепка котельных барабанов, так как заклепочные швы особенно легко подвергаются разъеданию, дают трещины и т. д. Предметом правил является также минимальный радиус закругления у краев котельных днищ, причем соответствующие нормы выработаны на основе новейших исследований и изучения многочисленных несчастных случаев. Наконец, следует указать на то, что в котлах весьма высокого давления совсем избегают клепки. Место клепаных барабанов занимают, правда, более дорогие, но зато более надежные в эксплуатации сварные или бесшовно-кованые барабаны.

Котлостроение сделало за последние годы исключительные успехи. Непрерывно возрастала поверхность нагрева и давление котлов, значительно улучшены напряжение поверхности нагрева и коэффициент полезного действия, что относится как к современным водотрубным котлам высокой производительности, так и к котлам более старых конструкций, жаротрубным котлам и т. д. ²

2. Более старые конструкции котлов.

Цилиндрический котел. Старейшим и простейшим видом парового котла является цилиндрический котел — простой цилиндрический резервуар без всяких внутренних устройств, омываемый проходящими под ним газообразными продуктами горения. Котел обычно снабжают

¹ Вышли в свет в издательстве Beuth, G. m. b. H., Берлин, 1927, с приложением норм и пояснений. (Имеется русский перевод.)

² См. Praetorius, Fortschritte im Dampfkesselbau, Die Wärme, 52, 1 и 24, 1929.

Прим. ред. Вопрос о составлении технических условий для изготовления паровых котлов, соответствующих современным материалам и развитию самих котлов, занимал видное место в деятельности Всесоюзных теплотехнических съездов, особенно III и IV.

Подготавливая эти нормы Междуведомственная комиссия по котлостроению составила ряд предположений, одобренных съездом, но еще не получивших силы закона. Нормы эти помещены в «Материалах к III Всесоюзному съезду» и в «Известиях Теплотехнического института», а именно:

«Материалы», вып. 3 (Москва, 1926).

Технические условия на котельное и топочное железо.

Технические условия на заклепочное железо (сталь).

Технические условия на заклепки.

Технические условия на дымогарные и жаровые трубы.

Технические условия на водопроводные трубы.

Технические условия на паропроводные, нефтепроводные, ресиверные и паропроводные трубы.

Технические условия на трубы для пароперегревателей и связанные.

«Материалы», вып. 5 (Москва, 1926).

Проект технических условий на изготовление паровых котлов.

«Известия Теплотехнического института», № 4(37), 1928.

Специальные технические условия на котлы с жаровыми трубами.

Специальные технические условия на котлы с дымогарными трубами.

Специальные технические условия на постройку горизонтально-водотрубных намерных котлов типа «Фицнер и Гампер».

Специальные технические условия на постройку паровых котлов системы «Бабкок-Вилькокс».

Технические условия на изготовление пароперегревателей.

Технические условия для котлов высокого давления.

Технические условия на горновую сварку и на водяном газе при котельных работах.

Технические условия на ацетиленовую и электросварку.

«Известия Теплотехнического института», № 7(50), 1929.

Технические условия для изготовления водотрубных паровых котлов высокого давления на заграничных заводах.

Технические условия на котлы высокого давления (выше 22 рабочих атмосфер) разрабатывались также особой комиссией при Объединенном научно-техническом совете в Ленинграде. Труды этой комиссии («Технические условия на постройку и поставку котлов высокого давления», Ленинград, 1930) включают обширный материал по этому вопросу. В частности, там имеется довольно полный материал по расчету котлов высокого давления и по уходу за ними (статьи инж. С. М. Шварцмана).

горизонтальной колосниковой решеткой, расположенной под его передней частью. Эти котлы очень дешевы, но обладают весьма малой производительностью и чрезвычайно плохим коэффициентом полезного действия, так как газообразные продукты горения покидают котел при высокой температуре. Поэтому таких котлов теперь больше не строят. Изредка их еще применяют в виде батарейных котлов, соединяя в одно целое два или три ряда барабанов, располагаемых один над другим. Верхние и нижние котлы соединяются между собой вертикальными штуцерами и имеют наверху общий паровой коллектор. Газообразные продукты горения проходят по нескольким дымоходам, сначала поднимаясь, а затем опускаясь по ним. Коэффициент полезного действия и производительности у этих котлов, конечно, значительно выше, чем у простого цилиндрического котла, но все же сравнительно мал (редко выше 50%). Батарейные котлы применяют поэтому при небольших размерах поверхности нагрева (примерно до 200 м²).

Котлы с жаровыми трубами. Эти котлы в настоящее время еще весьма распространены, особенно в средних и малых установках. Жаротрубный котел представляет собой горизонтальный барабан, сквозь который проходит одна или несколько широких, гладких или волнистых, труб, диаметром примерно от 600 до 1220 мм. Эти котлы обычно снабжают простыми горизонтальными колосниковыми решетками, иногда же топками с нижней подачей, газовыми топками, а в последнее время и топками для угольной пыли. Топку помещают в передней части жаровых труб. Другими словами, здесь применяются чисто внутренние топки. Горячие газы проходят сначала по жаровым трубам, затем делают один или несколько оборотов с боков или снизу

кожуха котла. Паротводится от помещенного на котле сухопарника.

В зависимости от числа волнистых труб различают котел с одной жаровой трубой (примерно до 50 м² поверхности нагрева), котлы с двумя жаровыми трубами (примерно до 100 м²) и т. д. Для колосниковых топок наиболее пригодными оказались котлы с двумя жаро-

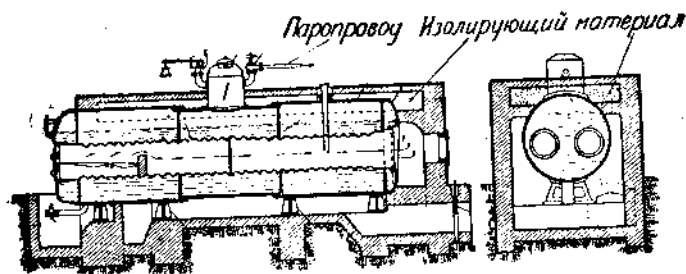


Рис. 110. Котел с двумя жаровыми трубами.

выми трубами. При трех или более жаровых трубах обслуживание становится слишком сложным, а очистка — затруднительной, в виду малого диаметра жаровых труб, но для газовых топок пригодны и котлы со многими жаровыми трубами. Наибольшие, построенные до настоящего времени котлы с жаровыми трубами имеют 5 волнистых труб и поверхность нагрева приблизительно от 500 до 600 м². Напряжение поверхности нагрева, обычно составляющее от 15 до 18 кг/м² ч.,¹ может быть существенно повышено при помощи особых внутренних устройств, имеющих целью увеличение скорости газов и придание им вихревого движения (направляющие конуса — Drallsteine). Коэффициент полезного действия обычно довольно низок (примерно от 50 до 55%), но он может быть значительно улучшен при помощи упомянутых устройств, а главным образом — путем присоединения за котлом с жаровыми трубами котлов с дымогарными трубами, перегревателей, экономайзеров и подогревателей воздуха.

На рис. 110 изображен нормальный котел с двумя жаровыми трубами. На рис. 111 представлен современный котел с пятью жаровыми трубами и с топкой для колосниковых газов. Под главным котлом расположены котел с дымогарными трубками и экономайзер. Описываемый котел конструкции «Вернингхауз» рассчитан на рабочее давление в 18 атм. ман. Кожух котла не обогревается. Газообразные продукты горения из жаровых труб переходят сначала через перегреватель в дымогарные трубки, а из них непосредственно в экономайзер. Благодаря такому устройству потери от лучеиспускания и теплопроводности значительно уменьшаются,

¹ Напряжение поверхности нагрева измеряется числом килограммов воды, испаряемых в 1 час с 1 м² поверхности нагрева. Эта мера употребительна, и ее легко определить, но ею можно пользоваться лишь для грубого суждения о напряжении поверхности нагрева, так как при равных количествах превращенной в пар воды (выраженных в кг/м² ч.) действительные подведенные количества тепла (выраженные в кал/м² ч.) могут быть весьма различны, в зависимости от степени подогрева питательной воды и давления в котле. Подробнее об этом см. стр. 193—194.

так как кладка котла вообще совсем не приходит в соприкосновение с горячими газами. Короткий дымовой канал от верхнего котла к нижнему тщательно изолирован. При испытаниях в условиях практической эксплуатации в этом котле достигнуты напряжения поверхности нагрева приблизительно до $40 \text{ кг/м}^2\text{ч}$. и коэффициент полезного действия (включая экономайзер) от 85 до 87%. Такие цифры едва ли могут быть превзойдены даже современными котлами высокой производительности.

Котлы с жаровыми трубами, называемые также котлами с большим водяным пространством, имеют и в настоящее время немалое значение, хотя возможности их применения теперь уже не так широки, как раньше. Переход к работе паром высокого давления, постепенно совершающийся почти во всех отраслях промышленного производства, делает невозможным широкое применение котлов с жаровыми трубами, так как при давлениях более 25 атм. стенки волнистых труб и днищ становятся слишком толстыми. Кроме того эти котлы занимают слишком много места по отношению к их производительности. Наконец, величина котла экономически ограничена, и едва ли ее можно поднять выше достигнутых в настоящее время максимальных цифр (600 м^2 поверхности нагрева). С другой стороны, котлы с жаровыми трубами, по сравнению со всевозможными конструкциями водотрубных котлов, отличаются большими преимуществами: они дешевы, обслуживаются просто, их легко чистить. Они обладают большим водяным запасом, благодаря чему легко выравниваются сильные колебания в расходе пара.

Имея ярко выраженные внутренние толчки, эти котлы отличаются весьма малыми потерями от лучеиспускания и теплопроводности, а также малыми потерями от простоев.

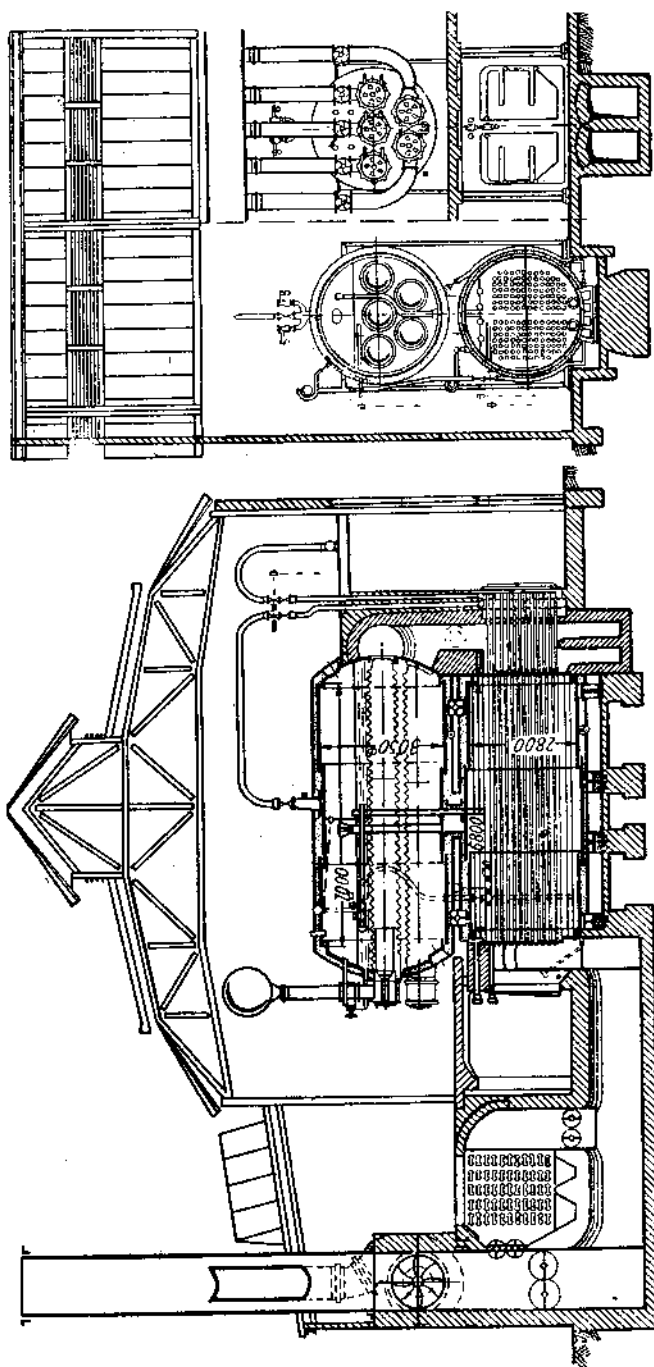


Рис. 111. Котел с пятью жаровыми трубами (вверху) и котел с дымовыми трубами (внизу), конструкции «Берингхауса», для отопления доменных газов (рабочее давление 18 атм., поверхность нагрева 485 м^2).

Котлы с дымогарными трубками. Первым шагом вперед от простого цилиндрического котла без внутренних устройств был котел с одной жаровой трубой. Для дальнейшего увеличения поверхности нагрева в котел стали встраивать от 2 до 5 жаровых труб. Следующий шаг приводит нас к котлу с дымогарными трубками, состоящему из цилиндрического котла с множеством узких трубок (диаметром от 50 до 60 мм), по которым проходят газообразные продукты горения. При этой конструкции опять необходима общая топка, в противоположность котлам с жаровыми трубками, у которых каждая жаровая труба имеет свою отдельную топку. В качестве топочной камеры применяют прямоугольные или круглые, сделанные из меди или железа, огневые коробки, которые, так же как и дымогарные трубки, окружены водой. Итак, этот тип котлов с дымогарными трубками, подобно котлам с жаровыми трубками, имеет внутреннюю топку. В зависимости от расположения дымогарных трубок различают трубчатые котлы с идущими вперед и идущими обратно дымогарными трубками. Вертикальные трубчатые котлы применяют лишь малых размеров (примерно до 30 м² поверхности нагрева). Такие котлы доставляют пар для паровых копров, пожарных насосов, прачечных, небольших пивоваренных заводов и т. д. Для большей производительности применяют почти исключительно горизонтальные трубчатые котлы с огневыми коробками. Область применения этих котлов ограничивается, главным образом, паровозами, локомотивами и пароходами. При очень большой мощности (от 300 до 600 м² поверхности нагрева) котел снабжают несколькими огневыми коробками. Известные из практики судостроения котлы с двусторонней топкой представляют собой котлы с дымогарными трубками, отапливаемые с обоих концов цилиндрического корпуса.

В стационарных установках встречаются, как уже упомянуто, котлы с дымогарными трубками, соединенные с жаротрубными котлами. Часто также эти котлы применяют для использования отходящего тепла разных заводских топок, причем они оказались вполне пригодными для этой цели.

Котлы с дымогарными трубками требуют гораздо меньше места, чем жаротрубные котлы, но зато обычно имеют и меньшую удельную производительность (от 15 до 20 кг/м² ч.; в качестве котлов для использования отходящей теплоты, в зависимости от температуры дымовых газов, — от 5 до 12 кг/м² ч.). Другой недостаток, особенно неприятный тогда, когда дымовые газы содержат много летучей золы, заключается в легком загрязнении и малой доступности поверхности нагрева.

Котел Мак-Николя. Переход к чисто водотрубным котлам представляет собой известный под названием котла Мак-Николя (Mac-Nicol) водотрубный котел с большим водяным пространством. К задней водяной камере водотрубного котла приклепаны два цилиндрических котла, которые, в свою очередь, сзади соединены косыми патрубками с верхним барабаном водотрубного котла. Котлы Мак-Николя соединяют преимущества котлов с жаровыми трубками (малая стоимость и нечувствительность к колебаниям нагрузки) с разными преимуществами водотрубных котлов (малое занимаемое место, высокая производительность). Но для больших давлений и крупных размеров они также не годятся.

Описанные до сих пор конструкции строят только для низких и средних давлений (самое высшее рабочее давление 25 атм.). Наиболее употребительна величина поверхности нагрева от 50 до 300 м².

3. Водотрубные котлы.

Лишь появление водотрубного котла сделало возможным необычайно быстрое развитие котлостроения последних лет. Величина водотрубных котлов почти неограничена. В Германии существует уже много котлов с поверхностью нагрева значительно более 1000 м² (до 2400 м²), а в Америке строят котлы даже крупнее 4000 м². Малое занимаемое место, большая производительность и хороший коэффициент полезного действия, быстрота подготовки к работе, — все эти важные преимущества водотрубных котлов заставляют почти всегда при новых установках решать выбор в их пользу, вследствие чего подавляющее большинство всех построенных после войны котлов, за исключением очень малых котельных единиц (ниже 70 м² поверхности нагрева), принадлежит к водотрубным котлам.

В зависимости от конструкции водотрубные котлы разделяют на однокамерные и двухкамерные котлы, секционные котлы, вертикально-водотрубные котлы и котлы специальных конструкций (например экранные котлы). Для всех этих конструкций характерно наличие одного или нескольких пучков прямых или изогнутых водяных труб, которые посредством водяных камер или непосредственно соединены с одним или несколькими барабанами.

Однокамерные котлы, в которых все трубы на заднем конце закрыты (так называемые трубы Фильда), а циркуляция обеспечивается второй, внутренней трубой, оказались ненадежными в виду затруднительности их очистки и частого прогорания весьма напряженно работающих труб.

Двухкамерные котлы. Напротив, двухкамерные котлы, у которых ряды труб спереди и сзади входят в водяные камеры, широко распространены. Наиболее известен изображенный на рис. 112, снабженный водяными камерами котел Штейнмюллера, который, примерно, до 250 м² поверхности нагрева имеет один, а при большей поверхности нагрева — два продольных или поперечных верхних барабана. Большей частью эти котлы имеют цепные топки, ступенчатые выносные топки или же топки для угольной пыли и от трех до четырех дымоходов. Между первым и вторым дымоходами обычно помещают перегреватель, а за последним дымоходом — экономайзер или подогреватель воздуха.

Для очень высоких давлений и сильно меняющихся нагрузок двухкамерные котлы, вообще говоря, мало пригодны, так как заключенная между двумя жесткими камерами система наклонных труб слишком мало эластична. Дальнейший их недостаток заключается в том, что при водяных камерах трудно создать большую поверхность нагрева и что большие камеры громоздки и представляют затруднения при перевозке.

Секционные котлы. Секционный котел, по основной мысли своего устройства, отличается от двухкамерного котла лишь тем, что в нем, вместо закрытых камер, для каждого вертикального ряда труб предусмотрена секционная камера или коллектор. Благодаря этому система труб приобретает большую эластичность и способность легче поглощать температурные напряжения.

Особые преимущества секционный котел представляет также благодаря простоте изготовления секций, упрощению и удешевлению перевозки и легкости монтажа. Секционные коллекторы могут изготавливаться серийно и окончательно собираться на заводе, вследствие чего установка их в котле производится на месте весьма быстро. По этой причине секционные котлы обычно дешевле вертикально-водотрубных котлов одинаковой производительности. Кроме того их обслуживание и содержание в исправности не требуют столь обученного персонала (очистка проще и легче), а смелные части для них легче доставать и можно держать на складе. Поэтому, в особенности для предприятий, расположенных далеко от места изготовления котла (например в случае морской перевозки), чаще всего выбирают секционные котлы, которые большинством немецких котельных заводов строятся наряду с двухкамерными и вертикально-водотрубными котлами.

Секционные котлы могут быть построены любого размера и рассчитаны на самые высокие давления. В Америке уже существуют котлы в несколько тысяч кв. метров поверхности нагрева, весьма успешно работающие под давлением около 100 атм. ман., а в Германии, на центральных силовых станциях Клингенберг и Белем, секционные котлы установлены наряду с вертикально-водотрубными котлами. На рис. 113 изображен один из новых секционных котлов.

Вертикально-водотрубные котлы.¹ Вертикально-водотрубные котлы, впервые появив-

¹ Вертикально-водотрубные котлы по-немецки называются «Steilrohrkessel» (т. е. котлы с крутым подъемом труб). Это название, конечно, правильное, чем принятое у нас, так как трубы этих котлов по большей части не вертикальны, а направлены только с большим уклоном.

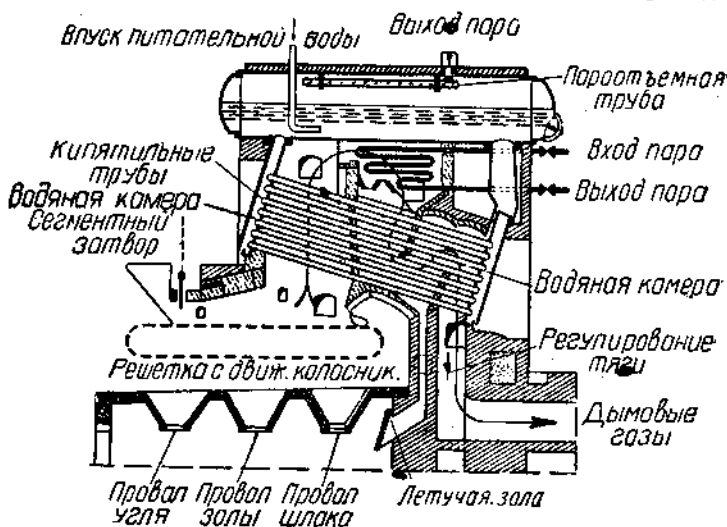


Рис. 112. Двухкамерный котел Штейнмюллера, снабженный решеткой с движущимися колосниками и перегревателем.

нившиеся около 20 лет назад, теперь весьма распространены, особенно в Германии. Для них характерно отсутствие водяных камер, вместо которых на высоте топки расположены один или несколько нижних барабанов, соединенных с лежащими над ними верхними барабанами пучками вертикальных или наклонных трубок. По сравнению с камерными котлами эти котлы обладают более благоприятными условиями циркуляции воды (малые сопротивления благодаря отсутствию камер), рациональным расположением перегревателя, хорошим направлением горячих газов, при-

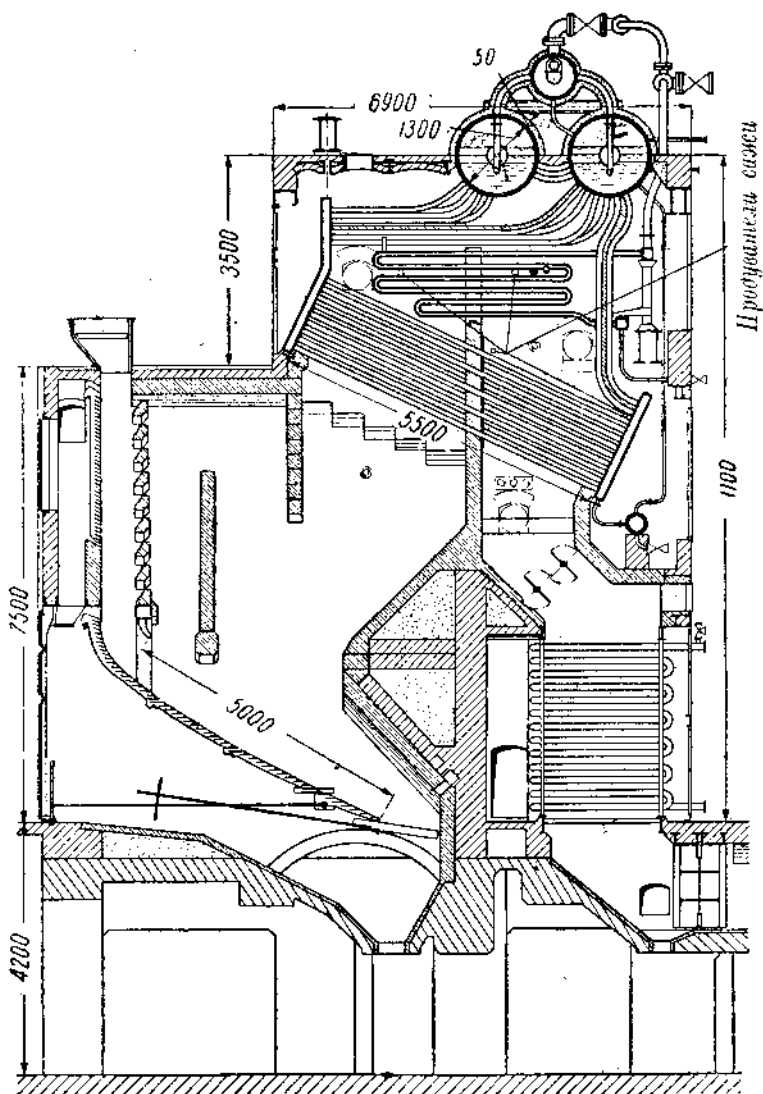


Рис. 113. Секционный котел объединенных котлостроительных заводов в Дюссельдорфе со ступенчатой колосниковой решеткой.]

способностью к самым разнообразным условиям эксплуатации и благоприятной теплопередачей, но самое главное — это отсутствием самих камер с их многочисленными креплениями, затворами люков и т. д. Недостаток этих котлов заключается в затруднительности удаления из труб накипи, в виду чего следует особенно тщательно заботиться об очистке воды.

Вертикально-водотрубный котел с течением времени претерпел существенные конструктивные изменения, и теперь разные заводы строят его совершенно различно. Для современного состояния котлостроения характерно предпочтение конструкции с тремя барабанами. Котлы со многими барабанами (четырьмя или пятью), часто строившиеся еще несколько лет назад, оказались для большинства случаев малоцелесообразными. При высоких давлениях необходимы

очень толстые стенки барабанов, и поэтому для экономии расходов стараются обойтись возможно меньшим числом барабанов. Кроме того у котлов со многими барабанами весьма усложняется схема циркуляции. В последнее время наблюдается даже стремление переходить к котлам с двумя барабанами.

На рис. 114 изображен строящийся заводами «Дюрр» (Dürr) вертикально-водотрубный котел «Гарбе» (Garbe) с выпрессованной ступенчатой доской, образующей одно целое с гладкой частью барабана. Прямые трубы обеспечивают легкую и быструю очистку, благодаря чему эта конструкция особенно уместна там, где приходится иметь дело с непостоянным составом питательной воды. Сменные трубы легко вставляются, причем незатруднительно держать на складе достаточное количество запасных труб. Однако котел «Гарбе» непригоден для давлений выше 30 атм., так как требующиеся для этих котлов специальные барабаны становятся слишком дорогими. Кроме того при сильных напряжениях, свойственных котлам высокого давления, прямые трубы делают котел слишком жестким. При высоких давлениях приходится останавливаться на вертикально-водотрубных котлах с изогнутыми трубами.

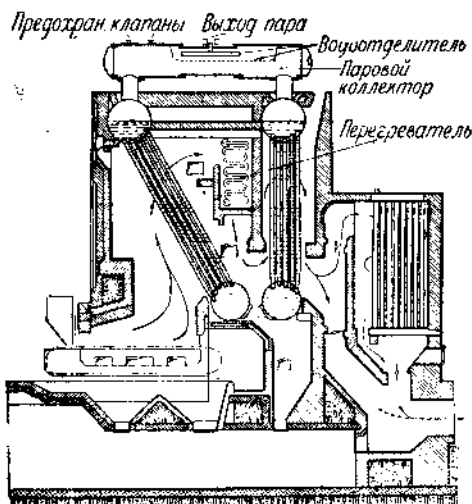


Рис. 114. Вертикально-водотрубный котел «Гарбе», снабженный решеткой с движущимися колосниками.

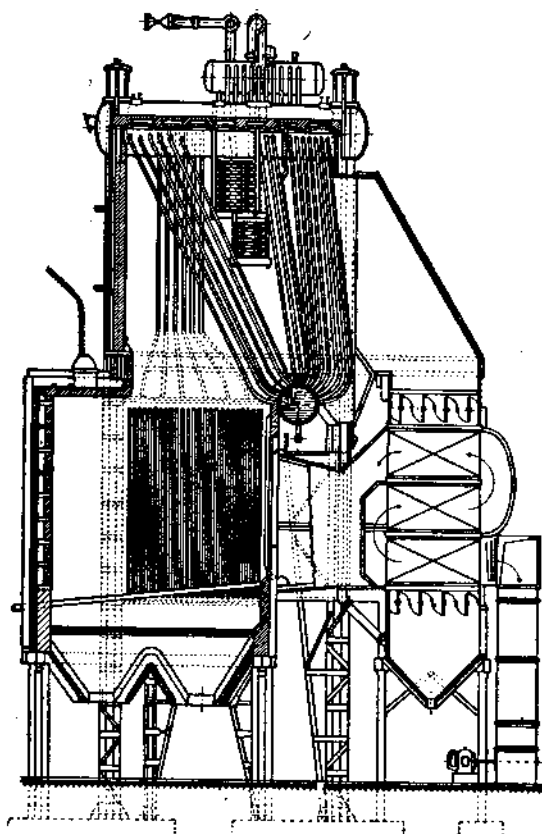


Рис. 115. Вертикально-водотрубный котел «Гумбольдт» с топкой для угольной пыли.

Разные конструкции вертикально-водотрубных котлов отличаются одна от другой главным образом расположением барабанов, формой труб (слабо или сильно изогнутых), но прежде всего — способом обеспечения циркуляции воды. Определенных стандартов для вертикально-водотрубных котлов до сих пор еще не выработано.

В то время как у большинства вертикально-водотрубных котлов нижние и верхние барабаны лежат в поперечном направлении относительно топки, котел «Гумбольдт» (Humboldt, рис. 115), имеет поперечные нижние и продольные верхние барабаны. Фирма Гумбольдт все свои вертикально-водотрубные котлы строит по этому своеобразному способу, т. е. с расположением верхнего котла по направлению циркуляции воды, благодаря чему последняя облегчается и улучшается.¹

¹ Интересна конструкция Мааса (Maas) фирм «Бабкок» и «МАН», соединяющая в некоторых отношениях преимущества обеих конструкций (секционных и вертикально-водотрубных котлов) и хорошо оправдавшаяся на практике (см. K a i s e r, Zeitschr. d. Bayer. Rev. Vereins, 28, 133, 1924. и 30. 1, 1926).

Вертикально-водотрубные котлы¹ пригодны и при очень малой производительности. За последние годы в Германии установлено много таких котлов с поверхностью нагрева менее 100 м².

Экранный котел. Тогда как рассмотренные до сих пор конструкции котлов строятся уже много лет и подверглись лишь за последние годы некоторым изменениям и усовершенствованию для приспособления их к более высоким давлениям, температурам и нагрузкам, с некоторого времени в котлостроении наблюдаются глубокие перемены, вызванные, главным образом, развитием топков для сжигания угольной пыли.

Усвоение того факта, что путем излучения при высоких температурах можно передавать гораздо большие количества тепла, чем посредством теплопроводности и конвекции, и что таким образом можно значительно уменьшить, при равной производительности, размеры котла и до известной степени повысить коэффициент полезного действия, привело к созданию первых экранных котлов чистого типа, у которых сгорание и теплопередача происходят почти одновременно и в одном и том же пространстве, подобно старым внутренним топкам (у котлов с большим водяным содержанием), но при значительно высшем напряжении поверхности нагрева.

В Германии первым настоящим экранным котлом, вступившим в эксплуатацию, был котел Бенсона (рис. 116). Этот котел, работающий с конца 1927 г., в общем, оказался хорошим.¹ Котел высокого давления, работающий при критическом давлении пара (225 атм. ман.), построен чрезвычайно высоким и поэтому занимает весьма небольшую площадь. Угольная пыль вдувается сверху, воспламеняется и отдает большую часть своей теплоты в окружающих поверхность нагрева камерах горения. Газы устремляются книзу и напра-

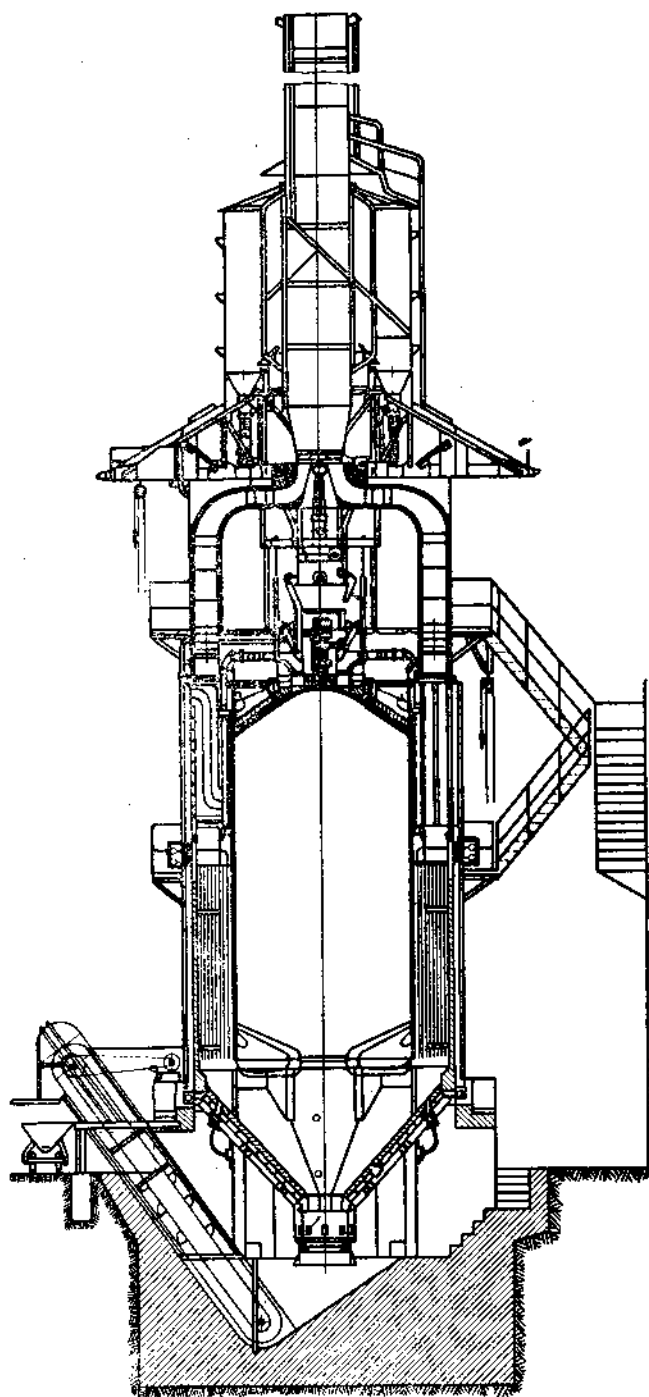


Рис. 116. Котел Бенсона для отопления угольной пылью, установленный на кабельном заводе Сименс-Шуккерт.

¹ См. Gleichmann, VDI-Zeitschr, 72, 1037, 1923.

входят по сторонам снова вверх, проходят через перегреватель и через подогреватель воздуха в дымовую трубу.

На практике уже успели зарекомендовать себя и другие экранные котлы, например котел Форсблада (Forssblad) на силовой станции в Вестеросе в Швеции,¹ дающий до 180 кг пара в час с 1 м² поверхности нагрева, экранный котел Combustion Engineering Corp.,² экранный котел Вуда,³ экранный котел Линке-Геймана, возникший из сконструированного уже несколько десятков лет назад котла Беттингтона,⁴ экранный котел фирмы Kohlscheidungs-gesellschaft⁵ и экранный котел системы Hanomag-Schneider.⁶

Экранный котел в настоящее время находится еще в начале своего развития. Если судить по достигнутым до сих пор прекрасным результатам, он будет играть в близком будущем значительную роль как идеальный аппарат для производства пара.

Котел Фёлькера.

Совершенно повал конструкции котла разработана Фёлькером. Этот котел подробно испытан на особой пробной установке фирмы «Кейльман и Фёлькер» в Берлине.⁷ На рис. 117 изображен небольшой опытный котел системы Фёлькера, общей поверхностью нагрева в 90 м², который был испытан на одной химической фабрике. Котел Фёлькера так сильно отличается от всех других конструкций котлов, что нам необходимо несколько остановиться на существенных особенностях его устройства.

Своеобразие котла Фёлькера заключается, главным образом, в вертикальном расположении одного над другим двух пучков труб, между которыми включен промежуточный барабан. Нижний пучок труб входит внизу в водяной барабан, верхний же — в несколько секций, в которых происходит отделение пара от воды. Каждая секция при помощи верхней паровой трубки и нижней водяной трубки связана с задним паровым барабаном. Отсюда пар, успевший освободиться от увлеченных им частиц воды, уходит сверху в перегреватель, в то время как вода стекает снизу через необогреваемые спускные трубы обратно в нижний барабан.

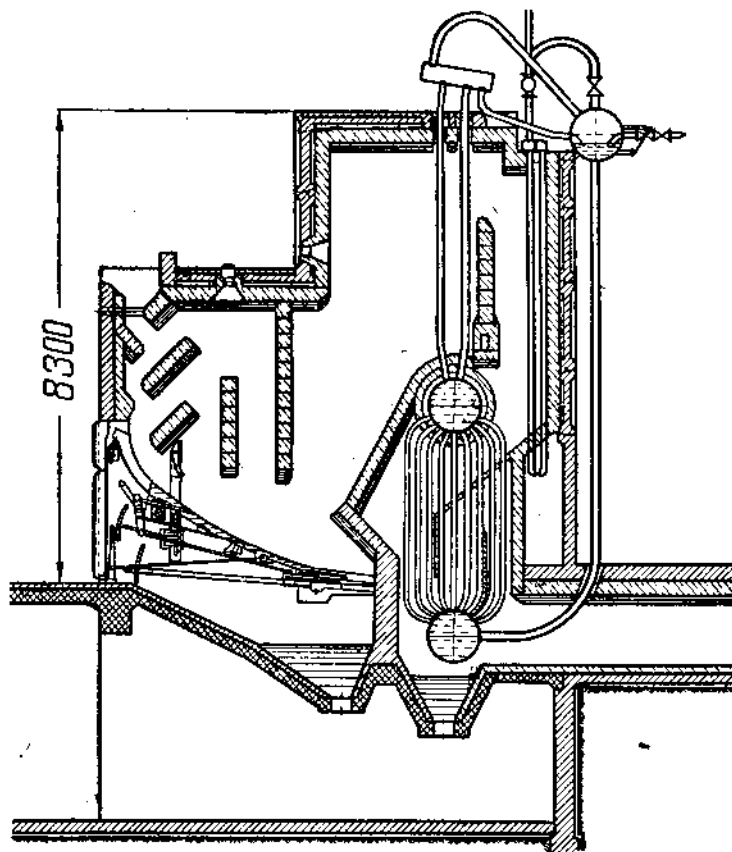


Рис. 117. Опытный котел Фёлькера, конструкции «Кейльман и Фёлькер», с поверхностью нагрева в 90 м², снабженный ступенчатой колосниковой решеткой для бурого угля.

¹ См. Forssblad, Elektrizitätswirtsch., 26, 381, 1927, и Power, 67, 1054, 1927.

² См., между прочим, Combustion, 18, 102, 1928.

³ См. The Engineer, 147, 578, 1929.

⁴ См. стр. 165.

⁵ Arch. f. Wärmewirtschaft, 10, 357, 1929.

⁶ См. Deinel, Zeitschr. d. Bayer. Rev. Vereins, 33, 149, 1929.

⁷ См. Berner, VDI-Zeitschr., 71, 709, 1927; Praetorius, Arch. f. Wärmewirtschaft, 8, 170, 1927.

Возвышающийся над средним барабаном пучок труб обогревается первым. Затем газообразные продукты горения направляются к перегревателю, а оттуда, огибая тщательно изолированный средний барабан, к нижнему пучку труб и, наконец, в боров.

Своеобразная система направления газов вызывает чрезвычайно энергичную, никогда до сих пор не достигавшуюся в котлах циркуляцию воды, которая в противоположность циркуляции в обыкновенных водотрубных котлах с обогреваемыми спускными трубами при всех нагрузках вполне равномерна и устойчива, т. е. не может изменить свое направление на обратное. Вследствие сильного нагревания верхних пучков труб, главное парообразование происходит в них, причем выделяющемуся пару приходится преодолевать давление сравнительно низкого столба воды. Энергичный подъем паровых пузырьков в верхнем пучке труб оказывает засасывающее действие на нижний пучок труб и усиливает движение в последних, а с другой стороны, образующиеся наверху в большом количестве паровые пузырьки имеют возможность на своем пути в паровое пространство проходить без большого сопротивления сквозь низкий столб воды. Далее, сильное нагревание верхнего пучка труб приводит к тому, что даже при растопке циркуляции начинается почти мгновенно, благодаря чему установившийся режим котла достигается весьма быстро без вредных температурных напряжений. Дальнейшего повышения водяной циркуляции Фелькер достигает устройством среднего барабана, который предупреждает закупорку труб образующимися внизу паровыми пузырьками вследствие неизбежного увеличения объема. Если бы это явление не было устранено, оно вызывало бы сильную пульсацию и нарушало циркуляцию воды. Кроме того включение среднего барабана желательно с конструктивной точки зрения, так как благодаря этому трубы делятся на отдельные части, и является возможность уменьшить верхнее суммарное поперечное сечение по сравнению с нижним, что еще более увеличивает скорость циркуляции в верхнем пучке труб.

Чрезвычайно большую подъемную силу в подъемных трубах, вызываемую большим перепадом статического давления в необогреваемых спускных трубах, сильным нагреванием верхних подъемных труб и устройством уравнильного барабана, Фелькер весьма остроумно использует для освобождения пара от воды уже в верхнем пучке труб. Для этой цели он подвешивает там шнек, с сужающимися кверху витками, создающий сильное винтообразное движение. Вследствие вращательного движения смеси воды с паром частицы воды, как более тяжелые, прижимаются к стенкам труб и образуют здесь тонкий, быстро испаряющийся слой воды, тогда как в центре трубы более легкие частицы пара поднимаются, не встречая препятствия со стороны воды. Все более сужающиеся кверху витки шнека усиливают вращение, и в результате поступающий в секционные камеры пар оказывается уже почти сухим.

На основании своих опытов Фелькер полагает, что при плохо очищенной воде на поверхностях шнеков осаждается большая часть образующейся накипи, поверхность же нагрева остается чистой. Действительно, вполне возможно допустить, что сильное смывающее действие воды предупреждает всякое осаждение накипи на трубах. Если это фактически верно, то устройство вставок для винтообразного движения уже по этой одной причине можно считать большим шагом вперед, так как шнеки легко вынуть при всяком очередном осмотре котла и подвергнуть очистке. Кроме того осаждение котельной накипи на шнеках может причинить гораздо меньше вреда, чем осаждение ее на чувствительной поверхности нагрева.

Другим большим преимуществом применения вставок для винтообразного движения является значительное повышение производительности котла. Тонкие, быстро движущиеся по поверхности нагрева слои воды могут поглощать большие количества тепла, благодаря чему при пробных испытаниях удавалось доводить напряжение поверхности нагрева до $185 \text{ кг/м}^2 \text{ ч}$. Здесь дело происходит в общем так же, как в рассматриваемом ниже котле «Атмос», удельная производительность которого, как известно, тоже высока, с той лишь разницей, что в котле Фелькера посредством винтовых поверхностей достигается быстрое вращение воды в неподвижной трубе, тогда как в котле «Атмос» вращаются сами трубы.

Несмотря на вертикальное расположение конструкции, высота котла Фелькера в общем невелика. Это объясняется тем, что топочное пространство лежит на высоте верхнего пучка труб, а нижний барабан и часть нижних труб находится ниже уровня колосниковой решетки.

Таким образом, котел Фелькера, по сравнению с обычными конструкциями, представляет ряд важных преимуществ. При этом его конструкция так проста, а удельная производительность так высока, что и расходы по первоначальному обустройству оказываются скорее ниже, чем выше, по сравнению с другими конструкциями. Производимые в настоящее время испытания в условиях эксплуатации покажут, оправдаются ли надежды, возлагаемые на этот котел.

Котел Ла Монт. Американская фирма «La Mont Corporation» также разработала совершенно новую конструкцию паровых котлов. Принцип их устройства заключается в том, что в ряд вертикальных обогреваемых снаружи труб вводится сверху в сравнительно небольшом количестве вода, стекающая по стенкам труб и образующая на них тонкую водяную оболочку. Подвод воды регулируется таким образом, что стенки труб постоянно омываются водой. Главная часть воды испаряется попутно в трубе, избыток же вместе с паром переходит в находящийся под трубами коллектор, а затем поступает в барабан, где пар отделяется от воды, направляясь затем в паровую магистраль.

Стекающая вниз вода, вследствие прилипания к стенкам, образует на них тонкий движущийся слой. Циркуляционный насос обеспечивает постоянное и энергичное движение воды, вследствие чего все образующиеся пузырьки пара немедленно отводятся, так как сопротивление весьма мало. Поэтому на поверхности нагрева не могут возникать недопустимые тепловые напряжения. Кроме того благодаря быстрому движению воды на поверхности нагрева не должна, по видимому, осажаться накипь. Выделяющиеся из воды соли оседают в виде ила в нижнем барабане и от времени до времени удаляются продувкой.

Опыт эксплуатации котла Ла Монта на большом американском заводе водного газа был весьма удачен.¹

4. Котлы высокого давления.

На развитие котлостроения и разработку типов топочных устройств в последние годы повлияли два чрезвычайно важных технических события: введение отопление угольной пылью и работы паром высокого давления, практически испытанных в различных условиях эксплуатации. Пожалуй, трудно указать какое-нибудь техническое новшество в области котлостроения, которое не стояло бы в прямой или косвенной связи с обоими этими достижениями.

Успехи в области повышения рабочих давлений весьма значительны. При этом характерно не столько повышение уже давно достигнутого в отдельных установках давления, сколько общее внедрение этих давлений в практику и испытание их во множестве заводских установок. Рабочее давление в котле, равное от 30 до 40 атм. ман., в настоящее время можно рассматривать как норму, вполне оправдавшуюся в разнообразных условиях при отоплении каменным углем, бурым углем, угольной пылью и газом вертикально-водотрубных и секционных котлов самых разнообразных типов. Это широкое внедрение в практику высоких давлений, на которые еще несколько лет назад смотрели как на наивысший достижимый предел, несомненно представляет не менее важный успех, чем развитие и конструктивная разработка новых типов котлов для работы при более высоких давлениях.

Обычные для средних давлений типы секционных и вертикально-водотрубных котлов применимы, без существенных конструктивных изменений, и для высоких давлений. Вместо клепаных барабанов ставят сварные или бесшовно-кованые; толщина стенок увеличивается соответственно более высоким напряжениям. Существуют уже вертикально-водотрубные и секционные котлы для давлений в 100 атм. ман. и выше, например, на центральной силовой станции в Мангейме и на силовой станции рудника Ильзе. На рис. 118 изображен котел высокого давления Мангеймской центральной силовой станции.

С эксплуатационной точки зрения, работа паром высокого давления создает некоторые затруднения. Эти затруднения, как показал опыт эксплуатации многочисленных котлов, вполне преодолимы, но требуют особой тщательности обслуживания и надзора. В особенности необходима весьма основательная подготовка питательной воды, так как чувствительность материалов котла в отношении разведения возрастает с повышением давления.²

Термические преимущества и экономические перспективы работы паром высокого давления рассмотрены в одном из дальнейших разделов.³

5. Специальные конструкции для котлов высоких давлений.

В течение ряда лет производились обширные опыты, клонившиеся к полному преобразованию способов производства пара весьма высоких давлений. При этом преследовалась цель—

¹ См. Arch. f. Wärmewirtschaft, 8, 170, 1927.

² См., между прочими источниками, Berl. Forschungsheft, 295, и VDI-Zeitschr. 71, 1476, 1927; далее, Gleichmann VDI-Zeitschr., 72, 1037, 1928, и Anderson, Engineering, 125, 25 и 55, 1928.

³ См. стр. 231—233.

понижить расходы, связанные с эксплуатацией котлов нормального устройства, и повысить их надежность в работе. Ниже вкратце описаны четыре наиболее известных способа достижения этой цели, уже хорошо разработанные на практике.

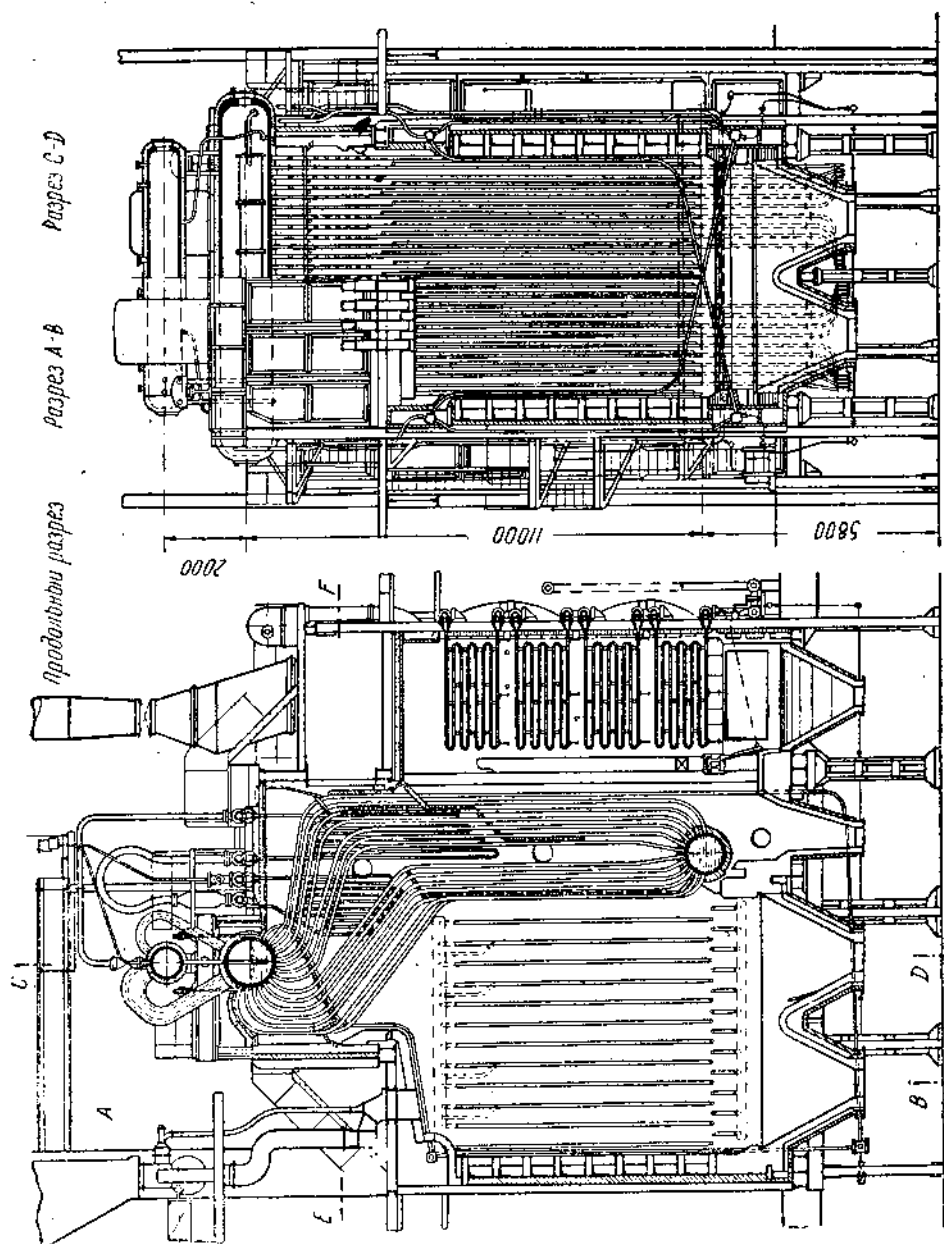


Рис. 118. Котел «Ганома» высокого давления (рабочее давление 110 атм. ман.)

Котел Шмидта-Гартмана. Фирма Die Schmidt'sche Heissdampfgesellschaft разработала способ (рис. 119), при котором пар производится в две стадии. В пучке труб, помещенном в самой тонке, развивается пар весьма высокого давления, отдающий затем свою теплоту испарения в помещенном вне тонки барабане. Пар проходит по эжевикам через этот барабан и снова превращается в воду, которая, далее, в подогревателе отдает собственно питательной воде еще часть своей теплоты, после чего направляется обратно в кипяточные трубки. Так создается непрерывный кругоборот, при котором образующийся в топочной камере пар служит лишь переносчиком теплоты. Если не считать небольших потерь от неплотностей, при этом цикле не происходит никакой потери вещества, что дает возможность применять при однократном напол-

нении системы труб абсолютно чистую воду. Этим устраняется образование накипи, коррозия и т. д. Главное парообразование происходит в барабане, в который вводится уже сильно подогретая вода. Образующийся здесь от косвенного нагрева паром новый пар направляется в перегреватель, омываемый дымовыми газами.

С начала 1926 г. в Вернигероде действует опытная установка на 60 атм. ман., которая, по имеющимся сведениям, оказалась хорошей во всех отношениях. Метод Шмидт-Гартмана с успехом испытан и в паровозостроении.¹ Как главнейшие преимущества этого метода, можно указать малую занимаемую площадь, малую стоимость первоначального оборудования, большую надежность в эксплуатации и доступность всех частей.

Котел Лёффлера. Аналогична по своей основной мысли система проф. Лёффлера (рис. 120), в которой пар производится также двухступенчатым способом. Однако в этой системе оба цикла

обращения воды связаны между собой. В первом ходе тонки находятся только трубы перегревателя. Подаваемый в эти трубы насосами особого устройства насыщенный пар подвергается здесь высокому перегреву, а затем вдвигается через снабженную многочисленными отверстиями трубу в водяное пространство лежащего вне тонки барабана. Вследствие столь сильного подвода тепла вода испаряется. Часть образующегося насыщенного пара направляется обратно в перегревательные трубки первого дымохода, в то время как главная часть пара проходит через перегреватель второго дымохода, после чего направляется в машины.

От этого метода ожидают в общем таких же преимуществ, как и от системы Шмидт-Гартмана (дешевизну, надежность в эксплуатации, легкую доступность), однако котел Лёффлера экономичнее только при очень высоких давлениях. Для пуска в ход необходим небольшой нормальный добавочный котел, чтобы с самого же начала подводить к кипяtilьным трубам перегретый пар.²

В настоящее время в Вэне-Флорисдорфе работает котел Лёффлера, оборудованный топкой с движущимися колосниками и рассчитанный на рабочее давление в 120 атм. при температуре пара в 500° и производительности в 8000 кг пара в час. Другой котел этой системы установлен на силовой станции в Вилговицах. Он рассчитан на такое же давление при максимальной производительности, соответствующей 6000 квт. Этот котел имеет тонку для угольной пыли. Там же стали строить еще два котла такой же величины и конструкции.

Котел «Атмос». Шведским инженером Бломквистом разработана другая специальная конструкция для пара высокого давления, так называемый котел «Атмос» (рис. 121). Здесь парообразование происходит, как и в нормальных конструкциях котлов, непосредственно в топочной камере, но в отличие от всех существовавших до сих пор котлов — в горизонтально расположенных вращающихся кипяtilьных трубах большого диаметра (около 300 мм). Вода вводится в эти трубы через особо тщательно изготовленные и уплотненные сальники; с другого конца труб через такие же сальники отводится пар.

Преимущества этой конструкции заключаются в необычайно высокой теплопередаче. Тем не менее, кипяtilьные трубы мало напряжены, так как вследствие центробежной

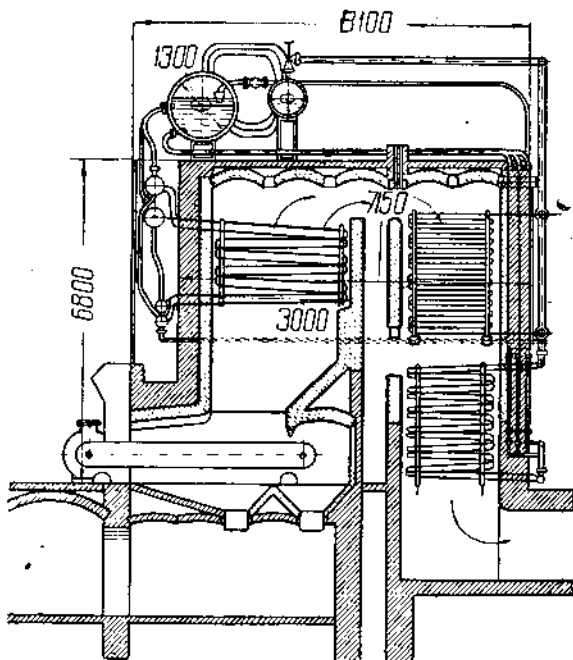


Рис. 119. Схематическое изображение котла высокого давления «Шмидт-Гартман».

¹ Подробнее см. Wagner, Die Schmidt-Hochdrucklokomotive. VDI-Zeitschr., 72, 1521, 1928.

² Подробнее см. Löffler, VDI-Zeitschr., 69, 1149, 1925; 72, 1353 и 1503, 1928.

силы все образующиеся пузырьки пара немедленно отбрасываются от стенок внутрь трубы.¹

Недостатком являются очень чувствительные сальники, в которых легко образуются неплотности.

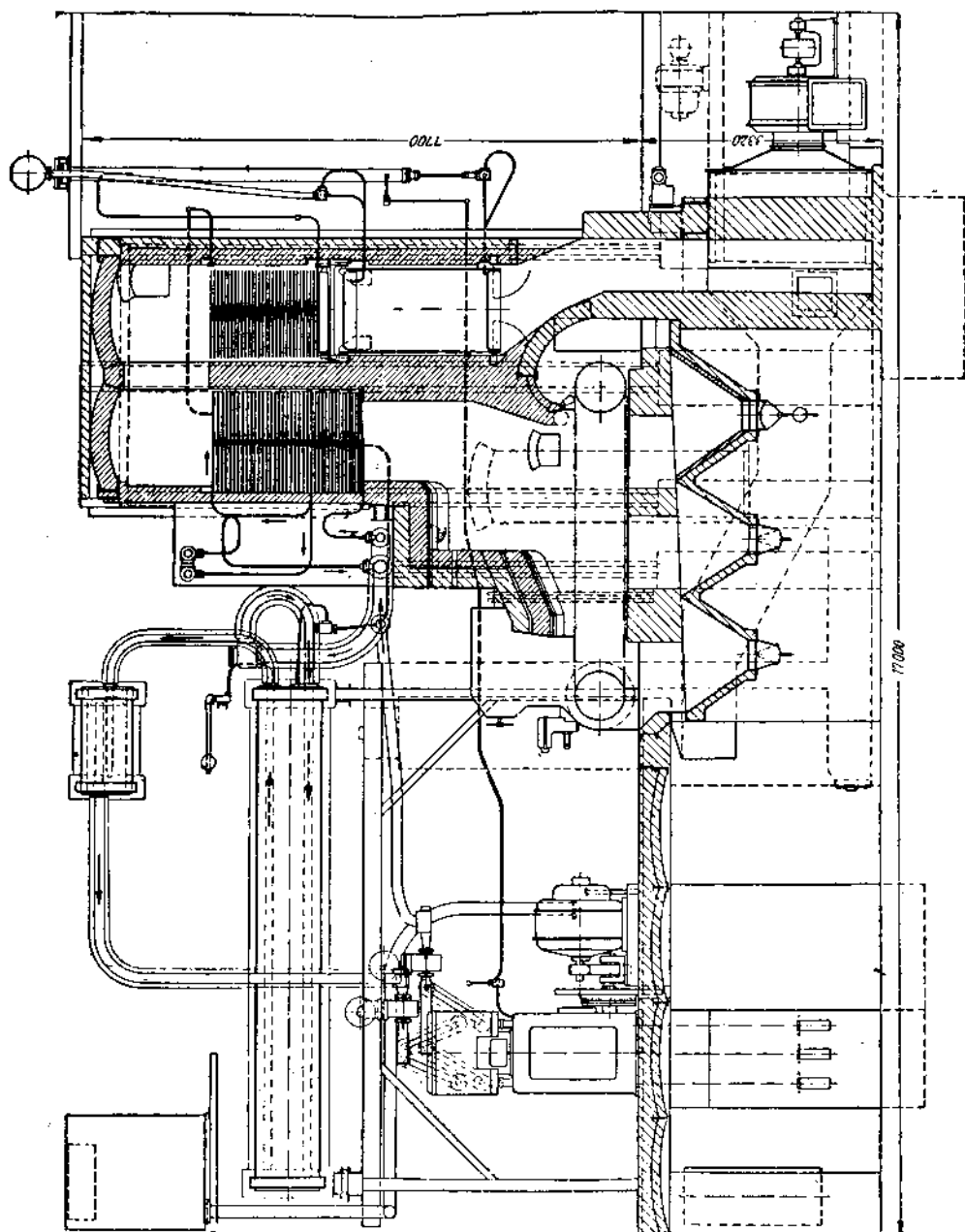


Рис. 120. Схематическое изображение котла высокого давления Шеффера.

Кроме различных, уже несколько лет безупречно работающих в Швеции, котлов «Атмос», несколько установок с такими котлами существует также в Германии и Франции.²

¹ Вернее, отгесняются от стенок трубы водой, прижимаемой к ним центробежной силой. *Прим. пер.*

² Относительно конструктивных подробностей и результатов эксплуатации см. J o s s e, VDI-Zeitschr., 69, 169, 1925 и Arch. f. Wärmewirtschaft, 9, 46, 1928.

Котел Бенсона. Четвертым практически испытанным способом является способ Бенсона. Выше (см. рис. 116 на стр. 182) уже кратко описан самый крупный из работающих в настоящее время котлов Бенсона. Это — экранный котел чистого типа. Способ Бенсона сводится к тому, что воду посредством насосов высокого давления доводят до критического давления (225 атм. абс.), а затем нагревают. Как известно, при критическом давлении вода переходит прямо в перегретый пар, как только будет достигнута критическая температура (374°). При этих условиях вода и пар имеют одинаковый объем.¹ В то время как при низких давлениях приходится чрезвычайно заботиться о быстрой и надежной автоматической циркуляции воды, необходимой для немедленного удаления образующихся пузырьков пара от поверхности нагрева, при способе Бенсона можно обойтись без автоматической циркуляции воды, а вместе с тем и без дорого стоящих барабанов. В этом котле вода просто прогоняется по системе труб, причем производи-

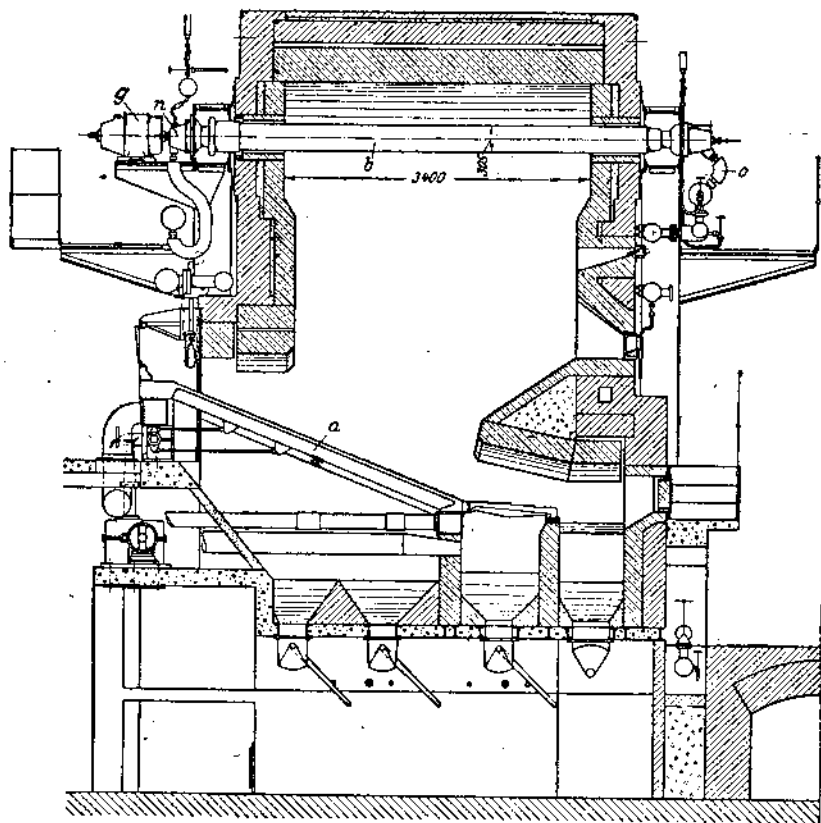


Рис. 121. Котел высокого давления «Атмос».

тельность насосов урегулирована таким образом, чтобы из труб выходил пар критического давления, который затем обычным образом перегревается в змеевиках. По сравнению с нормальными вертикально-водотрубными котлами здесь достигается, таким образом, существенное упрощение конструкции.

Как уже упомянуто выше, опыт эксплуатации котлов Бенсона на кабельном заводе фирмы Сименс-Шуккерт в Берлине оказался в общем удачным.²

В заключение следует сказать, что специальные конструкции для пара высокого давления находятся еще в первой стадии своего развития. Удастся ли им укрепиться в экономическом отношении, в настоящее время сказать трудно. Однако не подлежит сомнению наметившаяся во всех отраслях промышленности тенденция к повышению давления в котлах, и можно ожидать, что уже в ближайшие годы решится вопрос о том, завоюют ли уже известные конструкции

¹ См. рис. 36 — 40 на стр. 87—88.

² См. A b e n d r o t h, VDI - Zeitschr., 71, 657, 1927, и G l e i c h m a n n, VDI - Zeitschr., 72, 1037, 1928.

котлов и область давлений, примерно, между 60 и 225 атм. абс., или же, что более правдоподобно, производство пара пойдет в будущем по совсем новым путям.¹

6. Котлы специального назначения.

Котлы на отходящих газах. Так называют котлы, в которых используется для производства пара отходящая теплота заводских топочных установок. Отходящие газы заводских печей имеют температуру не менее 500°, а часто и значительно выше, и, таким образом, если не использовать их теплосодержание, то это повлечет за собой большие потери тепла. Устанавливая котлы, возвращающие в виде пара большую часть отходящей теплоты, мы часто получаем возможность покрыть таким образом главную часть потребности в паре, вследствие чего подобные котлы за последние десятилетия широко привились в разных отраслях промышленности.

Принципиальное различие между котлами, отапливаемыми топливом и теплом отходящих газов заключается в том, что в первых разность температур между горячими газами и котельной водой значительно выше, чем во вторых, а также в том, что в первых значительная часть теплоты передается излучением, тогда как в последних почти вся теплота передается посредством теплопроводности. Поэтому в котлах на отходящих газах пузырьки пара образуются значительно медленнее, в виду чего быстрая и регулярная циркуляция воды в них менее важна, чем в обычных котлах. Здесь главным требованием является возможно лучшая теплопередача, достигаемая в водотрубных котлах посредством тесных промежутков между трубами, а в котлах с дымогарными трубками — посредством малого диаметра труб. Но, так как всякое сужение поперечного сечения увеличивает сопротивление тяги, приходится так конструктивно разрабатывать каналы для газов (устранение резких закруглений, мертвых углов и т. д.), чтобы по возможности уменьшать всякие добавочные потери тяги. Далее, крайне важно постоянное сохранение поверхности нагрева чистой и свободной от сажи и накипи.

Для использования отходящей теплоты обычно применяют котлы с дымогарными трубками, но иногда и водотрубные котлы. Сравнение тех и других показывает, что котлы с дымогарными трубками обычно более целесообразны. При меньших потерях тяги они отличаются более высоким напряжением поверхности нагрева. Поскольку, кроме того, их размеры при равной поверхности нагрева меньше, чем у водотрубных котлов, котлы с дымогарными трубками занимают меньшую площадь, соответствующую данной производительности и стоят значительно дешевле. Крупные недостатки, присущие котлу с дымогарными трубками при непосредственной топке, здесь не играют роли, так как трубы только что названных котлов портятся и становятся неплотными только при быстрых и сильных температурных колебаниях (например при открывании топочных дверей). Эти колебания неизбежны в обычных котлах, в котлах же, использующих отходящее тепло, их никогда не бывает. Вследствие этого, как показывает практика, расходы на ремонт рассматриваемых котлов не выше, чем при водотрубных котлах.

Сажу и летучую золу из котлов с дымогарными трубками удаляют весьма просто. Очистка водотрубных котлов гораздо сложнее и всегда несовершенна. Зато накипь из водотрубных котлов удалять легче, вследствие чего при употреблении котлов с дымогарными трубками необходима основательная очистка воды. Впрочем, обстоятельные опыты показали, что благодаря медленности и равномерности парообразования в котлах на отходящих газах накипи осаждается в них гораздо меньше, чем в сильно напряженных обычных котлах.²

Итак, в большинстве случаев применение котлов с дымогарными трубками представляется более целесообразным. Впрочем, при большой производительности и более высоких давлениях иногда предпочтение отдают водотрубным котлам, обычно с крупным наклоном кипяtilельных труб.

Добавочные котлы высокого давления. Преимущества работы паром высокого давления в силовом хозяйстве весьма значительны, особенно в предприятиях, нуждающихся, помимо энергии, еще и в теплоте, так как всю потребную энергию или, по крайней мере, большую ее часть можно чрезвычайно дешево производить в машинах с противодавлением. Но так как на многих

¹ О добытых до настоящего времени данных и об экономических перспективах рассмотренных нами систем подробно докладывали Глейхман, Лёффлер, Гартман и Пфандер на втором собрании членов Комиссии для изучения установок высокого давления при Объединении электротехнических предприятий (сентябрь 1927 г., Берлин); см. изданную Объединением специальную брошюру.

² См. Rowe, 63, 116, 1926.

предприятиях все еще работают котлы с жаровыми трубами и так как полный переход на работу паром высокого давления требует установки новых котлов соответствующего типа, что связано с весьма значительными капитальными затратами, то во многих случаях, особенно если котлы низкого давления с жаровыми трубами находятся еще в хорошем состоянии, их замена оказывается слишком дорогой, и экономичность работы на высоком давлении приходится ставить под вопрос.

Интересное предложение, направленное к уменьшению расходов на первоначальное обзаведение, выдвинуто «Обществом добавочных котлов высокого давления». Общество рекомендует в существующий котел с жаровыми трубами или водотрубный встраивать небольшой добавочный котел.¹ В нормальном котле при этом попрежнему производят пар низкого давления для потребителей тепла, тогда как в добавочном котле производят пар высокого давления для машин, работающих с противодавлением. Таким образом не только достигается улучшение термических условий работы машин, но и значительное повышение производительности котла при той же занимаемой площади и лучшее использование отходящих газов, т. е. более высокий коэффициент всей установки.

В конструктивном отношении добавочный котел состоит из U-образно изогнутых труб, которые заходят сзади в жаровые трубы и вне потока дымовых газов одним концом ввальцованы в переднюю стенку маленького барабана, тогда как другой конец свободно входит в заднюю часть того же барабана. Последний разделен перегородкой на две части. Питательная вода входит в переднюю часть барабана и прогоняется насосом через кипятильные трубы, из которых она, уже в виде пара, выходит в заднюю часть барабана. Последняя соединена с сухопарником.

Добавочные котлы этого типа с успехом испытывались в экспериментальных установках.² Практического значения они еще не приобрели, так как их конструктивная разработка пока несовершенна. Если недостатки конструкции удастся устранить, то описанный способ производства пара высокого давления может оказаться иногда вполне целесообразным для предприятий среднего и малого размера.

Ртутные котлы. В Америке уже несколько лет ведутся опыты работы паровых турбин, вместо обычных водяных паров, на парах ртути. Последние имеют перед водяными парами то преимущество, что их давления, даже при высоких температурах испарения, сравнительно низки.³ В ртутнопаровых турбинах низкого давления, за которыми включается обыкновенная паровая турбина низкого давления, можно достигнуть гораздо более высоких коэффициентов полезного действия, чем в машинах, работающих водяным паром высокого давления. По идее Эммета построено уже несколько крупных ртутнопаровых установок, которые до настоящего времени показали себя с хорошей стороны.⁴

Спроектированный Эмметом ртутнопаровой котел отопляется угольной пылью и состоит из вертикальных, сверху круглых и снизу шестигранных, труб, сваренных между собой. Дымовые газы проходят по этим трубам и заставляют испаряться омывающую эти трубы ртуть. Подробное устройство котла неизвестно.

Несмотря на удовлетворительные результаты, достигнутые в Америке с ртутнопаровыми установками, их экономические перспективы, главным образом в виду весьма высокой стоимости ртути, весьма сомнительны. Однако не исключена возможность того, что удастся найти другое, более дешевое вещество, которое в области высоких температур сможет с выгодой заменить водяной пар.⁵

Электропаровой котел. Для предприятий, располагающих водяной силой, используемой лишь в течение части дня, часто оказывается выгодным заставлять работать свои гидравлические двигатели и в остальное время, чтобы полученная таким образом избыточная электрическая энергия служила для производства пара в котле с электрическим нагревом. Этот пар аккумулируют, и в рабочее время он применяется для уравнивания колебаний нагрузки.

¹ Патенты Крёпелина.

² См. Die Wärme, 49, 319, 1926.

³ См. рис. 43 на стр. 90.

⁴ См., в числе других источников, Münzinger, Höchstdruckdampf (J. Springer, Берлин, 1924); далее, P o w e r, 65, 566, 1927, и Arch. f. Wärmewirtschaft, 8, 191, 1927.

⁵ Предложенная Д о у (Dow) окись дифенила (см. Mechanical Engineering, 48, 815, 1926, и VDI-Zeitschr., 71, 193, 1927), согласно новейшим исследованиям, несмотря на свои выгодные термические особенности, не годится как рабочее вещество.

Хотя применение ртутнопаровых установок действительно вызывает большие сомнения, однако в новейшее время появляются сведения об этих установках крупных размеров. См. 10 000 kW Mercury-Turbine Plant. Engineering, 16 января 1931 г. Прим. ред.

Различают три главных вида электропаровых котлов: котлы с косвенным и прямым нагревом посредством электрического сопротивления и котлы с электродами. Система косвенного нагревания применяется для напряжений до 500 вольт (обычно для небольшой производительности), прямое нагревание — примерно до 1000 вольт (для средней производительности) и только для переменного тока), а электродное нагревание — для больших количеств энергии и трехфазного тока высокого напряжения до 20 000 вольт. На конструктивных подробностях мы здесь останавливаться не можем.¹

§7. Арматура котлов.

Каждый паровой котел снабжают разными приспособлениями, причем некоторые из них, служащие целям безопасности, предписаны законом. К числу важнейших дополнительных устройств принадлежат: приспособления для питания, запорные и спускные приспособления, водоуказательные приспособления, предохранительный клапан и манометр.

Питательные устройства. Каждая котельная установка должна иметь не менее двух взаимно-независимых питательных приспособлений.² Обычно при этом подразумеваются поршневые насосы, пароструйные насосы (инжекторы) и центробежные насосы, чаще всего приводимые в действие паром или электричеством. В новых и более крупных установках в настоящее время обычно пользуются центробежными насосами. Каждое из двух питательных приспособлений должно быть настолько мощным, чтобы оно могло подавать в котлы вдвое больше воды, чем испаряется при полной нагрузке.

Для того чтобы при разных нагрузках достигнуть постоянства уровня воды в котле, часто применяют автоматические регуляторы питания, которые вполне себя оправдали на практике.³ Тем не менее, совершенно необходимо постоянное наблюдение за уровнем воды со стороны кочегара, так как даже самые лучшие регулирующие приспособления иногда могут испортиться.

Питательный трубопровод должен быть снабжен возвратным клапаном, который при остановке питательных приспособлений закрывается давлением котельной воды. Кроме того должна быть устранена возможность ухода воды из котла через питательный трубопровод при неплотности возвратного клапана. Устье питательной трубы должно находиться в водяном пространстве, но возможно выше (чуть-чуть ниже самого низкого уровня воды).

Запорные и спускные приспособления. Каждый котел должен быть снабжен запорным приспособлением, посредством которого он мог бы быть изолирован от паропровода. Далее, должны быть предусмотрены один или несколько вентилей или кранов в наиболее низко расположенной части котла, через которые котел можно было бы опорожнять или продувать для выпуска газа.

Водоуказатели. Для безопасности эксплуатации весьма важно наличие надежных водоуказательных приборов. Законом предписываются два таких прибора, из которых по крайней мере один должен представлять собой водоуказательное стекло. В качестве второго прибора можно применять пробные краны или вентили. Каждое из обоих приспособлений должно быть независимо от другого соединено с пространством внутри котла посредством слабо изогнутых трубок, не подвергающихся воздействию горячих газов.

Надежное и точное определение уровня воды имеет исключительно важное значение для безопасной работы парового котла. Действие большинства водоуказателей основано на известном законе сообщающихся сосудов, согласно которому при равном давлении уровень воды в двух соединенных между собой сосудах стоит одинаково высоко. Однако при работе котлов большие затруднения возникают от того, что при сильно колеблющейся нагрузке уровень воды в котле колеблется часто в весьма широких пределах, вследствие бурления поверх-

¹ Подробнее см., между прочим, в книге K r a t o c h w i l ' я, *Elektrowärme als Mittel zur Erhöhung des Stromverbrauches*, 2 изд. R. Oldenbourg, Мюнхен и Берлин, 1927.

² Обязательное постановление НКТ от 2 сентября 1929 г. № 287. *Прим. ред.*

³ Широко известны уже несколько лет успешно применяемые в многочисленных установках регуляторы уровня воды Ганнемана. Отсутствие сколько-нибудь детальных сведений об автоматическом питании паровых котлов является существенным пропуском в книге Преториуса. Невозможность увеличивать объем этой книги заставляет ограничиться приведением только некоторых указаний на русскую литературу по этому предмету.

Инж. М. М. Р а б и н о в и ч, Автоматическое питание паровых котлов, Ленинград, 1926 (в книге приводится между прочим описание приборов Ганнемана).

Инж. М. С. Ш к р о б, Питание котлов высокого давления, Москва, 1930 (регуляторы питания системы «Сорес» и «Ascania»). *Прим. ред.*

ности воды. Небольшое засорение или неплотность в водоуказательном стекле или в соединительных трубках могут повлечь за собой совершенно неверные показания, почему постоянный контроль над этими приспособлениями крайне необходим. Следует рекомендовать частую продувку трубок.

Далее, чрезвычайно важно, чтобы кочегар мог ясно видеть уровень воды. Водоуказательное стекло должно быть хорошо освещено и расположено так, чтобы кочегар мог все время наблюдать за ним с своего места. В последнее время, особенно при котлах высоких типов, помимо предписанного законом водоуказательного стекла на высоте котла, применяют *сниженные указатели уровня воды*, приводимые в действие поплавками. При таких указателях отсчет производится на высоте глаза. Другие приборы снабжены рефлекторами, ярко освещающими уровень воды в стекле, благодаря чему он хорошо виден на значительном расстоянии и различим даже в случае помутнения стекла. Большое затруднение, особенно при высоких давлениях, представляет выбор материала для водоуказательного стекла. Стекло должно обладать большой сопротивляемостью не только в отношении механических, но и химических воздействий и не должно терять свою прозрачность. Помутневшие стекла, не позволяющие точно различать уровень воды, следует немедленно сменить.

Установленный для данного котла наипизший уровень воды должен быть обозначен на стенке котла особой чертой и буквами «Н. У.». Помимо этого, он должен быть ясно отмечен и на водоуказательном стекле.

Предохранительный клапан. Другим приспособлением, весьма важным для безопасной работы котла и поэтому предписанным законом, является предохранительный клапан, поперечное сечение которого точно устанавливается для каждого данного котла. При достижении максимального, установленного для данного котла давления предохранительный клапан должен выпускать наружу образующийся избыток пара. Для стационарных котлов обычно применяют клапаны, нагруженные грузами, для передвижных котлов — клапаны, нагруженные пружинами. При этом в настоящее время почти всегда пользуются клапанами с *высоким подъемом*, составляющим не менее четверти диаметра клапана. Эти клапаны поднимаются быстрее и выше обыкновенных клапанов, и благодаря этому даже при внезапном сильном сокращении отъема пара и усиленной топке в котле не может образоваться недопустимое давление.

Манометр. Далее, каждый котел должен быть снабжен надежным, градуированным на атмосферы, манометром, на циферблате которого отчетливой меткой должно быть обозначено максимальное разрешенное давление. Манометр должен быть расположен так, чтобы отчеты на нем удобно было производить с места кочегара.

Фирменная табличка. Наконец, к оборудованию котла принадлежит фирменная табличка с обозначением максимального давления котла, завода, построившего котел, текущего заводского номера и года изготовления.

8. Производительность котла.

Удельное напряжение котла, так называемое напряжение поверхности нагрева, представляет собой часто применяемый на практике масштаб для определения производительности котла. Обычно напряжение поверхности нагрева указывают в $\text{кг}/\text{м}^2 \text{ ч}$. Другими словами, количество пара, производимое в час одним кв. метром поверхности нагрева, является мерой напряжения котла. Однако при этом необходимо принимать во внимание два обстоятельства:

1. Теплопередача в разных местах поверхности нагрева совершенно различна, а с нею меняется и количество испаряемой воды. В первом дымоходе напряжение поверхности нагрева часто бывает в 20 раз больше, чем в последнем дымоходе. При определении напряжения котла необходимо исходить из некоторого *среднего* значения. Последнее вычислить легко, для чего нужно лишь разделить полное произведенное в час количество пара на число квадратных метров.

2. Выраженное в $\text{кг}/\text{м}^2 \text{ ч}$ напряжение поверхности нагрева не является абсолютно точным масштабом для суждения о котле, так как теплосодержание введенной в котел воды и произведенного пара может быть весьма различным. Если, например, в котел без экономайзера вводят воду при температуре в 50° , т. е. содержащую 50 кал/кг, и если теплосодержание насыщенного пара составляет 665 кал/кг, то при напряжении поверхности нагрева в $25 \text{ кг}/\text{м}^2 \text{ ч}$ средний подвод тепла составит $(665 - 50) \times 25 = 15400 \text{ кал}/\text{м}^2 \text{ ч}$. Если же питательная вода уже подогревается в экономайзере до 120° , то при равном напряжении поверхности нагрева подвод тепла составит $(665 - 120) \times 25 = 13600 \text{ кал}/\text{м}^2 \text{ ч}$.

Таким образом, истинное напряжение поверхности нагрева будет во втором случае на $\frac{15400 - 13600}{15400} = 11,7\%$ меньше, хотя количество испаренной воды в обоих случаях одинаково. Поэтому и выходит, что котлы, работающие со значительным подогревом воды, часто отличаются весьма высоким кажущимся напряжением поверхности нагрева.

Итак, обычай указывать напряжение поверхности нагрева в $\text{кг/м}^2 \text{ ч.}$, общераспространенный и удобный, все же, как показывает приведенный пример, часто вводит в заблуждение. Для точных расчетов и сравнений рекомендуется указывать напряжение поверхности нагрева в $\text{кал/м}^2 \text{ ч.}$ или же относить производимое количество пара к нормальному пару, т. е. к подводу теплоты в 640 кал/кг.

В таблице 18 приведены средние значения напряжения поверхности нагрева для важнейших типов котлов.

ТАБЛИЦА 18.

Нормальные значения напряжения поверхности нагрева котлов (в нормальном паре) для котлов разных конструкций.

	Напряжение поверхности нагрева			Подвод теплоты		
	Старые констр.	Новые констр.	Максимальные значения	Старые констр.	Новые констр.	Максимальные значения
	$\text{кг/м}^2 \text{ ч.}$			$1000 \text{ кал/м}^2 \text{ ч.}$		
Котлы с жаровыми трубами	18	25	30 — 40	11,5	16	19,2 — 25,6
Котлы с жаровыми и дымогарными трубами . .						
Водотрубные котлы с пологим наклоном труб . . .	20	30	35 — 60	12,8	19,2	22,4 — 38,4
Водотрубные котлы с крутым наклоном труб . . .	25	35	40 — 90	16	22,4	25,6 — 57,5
Экранные котлы	—	70	100 — 150	—	41,8	64,0 — 96

III. ОБМУРОВКА ТОПКИ И КОТЛА.

Вследствие высоких термических напряжений и сравнительно малой стойкости применяемых материалов, обмуровка топки и котла не отличается долговечностью и часто требует ремонта и обновления. В виду этого теплотехник-практик должен быть знаком с общими техническими основами выполнения кладки. От тщательности ремонтных работ стойкость обмуровки зависит не менее, чем от обращения с нею во время эксплуатации.

Требования. Важнейшие требования, предъявляемые к обмуровке, сводятся к следующему:

1) большая сопротивляемость в отношении высоких температур и температурных колебаний, в отношении химических воздействий осаждающихся на кладке шлаков и в отношении механического воздействия горячих газов (при сильном вихревом движении и высоких скоростях);

2) хорошее сохранение тепла, т. е. малая теплоотдача наружу;

3) непроницаемость швов кладки для воздуха, необходимая для предупреждения засасывания постороннего воздуха.

Эти свойства не всегда удается объединить, и иногда они даже оказываются в противоречии между собою. Малая теплопроницаемость строительных материалов создает сильное температурное падение внутри кладки, что приводит к различному тепловому расширению отдельных слоев камня, к термическим напряжениям, иногда даже к появлению трещин и быстрому разрушению связи кладки.

Поэтому целесообразно отчасти пожертвовать изолирующими свойствами кладки в пользу ее большей стойкости и перенести задачу сохранения тепла на другие материалы, т. е. на специальные изолирующие вещества, помещаемые изнутри или снаружи кладки.

Огнеупорная обмуровка. Необходимо соблюдать основное правило, заключающееся в применении для всех температур, начиная от 400 или 450°, огнеупорной обмуровки, так как при длительном воздействии высоких температур кирпич не отличается стойкостью, становится рыхлым и крошится даже от слабого механического воздействия. Поэтому все топочное пространство, а также, по крайней мере, передние дымоходы выстилают огнеупорной кладкой, толщина которой должна быть сообразована с температурой поверхности и с коэффициентом теплопроводности огнеупорного материала. В общем, кладка в топочной камере должна иметь толщину не менее 1 кирпича (25 см), а в дымоходах — не менее $\frac{1}{2}$ кирпича.

В качестве огнеупорного материала применяют почти исключительно *шамотный кирпич*, химический состав которого, огнеупорность (температура плавления), сопротивляемость воздействию шлаков, резким изменениям температуры, давлению и т. д. должны всецело зависеть от местных условий эксплуатации, от рода угля, от высоты температуры в толке, от свойств шлаков и т. п. В этом вопросе не может быть общих указаний. При выборе строительного материала для обмуровки следует привлекать специальную экспертизу.

Раствор. После того как выбран надлежащий строительный материал, необходимо готовить и шамотный раствор, точно соответствующий составу шамотных кирпичей. Различное отношение кирпича и раствора к термическим напряжениям может сильно сократить долговечность кладки. Во время «разбухания» кирпича и раствора при возрастающей температуре и их «усадки» при падении температуры вся кладка должна двигаться как одно целое. В противном случае нельзя избежать появления трещин, а затем и развала кладки. Особую тщательность необходимо проявлять при кладке свода, так как в нем напряжения больше всего. В свод следует класть шамотный клиновой кирпич с высокой температурой плавления. В пятах свод должен быть связан с прочными опорными кирпичами. Последние должны опираться на анкерные связи.

Кирпичная обмуровка. В качестве наружной обмуровки применяют сильно обожженный кирпич, который для достижения плотности кладки укладывают с тесными швами (примерно 5 мм ширины). Снаружи швы промазываются цементным раствором, а изнутри гладко затираются шамотным раствором.

Анкерные связи. Во всех ответственных местах котельная обмуровка должна быть укреплена посредством проходящих сквозь нее анкерных связей, скрепленных косынками с каркасом котла, или же посредством более коротких анкерных болтов, в свою очередь скрепленных с анкерными связями. Особенно хорошо должны быть укреплены и уплотнены места доступа внутрь котла, смотровые дверцы и т. д. Нагруженные балки никогда нельзя класть на промазанные раствором швы. Все железные части должны иметь достаточно места для теплового расширения, причем полости целесообразно заполнять упругим изолирующим материалом (шлаковой шерстью).

Подвесные перекрытия. Значительные расходы по текущему ремонту обмуровки неизбежны даже при самом тщательном выполнении и безупречном уходе во время эксплуатации. Чтобы уменьшить их, в последнее время прибегают к двум совершенно различным способам: к устройству так называемых подвесных перекрытий и к защите огнеупорной кладки, а иногда и полной замене ее охлаждаемыми водою стенками. Обоих этих способов мы уже касались выше, по другому поводу, так как они имеют значение и в отношении совершенства процесса сжигания топлива.¹ Поэтому здесь нам достаточно будет указать, что при употреблении перекрытий, упруго подвешенных к длинным балкам и иногда состоящих из нескольких расположенных один над другим слоев, во-первых, устраняются весьма вредные термические напряжения в кладке, так как кирпичи получают возможность свободно расширяться, а, во-вторых, существенно уменьшаются расходы по ремонту и сокращается продолжительность его выполнения, потому что при повреждении одного или нескольких кирпичей не приходится разрушать всю кладку, а можно в кратчайшее время сменить кирпичи по-одиночке.

Охлаждаемые водою стенки. Применением охлаждаемых водою стенок ослабляется или даже совсем устраняется весьма вредное для прочности кладки действие излучения и еще более опасное химическое воздействие на нее жидких шлаков. Далее, сводятся до минимума температурные колебания, весьма значительные при переменной нагрузке и при остановках работы.

Такой результат достигается благодаря тому, что температура охлаждающих труб остается при разных нагрузках неизменной.

¹ См. стр. 150 и 163.

От современных котлов высокой производительности требуется прежде всего быстрота подготовки к работе и хорошая приспособляемость к колебаниям нагрузки. Этим требованиям тем легче удовлетворить, чем меньше масса обмуровки, так как последняя, в силу своей высокой теплоемкости, аккумулирует в себе много тепла и делает котел инертным и малогибким в работе. Поэтому в новейших котлах, особенно в экранных котлах, кладку почти всецело заменяют стенками из охлаждающих труб, тонкими слоями изоляции и — для защиты от внешних механических воздействий — кожухами из листового железа.

Изоляция. Изоляция котельной обмуровки почти всегда представляет известные выгоды. Путем хорошей изоляции обмуровки, водяных камер, верхнего барабана и т. д. можно достигнуть значительной экономии. Все полости в котельной обмуровке следует заполнять изоляционным материалом. Весьма целесообразно, далее, устройство изолирующего слоя между огнеупорной кладкой и слоем простого кирпича, так как этим предупреждается накопление тепла в кирпичной кладке, а кроме того последняя предохраняется от воздействия слишком высоких температур.

IV. БОРОВ И ДЫМОВАЯ ТРУБА.

Гигиеническая проблема. При горении образуются большие количества дымовых газов, свободная теплота которых еще частично используется за котлом — в подогревателях воды и воздуха, после чего эти газы уже не представляют энергетической ценности и поэтому подлежат отводу наружу. Но так как они содержат весьма много углекислоты, а иногда еще и весьма ядовитую окись углерода, вредный и неприятный сернистый ангидрид и часто значительные количества мелкораспыленных твердых составных частей (летучая зола, летучий кокс, сажа), то их нельзя просто выдуть из последнего дымохода, а приходится заботиться о том, чтобы не причинять неприятностей и вреда окрестностям кочегарки.¹ В силу этих причин для отвода газообразных продуктов горения пользуются дымовыми трубами. Газы на значительной высоте смешиваются с воздухом, и их вредные составные части настолько рассеиваются, что обычно становятся вполне безвредными.

Техническая проблема. Помимо указанной санитарно-гигиенической задачи, на дымовой трубе лежит столь же важная техническая задача — привлекать нужный для горения воздух и этим обеспечивать хорошее сжигание горючего. Теплые дымовые газы, будучи легче наружного воздуха, устремляются вверх и выходят из верхнего отверстия трубы, тогда как холодный воздух, по известному закону сообщающихся сосудов, притекает на смену отходящим газам, причем он проходит через тонку, образующую единственное нижнее сообщение между наружным воздухом и внутренностью трубы. Чем больше разность весов газового столба в дымовой трубе и такой же высоты воздушного столба, отнесенного к тому же поперечному сечению, тем сильнее будет тяга, т. е. тем больше будет скорость газов в трубе и, соответственно, тем больше количество притекающего к топке воздуха.

Температура отходящих газов. Отсюда следует, что свободную теплоту отходящих газов нельзя использовать без остатка, так как от этого слишком уменьшилась бы тяга дымовой трубы и в топку не поступало бы достаточное для горения количество воздуха. Вообще говоря, для того чтобы естественная тяга была достаточна для подачи потребного для горения количества воздуха, температура отходящих газов у основания дымовой трубы должна быть не ниже 120 или 150°. Дальнейшее использование теплоты отходящих газов возможно лишь в том случае, если отказаться от естественной тяги и воздух для горения подавать в топку при посредстве вентиляторов (при топках с нижним дутьем).

Охлаждение газов. Разность весов газового и воздушного столбов зависит не только от температуры отходящих газов за котлом, но и от охлаждения газов на пути от котла до выхода из дымовой трубы. Чем сильнее это охлаждение, тем меньше будет тяга. Таким образом, с точки зрения экономии тепла и рациональной эксплуатации, весьма важно заботиться об уменьшении охлаждения отходящих газов, так как от этого зависит не только использование горючего, но иногда и работоспособность всей котельной установки. Борозды должны быть поэтому возможно короче. Кроме того следует хорошо защищать борозды и дымовую трубу от наружного охлаждения, например выстлывая их внутренние стенки слоем изоляционного камня. В особенности вредно скопление в борозе грунтовой воды, которая вызывает весьма сильное охлаждение отходящих газов. По этой причине борозды следует прокладывать по возможности выше самого

¹ Вредное влияние отходящих газов наблюдалось, например, в отношении хвойных лесов близ крупных городов.

высокого уровня грунтовых вод; если же это невозможно, их следует строить абсолютно водонепроницаемыми.

Атмосферные влияния. Наружная температура также влияет на силу тяги дымовой трубы. Летом, при весьма высокой средней дневной температуре, разность весов воздушного и газового столбов значительно меньше, чем в холодные зимние дни. Поэтому теплоту отходящих газов зимой удастся использовать в гораздо большей степени, чем летом. Это представляет собою благоприятное обстоятельство, так как отходящие газы обычно используются для подогрева питательной воды или воздуха. Между тем как питательная вода, так и воздух требуют в более холодное время года усиленного подвода тепла, по сравнению с более теплым временем года. Далее, сила тяги зависит еще от силы и направления ветра, от солнечного излучения, от дождя и других атмосферных явлений. В виду этого дымовая труба должна быть устроена и рассчитана так, чтобы она действовала достаточно сильно даже при особенно неблагоприятных атмосферных условиях, с тем чтобы при полной нагрузке котельной установки подавать в топку требуемое для горения количество воздуха. С другой стороны, при искусственной тяге мы приобретаем независимость от условий погоды. Это является большим преимуществом работы с искусственным засасыванием воздуха и нижним дутьем.

Потери от движения газов. Тяга дымовой трубы зависит не только от разности весов газовых столбов, но еще и от потерь давления при прохождении газов через котел, боров и дымовую трубу. Чем уже поперечные сечения, тем значительно больше будут сопротивления. Таким образом, при очень тесных дымоходах, малом расстоянии между рядами труб, тесных боровых и малом поперечном сечении дымовой трубы необходимы высокие дымовые трубы, которые могли бы потери от сопротивлений компенсировать большей разностью весов воздушного столба и столба отходящих газов.

Тяговая заслонка. При различной нагрузке котла различно и требуемое в единицу времени количество воздуха для горения. Последнее приходится регулировать повышением или понижением сопротивления движению газов. Для этого служит так называемая тяговая заслонка, помещаемая в борове за последним дымоходом котла и управляемая кочегаром. Чем шире открыта заслонка, тем больше воздуха будет поступать в топку. Таким образом, при высокой нагрузке котла заслонку надлежит широко открывать, а при низкой нагрузке — несколько прикрывать.

Плотность обмуровки. Действующая в топке тяга зависит, наконец, еще и от плотности кладки в котле, борове и дымовой трубе. При наличии в кладке неплотных мест часть воздуха засасывается не через топку, а непосредственно через эти места. Поэтому крайне важно устранять, по возможности, все такие неплотности, а там, где засасывание постороннего воздуха полностью устранить нельзя, например у механических скребков, расположенных в борове экономайзеров, у дверец люков, у смотровых окошек в дымоходах, борове и т. д., следует стремиться к тому, чтобы неплотные места были возможно малы.

Плотное закрывание на время остановок. Если во время эксплуатации на дымовой трубе лежит важная задача засасывать потребное для горения количество воздуха, то во время перерывов в работе тяга должна быть по возможности устранена, так как при засасывании холодного воздуха топочное пространство, котел, боров и сама дымовая труба остывают, что влечет за собой большие тепловые потери. Для возможного уменьшения этих потерь целесообразно устраивать у основания дымовой трубы особую заслонку, которая при остановке работ плотно закрывалась бы, так же как и тяговые заслонки за отдельными котлами. В виду того что эти заслонки вследствие воздействия высокой температуры и постоянных температурных колебаний очень быстро коробятся и становятся неплотными, они нуждаются в непрерывном надзоре и частом исправлении. Равным образом, надлежит заботиться о воздухонепроницаемом закрывании самого топочного пространства, о воздухонепроницаемости топочных дверец, смотровых отверстий и т. д. Особенно надежным в качестве запорного органа оказался так называемый тяговый затвор конструкции Штобера, о котором мы поговорим ниже.¹

В особенности следует заботиться о том, чтобы обходные каналы, если таковые есть, плотно отделились от главного дымохода котла дымовыми задвижками или заслонками; если же ими не пользуются длительное время, то лучше совсем замуровать их.

Строительные материалы для дымовых труб. Дымовые трубы чаще всего выкладывают из кирпича, но в последнее время еще чаще делают их железобетонными.

Кирпич для большинства работ до сих пор является наиболее экономичным строительным

¹ См. стр. 263—264.

материалом. Кирпичная дымовая труба, вообще говоря, дешевле бетонной и гораздо лучше в отношении течи, чем железная дымовая труба. Но большим недостатком является ее чувствительность в отношении атмосферных влияний. Подветренная сторона кирпичных дымовых труб обычно в течение короткого времени приобретает дефекты в виде расхождения швов, отчего страдает как прочность, так и тяга трубы. Вследствие этого кирпичные трубы обычно требуют больших расходов по текущему ремонту.

Железобетон гораздо лучше сопротивляется атмосферным влияниям. Другое преимущество железобетонных труб заключается в высоком сопротивлении железобетона сжатию и растяжению, благодаря чему можно применять более тонкие стенки и удешевить фундаментные работы. С другой стороны, бетон менее стоек в отношении высоких температур, а кроме того разбегается часто содержащейся в дымовых газах сернистой кислотой. Поэтому целесообразно покрывать дымовую трубу изнутри предохранительной одеждой из нетеплопроводного камня с целью уменьшения охлаждения и накопления тепла в бетоне. Дело в том, что бетон, вследствие своей сравнительно высокой теплопроводности и высокого удельного веса, обладает и весьма высокой способностью к аккумуляции тепла.

Железные дымовые трубы очень дешевы, благодаря малой толщине стенок имеют гораздо меньший вес, чем кирпичные или бетонные трубы, и требуют поэтому менее дорогих фундаментных работ. Кроме того их монтаж выполняется быстрее и дешевле. Однако большим их недостатком являются чрезвычайно высокие потери от охлаждения, весьма ухудшающие тягу.

В общем, для большинства установок наиболее подходят кирпичные и бетонные дымовые трубы. Но в котельных установках с плохим строительным грунтом и, далее, в тех случаях когда пользуются нижним дутьем или всасывающими вентиляторами и когда поэтому топка не зависит от тяги в дымовой трубе, с выгодой применяются также железные дымовые трубы.

У. ПОТЕРИ ТЯГИ И РАСЧЕТ ДЫМОВОЙ ТРУБЫ.

Обозначения.

H м	— высота дымовой трубы,
d "	— диаметр дымовой трубы у верхнего конца,
B мм рт. ст.	— показание барометра,
G_k кг	— вес дымовых газов (отнесенный к 1 м ² поперечного сечения и H м высоты),
$G_{воз}$ "	— вес воздуха (отнесенный к 1 м ² поперечного сечения и H м высоты),
O м ²	— средняя поверхность дымовой трубы,
V м ³ /ч.	— количество дымовых газов,
Z_m мм вод. ст.	— теоретическое максимальное значение тяги у основания дымовой трубы,
$Z_{ст}$ " " "	— статическое максимальное значение тяги у основания дымовой трубы,
Z " " "	— действительное максимальное значение тяги у основания дымовой трубы,
Z' " " "	— " " " " " " " " за дымовой заслонкой,
Z'' " " "	— " " " " " " " " над колосниковой решеткой,
Z''' " " "	— " " " " " " " " под колосниковой решеткой,
$Z_{ох}$ " " "	— потеря тяги от охлаждения в дымовой трубе,
$Z_{ск}$ " " "	— " " " " " " " " на создание скорости газов,
$Z_{тр}$ " " "	— " " " " " " " " от трения в дымовой трубе,
$Z_{бор.}$ " " "	— " " " " " " " " в борне,
$Z_{д.з.}$ " " "	— " " " " " " " " в дымовой заслонке,
$Z_{д.т.}$ " " "	— " " " " " " " " в котельных дымоходах и топочном пространстве,
$Z_{реш.}$ " " "	— " " " " " " " " в колосниковой решетке,
$Z_{пер.}$ " " "	— " " " " " " " " в перегревателе,
$Z_{эк.}$ " " "	— " " " " " " " " в экономайзере,
$Z_{п.в.}$ " " "	— " " " " " " " " в подогревателе воздуха,
$t_{вх.}$ °C	— температура дымовых газов при входе в дымовую трубу,
$t_{вых.}$ °C	— " " " " " " " " выходе из дымовой трубы,
$t_{ср.}$ "	— средняя температура газов в дымовой трубе,
$t_{воз.}$ "	— температура наружного воздуха,
$\theta_{ср.}$ "	— разность средних температур газов и воздуха = $t_{ср.} - t_{воз.}$,
C_p "	— теплоемкость дымовых газов,
k кал/м ² ч. °C	— коэффициент теплопередачи,
$\gamma_{вх.}$ кг/м ³	— удельный вес дымовых газов при $t_{вх.}^{\circ}$,
$\gamma_{ср.}$ " " "	— " " " " " " " " $t_{ср.}^{\circ}$,
γ_0 " " "	— " " " " " " " " 0° и 760 мм рт. ст.,
$\gamma_{воз.}$ " " "	— " " " " " " " " воздуха при $t_{воз.}^{\circ}$.

Общие указания. Правильный расчет деталей тяги чрезвычайно важен, так как от него в высокой степени зависит процесс горения, а вместе с тем также производительность и к. п. д. котельной установки. Выше мы уже указывали на то, что производительность дымовой трубы сильно зависит от атмосферных влияний. Это одно уже побуждает нас, рассчитывая дымовую трубу, назначать достаточные размеры, для того чтобы котельная установка даже при неблагоприятных атмосферных условиях сохраняла свою полную производительность. Кроме того в большинстве случаев приходится считаться с возможностью расширения установки в будущем, в виду чего целесообразно с самого начала придать дымовой трубе достаточные размеры. С другой стороны, нельзя выбирать слишком большие размеры, так как это, во-первых, очень превышает расходы по первоначальному обзаведению, а во-вторых, потому что чрезмерно широкие дымовые трубы приводят к высоким потерям от охлаждения, что в свою очередь понижает силу тяги.

Расчет дымовой трубы распадается на две части:

1. Определение высоты дымовой трубы на основании потребного разрежения.

2. Определение ширины дымовой трубы на основании количества пропускаемых газов.

Предварительно, однако, необходимо определить величину тяги и отдельные ее потери.

Статическая сила тяги. Вес столба дымовых газов, поперечного сечения в 1 м^2 , высоты H и средней температуры $t_{\text{ср}}$ составляет

$$G_{\text{д}} = H \cdot \gamma_{\text{ср}},$$

где $\gamma_{\text{ср}}$ — удельный вес дымовых газов при $t_{\text{ср}}$.

Если через $\gamma_{\text{воз}}$ обозначить удельный вес воздуха при $t_{\text{воз}}$, то вес воздушного столба такого же поперечного сечения и такой же высоты будет равен

$$G_{\text{воз}} = H \cdot \gamma_{\text{воз}}.$$

Разность обеих величин дает силу так называемой статической тяги у основания дымовой трубы:

$$Z_{\text{ст}} = H \cdot (\gamma_{\text{воз}} - \gamma_{\text{ср}}) \text{ мм вод. ст.} \quad (52)$$

Из этого уравнения видно, что статическая тяга тем больше, чем выше дымовая труба и чем больше разность удельных весов. Последняя же зависит главным образом от температуры газов и воздуха. Чем выше температура газов и чем ниже температура воздуха, тем больше будет сила тяги, тем лучше будет «тянуть» дымовая труба.

Удельный вес дымовых газов при 0° и 760 мм рт. ст. и при содержании углекислоты от 9 до 12% составляет для каменного угля, примерно, $1,325 \text{ кг/м}^3$, для влажных среднегерманских бурых углей, примерно, $1,270 \text{ кг/м}^3$. Удельный вес воздуха при 0° и 760 мм рт. ст. составляет $1,288 \text{ кг/м}^3$. При ином показании барометра B и иной температуре t эти числа следует умножить на $\frac{B}{760}$ и $\frac{273}{273 + t}$. Соответственно надлежит учитывать также разрежение или избыток давления. Влажностью воздуха обычно можно пренебрегать.

Пример 1. Чему равен удельный вес дымовых газов от сжигания каменного угля при разрежении в 20 мм и при температуре в 200° (при барометрическом давлении 750 мм рт. ст.)?

Имеем:

$$\gamma_{\text{д}} = 1,325 \cdot \frac{750 - 20}{760} \cdot \frac{273}{273 + 200} = 0,735 \text{ кг/м}^3.$$

Пример 2. Чему равен удельный вес воздуха при 700 мм рт. ст. и 25° ?

Имеем:

$$\gamma_{\text{воз}} = 1,288 \cdot \frac{700}{760} \cdot \frac{273}{273 + 25} = 1,09 \text{ кг/м}^3.$$

Статическая сила тяги никогда не проявляется полностью, когда котельная установка находится в работе. Она представляет собой достижимое лишь при остановке котла максимальное значение, которое можно определить измерением, если плотно закрыть дымовую трубу, чтобы газовый столб в ней временно остановился и труба не совершала никакой работы.

Потери тяги. В то мгновение, когда открывается заслонка, некоторая доля тяги ($Z_{\text{ск}}$) затрачивается на создание скорости течения газов (давление превращается в скорость), тогда как другая доля служит для преодоления сопротивления трения в дымовой трубе ($Z_{\text{тр}}$). Дей-

ствительно проявляющаяся во время работы сила тяги у основания дымовой трубы (Z_1) служит для того, чтобы покрывать потери тяги в борове ($Z_{\text{бор}}$), дымовой заслонке ($Z_{\text{д.з.}}$), в котельных дымоходах и топочном пространстве ($Z_{\text{д.т.}}$) и, наконец, в слое горючего на колосниковой решетке ($Z_{\text{реш}}$). При наличии перегревателя, экономайзера и подогревателя воздуха сюда прибавляются еще сопротивления в этих органах ($Z_{\text{пер}}$, $Z_{\text{эк}}$ и $Z_{\text{п.в.}}$). Все эти потери тяги образуются, главным образом, вследствие трения, отчасти же — вследствие охлаждения газов.

Итак, в разных местах тягового тракта мы получаем следующие значения силы тяги.

У основания дымовой трубы:

$$Z = Z_{\text{ст}} - Z_{\text{ск}} - Z_{\text{тр}} \text{ мм вод. ст.} \quad (53)$$

За дымовой заслонкой:

$$Z' = Z_{\text{ст}} - Z_{\text{ск}} - Z_{\text{тр}} - Z_{\text{бор}} \text{ мм вод. ст.} \quad (54)$$

Над колосниковой решеткой:

$$Z'' = Z_{\text{ст}} - Z_{\text{ск}} - Z_{\text{тр}} - Z_{\text{бор}} - Z_{\text{д.з.}} - Z_{\text{д.т.}} \text{ мм вод. ст.} \quad (55)$$

Под колосниковой решеткой:

$$Z''' = Z_{\text{ст}} - Z_{\text{ск}} - Z_{\text{тр}} - Z_{\text{бор}} - Z_{\text{д.з.}} - Z_{\text{д.т.}} - Z_{\text{реш}} \text{ мм вод. ст.} \quad (56)$$

Для сохранения равновесного состояния должно быть соблюдено равенство $Z''' = 0$; другими словами, вся имеющаяся в распоряжении сила тяги успевает израсходоваться на пути от поступления воздуха под колосниковую решетку до выхода газа из дымовой трубы. Переставляя тяговую заслонку и регулируя толщину слоя горючего в топке, мы можем произвольно изменять силу тяги и приспособлять ее к той или иной степени нагрузки котельной установки.

Теоретическое максимальное значение силы тяги. Статическая сила тяги представляет собой практически достижимое максимальное значение тяги у основания дымовой трубы. Теоретическое же максимальное значение еще выше. Разность обоих значений обусловлена тем, что газовый столб в дымовой трубе не везде имеет одинаковую температуру, так как, вследствие наружного охлаждения стенок дымовой трубы, температура газов падает с увеличением высоты.

К потерям от скорости и трения присоединяются еще потери от охлаждения, которые можно указать в мм рт. ст. ($Z_{\text{ох}}$), и тогда теоретическое максимальное значение силы тяги у основания дымовой трубы получится равным:

$$Z_{\text{т}} = Z_{\text{ст}} + Z_{\text{ох}} \text{ мм вод. ст.} \quad (57)$$

Измеренная же сила тяги у основания дымовой трубы составит:

$$Z = Z_{\text{т}} - Z_{\text{ск}} - Z_{\text{тр}} \text{ мм вод. ст.} \quad (58)$$

Потери тяги от охлаждения в дымовой трубе. Чтобы вычислить эти потери, необходимо предварительно определить температурный перепад в дымовой трубе. Если температуру у входа в дымовую трубу обозначить через $t_{\text{вх}}$, а температуру у выхода — через $t_{\text{вых}}$, теплоемкость газов, отнесенную к 1 м³ и $t_{\text{вх}}$ — через C_p , количество газов в м³/ч. — через V , всю среднюю цилиндрическую поверхность дымовой трубы в м² — через O , среднюю разность температур газов в дымовой трубе и наружного воздуха — через $\vartheta_{\text{ср}}$ и коэффициент теплопередачи — через k , то получится уравнение:

$$V \cdot C_p (t_{\text{вх}} - t_{\text{вых}}) = O \cdot k \cdot \vartheta_{\text{ср}} \quad (59)$$

С другой стороны

$$\vartheta_{\text{ср}} = \frac{t_{\text{вх}} + t_{\text{вых}}}{2} - t_{\text{воз}} \quad (60)$$

Из уравнений (59) и (60) можно определить выходную температуру $t_{\text{вых}}$, тогда как все остальные величины могут быть установлены измерением или расчетом.

$$V \cdot C_p (t_{\text{вх}} - t_{\text{вых}}) = O \cdot k \left(\frac{t_{\text{вх}} + t_{\text{вых}}}{2} - t_{\text{воз}} \right),$$

$$t_{\text{вых}} = \frac{V \cdot C_p \cdot t_{\text{вх}} - \frac{O \cdot k \cdot t_{\text{вх}}}{2} + O \cdot k \cdot t_{\text{воз}}}{V \cdot C_p + \frac{O \cdot k}{2}}. \quad (61)$$

Вычислив $t_{\text{вых}}$, мы тем самым определим и температурный перепад $t_{\text{вх}} - t_{\text{вых}}$.

Потеря тяги от температурного падения получится теперь как разность весов газового столба высоты H с убывающей (с $t_{\text{вх}}$ до $t_{\text{вых}}$) кверху температурой и газового столба равной высоты и постоянной температуры $t_{\text{вх}}$. Первый из этих газовых столбов можно с достаточным приближением приравнять газовому столбу постоянной температуры $t_{\text{ср}} = \frac{t_{\text{вх}} + t_{\text{вых}}}{2}$, причем получаем

$$Z_{\text{ок}} = H (\gamma_{\text{ср}} - \gamma_{\text{вх}}) \text{ мм вод. ст.}, \quad (62)$$

где $\gamma_{\text{вх}}$ — удельный вес газов при $t_{\text{вх}}$, а $\gamma_{\text{ср}}$ — их удельный вес при $t_{\text{ср}}$. Если γ_0 — удельный вес дымовых газов при 0° и 760 мм рт. ст., то $\gamma_{\text{вх}}$ и $\gamma_{\text{ср}}$ найдем равными:

$$\gamma_{\text{вх}} = \gamma_0 \frac{273}{273 + t_{\text{вх}}} \text{ кг/м}^3, \quad (63)$$

$$\gamma_{\text{ср}} = \gamma_0 \frac{273}{273 + t_{\text{ср}}} \text{ кг/м}^3. \quad (63')$$

Таким образом:

$$Z_{\text{ок}} = H \cdot \gamma_0 \left(\frac{273}{273 + t_{\text{вх}}} - \frac{273}{273 + t_{\text{ср}}} \right) \text{ мм вод. ст.} \quad (64)$$

Итак, ход расчета сравнительно прост. По данным величинам определяем сначала, согласно уравнению (61), выходную температуру $t_{\text{вых}}$; зная ее, находим и среднюю температуру газов $t_{\text{ср}}$, а затем, по уравнению (64), вычисляем $Z_{\text{ок}}$.

Коэффициент теплопередачи k , согласно таблице 12,¹ колеблется, в зависимости от толщины стенок, примерно, между 1,7 и 0,65 кал/м² ч. на 1° .

Потеря тяги от охлаждения тем меньше, чем ниже дымовая труба, чем ниже температура газов, чем меньше коэффициент теплопередачи и чем больше скорость газов и диаметр трубы. Эти условия находятся между собой в некотором противоречии, так как, например, увеличение скорости газов требует уменьшения диаметра трубы. Расчет должен показать, при каких соотношениях достигаются наиболее высокие значения, причем, конечно, кроме $Z_{\text{ок}}$, $Z_{\text{ск}}$ и $Z_{\text{тр}}$ должны быть приняты во внимание экономические и эксплуатационные факторы. В общем, при нормальных размерах можно ожидать потери тяги от охлаждения, равной, примерно, от 0,5 до 3 мм вод. ст.

Наконец, следует еще указать на то, что часто происходит и непосредственное охлаждение дымовых газов, а именно — вследствие засасывания воздуха через неплотности в кладке. Так нередко возникают весьма значительные потери тяги, особенно в старых трубах. Однако эти потери едва ли можно учесть расчетом.

Потери тяги от образования скорости газов. По известному закону течения по трубам, потеря тяги $Z_{\text{ск}}$ получается равной

$$Z_{\text{ск}} = \frac{\gamma_{\text{ср}} w^2}{2g} \text{ мм вод. ст.}, \quad (65)$$

где w — скорость газов в м/сек. $Z_{\text{ск}}$ зависит, главным образом, от w , но также и от температуры газов (так как $\gamma_{\text{ср}}$ с возрастанием температуры становится меньше), и, наконец, хотя и в весьма

¹ См. стр. 81.

малой степени, от состава газов и от степени разрежения. В таблице 19 представлены значения $Z_{\text{ск}}$ при обычных температурах газов и обычных скоростях. Из этой таблицы видно, что характер дымовых газов (от сжигания каменного или бурого угля) имеет незначительное влияние.

ТАБЛИЦА 19.

Потери тяги от образования скорости газов. (При разрежении в 20 мм и барометрическом давлении в 760 мм рт. ст. Удельный вес дымовых газов от каменного угля 1,325, от бурого угля 1,270).

Сорт угля	Средняя скорость газов в дымовой трубе м/сек	Средняя температура газов в дымовой трубе			
		100°	200°	300°	400°
Каменный уголь	2	0,195	0,155	0,125	0,105
	4	0,77	0,605	0,505	0,43
	6	1,74	1,375	1,13	0,965
	8	3,09	2,44	2,01	1,715
	10	4,85	3,82	3,16	2,67
Бурый уголь (среднегерманский)	2	0,185	0,15	0,12	0,10
	4	0,74	0,58	0,485	0,41
	6	1,67	1,32	1,08	0,925
	8	2,96	2,34	1,93	1,64
	10	4,65	3,66	3,03	2,56

Скорость w вычисляется по поперечному сечению трубы и часовому количеству газов. Ее можно также измерить посредством диафрагм.

Потери тяги от трения в дымовой трубе. Потери от трения $Z_{\text{тр}}$ может быть определена только с помощью эмпирических формул. Эта потеря, конечно, пропорциональна высоте дымовой трубы и квадрату скорости газов, а также удельному весу и обратно-пропорциональна диаметру дымовой трубы.

Поэтому при большой скорости, т. е. при сильной нагрузке котла и малом

диаметре дымовой трубы, эта потеря может быть довольно высока. Например, при высоте дымовой трубы в 50 м, диаметре ее в 0,5 м и скорости газов в 10 м/сек она составляет, примерно, 5 или 6 мм вод. ст. Кроме того довольно существенную роль играют свойства внутренней поверхности трубы. В виду этого, во избежание больших потерь от трения следует заботиться о том, чтобы стенки трубы были изнутри гладко и хорошо опуткатурены. При нормальных условиях, в зависимости от нагрузки, $Z_{\text{тр}}$ составляет, примерно, от 0,5 до 2 мм вод. ст. Несколько средних значений приведены в таблице 20.

ТАБЛИЦА 20.

Потери тяги от трения в дымовой трубе, отнесенная к 1 м высоты трубы и средней температуре газов в 200°.

Средний диаметр дымовой трубы м	Средняя скорость газов м/сек					Примечания
	2	4	6	8	10	
0,5	0,0080	0,0220	0,045	0,079	0,119	Приведенные значения подлежат умножить на действительную высоту дымовой трубы. Для более низких температур газов значения меняются пропорционально удельному весу газов, т. е. при более высоких температурах они ниже, а при более низких температурах — выше указанных в таблице.
1	0,0025	0,0060	0,019	0,032	0,048	
1,5	0,0015	0,0050	0,012	0,020	0,027	
2	0,0012	0,0045	0,009	0,015	0,021	
2,5	0,0009	0,0035	0,008	0,013	0,018	

Прочие потери тяги. Потери тяги в борове, в котле и в топке слагаются из потерь от охлаждения и от трения.

Потери в борове ($Z_{\text{бор}}$) обычно мала. Впрочем, при длинных и узких каналах, при значительных неплотностях в кладке и при сильном охлаждении дымовых газов (например от проникания грунтовых вод) она может достигнуть значительной величины. Но при нормальных условиях она редко составляет больше 1 или 2 мм вод. ст.

Потеря тяги в дымовой заслонке ($Z_{д.з.}$) всецело зависит от расположения последней. В большинстве установок заслонка представляет собою тот орган, посредством которого регулируется, сообразно нагрузке котла, сила тяги. При полном открытии заслонки рассматриваемая потеря падает почти до нуля, при почти закрытой заслонке она может достигать 10 мм вод. ст. и больше.

Потеря тяги в дымоходах и в топочном пространстве ($Z_{д.т.}$) зависит от конструкции котла. Чем теснее пути для прохода газов и чем выше нагрузка котла, тем больше будет и потеря тяги. Стремиться возможно более понижать ее было бы неправильно, так как с уменьшением потери тяги падает и теплопередача. Американские котлы иногда работают с чрезвычайно большой потерей тяги, но зато и с большой удельной производительностью. В старых установках без перегревателя и подогревателя питательной воды потерю тяги можно считать от 3 до 10 мм вод. ст., в более новых котлах высокой производительности с перегревателем, экономайзером и подогревателем воздуха эта потеря составляет от 15 до 20 мм вод. ст. и больше.

Потеря тяги в слое горючего ($Z_{реш.}$) также зависит от многочисленных факторов, например от высоты слоя, от отношения свободной площади колосниковой решетки к ее общей площади, от крупности угля и т. д. В зависимости от напряжения колосниковой решетки, можно, в среднем, ожидать потери от 2 до 8 мм вод. ст. Стокеры и новейшие колосниковые решетки высокой производительности с движущимися колосниками иногда, при толстом слое горючего, дают еще более высокую потерю. К этой потере нередко еще присоединяется потеря тяги от прохода служащего для горения воздуха через регулируемую заслонку перед топкой. Впрочем, такой способ регулировки, часто встречаемый в новых котлах вместо регулирования дымовой заслонкой, обычно не влечет за собой увеличения общей потери тяги, так как зато отпадает регулирование дымовой заслонкой.

Самотяга. До сих пор еще мало учитывается часто весьма значительное влияние на потребность котельной установки в тяге, оказываемое самотягой в топочном пространстве и в дымоходах. Котельные дымоходы действуют в известной мере как маленькие дымовые трубы. Во всех дымоходах, в которых газы направляются вверх, их стремление к подъему усиливает тягу в дымовой трубе, тогда как в опускающихся дымоходах это стремление тормозит тягу дымовой трубы. В котлах, у которых топочная камера, дымоходы, перегреватель, экономайзер и подогреватель воздуха помещены в виде башни одно над другими, как это часто бывает в котлах новых конструкций, газы столь сильно рвутся вверх к подъему, что даже при силе тяги, у конца котла равной нулю, получается все же значительная производительность. В таких установках часто можно обойтись значительно меньшими размерами дымовой трубы.

Однако самотяга имеет и определенные недостатки. При малом разрежении у колосниковой решетки в верхней части котлов высокой конструкции может образоваться значительное положительное давление. Вследствие этого часть дымовых газов может проникнуть сквозь неплотности обмуровки в котельное помещение и причинить вред или неудобство обслуживающему персоналу. Кроме того кладка сильно страдает от протекающих сквозь нее горячих газов, и поэтому легко могут возникнуть опасные термические напряжения, трещины и т. д. Для избежания этих недостатков лучше всего управлять подводом воздуха не с помощью дымовой заслонки, а посредством заслонки, помещенной перед топкой.¹

Внутренний диаметр и высота дымовой трубы. Для расчета внутреннего диаметра дымовой трубы прежде всего необходимо решить, какие скорости газов будут допущены в дымовой трубе. Обычно работают при скоростях газов не выше 5 или 10 м/сек у выхода из дымовой трубы. Если исходить из определенной скорости газов при максимальной нагрузке дымовой трубы, то по количеству дымовых газов при максимальной нагрузке определится диаметр дымовой трубы.

При расчете высоты дымовой трубы следует исходить из силы тяги, потребной у основания трубы. Потери тяги на пути от вступления воздуха в слой горючего (или в регулируемую заслонку перед топкой) до основания дымовой трубы не поддаются, как мы уже видели, точному расчету, но на основании опытных данных их можно приблизительно оценить в зависимости от устройства и производительности котельной установки. Далее, необходимо знать температуру газов у основания дымовой трубы. Обычно в новых установках с экономайзером и подогревателем воздуха ее принимают равной 120 — 150° при постоянной нагрузке и 150 — 200° при очень высоких нагрузках. Когда принята и эта величина, то для разных высот трубы можно

¹ См. K o n e j u n g, Zugverlust und Zugbedarf. Arch. f. Wärmewirtschaft, 10, 62, 1929.

вычислить среднюю температуру газов в трубе, а отсюда и статическую силу тяги. Если из этих значений вычесть соответствующие потери тяги от образования скорости газов ($Z_{ск}$) и от трения ($Z_{тр}$), которые могут быть вычислены, если известны высота, диаметр и скорость, то можно определить высоту, достаточную для требуемой максимальной силы тяги у основания дымовой трубы.

Таким образом, расчет нельзя провести строго математически, а приходится действовать последовательно попытками и сравнением результатов. Кроме того в виду шаткости предпосылок рекомендуется вести расчет с запасом, так как несколько большая дымовая труба все же лучше слишком маленькой, не соответствующей производительности котла. Впрочем, в настоящее время всегда существует возможность устройством искусственной тяги восполнить недостаточное действие дымовой трубы.

Опытные данные. Герберг (Herberg)¹ приводит следующие опытные данные, полезные при проектировании и приблизительных расчетах, но все же не вполне надежные.²

Высота дымовой трубы равна:

от 35 до 30 верхних диаметров в свету, если $d < 2$ м
 „ 25 „ 20 „ „ „ „ „ „ $d > 2$ м

Поперечное сечение дымовой трубы равно:

от $\frac{1}{4}$ до $\frac{1}{6}$ площади колосниковой решетки для мелких установок	} каменный уголь
„ $\frac{1}{6}$ „ $\frac{1}{10}$ площади колосниковой решетки для крупных установок	
„ $\frac{1}{6}$ „ $\frac{1}{10}$ площади колосниковой решетки для мелких установок	} бурый уголь
„ $\frac{1}{10}$ „ $\frac{1}{14}$ площади колосниковой решетки для крупных установок	

Тяга дымовой трубы равна:

0,4 H	при температуре дымовых газов у основания дымовой трубы	{	175 — 210°
0,45 H			200 — 225°
0,5 H			225 — 250°
0,55 H			250 — 300°
0,6 H			300 — 350°
0,65 H			350 — 400°

Потребная сила тяги равна:

18 — 18 мж вод. ст.	для поверхности нагрева	до 100 м ²
18 — 23 „ „ „ „ „ „	„ „ „ „ „ „	100 — 400 м ²
23 — 28 „ „ „ „ „ „	„ „ „ „ „ „	400 — 800 м ²
28 — 35 „ „ „ „ „ „	„ „ „ „ „ „	800 — 1 200 м ²
35 — 40 „ „ „ „ „ „	„ „ „ „ „ „	1 200 — 1 800 м ²
40 — 48 „ „ „ „ „ „	„ „ „ „ „ „	1 800 — 2 500 м ²

Добавка на экономайзер, перегреватель, подогреватель воздуха и т. д. — от 1 до 4 мж вод. ст.

Пример 1. В котельной топке предположено сжигать максимально 1000 кг каменного угля в час, с низшей теплотворной способностью $Q_H = 7000$ кал/кг. Коэффициент избытка воздуха α в худшем случае составляет 1,6. Какой диаметр в свету должна иметь на верхнем конце дымовая труба, если максимальная скорость газов должна быть равна 5 м/сек?

По рис. 17³ для $Q_H = 7000$ кал/кг, при $\alpha = 1,6$ получается количество дымовых газов, равное $12,5$ м³/кг, т. е. при 1 тонне в час горючего $12,5 \times 1000 = 12500$ м³/ч. Отсюда наиболее тесное поперечное сечение дымовой трубы:

$$F = \frac{12500}{5 \cdot 3600} = 0,696 \text{ м}^2,$$

а диаметр

$$d = \sqrt{\frac{4F}{\pi}} = \sqrt{\frac{2,79}{3,14}} = 0,945 \approx 1 \text{ м.}$$

¹ См. Feuerungstechnik und Dampfkesselbetrieb, 4. Auflage, 344 (Берлин, 1928, изд. J. Springer).

² См. ниже, пример 2.

³ См. стр. 52.

Пример 2. Для тех же условий, что и в примере 1, определить высоту дымовой трубы. Наибольшая сила тяги у основания дымовой трубы при 200° должна составлять 15 мм вод. ст. (при максимальной нагрузке).

Потребную высоту дымовой трубы можно сначала определить по приведенной выше эмпирической формуле приблизительно, приняв ее равной $35 d = 35$ м. По другой эмпирической формуле тяга дымовой трубы при 200° составляет приблизительно 0,45 Н, т. е. при 35 м $0,45 \times 35 = 15,8$ мм вод. ст. Эта величина довольно точно равна действительно требуемой. Тем не менее проведем расчет не только для $H_1 = 35$ м, но и для несколько больших высот: $H_2 = 40$ м и $H_3 = 45$ м.

Потери тяги от охлаждения. Прежде всего надлежит вычислить температуру газов у верхнего конца трубы $t_{\text{вых}}$. Для этого нужно знать общую среднюю цилиндрическую поверхность трубы. Если принять, что при диаметре в свету у верхнего конца в 1 м средняя ширина в свету составляет 1,5 м, а средняя толщина стенок равна 50 см, то искомая поверхность получится равной:

$$O = (1,5 + 2 \cdot 0,25) \cdot \pi \cdot H = 6,28 \cdot H \text{ м}^2,$$

т. е. для $H_1 = 35$ м, $O_1 = 220 \text{ м}^2$, для $H_2 = 40$ м, $O_2 = 250 \text{ м}^2$, для $H_3 = 45$ м, $O_3 = 282 \text{ м}^2$.

Коэффициент теплопередачи при толщине стенок в 50 см, согласно табл. 12, может быть принят равным приблизительно 1,1. Количество дымовых газов, как было определено в примере 1, составляет $V = 12\,500 \text{ м}^3/\text{ч}$, а теплоемкость дымовых газов при $t_{\text{вх}} = 200^\circ$ и содержания углекислоты в 10% равна, примерно, 0,33 (см. рис. 21).¹ Для того чтобы труба и при самых неблагоприятных условиях развивала требуемую силу тяги, температуру воздуха следует принять очень высокой, например $t_{\text{воз}} = 40^\circ$.

Теперь мы можем, на основании уравнения (61), вычислить $t_{\text{вых}}$ и получим, подставляя соответствующую той или иной высоте трубы величину поверхности O , для $H_1 = 35$ м, $t_{\text{вых}_1} = 190,9^\circ$, для $H_2 = 40$ м, $t_{\text{вых}_2} = 189,7^\circ$ и для $H_3 = 45$ м, $t_{\text{вых}_3} = 188,6^\circ$. Отсюда получаются средние температуры газов $t_{\text{ср}_1} = 195,5^\circ$, $t_{\text{ср}_2} = 195^\circ$ и $t_{\text{ср}_3} = 194,5^\circ$.

Удельный вес дымовых газов от каменного угля при 0° и 760 мм рт. ст. составляет $1,325 \text{ кг/м}^3$. При $t_{\text{вх}} = 200^\circ$ получаем $\gamma_{\text{вх}} = 1,325 \cdot \frac{273}{273 + 200} = 0,765 \text{ кг/м}^3$. Удельные веса при $t_{\text{ср}_1}$, $t_{\text{ср}_2}$ и $t_{\text{ср}_3}$ получаются равными, примерно $\gamma_{\text{ср}_1} = 0,773$, $\gamma_{\text{ср}_2} = 0,775$ и $\gamma_{\text{ср}_3} = 0,777$. Теперь можно определить потерю тяги от охлаждения. Согласно уравнению (62) она получается равной

$$Z_{\text{ох}_1} = 35 (0,773 - 0,765) = 0,280 \text{ мм вод. ст.}$$

$$Z_{\text{ох}_2} = 40 (0,775 - 0,765) = 0,400 \text{ " " "}$$

$$Z_{\text{ох}_3} = 45 (0,777 - 0,765) = 0,540 \text{ " " "}$$

Таким образом, потери тяги от охлаждения в случае максимальной нагрузки при принятой высокой температуре наружного воздуха сравнительно малы. При очень малой нагрузке, вследствие меньшей скорости газов, получаются гораздо большие значения, равно как и при очень низких наружных температурах. Но так как при малой нагрузке потребная сила тяги также меньше (остальные потери тяги тоже уменьшаются) и так как, далее, при очень низких наружных температурах сила тяги сама по себе становится значительно больше, то нам нет надобности вдаваться здесь в исследование этих условий. Принятые значения ($w = 5 \text{ м/сек}$ и $t_{\text{воз}} = 40^\circ$) представляются самыми неблагоприятными из возможных в данном случае.

Статическая сила тяги. Удельный вес наружного воздуха при 40° получается равным $\gamma_{\text{воз}} = 1,288 \cdot \frac{273}{273 + 40} = 1,125$. На основании уравнения (52) получаем:

$$Z_{\text{ст}_1} = 34 (1,125 - 0,773) = 12,3 \text{ мм вод. ст.}$$

$$Z_{\text{ст}_2} = 40 (1,125 - 0,775) = 14 \text{ " " "}$$

$$Z_{\text{ст}_3} = 45 (1,125 - 0,777) = 15,7 \text{ " " "}$$

Теперь мы уже видим, что оба значения H_1 и H_2 , несомненно, слишком малы.

Потери тяги от образования скорости. Если скорость у выхода из дымовой трубы при диаметре в 1 м составляет 5 м/сек, то при среднем диаметре в 1,5 м она составит в среднем

¹ На рис. 21, стр. 56, приведены средние теплоемкости от 0 до t° . Так как здесь для $t_{\text{вх}}$ берется истинная теплоемкость (строго говоря, средняя теплоемкость между $t_{\text{вх}}$ и $t_{\text{вых}}$, но этой разницей можно пренебречь, так как мы имеем дело со сравнительно малым температурным падением), то данные рис. 21 должны быть соответствующим образом пересчитаны. Для 10% CO_2 и 200° мы находим $C_{\text{ср}} = 0,325$ и вычисляем из уравнения
$$\frac{C_p(200^\circ) + C_p(0^\circ)}{2} = C_{\text{ср}}$$
 (от 0 до 200°) искомое значение $C(200^\circ)$, приблизительно равное 0,33.

$\frac{5}{1,5} = 3,33$ м/сек. По табл. 19 для 200° и 2 м/сек находим $Z_{ск} = 0,155$ мм вод. ст. Для 3,33 м/сек получается:

$$Z_{ск} = \frac{0,155 \cdot 3,33^2}{2} = 0,43 \text{ мм вод. ст.}$$

Это значение годится с достаточным приближением для всех трех высот дымовой трубы, так как средние температуры газов все весьма мало отличаются от 200° .

Потеря тяги от трения. Эта потеря для среднего диаметра дымовой трубы в 1,5 м, средней температуры газов в 200° и средней скорости в 3,33 м/сек получается, путем экстраполирования, по табл. 20, приблизительно равной 0,0036 мм вод. ст. на 1 м высоты.

Таким образом, получается:

$$Z_{тр_1} = 35 \times 0,0036 = 0,126 \text{ мм вод. ст.}$$

$$Z_{тр_2} = 40 \times 0,0036 = 0,144 \text{ " " "}$$

$$Z_{тр_3} = 45 \times 0,0036 = 0,162 \text{ " " "}$$

Истинная сила тяги. Последняя получается путем вычитания значений $Z_{ск}$ и $Z_{тр}$ из статической силы тяги $Z_{ст}$.

$$Z_1 = 12,3 - 0,43 - 0,126 = 11,744 \text{ мм вод. ст.}$$

$$Z_2 = 14 - 0,43 - 0,144 = 13,453 \text{ " " "}$$

$$Z_3 = 15,7 - 0,43 - 0,162 = 15,108 \text{ " " "}$$

Итак, для данных условий высота дымовой трубы должна быть равна 45 м, так как при 35 и 40 м не достигается требуемой силы тяги. Правда, расчет произведен для очень высокой температуры воздуха. Если максимальная нагрузка случается лишь в холодные зимние дни, как это в действительности обычно и бывает, то можно вести расчет, исходя из $t_{воз} = 0^\circ$, и тогда статическая сила тяги, при учете больших потерь от охлаждения и соответственно больших удельных весов газов, получится равной

$$Z_{ст_1} = 35 (1,288 - 0,779) = 17,8 \text{ мм вод. ст.}$$

$$Z_{ст_2} = 40 (1,288 - 0,781) = 20,2 \text{ " " "}$$

$$Z_{ст_3} = 45 (1,288 - 0,785) = 22,7 \text{ " " "}$$

Таким образом, в этом случае было бы вполне достаточно и дымовой трубы в 35 м. Этот пример показывает, как велико влияние наружной температуры на условия тяги в котельной установке.

VI. ИСКУССТВЕННАЯ ТЯГА.

1. Общие сведения.

В последнее время все чаще и чаще начинают заменять или усиливать естественную, вызываемую дымовой трубой, тягу посредством искусственной тяги. Чтобы осуществить это, во-первых, можно засасывать нужный для горения воздух с помощью вентиляторов, соединенных за тонкой с дымовым капалом (всасывающая тяга), а во-вторых, можно вгонять воздух при положительном давлении сквозь колосниковую решетку или нагнетать его в топочную камеру (нагнетательная тяга или нижнее дутье).

Эксплуатационные затруднения. Введение всасывающей тяги и нижнего дутья вначале представляло существенные затруднения, так как равномерное распределение всасывающего действия по всему горящему слою достигнуть не легко. Если толщина слоя угля и размер его кусков не вполне одинаковы по всей решетке, то в топках с нижним дутьем в местах малого сопротивления воздуха быстро образуются воронки и дыры, тогда как в других местах, где сопротивление выше, проходит насквозь слишком мало воздуха, отчего горение становится неполным. Правда, такие затруднения возможны иногда и при естественной тяге, но не в такой степени, как при сильной искусственной тяге. Кроме того в топках с нижним дутьем шуровка и наблюдение за огнем часто не вполне безопасны, так как не всегда устраняемое положительное давление над колосниковой решеткой выбивает пламя из топочных дверей и смотровых окошек при их открывании. Кроме того вследствие положительного давления в топочной камере газы могут проникать через неплотности и щели обмуровки в кочегарку и причинять вред обслуживающему персоналу. Напротив, при всасывающей тяге через неплотности и поры кладки, через щели в люках и дверцах засасывается много постороннего воздуха. Наконец, при сжигании малоценных углей, для которых вначале употребляли топки с нижним дутьем, легко возникают большие потери от уноса, так как вследствие сильного давления воздуха мелкие угольные частички взмываются вихревым движением воздуха и увлекаются в дымоходы котла. От этого

в первых топках не только получались большие тепловые потери, но и сильно загрязнялись дымоходы, отчего, с одной стороны, уменьшалась теплопередача, а с другой стороны — возра- стали расходы по очистке.

Преимущества. Все эти затруднения в современных топках преодолены. В настоящее время топка с нижним дутьем, а во многих случаях и всасывающая тяга представляют собой необходимые средства не только для повышения производительности, но часто и для улучшения к. п. д. В особенности котлы высокой производительности с колосниковыми решетками больших размеров или с топками для пылевидного топлива теперь почти всегда снабжают топками с нижним дутьем или с всасывающей тягой, а иногда и топками с обоими этими устройствами.

Вначале думали, что, применяя искусственную тягу, особенно всасывающую, можно обойтись совсем без дымовой трубы и таким образом значительно сократить капитальные затраты. Однако, как показывает опыт последних лет, эта надежда не оправдалась, если не говорить об особо благоприятных случаях. При сильной искусственной тяге почти всегда неизбежно повышенное образование летучей золы. Впрочем, и тогда, когда образование летучей золы и уноса не превосходит нормальной величины, устранение дымовой трубы влечет за собой значительные неприятности и вред для ближайших окрестностей кочегарки, что недопустимо по гигиеническим причинам. Вследствие этого многие котельные установки, работавшие со всасывающей тягой и имевшие низкие железные дымовые трубы, вынуждены были снова возвести у себя трубы нормальной высоты. Только установки, расположенные далеко от обитаемых мест, могут обходиться низкими дымовыми трубами.

Главные преимущества искусственной тяги следующие: легкость регулирования и независимость от влияний погоды, более высокая производительность, отнесенная к равной поверхности колосниковой решетки и поверхности нагрева котла (толстый слой горючего на решетке), способность быстрого приспособления к колебаниям нагрузки, меньшая потеря в отходящих газах, так как эти газы можно широко использовать для подогрева питательной воды и воздуха, а также возможность сжигать на нормальных решетках малощелочный и очень мелкий уголь. Этому следует противопоставить, как недостатки, более высокие эксплуатационные расходы в виде затрат на двигательную энергию и содержание в исправности вентиляторов или эксгаусторов.

При высокой производительности и больших размерах котлов, а также при топках для угольной пыли, нефти и газа искусственная тяга во всяком случае целесообразна. Но в средних и малых котельных установках, работающих на высокосортном угле, в большинстве случаев бывает достаточно естественной тяги. Однако и здесь искусственная тяга может приобрести значение, а именно — при расширении существующих установок. Повышение производительности часто бывает возможно лишь за счет устройства нижнего дутья или всасывающей тяги, так как размеры дымовой трубы (ее высота и поперечное сечение) окажутся уже недостаточными для естественной тяги. Между тем, расширить поперечное сечение невозможно, а надстройка дымовой трубы обходится дорого и часто оказывается бесполезной. Таким образом, введение искусственной тяги во многих случаях избавляет от расхода по устройству второй дымовой трубы.

2. Нижнее дутье.

Способ действия. В топках с нижним дутьем, как уже упоминалось выше, необходимый для горения воздух вдувается с положительным давлением в слой горючего или в топочную камеру. Нижнее дутье имеет, в общем, лишь задачу продувать воздух сквозь слой горючего и разгружать дымовую трубу, тогда как на естественной тяге попрежнему остается задача отводить газообразные продукты горения. Поэтому избыток давления воздуха при вступлении в слой топлива не должен превышать той величины, какая необходима, чтобы как раз преодолевать сопротивление в этом слое, так что непосредственно за решеткой не должно быть ни разрежения, ни сжатия (0 мм вод. ст.) Избыток давления над колосниковой решеткой, как сказано выше, может привести к прониканию дыма в помещение котельной и к выбрасыванию пламени при открывании люков и топочных дверей, что делает невозможной шуровку огня.

Итак, следует подчеркнуть, что нагнетательное или нижнее дутье никогда не может заменить дымовой трубы и способно лишь существенно облегчить ее задачу устранением сопротивления слоя горючего. Только в исключительных случаях, при работе с большим положительным давлением в топочном пространстве, можно почти обойтись без естественной тяги и удовлетвориться низкой дымовой трубой.

Паровое дутье. Положительное давление может быть создано паром или достигнуто посредством центробежного вентилятора. При паровом дутье воздух засасывается струями

пара, выходящими из многочисленных сопел под колосниковой решеткой. Пароструйные приборы, имея низкий к. п. д., вызывают очень большой расход пара (часто до 10% производительности котла), а кроме того при них огонь охлаждается паром, отчего к. п. д. понижается еще более. Поэтому в настоящее время эти приборы применяют редко; они представляют известные преимущества лишь тогда, когда значительное увлажнение угля целесообразно и с точки зрения техники сжигания, например при сжигании кокса и коксовой мелочи, сильно спекающихся углей и т. д. Конечно, приборы для парового дутья стоят дешевле вентиляторов, но эта разница более чем уравновешивается значительно более высокими эксплуатационными расходами.

Центробежные вентиляторы. Современные топки с нижним дутьем при колосниковых решетках с движущимися колосниками почти всегда работают с помощью центробежных вентиляторов. Различают два вида топок с нижним дутьем. В одной группе колосниковая решетка герметически закрыта, и все пространство под решеткой, включая зольник, находится под давлением. Клапан для регулирования воздуха в конце решетки способствует распределению воздуха соответственно выгоранию топлива. Недостатком этой конструкции является то, что при каждом опорожнении зольниковой воронки приходится останавливать нижнее дутье. Еще хуже, однако, то, что такая установка очень мало поддается регулированию. Поскольку в топках с движущимися колосниками сопротивление слоя топлива в продольном направлении решетки обычно убывает к заднему концу, соответственно большему выгоранию угля в этой части решетки, большее количество воздуха поступает как раз там, где оно менее всего нужно, что вызывает недостаток воздуха в передней части решетки и избыток его у конца решетки.

От этих недостатков свободна вторая группа топок с нижним дутьем, в которых воздух подводится принудительно, в точно урегулированном количестве, через несколько расположенных под колосниковой решеткой подвижных или неподвижных воздушных камер. По этому принципу разделены на зоны работают, между прочим, современные колосниковые решетки высокой производительности Штейнмюллера, Валтера и «Нибо и Ниссен».

Область применения. Топка с нижним дутьем сделала за последние годы такие успехи, что применяется теперь почти при всех крупных котлах, особенно если сжигается малое, мелкое топливо. Для всех стокеров, работающих обычно при значительной толщине слоя горючего, нижнее дутье представляется безусловно необходимым. Затраты на первоначальное оборудование в общем не особенно высоки, расходы по эксплуатации и текущему ремонту — малы. Кроме того благодаря почти равномерно распределенной тяге в топочном пространстве, а также легкости и скорости регулирования достигаются существенные преимущества с точки зрения техники сжигания, не говоря уже о повышении производительности и лучшем сохранении плит решетки.

3. Всасывающая тяга.

Тогда как нижнее дутье никогда не может полностью заменить дымовую трубу, при всасывающей тяге это возможно, так как присоединенный к борову вентилятор действует так же, как и дымовая труба, т. е. он не только засасывает нужный для горения воздух, но и удаляет газообразные продукты горения.

Всасывающая тяга прямого и непрямого действия. Различают всасывающую тягу прямого и непрямого действия. При всасывающей тяге прямого действия посредством большого вентилятора засасывают все образующиеся в котельной установке дымовые газы и выводят их наружу через дымовую трубу, тогда как при всасывающей тяге непрямого действия через вентилятор проходит только часть газов, которые за вентилятором вдуваются в дымовую трубу через центрально расположенное в ней сопло. Кинетическая энергия этих газов создает, как при действии эжектора, разрежение в дымовой трубе, благодаря чему отсасываются и остальные дымовые газы. Вместо того чтобы вдувать через сопло часть дымовых газов, можно пользоваться для этой цели воздухом и удалять полное количество отходящих газов, используя его присасывающее действие. При всасывающей тяге непрямого действия дымовая труба обычно расширяется конусообразно вверх, чтобы часть скорости превратить снова в давление и, таким образом, усилить всасывание.

При всасывающей тяге прямого действия требуется меньшая сила, но размеры вентилятора получаются больше; при всасывающей тяге непрямого действия вследствие плохого к. п. д. воздухопоструйных эжекторов необходим значительный расход энергии, но зато такая установка требует меньше места.

Сравнение с нижним дутьем. По сравнению с нижним дутьем, действующим посредством вентилятора, расход энергии установок для всасывающей тяги во всяком случае больше, так

как при нижнем дутье полностью используется естественная тяга дымовой трубы. Размеры установок для всасывающей тяги также оказываются больше вследствие большого удельного объема горячих дымовых газов по сравнению с объемом холодного воздуха, вводимого для процесса горения. Другим недостатком установок с всасывающей тягой является сильное разрежение в топочной камере, вследствие которого при неплотностях в обмуровке происходит засасывание больших количеств постороннего воздуха, т. е. ухудшение к. п. д. Кроме того, при мелком угле и толстом слое горючего в тонкие, одной всасывающей тяги бывает недостаточно, так как большое сопротивление слоя горючего требует слишком сильного разрежения в топочной камере. В этом отношении всасывающая тяга не отличается от естественной тяги дымовой трубы. В таких случаях следует подумать о применении одного нижнего дутья или же о комбинации всасывающей тяги и нижнего дутья, что часто применяется при особенно крупных котлах.

Всасывающая тяга, по сравнению с нижним дутьем, представляет то преимущество, что вся установка получается проще и дешевле в тех случаях, когда несколько котлов присоединяются к общему борову. При нижнем дутье воздух для горения приходится подводить от общего вентилятора к каждой колосниковой решетке посредством каналов или труб, или же ставить для каждого котла отдельный вентилятор. При всасывающей тяге, напротив, вентилятор может быть соединен с общим боровом или дымовой трубой, благодаря чему вся установка для тяги требует весьма мало места, а в уже существующих установках расходы по ее устройству оказываются значительно меньше стоимости переустройства на нижнее дутье. Кроме того при ней можно лучше использовать отходящие газы и этим иногда значительно повысить к. п. д. котельной установки. Далее, могут быть значительно уменьшены в новых установках капитальные затраты, так как при всасывающей тяге бывает достаточно поставить железную дымовую трубу. Таким образом, можно сэкономить большие расходы по сооружению дымовой трубы. Но этим преимуществом редко удается воспользоваться, потому что, как уже упомянуто, гигиенические соображения обычно не позволяют выпускать дымовые газы из низких труб.¹

VII. ПОДГОТОВКА ПИТАТЕЛЬНОЙ ВОДЫ.

Необходимой принадлежностью надежного в эксплуатации и экономично поставленного котельного хозяйства почти всегда является установка для подготовки питательной воды. Вода почти везде имеется в распоряжении в обильном количестве, но в своем природном состоянии она редко годится для непосредственного использования ее в паровом котле. На своем пути сквозь атмосферу и различные слои почвы она успевает принять в себя более или менее значительное количество газов и солей, при наличии которых почти всегда бывает необходима тщательная очистка.

1. Вред от неочищенной питательной воды.

С давних времен известно, что загрязнение котельной питательной воды не только вредно с точки зрения использования тепла для парообразования, но может также повести к убыточным перерывам в работе, так как котлы приходится часто останавливать в целях очистки. Опыт, приобретенный в особенности во время войны и в первые послевоенные годы, когда основательная очистка и подготовка питательной воды часто бывали невозможны, и, далее, в последнее время — при обслуживании особенно чувствительных котлов высокого давления, показал, что как долговечность котла, так и стойкость котельных материалов в высокой степени зависят от свойств питательной воды и что надежность котельной установки может весьма понизиться при питании ее неподходящей водой. Многие несчастные случаи и взрывы объясняются всецело отсутствием подготовки или недостаточной подготовкой питательной воды.

В связи с этим за последнее время произведено много опытов в лабораторной обстановке и на предприятиях, в целях исследования влияния питательной воды и ее примесей на безопасность эксплуатации паровых котлов. Если эти опыты еще далеки от своего завершения и если целый ряд вопросов остался до сих пор невыясненным, а частично даже служит предметом ожесточенных споров, то все-таки уже получен ряд ценных результатов, благодаря которым в последнее время удалось существенно понизить число несчастных случаев.

¹ Подробные сведения об искусственной тяге в котельных установках имеются в статье проф. Г. Ф. Кнорре в сборнике «Теплотехника», Ленинград, 1928. Там же помещен расчет искусственной тяги, основанный частью на самостоятельных формулах Г. Ф. Кнорре. См. также специальную монографию проф. Н. Н. Бутак ова, Механическая тяга в котельной, Москва, 1931. *Прим. ред.*

В общем, можно различать два рода принципиально различных вредных влияний питательной воды:

1) образование котельной накипи и грязи, объясняемые, главным образом, наличием в питательной воде солей;

2) разедание и появление трещин в котлах, что, главным образом, вызывается растворенными в питательной воде газами.

Оба эти явления во многих отношениях чрезвычайно вредны и опасны.

Осаждение котельной накипи. Вследствие изолирующих свойств котельной накипи осаждение ее на поверхности нагрева значительно понижает передачу тепла от газообразных продуктов горения испаряемой воде. Это, с одной стороны, ухудшает к. п. д. и производительность котла, значительно повышая тем самым расход горючего, а с другой стороны — опасно для существования котла, так как вследствие плохой теплопередачи сильно нагреваются части металлической поверхности нагрева, что влечет за собой образование отдулин, трещин и иногда может привести к серьезным повреждениям и взрывам. Особенно опасно неравномерное осаждение накипи на поверхности нагрева. Это явление легко возникает при сильных колебаниях нагрузки и недостаточной циркуляции воды и может вызвать вредные тепловые напряжения в материале котла. Кроме того большую роль играет химический состав и плотность накипи. Особенно низкой теплопроводностью отличается накипь, содержащая много кремнеземных соединений. Такая накипь даже в очень тонком слое быстро вызывает повреждения котельных труб.¹

Разъедание. Появление разедания и трещин в материале котла, правда, не влечет за собой тепловых потерь, так как не препятствует передаче тепла от горячих газов к питательной воде, однако прочность котла от этого уменьшается и срок его службы сокращается, а кроме того, это явление весьма опасно в том отношении, что во время работы коррозионные повреждения совершенно незаметны, тогда как осаждение накипи часто узнается по падению производительности и повышению температуры отходящих газов, прежде чем возникнут серьезные повреждения. Особенно опасны трещины в заклепочных швах, часто вызываемые обилием газов в питательной воде. Исследования последних лет показали, что мелкие волосные трещинки образуются вследствие напряжений, претерпеваемых материалом уже во время изготовления котла. Эти трещинки, в случае загрязнения питательной воды, очень быстро увеличиваются и существенно понижают сопротивляемость котельного материала.² Ряд взрывов в военные и послевоенные годы был вызван такими трещинами в котельных швах.

Работа при высоком давлении пара. Безукоризненное качество питательной воды особенно важно для современных котлов высоких производительности и давления. Путем помещения поверхности нагрева непосредственно в горячем топочном пространстве в последнее время чрезвычайно повышена удельная производительность котлов. Поглощение тепла этими элементами поверхности нагрева, подверженными излучению пламени, значительно выше, чем в котлах прежних конструкций, в которых теплота передавалась, главным образом, теплопроводностью и конвекцией. Следствием этого повышенного поглощения теплоты явилось сильное напряжение материала котла. Если в таких котлах осаждается накиль или же их стенки подверглись разеданию, то серьезные повреждения неизбежны через самый короткий срок. Далее следует иметь в виду, что в котлах новых типов, особенно в вертикально-водотрубных котлах с изогнутыми трубами, удаление накипи из труб весьма затруднительно, а иногда и невозможно. Наконец, мелкие крупинцы солей могут быть увлечены паром в перегреватель, в трубопроводы и турбины и способны вызвать там серьезные повреждения и разрушения. Далее, как показали новейшие исследования, твердое железо тем сильнее разедается солями и газами, чем выше рабочее давление.

Из этого краткого перечисления видно, что для всех котлов, особенно же для новейших окрапированных котлов с высоким напряжением поверхности нагрева и высокими рабочим давлением и температурой, чрезвычайно важное значение имеет безукоризненная очистка и подготовка питательной воды.

2. Способы очистки воды.

Следует различать три принципиально различных способа подготовки воды: механическую очистку, химическую очистку и дистилляцию. При этом нужно иметь в виду, что простая

¹ См. Eberle u. Holzhauser, Die Wärmeleitfähigkeit von Kesselsteinen. Arch. f. Wärmewirtschaft, 9, 171, 1928, и 10, 334, 1929.

² См. между прочим исследования Berl'a, Staudinger'a и Plagge, Forschungsheft, 295, Festgabe Carl v. Bach, стр. 7—17, изд. V.D.I., Берлин, 1927.

механическая очистка, при которой удаляются только увлекаемые водою примеси и взвешенные в ней вещества, вообще говоря, недостаточна, вследствие чего ее почти всегда приходится дополнять одним из двух других способов. Далее, механическая очистка не ограничивается обработкой питательной воды перед питанием ею котла, так как сюда же относится удаление осадков и выделений, образующихся во время происходящих в котле реакций, и прежде всего здесь имеется в виду непрерывная или периодическая отводка грязи. Ниже изложены преимущества и недостатки важнейших испытанных на практике способов подготовки воды.

3. Механическая очистка питательной воды.

Грубое засорение воды должно предупреждаться непосредственно у заборного конца трубы, для чего применяют частые решетки, отстойные бассейны и тому подобные устройства. В самом котельном помещении речь идет уже лишь об удалении мелких зерен и взвешенных веществ. Эта задача разрешается посредством *фильтров*, обычно состоящих из перфорированных железных листов, между которыми заключены слои мелкого щебня и песка. В подобных фильтрах применяют иногда в качестве фильтровального материала опилки. Однако фильтры с опилками имеют перед песочными фильтрами тот недостаток, что они не поддаются очистке, в виду чего опилки от времени до времени приходится сменять. Песочные же фильтры с помощью простых приспособлений для промывки можно быстро освобождать от всех задержанных ими примесей, таким образом полностью возвращая им их работоспособность. Для того чтобы производительность фильтров, т. е. количество протекающей сквозь них в единицу времени воды, не упала слишком низко, их необходимо часто очищать, так как осаждающаяся в них грязь значительно увеличивает сопротивление течению жидкости. Поэтому часто применяют так называемые *быстродействующие фильтры*, в которых промывка весьма ускоряется посредством особых приспособлений (вдувание воздуха, перемешивание песка и т. д.).

Продувку котла мы рассмотрим вместе с химической очисткой, так как способы опускания грязи находятся в тесной зависимости от разных способов химической очистки.

4. Химическая очистка питательной воды.

Для работы котлов особенно опасны содержащиеся в более или менее значительном количестве почти во всякой воде известковые и магниевые соли, которые называют источниками жесткости воды. Различают жесткость от углекислых солей, вызываемую двууглекислыми известковыми и магниевыми солями, и жесткость некарбонатную, которая вызывается известковыми и магниевыми солями серной, соляной, азотной и других кислот. Эти соли химически можно удалять двояким путем: во-первых, посредством так называемых способов осаждения, из которых наиболее известны известково-содовый способ, способ с применением едкого натра и соды и известково-содовый способ с непрерывной продувкой, и, во-вторых, посредством способов, основанных на реакциях обмена. Из последних способов наиболее известна очистка посредством пермутита и цеолита.

Известково-содовый способ. *Химические реакции.* Посредством присадки к воде известки удаляются растворенные в воде двууглекислые соли известки и магния, а также свободная углекислота, тогда как присадка соды заставляет выделяться сернистые, солянокислые и азотнокислые соли. Все известковые соли выпадают в виде нерастворимой в воде углекислой соли, а все магниевые соли—в виде нерастворимой в воде гидроокиси. Однако в то время как жесткость, зависящая от углекислых солей, исчезает из воды без того, чтобы ее место заняли растворимые щелочные соли, вода принимает в себя эквивалентное выделившемуся количеству неуглекислых солей количество солей натрия (сернистой, хлористой, азотнокислой). Всегда необходим некоторый избыток соды над ее теоретическим количеством, так как иначе, в виду обратимости реакций, легко может образоваться снова сернистая известка и сернистый магний.

При тщательном и постоянном контроле, необходимом вследствие непрерывно колеблющегося состава сырой воды, известково-содовый способ даст возможность достигнуть уменьшения воды самое большее до 3 или 4 немецких градусов жесткости (DNG). При особенно благоприятных условиях и большом избытке воды, а также при сильном подогреве воды жесткость можно свести даже до 1 или 2 DNG, что обычно вполне достаточно для работы котлов.

Подогревание воды. Сильный подогрев воды (по крайней мере, до 70°, а при возможности — еще и выше) можно рекомендовать уже потому, что этим весьма сокращается время, необходимое для осаждения солей жесткости. Кроме того при сильном подогреве воды эти соли выделяются в виде крупных хлопьев, удобных для фильтрования. При обыкновенной температуре (21°) реак-

ция требует от 6 до 8 часов, при 50°—3 часа, при 70°—всего 1½ часа. Другое большое преимущество ведения реакции при высокой температуре заключается в том, что одновременно отгоняется и часть обычно содержащихся в воде весьма вредных газов (углекислоты и кислорода). Поэтому всегда, когда это возможно, воду следует умягчать в теплом или горячем состоянии.

Преимущества и недостатки. Известково-содовый способ уместен всегда при наличии в воде большого содержания углекислоты и углекислых солей. Однако он требует довольно громоздких установок и постоянного хорошего обслуживания последних, внимательного надзора, частых химических анализов питательной воды и воды в самом котле и, наконец, частой продувки котла, так как вода в котле постепенно все более обогащается образующимися в очистительном аппарате сульфатом и хлоридом натрия, осаждающимися в виде ила и при сильной концентрации вызывающими выплескивания в котле и образование корки в насосах, клапанах и т. д. С другой стороны, как показали исследования Парра (Parr),¹ Холла (Hall)² и Берля (Berl),³ сернистый натрий представляет собой отличную защиту

против разъедания, и поэтому его присутствие в слабой концентрации желательно в питательной воде.

На рис. 122 изображен один из наиболее известных аппаратов, работающих по известково-содовому способу, — водоочиститель конструкции Штейнмюллера. Аппарат состоит из шести главных частей: распределителя воды *a*, подогревателя *b*, сатуратора для извести *c*, бака для содового раствора *d*, отстойного резервуара *e* и фильтра с кварцевым песком *f*. Особо внимания заслуживает применение в сатураторе совершенно свободного от углекислоты воздуха, прогоняемого непрерывным циклом сквозь известковую гущу и таким образом обеспечивающего равномерное насыщение воды известью, далее — автоматический распределитель содового раствора, который может быть точно урегулирован и подает соду строго пропорционально всему количеству проходящей через аппарат воды, и, наконец, вращательное движение воды в отстойном резервуаре, облегчающее и ускоряющее осаждение выделившихся хлопьев.

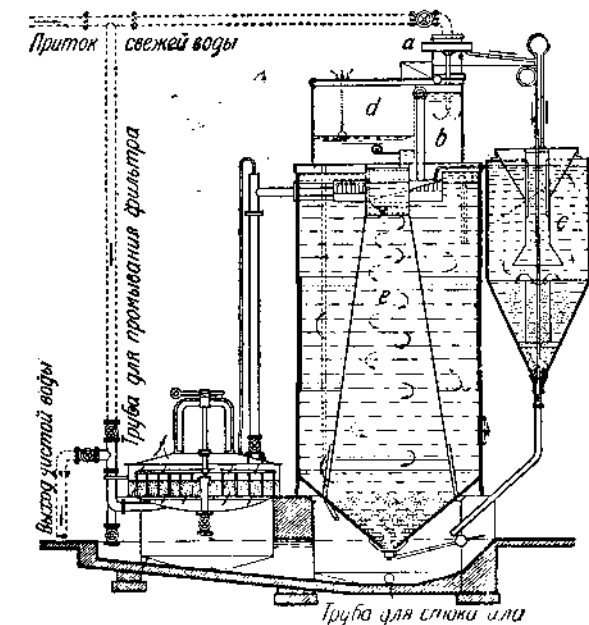


Рис. 122. Известково-содовый водоочистительный аппарат, конструкции Штейнмюллера.

a — распределитель воды; *b* — подогреватель; *c* — сатуратор для извести; *d* — резервуар для содового раствора; *e* — отстойный резервуар; *f* — фильтр с кварцевым песком.

Способ с применением едкого натра и соды. Этот способ отличается от известково-содового способа только тем, что при нем во время химических превращений, кроме нерастворимых в воде солей, образуется еще сода, которая затем подвергается такому же превращению, как и при известково-содовом способе. Таким образом, количество выделяющейся грязи здесь меньше, и это иногда может оказаться выгодным. С другой стороны, едкий натр значительно дороже извести, вследствие чего этот способ сопряжен с большими эксплуатационными расходами. В виду этого его применяют только в особых случаях, например при высоком содержании в воде магниевых солей.

Регенеративный способ. Химические реакции. При этом способе к воде присаживают только соду. Здесь так же, как и при известково-содовом способе, соли жесткости выпадают в виде нерастворимой углекислой извести и гидрата окиси. Далее, и здесь вода в котле, вместо вредных сульфатов и хлоридов, содержит соли натрия. Но в то время как при известково-содовом способе

¹ Bulletin Eng. Experiment Station, 94, 1927; 155, 1926.

² Power 69, 873, 1929. См. также: Die Wärme, 52, 690, 1929.

³ Arch. f. Wärmewirtschaft, 9, 165, 1928.

жесткость, зависящая от углекислых солей, полностью исчезает, при чисто содовом способе ее место занимают растворимые щелочные соли. Таким образом, вода в котле содержит больше солей, чем при известково-содовом способе. Кроме того здесь происходит дополнительная реакция, так как часть избыточной соды, под действием высокого давления и температуры в котле, разлагается на углекислоту и едкий натр, после чего едкий натр заставляет выделиться еще содержащийся в воде углекислый магний в виде гидрата окиси магния. Для того чтобы эта реакция происходила не в самом котле, а вне его, часть содержащей едкий натр котельной воды непрерывно отводит обратно по особой трубе в очистительный аппарат.

Установки для регенеративного способа, впервые предложенного Росселем, строились в значительном количестве фирмами «бр. Зульцер» в Винтертуре и «Рейхлинг» в Дортмунде. В начале столетия этот способ получил большое распространение, но теперь его совсем оставили и, главным образом, потому, что при нем в котле должен быть большой избыток соды, который иногда, особенно при высоком давлении в котле, может оказаться весьма вредным.

Кроме того и образование в котле углекислоты может вызвать опасное разъедание.

Содовый способ с непрерывной продувкой. Этот способ, впервые примененный штутгартской фирмой «Мюллер», внешне схож с регенеративным способом, так как и здесь происходит непрерывный отвод воды из котла по особой трубе. Однако, тогда как при регенеративном способе часть избыточной соды непрерывно отводится обратно в очистительный резервуар, при описываемом способе труба служит для обратного отвода грязи, образующейся при осаждении остаточной жесткости в котле. Осаждение двууглекислых солей производится не содой, а действием теплоты.

Данный способ представляет то преимущество, что при правильном обслуживании и надзоре он не допускает образования чрезмерно высокой концентрации солей. Кроме того при нем вода в очистительном аппарате нагревается от непрерывного притока воды из котла, благодаря чему и достигаются упомянутые выше большие преимущества. Впрочем, необходимо упомянуть и о некоторых недостатках этого способа и, прежде всего, о необходимости особенно тщательного надзора за обратным трубопроводом. Неизбежные мелкие неисправности, например засорение обычно довольно узких обратных труб, порча регулирующих приток воды поплавков и т. п., могут иметь весьма вредные последствия. Кроме того, отведенная обратно, свободная от кислорода вода жадно поглощает кислород, что может вызывать разъедание при обратной подаче этой воды в котел. Но, с другой стороны, как уже упомянуто, питательная вода оказывается сильно нагретой за счет воды, притекающей из котла, вследствие чего ее способность к поглощению кислорода уменьшается. Опасность того, что свободная углекислота в большом количестве проникнет в котел, также невелика в виду высокой температуры питательной воды.

Рассматриваемый способ выгоден, главным образом, в случае воды, жесткость которой вызвана преимущественно неуглекислыми солями и которая содержит малое количество магниевых солей.

Известково-содовый способ с непрерывной продувкой. Весьма оправдался также известково-содовый способ с непрерывной продувкой, успешно применявшийся, например, фирмами «Мюллер», ¹ «Итейнмюллер» и «Рейзерт». При способе «Harko» фирмы «Рейзерт» вода сначала очищается в нормальной известково-содовой установке, а затем подвергается воздействию разных присадок в отстойном резервуаре. Отсюда очищенная вода через дополнительную трубу течет в так называемый резервуар для дополнительной реакции, куда непрерывно поступает также небольшое количество воды из котла. После того как в этом сосуде совершится дополнительная реакция и вода успеет потерять почти всю свою жесткость, ее направляют в песочные фильтры.

По сравнению с уже рассмотренными способами способ «Harko» представляет следующие преимущества: почти полное освобождение воды от жесткости, весьма малую щелочность содержащегося котла и поэтому устранение столь частого при чисто известково-содовом способе «вскипания», почти полное устранение требуемой при известково-содовом способе продувки котла, особенно неудобной при высоких давлениях, полное выделение углекислоты (в противоположность содовому способу) и т. д. Однако и этот способ требует весьма тщательного обслуживания аппаратов и постоянного внимательного надзора. Так как, далее, дополнительная реакция требует весьма высокой температуры (которая, впрочем, без затруднений достигается обратным

¹ Относительно интересных новшеств в этом способе, например, относительно удаления кремневой кислоты, дегазации посредством вакуума и т. д., см. H a a s, Die Wärme, 51, 332, 1928.

отводом котельной воды), то почти отпадает польза, приносимая экономайзерами. В существующих установках это может оказаться недостатком, но в новых установках это является преимуществом, так как дает возможность отказаться от устройства экономайзера и вместо него поставить подогреватель воздуха.

Пермутитовый способ. Все способы осаждения имеют тот недостаток, что требуют постоянного тщательного надзора над очистительной установкой, ибо, как показывают многочисленные опытные данные, в противном случае вся польза от очистки воды может свестись к нулю вследствие почти всегда наблюдаемых сильных колебаний в составе воды. Поэтому большим преимуществом пермутитового способа является то, что он дает совершенно свободную от жесткости воду, независимо от свойств имеющейся воды и как бы «автоматически».

Сущность способа. Умягчение воды посредством пермутита основано на том, что силикаты алюминия (цеолиты) обладают способностью обмена содержащейся в них щелочи на другие металлы. Поэтому, если пропускать воду сквозь цеолитовый фильтр, источники жесткости в ней замещаются эквивалентными количествами натрия или калия. Такая установка не требует постоянного контроля поступающей воды, и поэтому ее надлежит лишь, по прохождении через нее определенного количества воды, регенерировать поваренной солью. В качестве фильтровальных материалов применяют искусственные цеолиты («пермутит» — в Германии, «дусиль» — в Англии).

Преимущества и недостатки. Наряду с большими преимуществами равномерности действия и легкости ухода следует прежде всего упомянуть еще о том, что пермутитовые установки занимают мало места, дают экономию на химикатах и, наконец, предоставляют возможность очищать совершенно холодную воду с таким же успехом, как горячую, так как реакция обмена не зависит от температуры. Недостаток пермутитового способа, особенно при сильной жесткости воды от углекислых солей, заключается в том, что в фильтре из солей временной жесткости образуется двууглекислая натриевая соль, разлагающаяся в котле на соду и углекислоту. Последняя же, особенно при наличии, кроме нее, кислорода, способна вызывать в котле разбедания. При пермутитовом способе необходимо поэтому всегда заботиться о тщательной дегазации воды.

Чтобы предупредить образование из двууглекислых солей углекислоты, воду, отличающуюся сильной жесткостью от углекислых солей, сперва умягчают посредством обработки ее известью, хотя установка становится от этого сложнее и расходы по очистке значительно повышаются. Зато пермутитовый способ особенно пригоден для умягчения воды, содержащей мало углекислоты и углекислых солей.

Содержащая кремний котельная накипь весьма опасна в виду своей малой теплопроводности. По вопросу о том, может ли такая накипь образовываться, несмотря на полное устранение жесткости в пермутитовых фильтрах, взгляды расходятся. По данным Пфадта (Pfadt),¹ в этом отношении получаются очень плохие результаты именно при воде, обработанной пермутитом, тогда как Браунгард (Braungard)² считает подобные случаи, равно как и описанные Пфадтом, вполне устраняемыми при регулярной продувке котла. По нашему мнению, в случае высокой концентрации солей в воде внутри котла образование кремнеземной накипи вполне возможно при всех способах очистки, равно как и при питании дистиллированной водой, и поэтому необходимо через определенные промежутки времени спускать из котла часть воды и этим предупреждать выделение осадков.

5. Установки для удаления газов.

Вред от кислорода. Как неопровержимо показали все исследования последних лет, кислород вреден даже в сравнительно малых количествах, так как разъедает материал котла. Удаление свободного кислорода поэтому не менее важно, чем удаление источников образования накипи. По эксплуатационным данным последних лет содержание кислорода ни в коем случае не должно превышать 0,5 мг/л. Если принять во внимание, что вода при 20° все еще способна растворять 9,09 мг/л кислорода и что почти всегда содержит несколько миллиграммов его и, далее, что часто признаваемый совершенно свободным от газов турбинный пар, сгущающийся в поверхностных конденсаторах, согласно опытным данным содержит, примерно, от 1,5 до 2,5 мг/л (причиной этого являются неизбежные неплотности в конденсаторах), то станет понятным, что одного обратного отвода конденсата турбин в котел ни в коем случае недостаточно,

¹ См. Speisewasserpflge, 41, 1926.

² См. Zeitschr. d. Bayer. Rev. Vereins, 29, 259, 1925.

чтобы предохранить его от разбедания. Почти во всех случаях освобождать от газов следует не только добавочную питательную воду, но и конденсат.

Нагревание воды. Для освобождения воды от кислорода применялись с большим или меньшим успехом разнообразные средства. Самый простой и во многих случаях достаточный способ состоит в нагревании воды во время ее химической очистки, что, как мы уже видели, выгодно и по другим причинам. Сильного движения, в котором вода находится во время реакции, и воздействия температуры в 70° или 80° большей частью бывает достаточно, чтобы выгнать из воды большую часть кислорода. Многие установки уже несколько лет работают таким образом, без обнаружения в котлах разбедания. Однако для котлов высокой производительности и высокого давления такой способ дегазации питательной воды не представляется удовлетворительным.

Фильтр с железными опилками. Другой способ заключается в том, что воду пропускают через фильтры из железных опилок или «стальной шерсти», причем железо связывает содержащийся в воде кислород. Этим способом стремятся сосредоточить неизбежное разрушение материала в безвредном месте. Способ в общем не оправдался. Вначале фильтры работают превосходно, но уже спустя короткое время они загрязняются, покрываются ржавчиной и совершенно перестают действовать. Даже частая очистка фильтров, кстати сказать, представляющая собой довольно хлопотливую процедуру, помогает мало. Кроме того происходит быстрая порча его фильтрующей способности, вследствие чего содержимое фильтра приходится часто менять. Гарантии достаточного освобождения воды от кислорода фильтры с железными опилками не дают.

Нагревание воды при вакууме. Исходя из того, что при убывании давления способность воды к растворению кислорода сильно падает, пытались достигнуть дегазации питательной воды нагреванием ее при разрежении. Действительно, таким способом можно значительно понизить содержание кислорода, особенно если позаботиться об усиленном движении воды. Однако полное освобождение от газов, примерно до $0,05$ или $0,1$ мг/л, как это требуется для котлов высокого давления, таким способом недостижимо.

Другие способы. Наконец, упомянем еще о попытках дегазации питательной воды вдуванием в нее азота или присадкой к ней сернистокислого натрия и затем о попытках предупреждения разбедания стенок котла возбуждением в них электрических токов (способ Кумберленда и др.). Эти попытки до сих пор обычно не приводили к успешным и надежным результатам.

Кипячение воды при вакууме. Полного освобождения от газов можно достигнуть, только доведя воду до кипения, так как в этом состоянии она совсем неспособна растворять газы. Чтобы, по возможности, снизить расход воды, целесообразно кипятить воду не при нормальном давлении, а при разрежении, т. е. при нагреве всего до 50° или до 60° , для чего большей частью бывает достаточно имеющегося в распоряжении мятного пара питательных насосов, конденсационных насосов и т. д.

На рис. 123 изображена схема дегазационной вакуум-установки акц. о-ва «Пермутит». Вся питательную воду, т. е. конденсат и добавочную воду, прогоняют насосом из собирательного резервуара через конденсатор для вторичного пара и подогреватель в находящийся под разрежением дегазатор, откуда вода возвращается к питательному насосу, подающему ее в котел. Дегазация производится в состоянии кипения, достигаемом или непосредственным введением в дегазатор пара (при свободном от масла паре), или же нагреванием воды в особом подогревателе перед ее поступлением в дегазатор (как на рис. 123). Всегда надлежит иметь избыток пара, направляемого вместе с выделившимися газами в конденсатор для вторичного пара и конденсирующегося там. Воздушный насос непрерывно откачивает газы и создает разрежение. Регулирование достигается с помощью поплавков и температурных регуляторов.

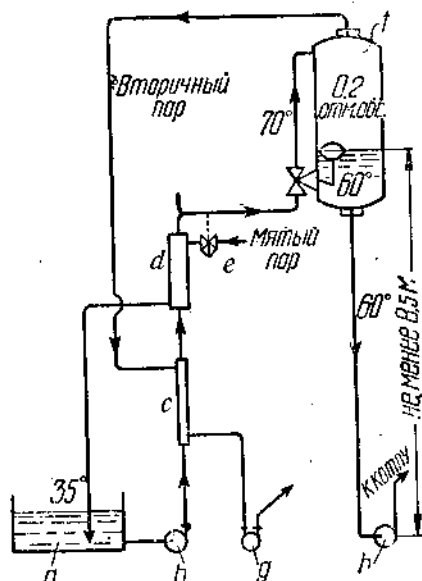


Рис. 123. Дегазация посредством вакуума.

а — собирательный резервуар для конденсата и добавочной воды; б — подающий насос; с — конденсатор для вторичного пара; д — подогреватель; е — дегазатор; г — регулятор температуры; ф — дегазатор; г — воздушный насос; б — питательный насос.

При помощи таких дегазационных установок, например, устроенных по типу, разработанному заводом «Атлас», можно достигнуть почти полной дегазации котельной питательной воды и устранения опасности коррозии. Конечно, одной дегазацией вопрос не исчерпывается, так как необходимо еще позаботиться о том, чтобы дегазированная вода не пришла вновь в соприкосновение с воздухом. Поэтому необходимо постоянно наблюдать за тем, чтобы в трубопроводах, насосах и т. д. не образовалось неплотностей. Полной воздухо непроницаемости надежнее всего можно достигнуть, обеспечив во всем трубопроводе за дегазатором определенное положительное давление.

6. Испарители.

Область применения. Третью большую группу водоочистителей образуют перегонные аппараты или испарители. В виду их высокой стоимости они обычно представляют интерес только для таких предприятий, которые большую часть питательной воды получают из поверхностных конденсаторов, добавляя к ней лишь сравнительно небольшое количество (обычно от 5 до 10%) свежей воды. Конденсат освобождается от воздуха в вакуум-дегазаторах, но очищать его больше не требуется, так как при своей циркуляции через котел и турбину вода не поглощает никаких веществ, могущих вызвать образование в котле накипи. Зато добавочную воду приходится не только дегазировать, но и очищать: химически — по одному из рассмотренных выше способов, или термически — посредством дистилляции. Термическая очистка заключается в том, что свежую воду испаряют и полученный таким образом влажный пар заставляют сгущаться в конденсаторе.

Преимущества и недостатки. Термическая очистка воды имеет перед всеми химическими способами то преимущество, что в котел не попадает никаких солей, чем устраняется необходимость продувки котла для удаления грязи. Далее следует иметь в виду, что даже безвредные для материала котла соли все же могут вызвать неисправности, так как при слишком высокой их концентрации пар легко увлекает с собой твердые частички соли, осаждающиеся на арматуре трубопроводов, на лопатках турбин и т. д., загрязняющие и разъедающие их. Эта опасность остается при всех химических способах очистки, но ее нет при термической очистке. Кроме того при наличии испарительных установок нет надобности в дополнительной дегазации, так как в испарителях выделяются не только соли, но и газы. Недостатком испарителей является их высокая стоимость. Расходы по их содержанию также сравнительно высоки, так как испарители часто приходится чистить. Наконец, и расход тепла в них значительно выше, чем в установках для химической очистки. Впрочем, затраченную на испарение воды теплоту в большинстве случаев можно получить обратно и использовать вновь. Необходимая от времени до времени продувка испарителя, конечно, вызывает большие тепловые потери, которые, однако, здесь не выше, чем в аппаратах для химической очистки. Зато как существенный недостаток следует отметить то, что при пользовании особенно жесткой водой большей частью бывает необходима предварительная химическая очистка, так как в противном случае в испарителе осаждается накипь, значительно понижающая производительность аппаратов.

Конструкция. Среди конструкций для термической подготовки воды известностью пользуются испарители «Атлас», «Бальке» и «Бюринг». В зависимости от рода производства и давления имеющегося в распоряжении мягкого пара, применяют испарители низкого давления или вакуум-испарители. При наличии в большом количестве нагревательного пара и при желании достигнуть высокой температуры питательной воды, можно применять одноступенчатые аппараты, более дешевые, но требующие большего удельного расхода пара. Если же, в виду наличия экономайзера, воду приходится нагревать не особенно высоко и если в распоряжении нет большого количества мягкого пара, то рекомендуется ставить многоступенчатые испарители. На рис. 124 дана схема двухступенчатого испарителя «Атлас» для добавочной воды. Аппарат действует следующим образом. Добавочная вода проходит сначала через охладитель (дегазатор), затем поступает в подогреватель и проходит через фильтр, откуда питательным насосом испарителя подается в первый испаритель, обогреваемый паром. Не испарившаяся здесь жидкость поступает дальше, во второй испаритель, где она испаряется, нагреваясь влажным паром из первого испарителя. Не испарившаяся и во втором испарителе жидкость (флегма) отсасывается, а вновь образовавшийся в последнем пар направляется в смешивающий подогреватель, где он отдает свою теплоту поступающему сверху и каплями стекающему вниз конденсату от турбин. Конденсат обогревательных змеевиков обоих испарителей также отводится в смешивающий подогреватель. Турбинный конденсат при своем поступлении в смешивающий подогреватель полностью освобождается от воздуха, благодаря чему выходящая снизу из по-

Большинство средств для предупреждения появления котельного камня содержит, главным образом, органические вещества. Примером может служить часто упоминаемый в литературе «тартрицид»,¹ содержащий, примерно, 35% веществ характера дубильной кислоты, 64% воды и 1% минеральных составных частей. При помощи этого средства удастся не только предупредить образование котельной накипи, но и быстро удалить уже образовавшуюся в работающем котле накипь. Средство в жидком виде при помощи простого прибора, включаемого в трубопровод питательной воды, вводит в воду и хорошо смешивают с ней. Приток «тартрицида» точно регулируют в зависимости от свойств воды. На каждый немецкий градус жесткости необходимо около 3 г/м³ «тартрицида».

Коренным образом отличается от описанного выше способ действия известного средства против накипи — «когидроля», изготавливаемого акц. о-вом «Н. Д. Ридель — Э. де-Хэн» в Зеельце, под Ганновером. В связи с новейшими исследованиями в области коллоидной химии выяснилось, что коллоидальный графит (когидроль) обладает сильной адсорбционной способностью в отношении солей жидкости. Поэтому при наличии в котельной воде когидроля образующие накипь вещества осаждаются на коллоидальных частичках графита и выпадают на дно в виде рыхлого ила. Эту грязь лучше всего спускать непрерывно. По сообщению Карплуса (Karplus),² данные относительно применения когидроля благоприятны, тем более, что это средство растворяет уже образовавшуюся котельную накипь и до известной степени предохраняет от коррозии. Когидроль можно добавлять в раствор в питательную воду или же обмазывать стенки котла водным его раствором.

К числу других предохранительных средств, оцениваемых положительно, принадлежат «кеспурит»,³ «лизоген»⁴ и др.

Применение предохранительных средств от котельной накипи обходится дешево, и так как расходы по их приобретению незначительны, то не следует отказываться от попыток использования на практике, особенно в небольших установках, проверенных средств, вроде указанных выше. Однако при этом необходим тщательный надзор за установкой и постоянный контроль, так как действительность этих средств весьма зависит от местных условий.

9. Внутренняя окраска.

До сих пор еще часто применяется окраска изнутри стенок котла разными предохранительными средствами, частью секретными, с целью возможности более легкого удаления накипи при очистке котла. Кроме того существует взгляд, будто подобная окраска предохраняет материал котла от разъедания. Против таких средств можно только предостеречь. Во многих случаях при окраске образуются вредные для здоровья или же огнеопасные газы, отчего уже произошло много несчастных случаев. Часто такая окраска производит также изолирующее действие, ухудшает теплопередачу и может привести к опасным напряжениям в материале. Поэтому ни в коем случае не следует окрашивать поверхность нагрева котла, разве что стенки верхнего коллектора. Наконец, во многих случаях установлено полное отсутствие результатов от подобной окраски, в других же случаях можно было даже предположить, что окраска способствовала разъеданию.

10. Освобождение пара и питательной воды от масла.

Вредность масла. Вода, содержащая масло, очень опасна для работы парового котла, так как вызывает в нем разъедание и покрывает поверхность нагрева сильно изолирующей пленкой, влекущей за собой застой тепла, вынуживание и трещины, т. е. последствия, подобные тем, которые вызываются накипью с содержанием кремнезема (коэффициент теплопроводности цилиндрического смазочного масла по Эрнсту⁵ составляет 0,104 кал/м ч. °C, а коэффициент теплопроводности кремнистой накипи по Эберле и Гольцауэру равен от 0,07 до 0,2 кал/м ч. °C).

Еще хуже последствия для эксплуатации котла, если, кроме масла, в питательной воде содержатся еще вещества, образующие накипь. Тогда масло и известковый ил образуют род

¹ См. между прочим Brogli o, Arch. f. Wärmewirtschaft, 9, 111, 1928; Claussen, Die Eisenbahnwerkstätte, 17, 1927.

² См. Dr. Hans Karplus, Kesselstein und Kolloidchemie. Die Wärme, 49, 551, 1926.

³ См. Schirmer, Wochenschr. f. Brauerei, 37, 267, 1927, далее — Arch. f. Wärmewirtschaft, 7, 85, 1926.

⁴ См. Ziemert, Die Wärme, 45, 250, 1922.

⁵ Wiener Ber., 3, 922.

замазки, осаждающейся на поверхности нагрева и еще более препятствующей теплопередаче в этих местах, чем масло и накипь порознь.

Поэтому, во избежание серьезных повреждений, необходимо без остатка удалять масло из конденсата машин, применяемого для питания котлов. Упомянем, кстати, что пар, содержащий масло, в виду своих указанных выше отрицательных свойств, малопригоден также для отопительных, сушильных целей и т. п. При отоплении не непосредственным скальзываются упомянутые выше недостатки (загрязнение поверхности нагрева), при непосредственном отоплении иногда могут испортиться нагреваемые предметы.

Мятый пар и конденсат поршневых паровых машин всегда содержат в известном количестве масло. Такие и турбинный конденсат не всегда вполне чист от масла. Поэтому во многих случаях, когда конденсат от машин снова направляют в котел, целесообразно от времени до времени проверять содержание масла в воде и, в случае надобности, устанавливать маслоотделители.

Маслоотделители для пара. В настоящее время существует ряд устройств, дающих достаточную для практических целей очистку пара от масла. Поскольку полученное обратно масло обычно удается вновь использовать для смазки, эти аппараты приносят большую пользу и быстро окупаются уже за счет указанной регенерации масла. Маслоотделители для пара представляют собой большие сосуды с большим числом ковшей для уловления масла или со спиральными вставками, помещаемыми внутрь паропроводов и принуждающими пар многократно резко изменять направление своего движения или же вихреобразно вращаться. Мелкие капельки масла, в силу своей большой инерции, отлагаются на листах или стенках, стекают вниз, собираются на дне сосуда и от времени до времени выпускаются из него. По опытам Баварского общества по надзору за паровыми котлами¹ хорошие маслоотделители отделяют от 85 до 96% всего увлеченного паром масла, благодаря чему достигается очистка от масла, примерно, до 10—15 г/т, каковая норма в большинстве случаев является удовлетворительной.

Маслоотделители для воды. Когда речь идет об освобождении от масла воды, например при повторном применении конденсата от поршневых машин с конденсацией, то в ход пускают простые отстойные резервуары, коксовые или грязевые фильтры, фильтровальный холст, химическое маслоотделение или, наконец, электролитический способ.

Простые *отстойные резервуары* пригодны только для отделения масла, содержащегося в воде в виде капель. Когда вода стоит продолжительное время в таком отстойнике, то удельно более легкие капли масла поднимаются на поверхность и могут быть удалены сливом или же вычерпыванием. Однако, вследствие мелкого распыления, большая часть смазочного масла из цилиндров паровых машин не имеет вида капель, а представляет собой эмульсию масла в конденсате. Так возникает напоминающее молоко помутнение воды, имеющее постоянный характер, т. е. такой, когда масло не отделяется от воды даже после продолжительного пребывания последней в отстойнике.

Фильтры всякого рода устраняют все капельное масло и даже часть эмульсии, но все-таки не дают полной очистки от масла. Кроме того фильтры быстро засоряются и тогда перестают действовать. Поэтому их приходится часто очищать и менять, что удорожает установку, требующую, помимо того, весьма тщательного ухода.

Химический способ состоит в том, что добавлением к воде сернистого глинозема и соды создают в ней осадок, который при своем образовании обволакивает частицы масла и приводит таким образом последнее в состояние, пригодное для фильтрации. Этот способ действует безупречно, но требует весьма тщательного обслуживания и надзора. Кроме того он довольно дорог.

Хорошим оказался *электролитический способ* акц. о-ва «Хальвор Бреда» (рис. 125), при котором разрушают масляную эмульсию током и заставляют масло собираться в пенистые хлопья, после чего обработанную так воду пропускают сквозь песочный фильтр, задерживающий хлопья. Этот способ не требует никакого обслуживания или надзора. Отделение масла достигается почти полное. Оборудование в конструктивном отношении отличается простотой, а так как расход тока мал, то и расходы не особенно высоки. При этом способе необходимо часто очищать электроды и фильтр, но эта очистка производится быстро.

11. Заключение и руководящие указания.

При современном уровне техники всякую воду путем очистки ее от солей и газов можно сделать пригодной для употребления в котлах. Какой из описанных выше способов окажется

¹ VDI-Zeitschr., 54, 1069, 1910.

наиболее экономичным и подходящим во всех отношениях, зависит от свойств воды и от условий эксплуатации. Условием для бесперебойной работы является во всех случаях тщательный надзор за очистительной установкой и постоянная проверка качества свежей, питательной и котельной воды. Для того чтобы в практической работе с уверенностью избегать образования котельной накипи и разъедания котлов, следует соблюдать общие правила:

1. Необходимо заботиться о постоянном поддержании *минимальной щелочности*, которая согласно предложениям Шплиттгербера (Splittgerber)¹ должна составлять 0,4 г/л при едком натре (NaOH) и 1,85 г/л при соде (Na₂CO₃). При наличии в воде обеих этих составных частей формула для минимальной щелочности выразится следующим образом:

$$\frac{\text{Na}_2\text{CO}_3}{4,6} + \text{NaOH} = 0,4 \text{ г/л.}$$

2. С другой стороны, щелочность не должна быть и слишком высока, так как в противном случае приходится опасаться вспенивания и выплескивания в котле. Кроме того при наличии

в котле заклепочных швов или иных капиллярных промежутков существует опасность образования местных очагов с высокой концентрацией едкого натра, что может повлечь за собой значительные разъедания и вызвать, таким образом, повреждения, т. е. ущерб для эксплуатации.

3. Эти опасности отпадают, если вместо упомянутого в п. 1 предохранительного способа (минимальная щелочность) применять *сульфатный предохранительный способ*, при котором заботятся об известном содержании в воде глауберовой соли (Na₂SO₄). По американским данным, весовое отношение соды к глауберовой соли при давлениях до 10,5 атм. ман. должно составлять 1:1, при давлениях от 10,5 до 17,5 атм. ман. 1:2 и при высоких давлениях 1:3. Напротив, по исследованиям Берля,² определенного соотношения между содой и глауберовой солью не требуется. Сульфаты при всех концентрациях задерживают разъедание и сами

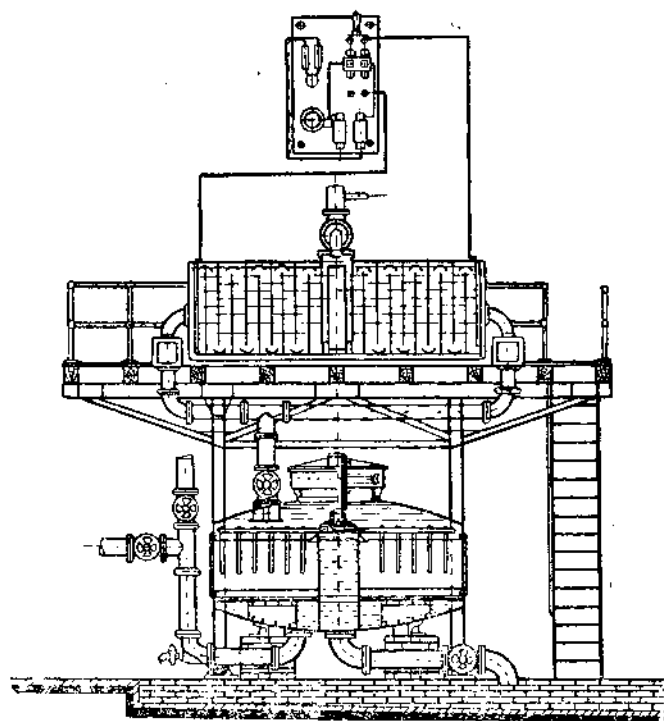


Рис. 125. Маслоотделительная установка системы «Гальворт-Бреда», работающая по электролитическому способу.

Вверху находится электрическая распределительная доска, под ней показаны приток воды и отстойный резервуар с электродами, внизу — фильтр, а слева от него — сток воды.

совершенно безопасны. Кроме того они предупреждают разъедание и в капиллярных пространствах. Слишком высокого содержания солей, само собой разумеется, следует избегать в виду возможности вскипания и вспенивания и, далее, в виду опасности увлечения солей паром (см. п. 5).

В Америке уже накопились благоприятные практические результаты с сульфатным предохранением. В Германии практических данных еще нет (исследования Берля производились не над котлом, а на лабораторных аппаратах). Окончательного суждения о надежности сульфатного предохранения вывести поэтому еще нельзя.

4. Жесткость воды в котле, по возможности, не должна превышать 2 DHG.

5. Общее содержание растворенных солей должно составлять не более 40 г/л. Его можно

¹ См. «Speisewasserpflge», стр. 15, и «Kesselbetrieb», 36.

² См. Arch. f. Wärmewirtschaft, 9, 165, 1928.

приблизительно проверять посредством ареометра Боме. Максимальное содержание, определенное при 15° температуры воды, ни в коем случае не должно превосходить 2° Боме.

6. Особенно опасна кремне содержащая накипь в виду ее малого коэффициента теплопроводности.¹ Поскольку кремневая кислота не поддается полному устранению при очистке воды, приходится заботиться о том, чтобы она не выпадала из раствора, что достигается частой продувкой котла. Вместе с тем, чтобы кремневая кислота не могла дать нерастворимого соединения с солями жесткости, необходимо, чтобы остаточная жесткость воды в котле была возможно мала (см. п. 1). Избыток щелочи (см. п. 1) также уменьшает опасность, так как в этом случае образуется растворимый силикат натрия.

ДОПОЛНЕНИЕ РЕДАКТОРА.

Вопрос об очистке питательной воды играет сейчас чрезвычайно важную роль в новейшей котельной практике; поэтому литература этого вопроса очень велика. Приводим только некоторые русские труды.

Обстоятельное изложение всего вопроса об очистке питательной воды, с приведением новейшей литературы этого вопроса, имеется в книге: Р. Г. Грановский, Котельные установки, Ленинград, 1930 (отделы XXVII и XXVIII). Имеется также специальный труд, посвященный вопросу об очистке питательной воды: И. Л. Гордон, Вода и ее очистка, Москва, 1927.

В книге В. А. Макеева, Конденсационные устройства паросиловых установок, Москва, 1930, вопросу об очистке и подогреве питательной воды тоже отводится заметное место. Сведения об очистке воды приводятся также во всех курсах центральных станций, например, у А. А. Лаговского, Теплосиловые установки, 131—162, Москва, 1928; у Г. Кизера, Основы проектирования электрических станций, 241—261, Ленинград, 1931. В новейшей книге по подготовке питательной воды (инж. М. С. Шкроб, Питание котлов высокого давления, Москва, 1930) даются очень полные сведения об очистке питательной воды на установках высокого давления «Тэжэ» в Москве и установке в Лангербрюнге.

VIII. ХРАНЕНИЕ И ДОСТАВКА ГОРЮЧЕГО.²

Каждое предприятие, для обеспечения эксплуатации, должно располагать известным топливным резервом. В зависимости от местных условий, этого резерва должно хватать на несколько дней, а часто даже на несколько недель. Внезапные перебои транспорта, могущие произойти в результате неблагоприятной погоды (замерзание водных путей, снежные заносы и т. д.), повреждений на линии и т. п., влекут за собой перерывы в доставке горючего, а это, в свою очередь, при отсутствии достаточного резерва, может привести к остановке целого предприятия.

1. Хранение угля.

Весь хранимый уголь целесообразно разделять на части. Прежде всего уголь складывается на открытом воздухе в обширных складах (недельный резерв). В целях экономии площади такого склада, а также для того, чтобы часть угля всегда находилась под рукой, над котлами устраивают большие угольные бункеры (дневной резерв). Если для мелкого предприятия расходы по устройству таких бункеров оказываются слишком значительными, то в качестве небольшого резерва в котельном здании служат наполненные углем подводящие топливо трубы и питательные бункера (часовой резерв).

Поглощение кислорода и повышение температуры. При хранении каменного и бурого угля надлежит иметь в виду следующее.³ Уголь всегда поглощает на своей поверхности кислород, с выделением при этом теплоты. Чем выше температура наружного воздуха,

¹ См. Eberle u. Holzhauer, Arch. f. Wärmewirtschaft, 9, 171, 1928, и 10, 334, 1929.

² Вопрос этот является собственно выходящим за пределы чисто котельной практики, но обыкновенно рассматривается как в курсах котельных установок, так и в курсах центральных электрических станций. С большой подробностью и в отношении к специальным видам топлива, важным для СССР (торф), он рассмотрен у Р. Г. Грановского (Котельные установки, отд. XXXII, XXXIII). См. также Кизер, Основы проектирования электрических станций, стр. 219—240, и Э. С. Меерович, Эксплуатация центральных электрических станций, гл. II, отделы IV, V, VII. Прим. ред.

³ См. брошюру «Zweckmäßige Lagerung von Kohle», изданную Комиссией экономичного производства (AWF), изд. Beuth, Берлин.

тем хуже отводится теплота и тем выше, следовательно, поднимается температура угля. Окисление серного колчедана и влажность также благоприятствуют распаду угля и увеличивают поглощающую поверхность. Поэтому при продолжительном хранении в высоких штабелях некоторых сортов угля может произойти значительное повышение температуры, в конце концов приводящее к самовозгоранию. Кроме того это развитие теплоты представляет собой не что иное, как медленное горение, при котором уменьшается теплотворная способность угля. В виду этого следует всячески избегать слишком долгого хранения угля.

Отношение разных сортов угля к хранению. Разные сорта угля различно относятся к хранению. Антрацит и кокс сравнительно нечувствительны к выветриванию, равно как и брикеты из каменного угля. Особенно опасны явления выветривания у рудничного бурого угля и брикетов из бурого угля.

Другие причины самовозгорания. Самовозгоранию способствуют примеси дурных проводников теплоты, препятствующих отводу теплоты из середины угольной кучи, а также такие примеси, которые сами легко воспламеняются (например куски дерева), далее — сильное нагревание поверхности кучи (солнечные лучи, нагрев от близко расположенных топок), увлажнение дождем и снегом, доступ воздуха во внутренность кучи и, главным образом, значительная высота кучи, так как в этом случае нижние слои угля не могут отдать наружу развивающуюся теплоту. Мелкий уголь, вследствие своей сравнительно большей поверхности и плохой теплопроводности, больше склонен к выветриванию и самовозгоранию, чем крупный уголь.

Предупредительные меры. Чтобы по возможности устранить большие опасности и убытки, могущие произойти в результате хранения угля, следует прежде всего стремиться к тому, чтобы *не слишком затягивать хранение*. Неправильный обычай многих предприятий рассматривать сложенный уголь как «неприкосновенный фонд» и годами не прикасаться к нему. Если мы и не увидим в один прекрасный день, как горит весь угольный склад, то все же для нас останется другой сюрприз: когда нам действительно понадобится «неприкосновенный фонд», то окажется, что первоначально высокоценный уголь превратился в рыхлую, крошащуюся массу с незначительной теплотворной способностью.

Уголь следует укладывать возможно более *плотно* и при этом *тонким слоем*, — плотно, чтобы уменьшить доступ воздуха во внутренность штабелей, и тонким слоем, чтобы обеспечить быстрый отвод развивающейся теплоты. Каменноугольные брикеты можно складывать в штабеля высотой не более 4 м, каменный уголь, в зависимости от содержания в нем газов, — высотой от $2\frac{1}{2}$ до 3 м и брикеты бурого угля — высотой от 2 до $2\frac{1}{2}$ м.

Избегать плохо проводящих теплоту или горючих примесей, разделять уголь разной крупности и разного происхождения, защищать сложенный уголь от воздействия тепла снаружи — все это важные правила, которые также необходимо соблюдать при хранении. Наконец, для защиты от возможности распространения пожара угольные кучи следует разделять на части и устраивать между ними проходы, что во многих городах предписано и полицейскими правилами. При хранении угля, особенно склонного к самовозгоранию, рекомендуется, кроме того, устраивать огнестойкие перегородки (например из волнистого железа, металлических труб и т. д.) и, наконец, постоянно контролировать температуру, измеряя ее в разных местах штабелей.

2. Подача угля.

Ручная подача. Только в самых мелких или временных предприятиях может заслуживать предпочтения подача угля при помощи кочегаров или каталей, пользующихся для этого тачками и лопатами. Самым главным недостатком такой «ручной подачи» являются ее гигиенические последствия — грязные кочегарки и загрязненный угольной пылью воздух. К этому присоединяется часто весьма неприятное загромождение двора движущимися тачками, непрерывное закрывание и открывание дверей, вызывающее опасные для здоровья сквозняки в котельном помещении, и, наконец, загрязнение всех измерительных приборов в кочегарке — явление, особенно нежелательное с точки зрения эксплуатации.

Автоматическая подача. В виду изложенного, во всех новых установках следует предусматривать автоматическую подачу угля и загрузку его в топку. Устройство простых транспортировочных приспособлений быстро окупается даже в применении к старым и мелким установкам и почти всегда возможно без крупных переделок установки.

Первое правило устройства всех приспособлений для подачи угля заключается в том, чтобы по возможности избегать всякой перегрузки и создания каких-либо механических

напряжений в транспортируемом горючем, так как в противном случае образуется пыль и мелочь, а от этого уменьшается ценность угля, и часть его теряется.

В случае устройства над котлами больших бункеров рекомендуется позаботиться не только об автоматической подаче в них угля со складочного места, но и об автоматическом равномерном распределении.

Для подъема угля на высоту бункеров чаще всего применяют *элеваторы*, состоящие из цепи или бесконечной ленты с вереницей ковшей для угля. Бескопечная лента движется на икн-вах с электрическим приводом. Лента обычно заслуживает предпочтения перед цепью, так как при ней расход энергии меньше, а скорость подачи больше. Только при значительной высоте подъема более целесообразным является цепной элеватор, так как ленточный элеватор не обладает достаточной производительностью. При совершенно прямом пути подачи можно применять также *наклонные ленточные транспортеры*, тогда как при наличии закруглений устраивают *подвесные электрические дороги* с грейферами, норри и т. д., что дает возможность подавать уголь без перегрузки до самого бункера.

Уголь, доставленный на высоту верхнего края бункеров, целесообразно передавать на горизонтально движущиеся ленточные транспортеры и распределять между отдельными бункерами посредством автоматических *опрокидывающихся выкаток* или же простых *сбрасывателей*. Переставляя вручную сбрасыватели можно, в случае надобности, проводить уголь мимо отдельных бункеров и вообще произвольно регулировать распределение. Вместо ленточных транспортеров, можно применять также *шнеки*, однако лишь при твердом сухом угле, так как иначе и шнек загрязняется, и уголь портится.

Бункеры обычно имеют внизу выпускные отверстия и наклонные стенки. Когда выпускная заслонка бункера открывается, уголь скользит книзу и по особым рукавам подводится к воронкам отдельных топок.

Транспортировочные устройства подобного рода применимы почти при всех видах твердого и кускового горючего. Только угольная пыль требует иных приспособлений и, конечно, других способов хранения.

3. Доставка и хранение угольной пыли.

Доставка. Средствами для транспортирования угольной пыли при коротком расстоянии (примерно до 100 м) служат шнеки, при среднем расстоянии (примерно до 500 м) применяется пневматическая подача, а при больших расстояниях — специальные вагоны. Применяя все эти способы транспортировки, в особенности же шнеки, необходимо следить за тем, чтобы угольная пыль была сухой, так как в противном случае вследствие образования конденсационной воды аппараты легко могут засориться, и вся установка перестанет работать. Поэтому никогда нельзя допускать охлаждения теплой пыли в неподвижном шнеке. Все заслонки и вентили в трубопроводах для пыли должны быть безукоризненно плотными и легко доступными, чтобы случайные засорения можно было легко устранять. Так называемый питающий шнек, служащий для разгрузки бункеров и подводящий пыль к горелкам, устраивается различно, в зависимости от рода пыли. Этот шнек не должен быть слишком коротким, чтобы пыль не «пролетала» сквозь него в слишком большом количестве. Число его оборотов не должно быть чрезмерно велико, так как быстро вращающиеся шнеки легко нагреваются. Особенно при буром угле шнек должен иметь большую длину и много витков.

Хранение в бункерах. При хранении пыли в бункерах необходимы особые меры предосторожности. Наибольшие опасности при доставке и хранении пыли представляют самовозгорание и взрывы.

Опасность от взрывов и ее предупреждение. Взрывы могут произойти в случае образования плотной смеси угольной пыли и соприкосновения ее с открытым пламенем или с искрой. Чем мельче пыль и чем выше содержание в ней летучих составных частей, тем опаснее она в отношении взрыва. Пыль из антрацита и из тощих углей (менее 13% летучих составных частей) с этой точки зрения не опасна. Напротив, большинство сортов пыли, приготовляемой из вестфальских, саксонских и силезских каменных углей, и, далее, все сорта пыли из бурого угля, когда их подхватывает вихрицаемая струя воздуха, дают взрывчатые смеси. Во всех помещениях, где находятся машины для приготовления угольной пыли и бункера для нее, не допускается применение открытых осветительных приборов и огня (запрещается курить).

Самовозгорание и его предупреждение. Сложенная для хранения угольная пыль, как и всякий уголь, склонна к самовозгоранию. Воспламеняется она еще легче кускового угля, так как ее частицы имеют относительно большую поверхность и, таким образом, подвергаются воздей-

ствием кислорода на относительно большей площади. Приведенные выше правила хранения угля действительны и для угольной пыли, однако с тем добавлением, что угольную пыль ни в коем случае нельзя хранить на открытом воздухе, а только в плотно закрывающихся вместилищах. При этом необходимо избегать слишком долгого хранения пыли в бункерах. Доступ влаги должен быть предупрежден. Следует тщательно наблюдать за температурой. Не следует применять слишком больших бункеров. Всякое нагревание пыли во время транспортировки необходимо тщательно предупреждать. Бункера не должны подвергаться воздействию тепла извне, например, не должны помещаться вблизи горячих стен.

Во всех помещениях, связанных с приготовлением, подачей и сжиганием угольной пыли, должна соблюдаться *безукоризненная чистота*. Следует избегать всякого осаждения пыли, и такую пыль необходимо немедленно удалять, так как при взметании ее воздухом может образоваться взрывчатая смесь.

В виду большой опасности, связанной с приготовлением, транспортировкой и хранением в бункерах угольной пыли германский угольный совет издал брошюры «О предупреждении опасностей при обращении с угольной пылью» и «О сооружении установок для угольной пыли»,¹ заслуживающие всяческого внимания.

Затруднения эксплуатационного характера. При хранении в бункерах угольной пыли возникает ряд эксплуатационных затруднений, устранение которых требует особых мероприятий. Часто при опорожнении бункеров образуются *воронки*, заключенные между почти вертикальными стенками в несколько метров высоты. Или же в нижней части бункера образуются «*мостики*», препятствующие падению угольной пыли. В результате питающие шнеки вращаются порожнем. При легких сотрясениях воронки и мостики внезапно осыпаются и переполняют трубопроводы. При этом угольная пыль, особенно из бурого угля, ведет себя как жидкость.² Как следствие этих периодических явлений наблюдаются неравномерная загрузка топки, плохое сжигание, большие потери — то от большого избытка воздуха, то от неполного сгорания, а часто даже полное срывание и потухание пламени. Для устранения этих нежелательных явлений необходимо заботиться о равномерности состава горючего. Стенки бункера должны иметь уклон приблизительно в 55°, чтобы предупреждать прилипание пыли к стенкам. В бункерах не должно быть выступов или углов, где могла бы застревать пыль. Образование мостиков и воронок можно, хотя и не вполне, предупредить вдвуханием воздуха под давлением или посредством механических разрыхляющих приспособлений.

IX. УДАЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ.

Всякое топливо содержит, кроме горючих веществ и воды, еще целый ряд негорючих составных частей — так называемую золу, отделение которой перед процессом сжигания возможно лишь в небольших пределах, так как значительная доля этих ингредиентов весьма тесно распределена и прочно связана с горючим веществом топлива. Эти примеси распределены так тесно, что даже от угольной пыли их нельзя полностью отсеять дутьем, вследствие чего даже самые мелкие частицы пыли всегда содержат зольные ингредиенты.³

Таким образом, негорючие составные части попадают в топку. Они остаются в ней частью в твердом состоянии, частью в жидком — с последующим затвердеванием, и нуждаются в отделении и извлечении из топочной камеры. Так как зола часто образуется в большом количестве (малоценные сорта горючего содержат иногда до 80% золы) и так как, далее, оставление золы и шлаков в топочной камере, в дымоходах и т. д. легко может привести к большим затруднениям, вопрос об удалении золы и шлаков имеет большое значение.

Способы удаления остатков горения. Главная часть остаточных продуктов горения остается в топке и подлежит ручному или автоматическому удалению. Другая часть оседает в дымоходах, в борове и в дымовой трубе в виде летучей золы, третья часть уходит через дымовую трубу. Таким образом, приходится различать:

- 1) приспособления для удаления остатков, находящихся в топке;
- 2) приспособления для удаления летучей золы из котельных дымоходов;

¹ На основании приказа германского министра торговли и промышленности от 21 ноября 1927 г. См. также Schulte, Betriebsgefahren der Kohlenstaub-Aufbereitung und Kohlenstaubfeuerung, Arch. f. Wärmewirtschaft, 9, 107, 1928.

² См. Rosin, Eigenart der Braunkohlenstaubfeuerung, Arch. f. Wärmewirtschaft, 7, 313, 1926.

³ См. Gonnell, Arch. f. Wärmewirtschaft, 9, 209, и Schwartzkopf, 15-й выпуск Отчетов комиссии по угольной пыли германского угольного совета.

3) приспособления, улавливающие взвешенные в газах частицы и препятствующие выбрасыванию летучей золы из дымовой трубы;

4) работы по очистке после остановки котлов, для устранения летучей золы (и сажи) в дымовых каналах, в дымовой трубе, а также твердых образований на обмуровке топочной камеры.

Следует заметить, что приспособления, упомянутые в п. 3, применяются лишь при весьма высоком содержании в дымовых газах летучей золы и прежде всего для пылеугольных топок.

1. Приспособления для удаления золы.¹

Предъявляемые требования. При удалении из топки золы и шлаков, помимо эксплуатационной в технической стороне вопроса, необходимо считаться еще и с его гигиенической стороной. Если, например, при топках, работающих на буром угле, удаляют вручную из совершенно темных и тесных подвалов еще раскаленную золу, дающую большое количество пыли и газов, то такой метод работы не может не сопровождаться вредом для здоровья персонала.

Поэтому первым и важнейшим условием при сооружении устройств для удаления золы является *хорошо проветриваемый, просторный золный подвал* и предупреждение выделения пыли и газов. Каналы для удаления золы не должны сообщаться с котельным помещением. В новых установках следует располагать котлы настолько высоко, чтобы отвоз золы мог производиться прямо по поверхности земли. Современным установкам предъявляется, далее, требование *широкой механизации* удаления золы. Здесь более, чем где бы то ни было, уместна замена физического труда людей работой механических приспособлений. Можно надеяться, что недалеко то время, когда нигде не будут больше удалять золу из кочегарок с помощью водяного шланга, лопат и ручных тачек.

Мы можем упомянуть о следующих четырех типах механических устройств для удаления золы: о пневматических установках, промывных установках, установках с подачей воды под напором и о механических транспортерах золы.

Пневматическое удаление золы. Пневматическая установка для удаления золы состоит из всасывающего насоса с приводным мотором, сборника, приемника для шлака со всасывающим рукавом, присоединяемым к золному бункеру, и, наконец, из воздухопровода и золопровода. Посредством насоса из бункера все время засасывается свежий воздух, увлекающий золу и доставляющий ее через упомянутый рукав и золопровод в сборник. Оттуда зола удаляется смесительным шнеком и доставляется непосредственно к месту свалки или погрузки. Иногда сборнику придают коническую форму с расположенным внизу и закрывающимся заслонкой довольно большим отверстием, из которого золу можно спускать по наклонным желобам в вагоны для отвозки. При твердых шлаках золопровод и смесительный шнек довольно сильно изнашиваются, особенно в закружениях.

Удаление золы промывкой. При этом способе удаленная зола непрерывно сползает из бункеров по прямым или кривым к ним трубам из листового железа в закрытые промывные желоба, уложенные с некоторым уклоном; к этим желобам под незначительным давлением подается вода. Упомянутые трубы оканчиваются ниже поверхности промывной воды, чтобы в них не мог проникнуть воздух. В другом устройстве, широко известном под названием системы Ротштейна и предназначенном для более крупных установок (рис. 126), бункера имеют воронкообразные приемники с вертикальной промывной трубой и питаются водой под давлением от 0,5 до 1 раб. атм. Из отдельных приемников зола подается промывной водой в главный промывной желоб, проложенный со значительным уклоном. Промывные желоба заканчиваются в бассейнах, где вода отделяется от золы. Затем зола подается черпаковым элеватором в высоко расположенные бункера, а отсюда спускается в вагоны, или же ее грузят из бассейна в вагоны с помощью грейферов. Расход воды составляет, примерно, 10 кг на 1 кг золы.

Устройство для удаления золы промывкой, замечательное тем, что оно требует небольшой строительной высоты и поэтому легко может быть применено к старым установкам с низкими

¹ См. S p o t t, Abförderung von Feuerrückständen, Arch. f. Wärmewirtschaft, 8, 145, 1927.

Прим. ред. Кроме общих курсов котельных установок и электрических станций (Р. Г. Граповский, Кизер, Э. С. Меерович и др.), вопрос этот обстоятельно разбирается также в статье Э. С. Мееровича, Золоудаление. Известия Теплотехнического института, № 3 (36), 1928, и в книге А. Рюль и Р. Шульте, Золоудаление. Москва, 1931.

каналами для удаления золы, недавно было описано Штиперницем (Stipernitz).¹ Оно состоит из наклонного лотка под колосниковой решеткой, в котором скопляется шлак. К высшей точке лотка без особого давления подводится по перфорированной трубе промывная вода, застаивающаяся перед местом скопления золы. Когда вода достигнет известной высоты, она прорывает плотину золы и приводит всю массу последней в движение, причем зола медленно сползает книзу. В зависимости от характера золы, бывает достаточно уклона от 10 до 15°, благодаря чему вся потребная высота весьма мала. Весьма мал также, по сравнению с другими промывными способами, расход воды, составляющий, примерно, 1 кг на 1 кг золы.

Удаление золы напорной водой. При этом способе зола в определенные периоды времени направляется по закрытым рукавам к водяному эжектору, а отсюда по закрытой трубе к месту свалки или сборочному бункеру. Давление воды составляет от 15 до 35 атм. ман. в зависимости от высоты подачи. Расход воды при этом значительно меньше, чем при большинстве промывных способов, и составляет, примерно, 3 кг на 1 кг золы. После каждого употребления трубы необходимо промывать, чтобы предупредить прикипание к ним остатков золы. Напорную воду целесообразно часто сменять. После каждой подачи ее пропускают через отстойные устройства,

так как при все возрастающей жесткости воды в трубах легко могут образоваться закупоривающие их твердые каменные отложения.

Механические способы удаления золы.

При одном из известных механических способов удаления золы последняя сначала проваливается через рукава в глубокие, наполненные водой цементные желоба, откуда медленно движущаяся скребковая лента подает ее к месту погрузки или к собирательному бункеру. Иногда применяют также трясущиеся скаты, качающиеся ковши, нории и шнеки, колеса с лопатками и тому подобные устройства.²

Размельчение шлака. При всех этих способах удаление мелкозернистой золы не представляет особых затруднений. При крупной же величине кусков шлака их приходится размельчать вручную или, лучше, посредством дробильных валцов с механическим приводом. При промывных способах это дробление ведут, примерно, до величины ореха; при удалении золы напорной водой, а также механическими и пневматическими способами куски должны быть, примерно, величиной в кулак.

Рис. 126. Удаление золы промывной водой по системе Ротштейна.

По этому поводу упомянем о шлаковом генераторе фирмы Вальтер и К°, пригодном в особенности для колосниковых решеток с движущимися колосниками. Раскаленный шлак падает с решетки в железную, охлаждаемую водой шахту, в которой помещены дробильные валцы. Последние от времени до времени автоматически приходят в движение, размельчают успевший к этому моменту вполне выгореть шлак и выбрасывают его. После этого шлак может быть передан на вынос золы.

Какой способ наиболее экономичен для данного предприятия, приходится решать в каждом отдельном случае особо. Расходы по первоначальному оборудованию, в зависимости от местных условий, колеблются весьма сильно, а вынос отдельных частей в значительной степени зависит от рода горючего, а также от крупности зерен и состава золы и шлака.

2. Удаление летучей золы с поверхностей нагрева.

Вредное влияние загрязнения поверхностей нагрева. Для экономичной работы котельной установки весьма важно поддерживать в чистоте поверхности нагрева котлов. При загрязнении поверхности нагрева, с одной стороны, понижаются к. п. д. и производительность котла, так как горячие газы вследствие плохой теплопередачи покидают котел при более высокой температуре, что повышает потери в отходящих газах; с другой стороны, когда части поверхности нагрева, предназначенные для восприятия лучистой теплоты, бывают покрыты корой из сажи

¹ См. Arch. f. Wärmewirtschaft, 8, 180, 1927.

² См. Schulte, Die Wärme, 52, 90, 1929.

и легучей золы, значительно возрастает температура в топочном пространстве. От этого весьма страдает в водотрубных котлах обмуровка топочной камеры. Сильное загрязнение поверхности нагрева может, далее, весьма повредить тяге вследствие сужения путей для прохода газов. В результате дымовая труба может оказаться неспособной создавать необходимую тягу, и тогда часто приходится останавливать для очистки. Вследствие той же причины может уменьшиться степень использования котлов, работающих с перерывами, так как при плохой теплопередаче весьма удлиняется время растопки. Наконец, сильно загрязненные котлы неспособны быстро приспособляться к колебаниям нагрузки.

Трубки для продувки. До сравнительно недавнего времени для очистки водяных труб большей частью пользовались простой продувочной трубкой с рядом отверстий, соединяемой резиновым или металлическим рукавом с паропроводом или магистралью сжатого воздуха. Эти продувочные трубки вводились вручную через боковые отверстия в обмуровке, а также с фронта и тыла котла, причем их просовывали между отдельными рядами труб. Такой способ отнимает много времени и труда, а кроме того вследствие почти неизбежных неплотностей, особенно в месте соединения металлического рукава с продувочной трубкой, представляет постоянную опасность для обслуживающего персонала. Действие этого прибора, само по себе довольно незначительное, так как большие участки поверхности нагрева вообще не нащупываются тонкими струями пара, ухудшается еще от того, что, из боязни перед возможными катастрофами паровые вентили обычно открываются лишь на небольшую величину. Кроме того действие этого прибора весьма зависит от сноровки рабочего. И, наконец, во время работы по очистке, продолжающейся при тщательном отношении к делу от 30 до 60 минут на каждый котел, в котельные дымоходы засасывается в большом количестве холодный воздух, существенно понижающий на это время т. п. д. котла.

Постоянные паровые продуватели для сажи. Все эти недостатки устраняются новейшими постоянными продувателями для сажи. Для примера укажем на продувочное приспособление типа Штейнмюллер («Auen»). Оно состоит из ряда трубок, установленных в разных дымоходах котла, перпендикулярно к котельным трубам. Посредством помещенных сбоку от котла цепных блоков или маховичков продувочные трубки приводятся в движение и в то же время посредством особого механизма передвигаются взад и вперед, причем из расположенных по их окружности сопел выходят струи пара, непрерывно описывающие винтовые поверхности и, таким образом, очищающие намеченный участок поверхности нагрева. Обслуживание аппарата просто и совершенно безопасно, так как пар высокого давления (желательно — сильно перегретый) подводится к трубкам с соплами по прочно укрепленным неподвижным трубам. При необходимости продуть котел достаточно открыть вентиль или быстродействующую задвижку для пара, после чего кочегар, пользуясь цепным колесом, заставляет трубки с соплами повернуться несколько раз в ту и другую стороны. В течение нескольких минут вся поверхность нагрева оказывается очищенной.

Большинство германских котлостроительных заводов изготавливает продувочные приспособления аналогичных конструкций. Эти приспособления вполне оправдались на практике.¹ Даже помещаемые в первом дымоходе продуватели для сажи, защищаемые чугунными плитами от лучшего действия пламени, отличаются долговечностью. Вырывающиеся с большой силой струи перегретого пара удаляют даже твердую корку. Впрочем, эти продуватели расходуют довольно много пара, в виду чего продувку рекомендуется производить в периоды малой загрузки котла.

Пневматические и паро-газовые продуватели для сажи. Если для продувателей нет в распоряжении перегретого пара и приходится применять насыщенный пар, то не исключена опасность образования корки. Поэтому в таких случаях, вместо пара, целесообразно пользоваться сжатым воздухом. Однако сжатый воздух имеет тот большой недостаток, что при нем сильно охлаждается поверхность нагрева котла. Хорошо оправдался на практике продуватель «Фрейсинг», питаемый паром от котла и наподобие эжектора засасывающий из дымоходов горячие газы и выдувающий их вместе с паром. При употреблении этой паро-газовой смеси опасность образования коры значительно уменьшается. Кроме того расход пара у этого продувателя значительно ниже, чем у чисто паровых продувочных приборов.

Очистители для легучей золы и направляющие конуса (Drallsteine). В жаротрубных котлах также с выгодой применяются продуватели сажи. Однако в применении к этим котлам

¹ См. Praetorius, Vergleichsversuche mit Russbläsern, Arch. f. Wärmewirtschaft, 10, 187, 1929.

оправдался еще другой способ удаления летучей золы, попутно повышающий также производительность и коэффициент полезного действия котла: мы имеем в виду так называемые очистители летучей золы и направляющие конуса. Они представляют собой полукруглые диски или конические тела с лопатками, наподобие турбинных. Эти диски благодаря внезапным сужениям поперечного сечения создают местные повышения скорости, проявляющиеся толчками и бросающие летучую золу в заднюю часть котла, где она осаждается в углублениях и откуда ее можно удалять во время работы пневматическим способом. Конуса, кроме увеличения скорости, создают вихревое движение газов и этим улучшают теплопередачу, к. п. д. и производительность.

Если при таком способе удаление летучей золы удастся и не столь совершенно, как при применении продувателей для сажи, то все же при пользовании разными типами направляющих конусов, из которых наиболее известны конуса «Деваг», конуса «Каролус II» и очиститель летучей золы «Дейса», были достигнуты на практике хорошие результаты: производительность и использование топлива у старых жаротрубных котлов значительно повышались. Необходимым условием для применения таких очистителей летучей золы является хорошая тяга, так как описанные вставки вызывают значительное увеличение сопротивления прохождению газов.

3. Обеспыливание отходящих газов.

Выделение пыли от отходящих газов топков работающих на пылевидном угле, оказалось во многих случаях совершенно необходимым, особенно при расположении предприятия вблизи населенных мест. Предложенные и испытанные до настоящего времени способы хотя и дали до известной степени положительные результаты, однако, поскольку их работа технически совершенна, они оказываются чрезвычайно дорогими и иногда могут поставить под вопрос экономичность отопления пылевидным углем. Решения, удовлетворительного и в техническом и в экономическом отношении, до сих пор еще не найдено.

Различают три основных типа устройств для выделения пыли: электростатический, мокрый механический и сухой механический.¹

Электростатические способы. Электростатические способы обеспыливания, из которых наиболее известен способ Коттрелля,² основаны на действии сильного электростатического поля постоянного направления. Установки такого рода надежны в работе, дают почти полное обеспыливание и влечут за собой незначительные эксплуатационные расходы, так как ухода за ними почти не требуется, а расход тока весьма мал. Большим недостатком, однако, являются чрезвычайно высокие расходы по первоначальному оборудованию и большое занимаемое место. В последнее время пытались повышением скорости газов до 4 м/сек уменьшить размеры установки, но при этом пришлось мириться с некоторым понижением к. п. д. Впрочем, достигнутая при этом степень очищения (от 85 до 90%) вполне достаточна для большинства случаев практики.

Мокрый механический способ. Способы мокрого механического обеспыливания, при котором вода, распыленная на мелкие брызги, направляется навстречу газам, во многих случаях оправдались, в других же оказались совершенно непригодными.³ Кроме того им присущи большие экономические и эксплуатационные недостатки. Выделяющаяся грязь причиняет значительные неудобства и вызывает дополнительные расходы, например на устройство отстойных прудов. Расход воды велик, и если пылеочистительное устройство расположено на большой высоте, то велик и расход энергии. Расходы по первоначальному оборудованию высоки, хотя и ниже, чем при электрофильтрах. Наконец, вследствие охлаждения отходящих газов при этом способе наблюдается большая потеря тяги.

Сухие механические способы. Сухие механические способы обеспыливания можно, в свою очередь, подразделить на основанные на действии силы тяжести и основанные на действии центробежной силы.

При обеспыливании действием тяжести обычно пользуются так называемыми камерами для обеспыливания. Из дымового канала газы внезапно выходят в более просторное помещение, в котором вследствие внезапного уменьшения скорости пыль должна оседать. Но так как, в общем, газовый поток не заполняет всего поперечного сечения камеры, а лишь несколько расши-

¹ См. также F ö r d e r r e u t h e r, Wirkungsweise von Staubsichtern und Staubabscheidern, Arch. f. Wärmewirtschaft, 9, 323, 1928.

² Германские фирмы, например заводы, «Сименс-Шуккерт» и «Лурги», также строят электрофильтры для отходящих газов котлов.

³ См., между прочим, отчет Compagnie d'Electricité de la Dendré, Arch. f. Wärmewirtschaft, 9, 220, 1928.

ряется, то скорость уменьшается весьма мало, и пыль отделяется в крайне незначительном количестве. Заделка отражательных и распределительных поверхностей также не принесла до сих пор существенных результатов.

Очень интересные и благоприятные результаты дали испытания сооруженного *Compagnie d'Electricité de la Dendre* газового канала, длиною в 20 м.¹ При соблюдении скорости газов от 1 до 1,25 м/сек удавалось отделять большую часть вредной пыли. Отложения, образующиеся вдоль всего канала удаляются посредством наклонных перегородок. Испытания показали, что пыль отделяется тем полнее, чем меньше высота ее падения, и что в первой части канала отделяются более крупные, а дальше — более мелкие частицы, тогда как совсем мелкая, обычно безвредная, порошкообразная пыль улетает через дымовую трубу. Выяснилось также, что путем устройства довольно длинных и низких боровов с умеренной скоростью течения газов можно достигнуть практически достаточного отделения летучей золы. Однако расходы, связанные с применением этого способа, в особенности когда дело идет об одном или всего нескольких котлах, очень высоки, и велика также потребность в месте. К этому присоединяются прочие крупные недостатки длинных боровов и в первую очередь высокие потери на охлаждение и потери тяги. Поэтому рассмотренный способ обеспыливания уместен только в специальных случаях.

Центробежное обеспыливание заключается в том, что газовый поток с большой скоростью проходит по спиральным каналам, причем тяжелые частицы пыли отбрасываются наружу и улавливаются в резервуары. В качестве устройств для просеивания при мельницах для угольной пыли такие аппараты, в общем, хорошо оправдались. Однако при больших количествах отходящих газов нет возможности работать со столь высокими скоростями. Поэтому в наиболее известном центробежном пылеотделителе для отходящих газов, двойном циклоне Давидсона, центробежное действие поделено между двумя аппаратами. Весь поток газов проходит с умеренной скоростью (10 м/сек) через большой циклон, причем частицы пыли хотя еще и не отделяются, но все же переходят к периферии. После одного оборота вращающегося газового потока его наружный слой, содержащий главное количество пылевых частиц, отводится в меньший циклон, в котором движение происходит с большой скоростью и достигается полное обеспыливание. Это остроумное приспособление во многих случаях вполне оправдалось, в других же случаях, особенно при колеблющейся нагрузке, оказалось непригодным. К. п. д. иногда высок (85%), но часто бывает довольно мал (от 55 до 60%). Другие центробежные пылеотделители имеют турбинные вставки или крыльчатки. Практические результаты с такими аппаратами весьма разнородны. Однако накопившийся до настоящего времени опыт как будто указывает на то, что все центробежные пылеотделители годятся только для установок с равномерной нагрузкой.

ДОПОЛНЕНИЯ РЕДАКТОРА.

Котлостроение в СССР.

Развитие котлостроения в СССР идет таким быстрым темпом, что сводные характеристики изготавливаемых типов быстро становятся устаревшими. Эти изменения особенно заметны в вертикально водотрубных котлах большой мощности и высокого давления. Общий обзор котлостроения в СССР содержится в книге «Котлостроение в СССР», изданной Конвенцией государственных предприятий металлической промышленности в 1928 г.

В этом издании можно найти описание и нормы общезвестных жаротрубных, горизонтально- и вертикально-водотрубных котлов, изготавливаемых в СССР. Из новых конструкций можно отметить трехбарабанные котлы Невского завода в Ленинграде (заменившие строившийся там до недавнего времени пятибарабанный котел системы «Стерлинг»; трехбарабанные котлы разработаны также Южмангустестом).

Таблица размеров трехбарабанных котлов Невского завода приведена в книге Р. Г. Грановского, *Котельные установки*, стр. 145. О развитии котлостроения на Ленинградском металлическом заводе имени Сталина новейшие сведения имеются в статье Н. В. ШUTOVA («Тепло и сила», № 8 — 9, 1930). В настоящее время завод выполняет вертикально-водотрубные котлы с поверхностью нагрева до 1500 м² (в разработке находятся проекты котлов с поверхностью

¹ См. отчет *Compagnie d'Electricité de la Dendre*, Arcg. f. *Wärmewirtschaft*, 9, 220, 1928.

² О новых исследованиях, способах и практических результатах в области пыли и летучей золы сообщают также Meldau и Heitmann, см. 18-й и 20-й выпуски отчетов Комиссии по угольной пыли государственного угольного совета и Arch. f. *Wärmewirtschaft*, 10, 9, 1929.

нагрева до 2500 м^2), причем рабочие давления достигают 30, 33, 35 атм. Котлы морского типа «Вабкок и Вилькок» строятся с поверхностями нагрева до 870 м^2 и для давлений до 32 атм. На рис. 126а изображен вертикально-водотрубный котел системы ЛМЗ, изготовленный для 2-й ГЭС в Ленинграде.

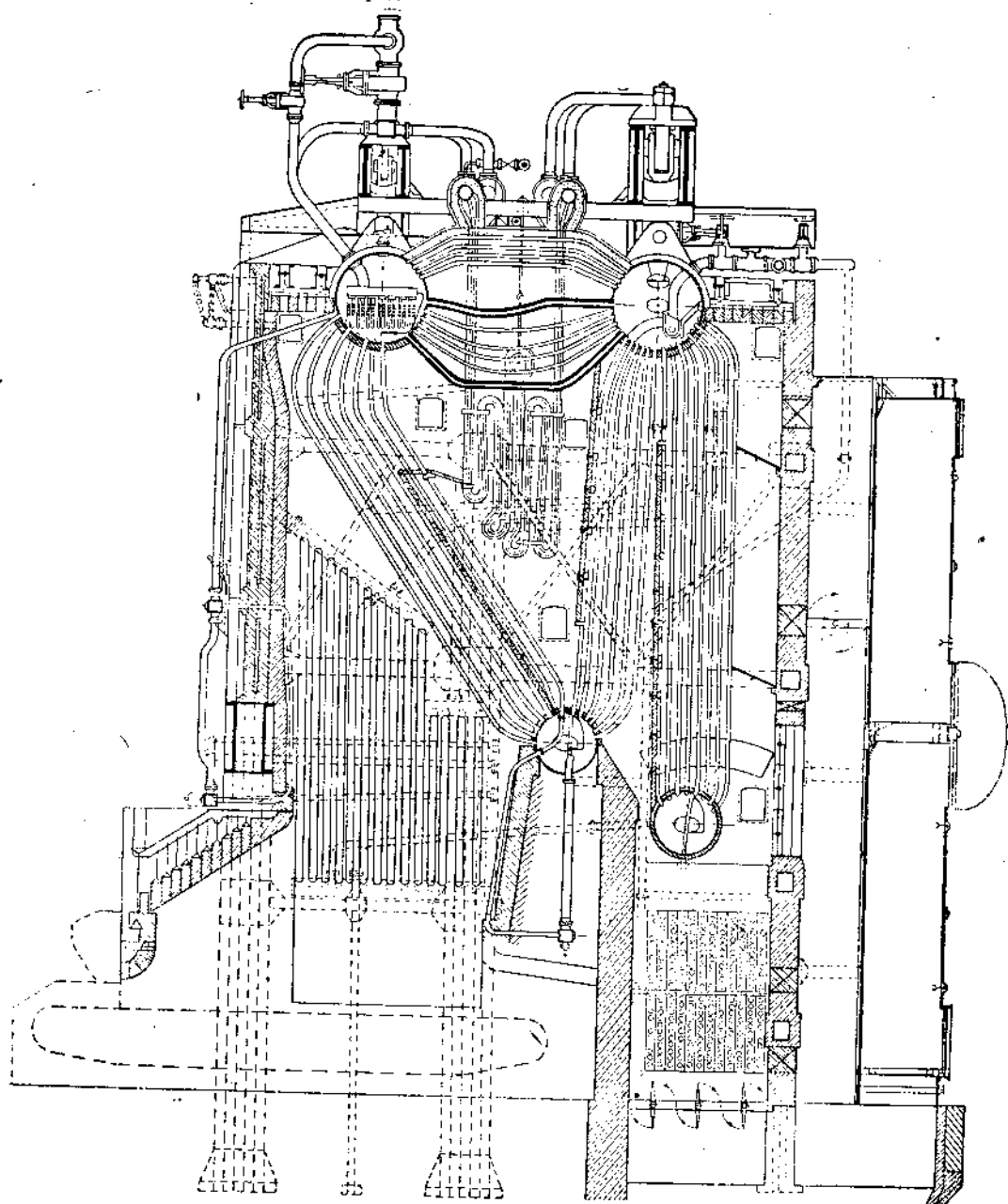


Рис. 126а. Вертикально-водотрубный котел системы ЛМЗ с поверхностью нагрева, равной 1500 м^2 с, экономайзером и воздухоподогревателем для 2-й ГЭС в Ленинграде.

Котел этот имеет поверхность нагрева в 1500 м^2 и снабжен экономайзером и воздухоподогревателем (поверхность нагрева воздухоподогревателей 4100 м^2), рабочее давление 30 атм., перегрев пара до 425° и подогрев воздуха до 210° .

Котлы предназначены для работы на донецком угле марки «Г», сжигаемом на цепных механических решетках. Нормальный съем пара принят равным $50 \text{ кг/м}^2 \text{ ч.}$ с форсировкой до $60 \text{ кг/м}^2 \text{ ч.}$

Подробная библиография вообще по типам котлов высокого давления имеется в статьях «Котлы паровые» (проф. П. Соловьева и Л. Павлушкова), «Котлы паровые высокого давления» (С. Шваримана) и «Котельные установки» (проф. П. Соловьева) в II томе «Технической энциклопедии», Москва, 1930.

ГЛАВА ВТОРАЯ.

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ И СПЕЦИАЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА.

1. ПЕРЕХОД К БОЛЕЕ ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЯМ.

Стремление к более высоким рабочим давлениям в паровом хозяйстве характерно для современного прогресса техники и определяет собой будущее направление развития котлостроения. Если несколько десятилетий назад давление в 10 раб. атм. считалось высоким, то в настоящее время котлы с давлением в 15 или 20 раб. атм. считают котлами среднего давления, а о высоком давлении говорят, начиная лишь с 30 или 40 раб. атм. Но даже эту область давлений, нормальную в наше время для крупных силовых станций и для установок с противодействием в промышленных предприятиях, следует признать низкой по сравнению с новейшими установками особо высокого давления, работающими при 60, 100 и 120 раб. атм., а иногда даже при 225 раб. атм. (котел Бенсона).

1. Преимущества пара высокого давления и экономически рациональные давления

Виды паровых хозяйств. Какие причины говорят в пользу повышения давлений, какие преимущества достигаются при этом и для каких предприятий пригоден пар высокого давления? Чтобы ответить на эти вопросы, необходимо прежде всего разделить паровые установки на три принципиально различные группы и рассмотреть таковые в отдельности. Группы эти следующие:

- 1) предприятия с чисто энергетическим потреблением пара,
- 2) предприятия с силовым и тепловым потреблением пара,
- 3) предприятия с чисто тепловым потреблением пара.

В первой группе повышением рабочего давления можно повысить *термический коэффициент полезного действия* машин. Во второй группе, если работа производится на машинах с противодействием или с отъемом пара, повышением давления достигается существенное *повышение производительности* машин, благодаря чему вся потребность в энергии или, по крайней мере, весьма значительная ее часть может быть покрыта дешевой работой противодействия. Иногда даже, если это допускают местные условия, возможна продажа избыточной энергии посторонним потребителям (районным станциям или соседям). Третья же группа повышением давления не достигает в термическом отношении никаких выгод, так как при чисто тепловом потреблении невозможно какое-либо использование полученного повышением давления напора.

Но даже для предприятий этого рода умеренное повышение давления может оказаться целесообразным при условии сильных колебаний в расходе пара, так как возникает возможность накапливать большие количества пара в *аккумуляторах Рутса*, благодаря чему котлы разгружаются и обеспечивается получение при всех обстоятельствах потребных количеств пара. Если, например, необходимо для производственных целей давление составляет 4 раб. атм., то почти всегда окажется выгодным установить котел с давлением в 10 или 15 раб. атм. и разность давлений между 10 или 15 и 4 раб. атм. использовать для аккумуляции пара.

Экономические соображения. В каждом отдельном случае для выбора давления решающую роль играют экономические соображения. Термические преимущества только тогда имеют достаточный вес, когда они не сводятся к нету повышенной первоначальной стоимостью. В общем, при современных условиях капитальные затраты по сооружению целых установок в области низких и средних давлений (примерно до 20 атм. ман.) почти не повышаются с возрастанием давления, тогда как термические выгоды возрастают очень быстро. Поэтому выбор давления в котле, примерно, в 20 атм. ман. оказывается экономичным почти для всех видов паровых хозяйств. Однако для предприятий с чисто тепловым потреблением пара, даже в случае работы с аккумуляторами Рутса, едва ли даст выгоду повышение давления за предел в 15 атм. ман.,

так как, начиная с этого давления, удельная аккумулятивная способность аппаратов Рутса почти перестает повышаться с повышением давления.

При давлениях свыше 20 раб. атм. расходы по первоначальному обузданию возрастают быстрее, тогда как повышение к. п. д. и производительности машин идет медленнее. Экономический предел для чисто силовых хозяйств лежит в настоящее время около 30 или 40 раб. атм.

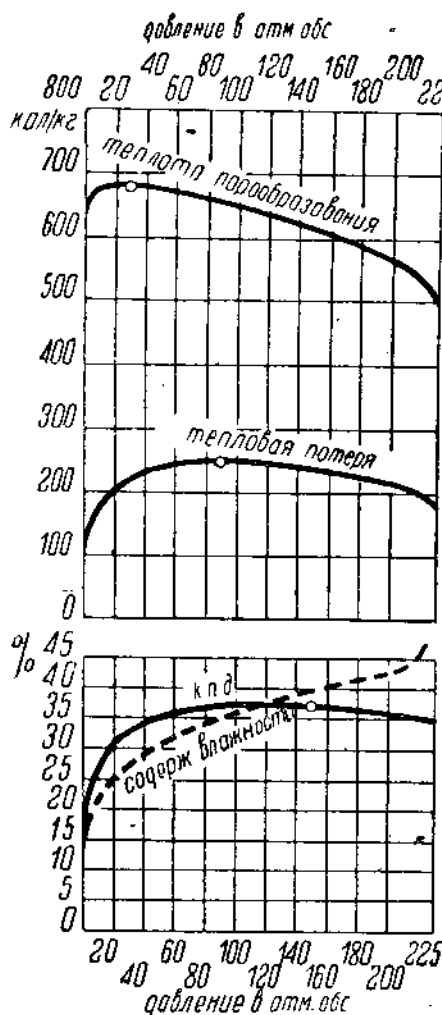


Рис. 127. Работа насыщенным паром.

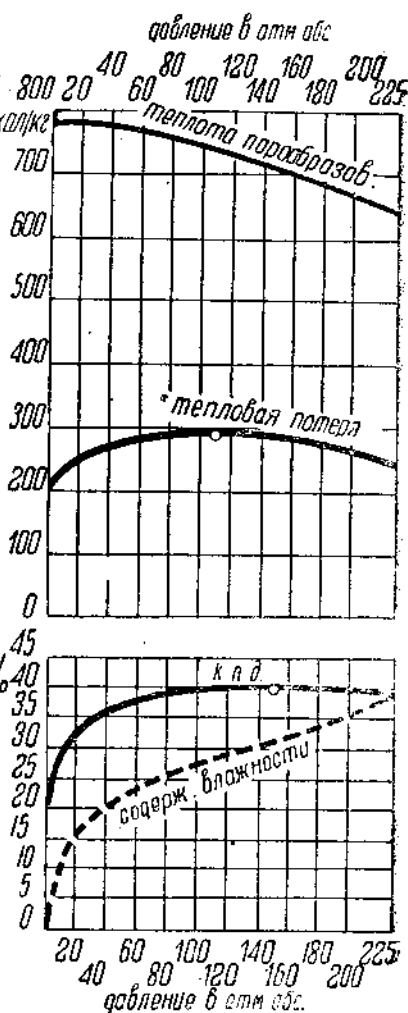


Рис. 128. Работа перегретым паром (400°).

Рис. 127 и 128. Расход теплоты для производства пара, тепловой перепад (при адиабатическом расширении на 0,05 атм. абс.), термический к. п. д. и содержание в паре влаги при 0,05 атм. абс., в зависимости от давления свежего пара.

(в более мелких хозяйствах 30, в более крупных 40 раб. атм.). В установках же, работающих с противодавлением, иногда могут оказаться выгодными гораздо более высокие давления, если высок расход силовой энергии или если есть возможность сбыта на сторону избыточной энергии.

Если удастся построить дешевые и надежные в работе котлы особо высокого давления, к чему уже имеются предпосылки, то описанная картина совершенно изменится. Тогда и установки с чисто силовым потреблением пара перейдут на рабочие давления в 100 раб. атм. и выше.

2. Термические свойства пара высокого давления.

На к. п. д. самой котельной установки давление пара почти не оказывает влияния. Впрочем, при повышении давления повышается и температура воды, отчего теплопередача уменьшается. Однако вызываемое этим уменьшение к. п. д. и производительности может быть вполне скомпенсировано лучшим использованием перегревателя, экономайзера, подогревателя воздуха и т. д.

Большие термические преимущества пара высокого давления проявляются полностью лишь при использовании пара для работы паровых двигателей. Рис. 127¹ показывает, что количество теплоты, затрачиваемой на производство насыщенного пара, сначала возрастает, но уже при 25 атм. абс. достигает своего максимума, а затем, с возрастанием давления, падает — сначала понемногу, а далее все сильнее. Это обстоятельство необходимо особенно подчеркнуть, так как до сих пор еще часто приходится слышать ошибочное мнение, будто бы для более высоких давлений необходима большая затрата горючего. Это бывает верно — и то лишь в незначительной степени — при давлениях до 25 атм. абс. Напротив, при более высоких давлениях расход горючего уменьшается. Разность теплосодержаний, могущая быть использованной в двигателе, возрастает приблизительно до 90 атм. абс., а при еще более высоких давлениях очень медленно падает, вследствие чего вычисляемый по затраченной теплоте и разности давлений термический к. п. д. продолжает возрастать, примерно, до 150 атм. абс. (см. рис. 127 внизу). Из рис. 127 также видно, что содержание влаги в выходящем из машин паре повышением давления весьма быстро возрастает. Это — большой недостаток работы паром высокого давления, так как влажный пар не только ухудшает производительность машин, но и сильно портит турбинные лопатки.

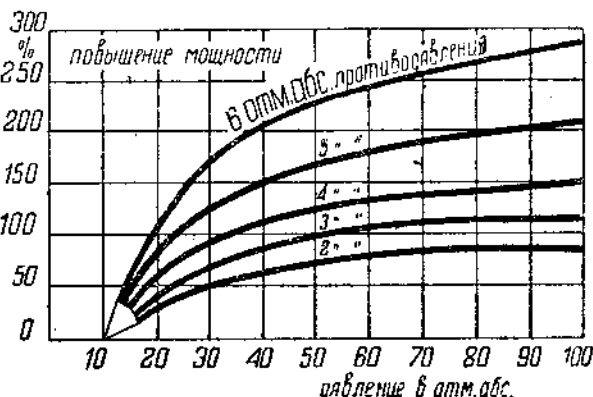


Рис. 129. Процентное повышение производительности машины с противодавлением при возрастающих давлениях и противодавлениях от 2 до 6 атм. абс. Для сравнения принято давление в 10 атм. абс.

Поэтому для практического использования теоретических преимуществ высокого давления переход на работу паром высокого давления всегда должен сопровождаться введением значительного перегрева.²

На рис. 128 представлены такие же соотношения, как на рис. 127, но только для сильно перегретого пара. Мы видим, что здесь не только кривая термического к. п. д. расположена значительно выше, чем при насыщенном паре, и максимальное значение к. п. д. лежит уже не при 150, а при 180 атм. абс., но и то, что содержание влаги в мятом паре машин значительно ниже, чем при работе насыщенным паром.³

При машинах с противодавлением решающую роль играет вопрос о повышении производительности. Рис. 129 показывает, что процентное повышение весьма значительно во всех случаях, вплоть до самых высоких давлений. При этом оно тем выше, чем выше противодавление.⁴

¹ Кривые построены на основании таблиц для пара и IS-диаграммы Моллье (6-е изд., I. Springer, Берлин, 1929).

² Общий вопрос о применении пара особенно высоких давлений (порядка 100 атм. и выше) и перегревов (450° и выше) выходит за пределы настоящей книги. См. разбор этого вопроса в книге проф. С. Г. Жиряцкого, Паровые турбины, ч. II, § 67. Киев, 1931. Прим. ред.

³ Относительно дальнейших преимуществ перегрева см. следующий раздел.

⁴ Мы не можем подробно останавливаться здесь на этой интересной теме. Подробнее см. Praetorius, Wirkungsgrad und Leistungssteigerung von Gegendruckmaschinen, VDI-Zeitschr, 71, 189, 1927.

II. ПЕРЕГРЕВ ПАРА.

Перегрев пара, лишь несколько десятилетий назад введенный в практику инженером В. Шмидтом (W. Schmidt), оказался одним из самых важных и верных средств для повышения экономичности и надежности паросиловых установок. В настоящее время перегреватель является почти неизбежной составной частью большинства современных паровых котлов всех типов и размеров. Правда, перегрев пара можно рекомендовать только тогда, когда пар предназначен для работы в паровых двигателях. Для тепловых процессов перегрев обычно не представляет преимуществ. Во многих случаях его даже необходимо избегать. Но так как в большинстве принадлежащих промышленным предприятиям котельных установок с сильным тепловым потреблением пара давление его сначала понижается в двигателях, работающих с противодавлением или с отъемом пара, и лишь затем пар направляется к различному тепловым его потребителям, то для таких предприятий перегрев пара оказывается целесообразным и даже в большинстве случаев необходимым, так как без этого из машины с противодавлением выходил бы слишком влажный пар, совершенно непригодный для весьма многих тепловых процессов.

1. Преимущества перегрева и свойства перегретого пара.

Преимущества для эксплуатации котлов. В первую очередь нас интересуют здесь преимущества перегрева для эксплуатации самих котлов, хотя, как сразу же отметим, эти преимущества обычно не играют решающей роли для установки перегревателей.

Устройством перегревателя почти всегда достигается существенное *повышение коэффициента полезного действия котла*. Увеличивается вся воспринимающая теплоту поверхность нагрева, и благодаря этому от газообразных продуктов горения отнимаются значительные количества теплоты, что приводит к понижению потерь *→* отходящих газов. В уже существующих котлах установкой перегревателей удается достигнуть повышения к. п. д., в среднем, на 3 — 5%. При этом следует иметь в виду, что во многих случаях установка перегревателя возможна без каких-либо изменений в самом котле, так как перегреватель требует мало места и, например, во всех водотрубных котлах располагается между дымоходами котла. Отсюда происходит второе преимущество, а именно *повышение производительности при равном занимаемом месте*. Это повышение производительности следует относить к произведенному количеству тепла (а не к произведенному количеству пара, которое от установки перегревателя почти не изменяется). В зависимости от давления пара повышение производительности составляет, примерно, от 10 до 30%.

Здесь следует обратить внимание на одно весьма распространенное заблуждение: непосредственной экономии горючего устройство перегревателя обычно не дает. В виду большого теплосодержания перегретого пара перегрев требует добавочного расхода горючего, что обычно компенсируется улучшением к. п. д. Таким образом, выгода от перегрева заключается в том, что при равном расходе горючего получается значительно более ценный по своим свойствам пар.

Термодинамические преимущества. Значительно важнее термодинамические преимущества перегретого пара, проявляющиеся в работе паровых двигателей. Мы лишь кратко укажем на них, так как их подробное рассмотрение не входит в рамки настоящей книги. *Термодинамический к. п. д. паровых двигателей* с повышением перегрева возрастает, т. е. отношение количества термически используемой в машине теплоты к полному теплосодержанию пара становится более выгодным.¹ В зависимости от начального и конечного давлений в машине выигрыш составляет приблизительно от 5 до 15%. Его легко определить по известной IS-диаграмме, отсчитывая вертикальные расстояния между кривыми постоянных давлений (т. е. по адиабатам). Например, при 20 атм. абс. теплосодержание насыщенного пара приблизительно равно 669 кал/кг, а при адиабатическом расширении на 0,05 атм. абс. выходящий в конденсатор пар содержит еще 461 кал/кг, откуда термический к. п. д. получается равным $\frac{669 - 461}{669} = 31,1\%$. С другой стороны, перегретый пар при 400° имеет теплосодержание 776 кал/кг, а при равном давлении в конденсаторе пар в нем содержит 518,5 кал/кг, так что термический к. п. д. получается равным $\frac{776 - 518,5}{776} = 33,2\%$. Итак, улучшение термического к. п. д. дви-

¹ См. также стр. 233 и рис. 127 и 128 в предыдущем разделе.

гателя составляет $\frac{33,2 - 31,1}{31,1} = 6,75\%$. Если же речь идет о машинах без конденсации то для насыщенного пара термический к. п. д. получится равным $18,4\%$, перегретый пар в 400° даст термический к. п. д. $20,4\%$, и выигрыш составит $\frac{20,4 - 18,4}{18,4} = 10,85\%$.

Как показывает этот пример и как это легко подтвердить математическим путем, *перегрев влияет на термический коэффициент полезного действия тем лучше, чем выше давление пара за машиной*. Таким образом, в машинах без конденсации от перегрева получается больший выигрыш, чем в машинах с конденсацией, а в машинах с противодавлением за машиной в несколько атмосфер достигаются еще более благоприятные результаты, чем в машинах без конденсации.

Кроме этого чисто термического превосходства, работа перегретым паром, с точки зрения практической эксплуатации, обладает еще более значительным термодинамическим преимуществом, заключающимся в том, что *потери при превращении теплоты в механическую энергию при перегретом паре значительно ниже, чем при насыщенном паре*. При расширении насыщенного пара в поршневой машине возникают большие потери от конденсации у холодных стенок: часть пара, таким образом, совершенно теряет свою работоспособность. При расширении перегретого пара, правда, также возникают потери от охлаждения, но они вследствие весьма малого коэффициента теплопередачи перегретого пара гораздо меньше, чем при насыщенном паре. Кроме того охлаждение проявляется не столько в образовании конденсата, сколько в понижении температуры. От этого рабочая ценность охладившегося пара хотя и несколько уменьшается, но все же не уничтожается полностью, как при конденсации насыщенного пара. Разница между работой насыщенным и перегретым паром в этом отношении столь значительна, что термодинамические потери в машинах, работающих перегретым паром, часто не достигают половины тех потерь, которые происходят в машинах, работающих насыщенным паром. Термодинамический к. п. д., называемый также внутренним или относительным к. п. д.,¹ т. е. отношение количества действительно использованной теплоты к тому ее количеству, которое вообще можно использовать, у паровых двигателей, работающих насыщенным паром, в среднем составляет от 50 до 60%, у паровых двигателей, работающих перегретым паром, от 70 до 80%, а иногда и значительно выше.

Сохранение материала турбин. Наконец, в отношении паровых турбин следует еще иметь в виду, что перегретый пар дает *гораздо меньшие потери трения* и что *турбинные лопатки* при работе перегретым паром *служат гораздо дольше*, так как сухой пар сильно разъедает материал машины. Это обстоятельство с экономической и эксплуатационной точек зрения имеет очень важное значение. При работе перегретым паром не только значительно уменьшаются расходы по содержанию и ремонту машин, но и значительно повышается надежность работы.

Уменьшение сопротивления в трубопроводах. Если принять еще во внимание, что при работе перегретым паром сопротивление в трубопроводах сильно понижается и что в них не образуется или почти не образуется конденсата, постоянное и надежное удаление которого часто причиняет затруднения, то окажется, что перегрев пара представляет целый ряд больших преимуществ и что установка перегревателей почти всегда окупается в самое короткое время.

Перегреватели для установок с чисто тепловым потреблением пара. Даже в установках с чисто тепловым потреблением пара привлечение небольшого перегревателя часто оказывается выгодным и целесообразным. Во-первых, в перегревателе почти без остатка высушивается пар, который всегда бывает немного влажным, а при сильных колебаниях нагрузки и при высоких нагрузках часто содержит даже много влаги. Такое высушивание пара само по себе всегда желательно. С другой стороны, небольшой перегрев уменьшает нежелательное образование воды в трубопроводах и тепловые потери от излучения и теплопроводности (благодаря малому коэффициенту теплопередачи перегретого пара). Перегрев можно регулировать таким образом, чтобы теплота перегрева как раз покрывала потери от охлаждения в трубопроводах. Тогда пар будет доходить к потребителям теплоты в совершенно сухом состоянии, в то время как

¹ Относительный коэффициент полезного действия определяют так же, как отношение теоретического расхода пара в машине с неполным расширением к действительному расходу пара. К сожалению, различные обозначения еще не имеют точно установленного смысла.

Прим. ред. Для паровых турбин терминология коэффициентов полезного действия является более или менее установленной. См. Н. А. Давыдов, Терминология и методика подсчетов испытаний паровых турбин, "Изв. Теплотехн. инст.", № 10 (23), 1926.

при котлах, работающих насыщенным паром, особенно при длинных трубопроводах, пар часто доходит до места потребления довольно влажным.

2. Промежуточный перегрев.

За последние годы в практике привился особый вид перегрева пара, так называемый промежуточный перегрев, применяемый, главным образом, в установках высокого и высшего давлений. В виду довольно трудных условий работы металлических материалов при высоких давлениях и температурах, нельзя переступать определенных температурных пределов. Сталь при температурах 500° и 600° уже начинает светиться красным калением. А так как для изготовления перегревателей и турбинных лопаток применяются только сталь и подобные ей сплавы, то приходится избегать всякого перехода за предел в 500° и ограничиваться на практике средними температурами между 400° и 480° .

При этом необходимо помнить о том, что температурная область перегрева при работе паром высокого давления весьма тесна, потому что, как известно, с возрастанием давления возрастает и температура парообразования. При перегретом паре в 450° мы при 10 атм. абс. получаем приблизительно $450 - 180 = 270^{\circ}$ перегрева, при 40 атм. абс. — всего лишь $450 - 250 = 200^{\circ}$, а при 100 атм. абс. — еще меньше, а именно всего $450 - 310 = 140^{\circ}$. Отсюда следует, что при высоких начальных давлениях граница насыщенного пара достигается при расширении в турбине очень скоро, так что ступени низких давлений работают влажным паром, отчего страдают лопатки и сильно падает к. п. д. машины. Таким образом, при высоких давлениях однократного перегрева пара недостаточно и возникает необходимость — или, по крайней мере, становится полезным — после определенного снижения давления подвергнуть пар новому перегреву.¹

3. Конструктивные типы перегревателей.

Различают два основных типа перегревателей: почти исключительно применяемые до сих пор конвекционные котельные перегреватели, поверхность нагрева которых помещается между первым и вторым дымоходами котла, и недавно получившие распространение в Америке при котлах высокой производительности *радиационные перегреватели*, у которых вся поверхность нагрева помещена в самой топочной камере и подвергается облучению пламенем. Иногда как для перегрева свежего пара, так и для промежуточного перегрева применяют так называемые *центральные перегреватели*, в которые направляют пар из нескольких котлов или машин. Следует также упомянуть о «промежуточных» перегревателях, конструктивно мало отличающихся от нормальных котельных перегревателей. Кроме того в последнее время с успехом испытаны на практике промежуточные перегреватели, обогреваемые свежим паром.

Перегреватели в котельных дымоходах. Перегреватели этого типа имеют вполне установившуюся конструкцию и состоят из многочисленных толстостенных, цельнотянутых, U-образно изогнутых стальных труб. Оба конца каждой трубы ввальцованы в коллекторы, изготовляемые из чугуна, литой или кованой стали и имеющие круглое или прямоугольное поперечное сечение. Поток насыщенного пара входит в один из коллекторов перегревателя, распределяется по отдельным трубам, проходит параллельно сквозь все змеевики, обогреваясь в то же время горячими газами, и собирается во втором коллекторе, откуда он направляется в паропровод. Иногда включают последовательно несколько групп таких трубчаток. Тогда приходится либо прибегать к нескольким промежуточным коллекторам, или же разделять оба коллектора на секции.

Далее, различают перегреватели с *горизонтальным и вертикальным расположением труб*. Оба эти типа имеют свои преимущества и недостатки. При горизонтальном расположении преимуществом является легкость наполнения перегревателя водой при растопке и удобство опорожнения от воды, но зато трубы легко провисают и прогибаются, отчего могут возникнуть неплотности в местах вальцовки. При вертикальном расположении выпуск воды более затруднителен, зато удобнее монтаж и разборка, а кроме того трубы меньше загрязняются летучей золой и сажей. В общем, при вертикальноводотрубных котлах обычно предпочитают вертикально подвешенные трубы перегревателя, а при котлах с пологими трубами — перегреватели

¹ Вопрос о промежуточном перегреве имеет большое значение для паровых турбин самого высокого давления (больше 35—40 атм.), см. проф. Ж и р и ц к и й, Паровые турбины, т. II, § 68, Киев, 1931. *Прим. ред.*

с горизонтально расположенными трубами, которые также можно подвешивать, но чаще подпирают, для предохранения от прогибания, чугунными, полыми, охлаждаемыми воздухом балками.

На рис. 130 изображен котел с двумя жаровыми трубами, типа Борзиг, в котором поставлен перегреватель с горизонтальными трубами. Газообразные продукты горения проходят по жаровым трубам, затем через дымоход, в котором помещен перегреватель, и лишь после этого поступают в дымоходы, окружающие корпус котла. У всех котлов с жаровыми трубами конструкция перегревателя, в общем, такая же. В комбинированных котлах с жаровыми и дымогарными трубами горячие газы последовательно проходят через жаровую трубу, перегреватель, дымогарные трубы, огибают поверхность верхнего барабана, затем направляются по боковым дымоходам и, наконец, по нижнему дымоходу нижнего барабана.

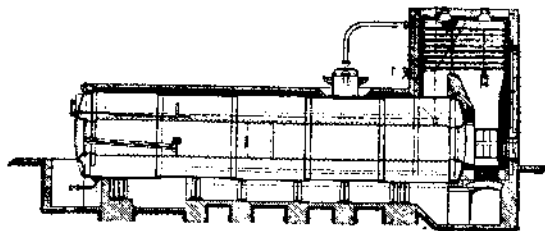


Рис. 130. Котел с двумя жаровыми трубами и перегревателем (15 атм. ман., поверхность нагрева 160 м²), дающим 350°; конструкция «Борзиг».

Расположение перегревателя в котлах с полными и с круто поставленными трубами ясно показано на приведенных выше изображениях.¹ На рис. 131 изображен готовый для установки на место пучок вертикально расположенных труб перегревателя.

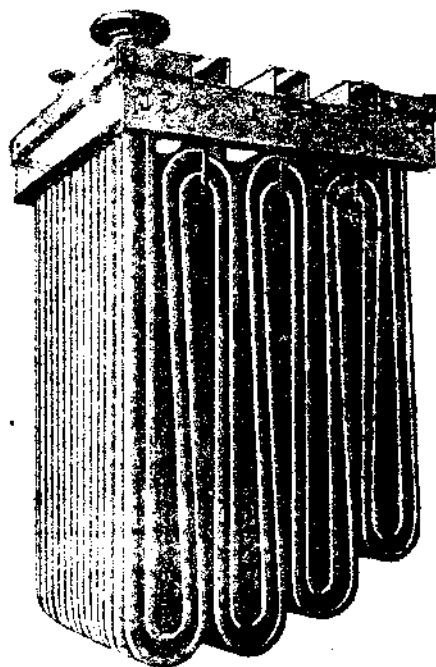


Рис. 131. Готовый для установки пучок труб перегревателя.

Радиационные перегреватели Несмотря на свои большие преимущества (хорошая теплопередача, малые размеры), перегреватели этого типа пока еще не привились в Германии, хотя есть сведения о том, что в Америке они хорошо работают во многих установках. Существенными недостатками радиационных перегревателей являются их высокая чувствительность, вследствие которой при сильных температурных колебаниях и особенно при малой нагрузке котла они легко перегорают, и, далее, неравномерность при колебаниях нагрузки температуры пара, меняющейся от малейшего изменения режима топки. Для предупреждения перегорания труб и во избежание чрезмерного повышения температуры пара иногда устраивают регулирующие приспособления, которые при малой нагрузке котла пропускают по трубам перегревателя избыточный пар, выпускаемый затем наружу неиспользованным. Конечно, это вызывает большие тепловые потери. Кроме того для получения равномерной температуры перегретого пара в больших американских котлах иногда включают параллельно радиационный перегреватель и перегреватель, помещенный в дымоходе котла, причем последний перегреватель принимает на себя задачу регулирования температуры.

Радиационные перегреватели обычно помещают прямо в топочную камеру, совершенно так же, как располагается подверженная облучению часть поверхности нагрева котла. Часто перегреватели защищают от непосредственного действия излучения шамотовыми решетчатыми стенками, но при этом в значительной мере утрачивается важнейшее преимущество радиационного перегревателя — его высокая теплопередача.

¹ На рис. 112 — 115 представлены котлы разных конструкций с горизонтальным перегревателем, а на рис. 118 — котел с вертикальным перегревателем.

Как видим, существует ряд эксплуатационных затруднений, заставляющих сомневаться в том, распространится ли радиационный перегреватель в той конструкции, какая принята в Америке. Больше видов на будущее имеет примененный в системе Лейфлера радиационный перегреватель с принудительным движением пара, при котором не приходится опасаться перегорания.

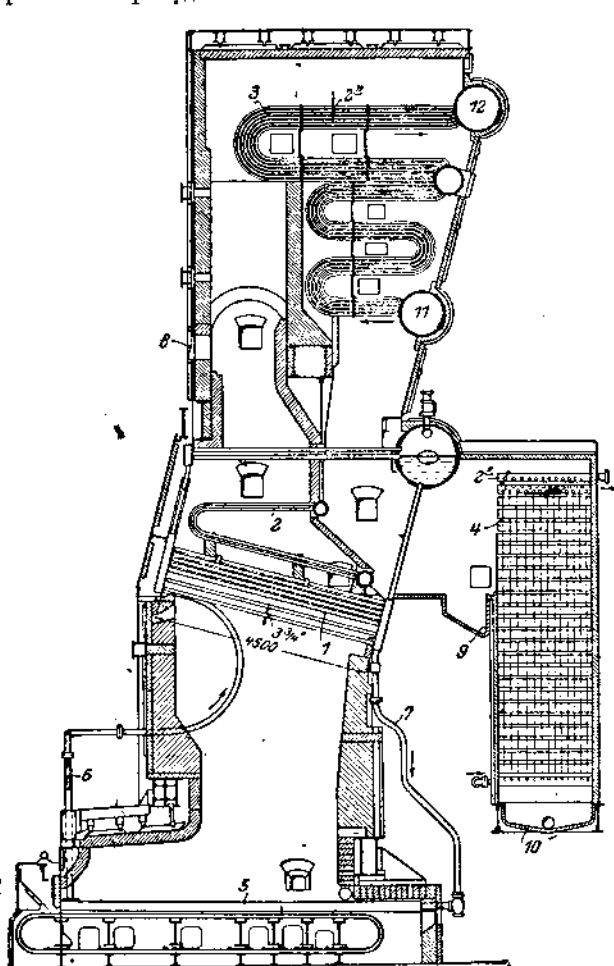


Рис. 132. Американский секционный котел (поверхность нагрева 565 м^2) с малым перегревателем высокого давления (250 м^2) и большим промежуточным перегревателем (1300 м^2).

1 — кипательные трубы; 2 — перегреватель высокого давления; 3 — промежуточный перегреватель; 4 — подогреватель питательной воды; 5 — охлаждающие балки на сторонах топочной камеры; 6 — трубы для воды, поднимающейся от охлаждающих балок; 7 — трубы нисходящей циркуляции для охлаждающих балок; 8 — заслонка для воздуха для быстрого ослабления перегрева; 9 — соединяющая труба для летучей воды; 10 — поддон для всасывания водяных брызг; 11 и 12 — коллекторы над промежуточным перегревателем.

и слабее действующие промежуточные перегреватели свежим паром, при которых перегрев может происходить у самой турбины. Благодаря этому избегаются длинные трубопроводы, а вместе с тем и довольно значительные потери давления и температуры. При этом поступающий из котла сильно перегретый свежий пар, прежде чем вступить в турбину, отдает незначительную часть своей теплоты перегрева пару низкого давления.¹

Промежуточные перегреватели. Для промежуточных перегревателей обычно применяют особые котлы, которые во избежание длинных трубопроводов целесообразно устанавливать возможно ближе к турбинам. На рис. 132 изображен американский секционный котел со сравнительно небольшой поверхностью нагрева (565 м^2), снабженный нормальным перегревателем высокого давления (250 м^2) и весьма большим промежуточным перегревателем низкого давления (1300 м^2). Этот котел, совместно с двумя нормальными котлами, доставляет пар высокого давления для турбины, тогда как в промежуточном перегревателе весь полученный в трех котлах пар низкого давления подвергается дополнительному нагреванию. В виду высокого поглощения тепла промежуточным перегревателем дальнейших дымоходов в котле не сделано. Горячие газы омывают последовательно поверхность нагрева котла, перегреватели высокого и низкого давления, а затем непосредственно направляются в экономайзер.

Недостатком промежуточного перегрева за счет дымовых газов являются дорогие трубопроводы от турбины к котлу и обратно, которые в виду большого удельного объема пара низкого давления должны иметь весьма большой диаметр. Другой недостаток заключается в том, что для достижения установившегося режима требуется не менее 2 или 3 часов. В виду этого в последнее время часто применяют более дешевые, хотя

¹ О промежуточном перегреве помощью пропускания свежего пара см. статью Г н у, «Tendencies in Steam turbine Development». Engineering, февр. 1, 8, 1929.

4. Требования, предъявляемые к перегревателям.

Высокая производительность и высокий коэффициент полезного действия. Чем больше теплопередача, отнесенная к 1 м^2 поверхности нагрева перегревателя, тем меньше могут быть его размеры. Поскольку теплопередача зависит от разности температур, от скорости газов и от чистоты поверхности нагрева, перегреватель приходится подвергать действию *дымовых газов* возможно более *высокой температуры*. Поэтому перегреватели, помещаемые в дымоходах, в водотрубных котлах устанавливают всегда перед вторым дымоходом, а в жаротрубных котлах — непосредственно за жаровой трубой, где газы имеют температуру, примерно, от 500 до 700°. В отношении удельной производительности радиационный перегреватель значительно превосходит перегреватели в дымоходах, так как он подвергается действию излучения пламени и поэтому работает при гораздо большей разности температур. Поэтому поверхность нагрева у него при равной производительности значительно меньше.

Высокая скорость газов достигается тесным расположением труб. Впрочем, от этого возрастает сопротивление тяги и становится необходимой дымовая труба больших размеров. причем приходится работать со всасывающей тягой или нижним дутьем. При радиационных перегревателях, так же как и при непосредственном облучении котельной поверхности нагрева, большой скорости газов не требуется, так как теплоотдача излучением не зависит от скорости газов.

Чистота поверхностей нагрева для перегревателя так же важна, как и для котла. Наружную поверхность труб можно содержать в чистоте посредством неподвижных *продувателей сажи* и такого же устройства, как применяемые для кипяtilьных труб, причем таким продувателем следует пользоваться ежедневно. Осаждение солей и накипи внутри труб возможно только при сильном дополнительном испарении в самом перегревателе и при слишком сильной концентрации солей в котельной воде. Вспенивания и вскипания котла, а также слишком сильного обогащения воды солями следует поэтому избегать, хотя бы ради того, чтобы шадить перегреватель.

Надежность и долговечность. По закону необходимы предохранительные клапаны и водоотводные устройства. Кроме того рекомендуется встраивать термометры, по которым, для избежания недопустимо высоких температур, необходимо регулярно производить отсчеты. Эти термометры подлежат постоянному контролю. Целесообразно также установить позади перегревателя манометр, так как по разности давлений на конце, обращенном к котлу, и на противоположном конце можно судить о степени загрязнения и, в случае надобности, сменить трубы перегревателя, прежде чем произойдет серьезное повреждение.

Особенно *чувствительные места вальцовки* труб в коллекторы перегревателя следует защищать от соприкосновения с горячими газами устройством изолирующего слоя. В некоторых конструкциях места вальцовки труб вынесены из дымоходов.

Весьма важно защищать трубы перегревателя от действия *недопустимо высоких температур*. Такие могут возникнуть, с одной стороны, вследствие отложения накипи, а с другой стороны — при проходе слишком малого количества пара, так как пар отводит поступающую сквозь стенки труб теплоту и охлаждает их. Поэтому всегда следует избегать полного выключения перегревателя во время работы котла. При растопке котла также велика опасность прогорания, так как должно пройти определенное время, часто довольно значительное, прежде чем образуется пар. Поэтому в период растопки необходимо заполнить трубы перегревателя водой или прогонять сквозь них пар, заимствованный от соседних, уже работающих котлов. Радиационные перегреватели, естественно, особенно чувствительны и нуждаются в постоянном охлаждении мощным потоком пара.

Регулирование температуры пара. Во многих предприятиях бывает необходимо производить при любой нагрузке котла перегретый пар вполне определенной температуры. Между тем перегреватель, в зависимости от нагрузки котла, влажности поступающего пара и т. д., дает перегретый пар, температура которого сильно колеблется. Регулирование температуры перегретого пара может происходить или в самом перегревателе, или же на месте потребления пара. Во многих случаях, особенно при жаротрубных котлах, температуру перегретого пара регулируют путем открывания и закрывания чугунных поворотных заслонок, помещенных перед перегревателем в дымоходе котла. При этом способе часть горячих газов отводится мимо перегревателя прямо во второй дымоход. Такая регулировка проста, однако, обычно оказывает лишь слабое действие, так как заслонки при высоких температурах коробятся и ими почти не удается пользоваться во время работы. Долговечность таких поворотных заслонок также

весьма невелика. Лучшие результаты дал другой способ, при котором произвольно регулируемая часть перегретого пара проводится через пучок труб, встроенный в водяное пространство котла. Таким образом, этот частичный поток пара охлаждается, и его теплота испарения с пользой отдается заключенной в котле воде. После этого охлажденный пар снова смешивается с сильно перегретым паром. При регуляторах перегретого пара, включаемых за перегревателем в трубопровод, впрыскивается мелко распыленная холодная вода, которая испаряется и отнимает у перегретого пара желаемую часть его теплоты перегрева. При обоих последних способах дело сводится, конечно, только к охлаждению перегретого пара. Последующее повышение температуры при этом невозможно. Поэтому поверхность перегревателя должна быть настолько велика, чтобы ни при какой нагрузке температура не могла упасть ниже требуемой нормы.

Существует еще много других способов регулирования перегретого пара, которые, однако, мало отличаются в принципиальном отношении от рассмотренных выше.

Легкая смена труб перегревателя. Поскольку при сильно нагруженных перегревателях никогда нельзя совершенно избежать повреждений, весьма важно иметь возможность легкой смены труб. В противном случае получаются высокие расходы на ремонт и длительные простои. В новейших конструкциях котлов заботятся о том, чтобы весь перегреватель можно было просто удалить через верх или вбок.

Малое падение давления пара. При сильной нагрузке котла иногда, вследствие большой скорости прохода пара по трубам перегревателя, образуется весьма значительное падение давления, крайне нежелательное именно при высоких нагрузках котла. Особенно значительно это падение давления в перегревателях, составленных из нескольких последовательно соединенных групп. Боссе (Bosse) установил, что в вертикально водотрубном котле в 15 атм. абс. в одном только перегревателе падение давления может составить больше 1 атм.¹

По этой причине следует по большей части предпочесть параллельное включение всех пере-

гревательных труб их последовательному соединению в несколько групп. Равным образом целесообразны широкие сечения питательных паропроводов насыщенного пара.

5. Влияние нагрузки котла.

Влияние перегревателя на к. п. д. котла вообще тем благоприятнее, чем выше нагрузка котла. На рис. 133 представлены полученные мною на основании детальных опытов кривые коэффициентов полезного действия двух котлов совершенно одинаковой конструкции, из которых один был снабжен перегревателем. Заметно, что при небольшой нагрузке почти нет какого-либо улучшения к. п. д., так как температура отходящих газов мала и у котла, не имеющего перегревателя. Зато при очень высоких нагрузках поверхность нагрева котла, работающего насыщенным паром, не может принимать достаточно теплоты, и поэтому потеря явной теплоты в отходящих газах весьма велика, а к. п. д. падает очень быстро. У котла, снабженного перегревателем, кривая коэффициентов полезного действия проходит почти горизонтально, так как поверхность нагрева перегревателя принимает и использует большую часть избытка теплоты отходящих газов.

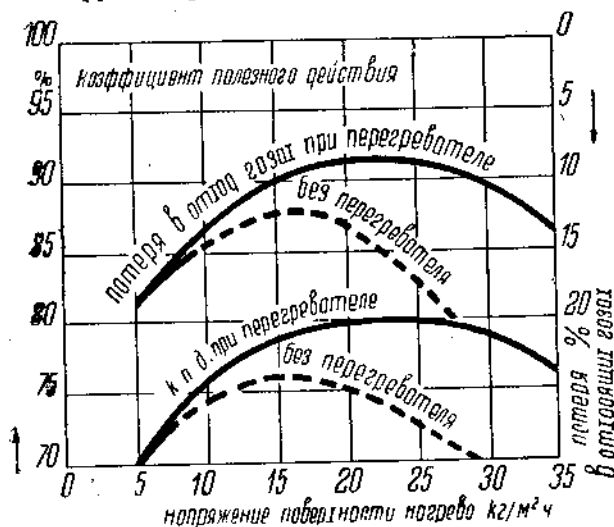


Рис. 133. Коэффициент полезного действия и потеря в отходящих газах с перегревателем и без него, в зависимости от нагрузки. (На основании сравнительных испытаний.)

¹ См. Arch. f. Wärmewirtschaft, 7, 252, 1926.

1. Общие сведения.

Потери в отходящих газах. При рассмотрении в первой части книги тепловых потерь в котельной установке мы уже указывали на то, что потеря с отходящими газами обычно является самой значительной потерей при установившемся состоянии. Далее мы показали, что эту потерю в отходящих газах полностью устранить нельзя, так как определенная часть температурного перепада необходима для создания тяги в дымовой трубе и для обеспечения тем самым подвода в топку необходимого для сгорания воздуха. Выяснилось, что разность между температурой отходящих газов у основания дымовой трубы и температурой наружного воздуха должна составлять не менее 110° или 130° . Другими словами, при средней температуре воздуха в 15° отходящие газы должны иметь температуру от 125 до 145° . Если отказаться от естественной тяги и работать с помощью нижнего дутья или всасывающей тяги, то эту температуру можно значительно понизить. Но по экономическим причинам обычно от этого отказываются, так как при более полном использовании теплоты отходящих газов требуется очень большая поверхность нагрева. Дело в том, что при убывании температуры уменьшается и разность температур отходящих газов и воспринимающего теплоту тела, а вместе с тем и передача тепла, отнесенная к единице поверхности нагрева. Только при очень низких температурах воспринимающего теплоту тела (например при растоплении льда) можно было бы достигнуть более высокой удельной производительности.

Использование отходящих газов в котле. Тот факт, что экономическая сторона передачи тепла зависит, главным образом, от использования перепада температур, привел к идее устройства отопляемых дымовыми газами подогревателей питательной воды, или так называемых экономайзеров. Конструкторы котлов убедились в том, что их прежнее стремление к возможно более полному использованию отходящих газов в самом котле не соответствует принципу экономичности и что для температуры отходящих газов существует предел, ниже которого не позволяют опускаться чисто технические обстоятельства. Этот предел лежит тем выше, чем выше давление в котле. Для пояснения приведем небольшой пример. В старом котле низкого давления, работающем при 8 атм. абс. температура воды равна 175° . Таким образом, теоретический нижний предел для использования отходящих газов должен был бы лежать также при 175° , т. е. уже значительно выше указанных возможных температур отходящих газов от 125 до 145° . Практически следовало бы исходить из температуры отходящих их газов, равной не менее 200° , причем и это значение было бы достижимо только путем устройства весьма большой поверхности нагрева и ценой весьма малой удельной теплопередачи в последнем дымоходе. По сравнению с наиболее выгодным значением температуры отходящих газов (125°) получилась бы добавочная потеря от свободной теплоты в отходящих газах, в размере приблизительно 3 или 5%, в зависимости от содержания в этих газах углекислоты.¹

Напротив, в современном котле высокого давления на 40 раб. атм. температура воды равна 250° . Таким образом, практическая достижимая температура отходящих газов будет не менее 275° , а добавочная потеря, по сравнению с температурой в 125° , составит приблизительно от 8 до 14%. Этот пример показывает, что при использовании отходящих газов только в самом котле к. п. д. котла с возрастанием давления должен сильно упасть. Термическая выгода повышения давления для машины уничтожалась бы термической потерей в котле, и переход к работе при высоком давлении потерял бы экономический смысл.

Использование отходящих газов в подогревателях. Отсюда с очевидностью вытекает, какое важное значение имеет использование дымовых газов в особых, не принадлежащих к поверхности нагрева котла, подогревателях. Будет ли подогреваемое вещество питательная вода для котла или воздух для горения, или, наконец, любое другое твердое, жидкое или газообразное тело, принципиально не существенно. Важно лишь наличие большего температурного перепада, чем имеющийся в последнем дымоходе котла. Чем больше температурный перепад, тем благоприятнее теплопередача и тем меньше и дешевле может быть поэтому поверхность нагрева. В виду этого с точки зрения тепловой экономики наиболее целесообразен противоточный способ, при котором самые горячие газы соприкасаются с уже подогретой жидкостью, а уже охлажденные газы — с холодной жидкостью, направляющейся в подогреватель. Этот способ почти исключительно и применяется на практике. С другой стороны, термическое использование бывает тем выгоднее, чем ниже температура подогреваемого вещества.

¹ См. рис. 44 на стр. 94.

Точка росы. Но тут возникает новое эксплуатационное затруднение, о котором отнюдь не следует забывать. Мы знаем, что отходящие газы всегда содержат небольшое, а часто даже (при всех тонках, работающих на буром угле) весьма значительное количество водяного пара. В зависимости от состава отходящих газов, точка росы, т. е. та температура, при которой отходящие газы насыщаются водяным паром, лежит на разной высоте. Как показывает рис. 134, точка росы расположена выше всего при угле, влажном и содержащем много CO_2 . Понижение температуры ниже точки росы влечет за собой осаждение влаги, которая вместе с пылью, сажей и т. д. образует твердую кору. Эта кора, образующаяся на поверхности нагрева подогревателя, сильно вредит передаче тепла и разрушает трубы. Таким образом, необходимо всячески избегать понижения температуры за точку росы, тем более, что при содержании в угле серы к указанным явлениям присоединяется еще вредное действие образующейся сернистой кислоты.

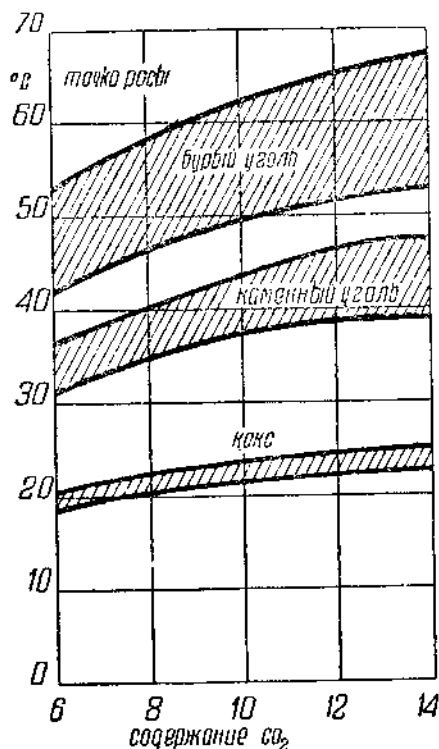


Рис. 134. Температура точки росы отходящих газов от сжигания бурого угля, каменного угля и кокса, в зависимости от содержания CO_2 . (Верхние предельные кривые действительны для высокого, нижние — для низкого содержания в горючем влаги.)

и от этого получают указанные выше невыгодные последствия. В подогревателях воздуха соотношения складываются, как мы увидим ниже, значительно благоприятнее.

Таким образом, допустимое понижение температуры ограничено снизу точкой росы. Поэтому, прежде чем подогревать питательную воду дымовыми газами, ее следовало бы предварительно нагреть настолько, чтобы ее температура приблизительно соответствовала точке росы отходящих газов. При тонке каменным углем и коксом подводимая вода обычно бывает достаточно теплой (для кокса 20° , а для каменного угля 30 или 40°). Но при тонке бурым углем необходима осторожность. Применение при очистке воды высоких температур (от 50 до 70°), засасывание уже нагретого с котельные стенки (или из машинного помещения) воздуха при работе воздухоподогревателями помогают и при наиболее неблагоприятных обстоятельствах избегать местного понижения температуры отходящих газов за точку росы.

2. Что лучше — подогревать питательную воду или воздух?

Успешно применяемые на практике уже несколько десятков лет подогреватели питательной воды (экономайзеры) в последние годы встретили серьезного конкурента, каковым явился подогреватель воздуха. Мы только что видели, что главная цель подогревания посредством дымовых газов, а именно уменьшение потерь с отходящими газами, может быть достигнута при

обоих соперничающих методах. Однако при этом сразу же возникает вопрос о стоимости подогревателя, которая для двух столь различных веществ, как вода и воздух, может быть весьма различна. Далее, подогревание дымовыми газами не представляет собой самостоятельного процесса. Поскольку дело касается подогревания питательной воды для котла и подогревания воздуха, потребного для работы *точки котла*, подогрев является органически связанным с процессами сжигания и парообразования частичным процессом производства пара. Поэтому его нельзя рассматривать отдельно, а лишь в рамках всей задачи производства пара. Мы сейчас увидим, что даже такая точка зрения слишком узка и что при оценке выгод и недостатков экономайзеров и подогревателей воздуха приходится учитывать не только производство пара, но и его потребление.

Преимущества подогревания воды. Как на существенный недостаток использования дымовых газов в самом котле мы указали на то, что температура испарения воды ставит охлаждению дымовых газов чисто арифметический предел, весьма высокий даже в установках низкого давления. Но даже технически возможная предельная температура не достижима по экономическим причинам, так как при малом температурном перепаде в последнем дымоходе получаются очень большие и дорогие поверхности нагрева с совсем незначительным напряжением их. Если же встроить в котел экономайзер, то не только возможно широкое использование дымовых газов со значительным повышением общего к. п. д., но и достигается значительная экономия капитальных расходов, так как, с одной стороны, поверхность нагрева экономайзера сама по себе дешевле поверхности нагрева котла, а с другой стороны — теплопередача, а вместе с тем и напряжение поверхности нагрева вследствие значительно выше напряжения поверхности нагрева в последнем котельном дымоходе. Наконец, большим преимуществом значительного подогрева воды перед питанием ею котла является то, что содержащиеся в воде опасные в отношении образования накипи вещества и агрессивные газы выделяются уже в экономайзере, где они могут создать гораздо менее неприятные повреждения, чем в самом котле. Итак: *уменьшение потерь в отходящих газах, удешевление всей установки при равной производительности, существенное уменьшение занимаемого места вследствие уменьшения общей поверхности нагрева и лучшее сохранение материала котла вследствие большей надежности в работе и большей долговечности* — вот, вкратце, главные преимущества подогревания воды.

Регенеративный способ. Однако теперь возникает новый вопрос: нет ли еще более дешевых и целесообразных средств для подогревания воды? Действительно, последние успехи паровой техники показали, что подогревание питательной воды посредством отъемного пара паровых двигателей, или так называемый регенеративный способ, приносит столь значительные термические и экономические выгоды, что его применяют почти во всех вновь производимых установках.

Нам приходится ограничиться здесь лишь краткой характеристикой больших преимуществ регенеративного способа. Дело в том, что во всех паровых двигателях, работающих с конденсацией, подавляющая часть теплоты пара теряется в конденсаторе, вследствие чего даже современные турбины высокого давления работают с термическим к. п. д. всего в 25 — 35%. При машинах без конденсации потери, конечно, еще выше, а термический к. п. д. еще ниже. Однако, если производить частичный отъем расширяющегося в машинах пара на разных ступенях расширения, в целях ступенчатого подогревания питательной воды по принципу противотока, и образующийся при отдаче теплоты конденсат отъемного пара присоединять к холодной питательной воде, то эта часть находившегося в машинах пара будет термически использована без остатка. Чем больше будет отнято пара по сравнению со всем его количеством, проходящим через машины, тем выше окажется к. п. д. турбин. И далее, чем больше будет число ступеней отъема, тем выше можно подогревать питательную воду. В машинах с противодавлением получается еще то большое преимущество, что при применении регенеративного способа производительность, отнесенная к равному расходу нагревательного пара, может быть значительно повышена.¹

Сравнение регенеративного способа с экономайзером. Подогревание питательной воды отъемным паром имеет, как видим, перед подогреванием дымовыми газами то большое преимущество, что при нем весьма значительно повышается к. п. д. машин. К этому присоединяются дальнейшие преимущества: уменьшение поверхности нагрева благодаря хорошей теплопере-

¹ См. Praetorius, Wirkungsgrad und Leistungssteigerung von Gegendruckmaschinen, VDI-Zeitschr., 71, 189, 1927.

даче между конденсирующимся паром и нагревательными трубами, т. е. уменьшение потребности в месте, меньший вес и обычно меньшие капитальные затраты,¹ более легкие уход, очистка, текущий ремонт и т. д.

Регенеративный способ уже вытеснил экономайзеры из многих установок, в других он, по крайней мере, взял на себя большую часть подогревания воды, так что использование дымовых газов не могло уже производиться полностью в экономайзерах. Если, например, в установке высокого давления на 40 атм. в котле вода, как это часто бывает, подогревается отъемным паром до 150°, то в экономайзере дальнейший подогрев можно довести, быть может, до 180°, но отходящие газы охладятся при этом не более, чем до 200°. Поэтому в установках с подогреванием воды отъемным паром экономайзер становится или совсем излишним, или же, если он остается, то свою задачу использования теплоты отходящих газов до экономически предельной температуры он разрешает уже не полностью. Для всех таких установок приходится, таким образом, изыскивать иные возможности использования отходящих газов.²

Преимущества подогревания воздуха. Такую возможность представляет подогревание необходимого для горения воздуха. С точки зрения использования отходящих газов, подогревание воздуха является не только полноценной заменой подогревания воды, но часто и настоятельной необходимостью в современных котельных установках. Сильное излучение в современных котлах с охлаждаемыми водой топочными камерами влечет за собой значительное понижение температуры в топочном пространстве, отчего не только падает производительность котла, но иногда оказывается не обеспеченным и самый процесс сжигания. Только сильным подогреванием воздуха можно предупредить понижение температуры в топочном пространстве, а иногда даже достигнуть значительного повышения температуры сжигания, отчего к. п. д. котла может быть весьма повышен. Подогреванием воздуха можно достигнуть также существенного понижения потерь в несгоревших остатках, т. е. лучшего выгорания угля.

Сравнение подогревателя воздуха с экономайзером.³ Итак, подогреватель воздуха необходим во многих современных котельных установках с большой поверхностью нагрева на лучистой теплоте. Он дает возможность *сжигать малоценное горючее* без риска плохого воспламенения и способствует значительному повышению коэффициента полезного действия и производительности. Но и в конструктивном отношении он имеет большие преимущества перед экономайзером, так как требует лишь *малой толщины стенок*, ибо воздух, в противоположность питательной воде, не находится под давлением. Таким образом, и цена подогревателя воздуха не повышается, как у экономайзера, с возрастанием давления в котле. В силу этого подогревание воздуха особенно экономично в установках высокого давления.

Другое большое преимущество подогревателей воздуха заключается в том, что даже при очень низких температурах воздуха и сильной влажности дымовых газов *почти не приходится опасаться потения*. Благодаря тому что при подогревателях воздуха с обеих сторон поверхности нагрева находятся газы (воздух и дымовые газы), коэффициенты теплоотдачи которых приблизительно равны (они зависят только от скоростей обоих газов, в общем приблизительно равных), поверхность нагрева сама принимает приблизительно среднюю температуру.⁴ Даже если вводится очень холодный воздух (0°) и если точка росы газов лежит очень высоко (65°), то лишь, примерно, при температуре отходящих газов $2 \times 65 = 130^\circ$ и ниже следует опасаться местного выделения воды на поверхности нагрева. При нормальной температуре входящего воздуха от 20 до 30° отходящие газы очень влажного бурого угля могут охлаждаться до 100 или 110°, а отходящие газы каменного угля — до 50 или 60°, чего практически почти никогда не бывает.

¹ Капитальные затраты зависят прежде всего от числа мест отъема. Большое число мест отъема хотя и дает высокий термический коэффициент полезного действия, но обходится дорого. Экономичнее всего работать при 2 или 4 точках отъема (см. также Noack, VDI-Zeitschr., 67, 1159, 1923 и Zerkowitz, VDI-Zeitschr. 68, 1093, 1924).

² Вопрос о подогреве воды при регенеративном процессе тесно связан с теорией паровых турбин и часто разбирается в связи с теорией последних. См., например, проф. Г. С. Жиряцкий, Паровые турбины, т. II, § 58, 59. И. Г. Гродский, Регенеративный процесс в паровых турбинах, «Тепло и сила», № 8—9, 1930. М. Рубинштейн, Исследование регенеративного процесса в паротурбинных установках. «Изв. Теплотехн. инст.», № 1 (44), 1930, и № 9 (52), 1930. *Прим. ред.*

³ Вопрос о воздушных экономайзерах в связи с подогревом питательной воды разобран специально в книге проф. П. Н. Бутакова, Воздушные экономайзеры и водоподогрев промежуточным паром, Москва, 1927. *Прим. ред.*

⁴ Подробнее о влиянии скорости на теплопередачу изложено в статье G u m z'a, Arch. f. Wärmewirtschaft, 10, 116, 1929.

Область применения экономайзеров. Сравнение между экономайзерами и подогревателями воздуха оказывается, таким образом, в общем, в пользу подогревателей воздуха. Но для всех старых и мелких установок, где подогрев отъемным паром нельзя осуществить, а если можно, то лишь в очень малых пределах (например в предприятиях с чисто тепловым потреблением пара или при поршневых паровых машинах с простым расширением), и, далее, для большинства котлов с колосниковыми топками, в которых воздух для горения можно подогревать лишь не на много, экономайзер сохраняет свое значение как одно из наиболее экономичных средств для повышения к. п. д. котла и уменьшения расхода горючего. В новых установках последовательное включение экономайзера и подогревателя воздуха часто является наиболее экономичным решением задачи использования теплоты отходящих газов.

Наконец, следует указать еще на одну область применения экономайзеров: на работу паром высокого давления. Чем выше давление, тем больше процентная доля теплосодержания воды в общем теплосодержании пара. При рабочем давлении в 10 атм. ман. теплосодержание воды составляет 186, а теплота испарения 480 кал/кг, между тем как при 50 раб. атм. теплосодержание воды равно уже 273, а теплота испарения равна лишь 391 кал/кг.¹ Таким образом, в подогревателе питательной воды при 10 раб. атм. можно получить максимально 28%, тогда как при 50 раб. атм. — около 41% всей теплоты. Поскольку поверхность нагрева экономайзера обходится значительно дешевле поверхности нагрева котла, возможно большая разгрузка котла в пользу экономайзера представляется весьма целесообразной и экономичной. Поэтому во всех таких установках высокого давления, где регенеративный способ неприменим, помимо устройства дешевых подогревателей воздуха, имеет большое значение и устройство экономайзеров, в целях значительного подогрева воды. В этих случаях также рекомендуется последовательное включение экономайзера и подогревателя воздуха.

3. Конструктивные типы экономайзеров. ²

Экономайзер Грина. Всего несколько лет назад чугунный экономайзер Грина представлял собой самую известную и почти единственную применяемую на практике конструкцию. Этот экономайзер состоит из множества вертикальных чугунных труб, сверху и снизу входящих в водяные камеры. Все ряды труб соединяются параллельно. Холодная питательная вода вступает в экономайзер в самой нижней его точке через общую коллекторную трубу и покидает его в самой верхней точке — также через общую трубу. Для устранения загрязнения экономайзера, неизбежного при угле, дающем много сажи и летучей золы, а также при кратковременном местном падении температуры ниже точки росы, предусмотрены скребки с электрическим приводом, ходящие вверх и вниз на приводных цепях и счищающие отложения на трубах. Для внутренней очистки труб от грязи и накипи служат лючки с крышками. Независимо от этого, отдельные группы труб легко можно сменять.

Эти все еще многочисленные в старых установках экономайзеры, конструкция которых за последние 50 лет существенно не изменялась, имеют большие недостатки и уже не соответствуют современному состоянию котельной техники. При давлениях свыше 20 раб. атм. гидравлически впрессованные в камеру трубы уже не держат плотно. Экономайзеры этой системы занимают довольно много места, вследствие чего их поверхность велика; поэтому велики и потери от охлаждения. Невыгодно также то, что через отверстия, сквозь которые проходят, двигаясь вверх и вниз, цепи скребков, проникает (особенно во время рабочих перерывов) в большом количестве холодный воздух, обычно успевающий совсем охладить экономайзер.

Новые конструкции. Следует различать четыре типа современных экономайзеров:

1. Чугунные экономайзеры с гладкими трубами, подобные старым экономайзерам Грина, но усовершенствованного типа.
2. Чугунные экономайзеры с ребристыми трубами.
3. Железные экономайзеры из гладких кованых труб.
4. Специальные конструкции.

В принципиальном отношении, важнейшим прогрессом во всех чугунных экономайзерах,

¹ См. рис. 41 и 42 на стр. 89.

² Для более подробного ознакомления с экономайзерами можно обратиться к большой монографии К. Рюль, *Подогрев питательной воды отходящими газами*, Москва 1930, с дополнениями проф. М. М. Щегляева. *Прим. ред.*

по сравнению со старыми экономайзерами Грина,¹ явилось значительное улучшение материала, главным образом, в отношении прочности, стойкости против разъедания и так называемого «разбухания» чугуна. Кроме того во всех четырех группах соответствующими конструктивными мерами (устранение мертвых пространств) достигнуто улучшение теплопередачи и коэффициента полезного действия, причем соответственно уменьшилось занимаемое место.

Чугунные экономайзеры с гладкими трубами. Экономайзеры этого типа строят теперь только для котлов низкого и среднего давления (примерно до 25 раб. атм., самое большее 35 раб. атм.).² От экономайзеров из ребристых труб они выгодно отличаются большим содержанием воды и благодаря этому, подобно жаротрубным котлам, имеют некоторую аккумулятивную способность. Далее, их легче содержать в чистоте и без затруднения очищать во время перерывов в работе, так как они легко доступны; наконец, благодаря прямым и широким путям для дымовых газов, они гораздо меньше ослабляют тягу дымовой трубы, чем экономайзеры

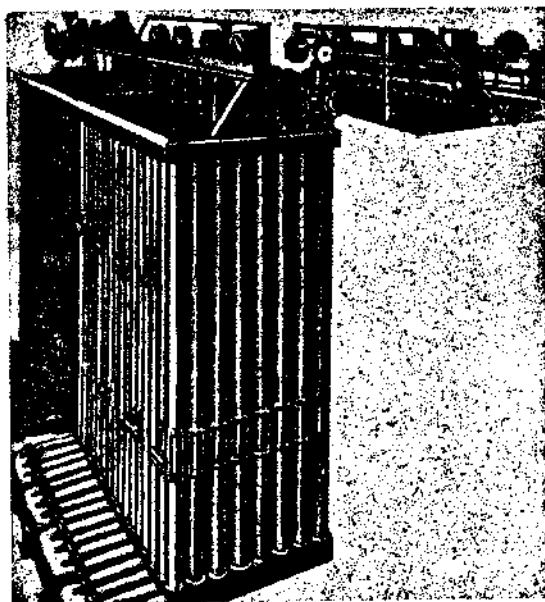


Рис. 135. Двойной перегреватель с поверхностью нагрева в $2 \times 233 \text{ м}^2$ и противоточным серийным включением. Конструкция завода Vereinigte Ekonomiser-Werke.

с ребристыми трубами. Шахматное расположение труб хотя и увеличивает теплопередачу, но повышает сопротивление тяги и увеличивает загрязнение. Поэтому от такого расположения труб обычно воздерживаются. Недостатком экономайзеров с гладкими трубами является, главным образом, то, что они занимают много места. Потери от наружного воздуха, проникающего внутрь скребков, хотя и понижены путем уменьшения поперечного сечения отверстий для цепей, но все же довольно велики. В последнее время, вместо скребков, иногда применяют продуватели для сажи. Вертикальное расположение труб, применявшееся уже в экономайзерах Грина, исключительно применяется и в настоящее время. Дымовые газы направляются перпендикулярно или параллельно трубам. При последней системе достигается большая равномерность газового потока и лучшая теплопередача, но по конструктивным причинам эта система не всегда выполнима. Существенное усовершенствование, по сравнению со старой конструкцией Грина, представляет выполняемое, например, фирмой

«Vereinigte Ekonomiser-Werke» противоточное серийное включение, при котором питательная вода не проходит параллельно по всем трубам, а последовательно через отдельные ряды труб, в противотоке к дымовым газам, чем достигается повышение производительности, примерно, на 5 — 10%. Кроме того опасное потение труб при случайном падении температуры ниже точки росы, отчего наступает преждевременное разрушение труб, может случиться лишь в первом ряду труб, а не на нижнем конце всех труб, как это бывает при параллельном включении. На рис. 135 изображен современный гладкотрубный экономайзер этого типа с поверхностью нагрева в $2 \times 233 \text{ м}^2$.

Экономайзеры с ребристыми трубами. Эти экономайзеры более нового происхождения, но они быстро укоренились в практике вследствие своей дешевизны, высокой теплопередачи, очень малого занимаемого места и пригодности для всяких, в том числе и для весьма высоких

¹ Фирма E. Green, & Son, Ltd. в настоящее время тоже больше не строит устаревших экономайзеров, а разны новые конструкции, в том числе, кроме современных экономайзеров с гладкими трубами, также и экономайзеры с ребристыми трубами. Эти новые конструкции, равно как и новые германские конструкции, представляют существенные преимущества в отношении занимаемого места, производительности и качества материалов.

² При давлениях свыше 20 раб. атм. гидравлически впрессованные трубы еще особым образом укрепляются.

рабочих давлений. В виду указанных особенностей этот тип наиболее пригоден для установок высокого давления и для включения в старые установки, где мало свободного места, а также для котлов, работающих параллельно с тепловыми аккумуляторами. Для котлов, отапливаемых низкосортным углем, образующим много сажи и летучей золы, а также в случае сильных колебаний нагрузки, не выравниваемых с помощью аккумуляторов, они менее приспособлены вследствие легкого загрязнения ребристых труб, затруднительности очистки и малого водяного содержания.

Разные конструкции экономайзеров с ребристыми трубами отличаются, главным образом, формой ребер (круглые или квадратные ребра), высотой ребер и их взаимным расстоянием, направлением движения воды (группы труб с водяными камерами или непрерывное течение воды, последовательно через все трубы) и направлением движения дымовых газов (принудительное направление газов по замкнутым, заключенным между ребрами, частичным каналом или свободное движение газов между ребрами). Рассмотрение преимуществ и недостатков всех этих разнообразных конструкций завело бы нас слишком далеко.¹ Общей для всех этих конструктивных типов чертой является горизонтальное укрепление труб и удаление отложений между ребрами с помощью подвижных продувателей для сажи.

На рис. 136 изображен готовый к установке на место ребристый экономайзер Штирле «Германского акц. об-ва экономайзеров высокого давления».

Экономайзеры с гладкими коваными трубами. Эти экономайзеры применяются предпочтительно перед чугунными при крупных котлах с высоким рабочим давлением, так как они надежнее и гибче в работе и при этом благодаря более тонким стенкам легче и гораздо лучше в отношении теплопередачи. Кроме того они не так чувствительны в отношении случайного образования в них пара. Поэтому в них можно без боязни подогревать воду почти до начала испарения. Однако для экономичной работы таких установок первым и важнейшим условием является высокая температура поступающей питательной воды (не менее 80°) и надежная очистка и дегазация воды до ее поступления в экономайзер. Железо

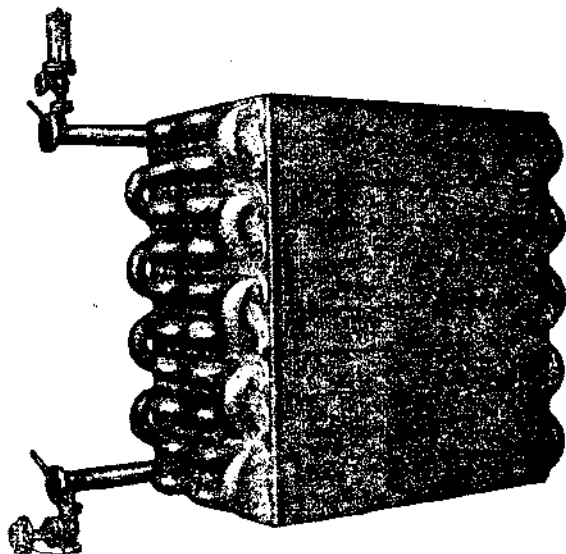


Рис. 136. Экономайзер «Штирле» с ребристыми трубами.

гораздо менее стойко в отношении химического воздействия питательной воды и дымовых газов, чем чугун, и поэтому железный экономайзер требует такого же заботливого ухода, как сам котел. Поэтому такие экономайзеры применяют только в связи с регенеративным способом, а также с испарительными и дегазационными устройствами. Примерами применения современных железных экономайзеров служат центральные силовые станции Клингенберг в Берлине и Женевилье под Парижем.

Конструкция этих экономайзеров подобна конструкции перегревателей. Цельнотянутые, змеевидно изогнутые трубы устанавливаются горизонтально. Серия труб соединяется в группу и вальцовывается в цельнотянутые, расположенные ярусами коллекторные трубы или прямоугольные коллекторные коробки. Напротив устьев труб обычно устраиваются лючки с ниппельными затворами для очистки труб изнутри. Наружная очистка производится при помощи продувателей для сажи. Так как эти экономайзеры пристраиваются к котлу всегда непосредственно, весьма важное значение имеет легкость удаления всего экономайзера при крупном ремонте и легкость смены отдельных труб. На рис. 137 показан готовый к установке на место железный экономайзер типа «Гумбольдт».

¹ См. между прочим Hartmann, Der Vorwärmerbau, том III публикаций Центрального объединения прусских обществ по надзору за паровыми котлами. Изд. Центр. объединения в Галле на Заале, далее—Die Wärme, 50, 363, 1927; 51, 527, 1928 и т. д.

Специальные конструкции. Специальные конструкции экономайзеров, несмотря на единичные успехи, не получили еще большого значения для практики. Поэтому мы лишь кратко коснемся их.

Машиностроительный завод «Hans Simmon» в Вене разработал *вращающийся экономайзер*, состоящий из железного кожуха с вращающимся нагревателем. Последний имеет полный стальной вал с двумя сидящими на фланцах литыми стальными колесами, снабженными ребрами. Эти колеса образуют водяные камеры и имеют полые ручки, благодаря чему питательная вода через сальники, вал и ручки попадает в камеры. Экономайзер совершает 390 оборотов в минуту. Его помещают в ответвление борова. Дымовые газы засасываются вследствие большого числа оборотов, а по выходе из экономайзера снова направляются в боров.

Эта конструкция, отличающаяся особенно хорошей теплопередачей, весьма малым занимаемым местом и, что важнее всего, полной независимостью от тяги в дымовой трубе, длительное время успешно применялась на нескольких бумажных фабриках.¹ Осаждение сажи невелико, так как частицы ее вследствие вращения экономайзера отбрасываются от его поверхности нагрева. Внутренняя очистка также очень проста.

Комбинацию из теплового аккумулятора, котла для использования отходящей теплоты и экономайзера представляет *утилизатор отходящей теплоты «Ольбригт-Гертейс»*,

много лет успешно работавший на заводе Аусиг «Союза химического и металлургического производства».² При этом способе питательная вода распыляется и посылается навстречу пару, полученному в котле для использования отходящей теплоты, причем она подогревается до температуры испарения.

При способе Маргерра вода, удерживаемая насосом под давлением, нагревается в особых приборах и после уменьшения давления ниже давления насыщения частично испаряется. Неиспарившаяся вода снова направляется в насос и опять вступает в цикл. Количество циркулирующей воды автоматически регулируется. Установка описанного рода работает, например, на цементном заводе Заале-Гранау близ Галле.³

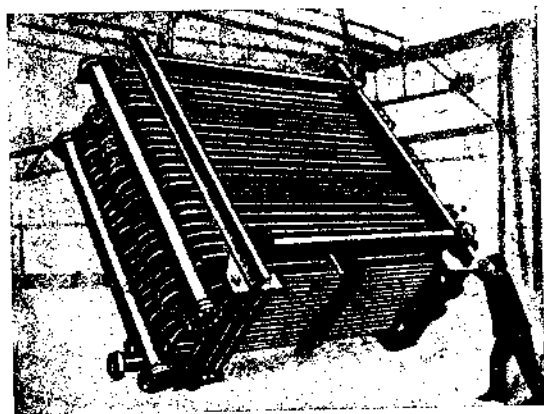


Рис. 137. Железный экономайзер типа Гумбольдт.

Котлы для использования тепла отходящих газов, уже рассмотренные в одном из предшествовавших отделов,⁴ строго говоря, также относятся сюда, так как они служат для использования тепла дымовых газов преимущественно от заводских топок.

4. Требования, предъявляемые к экономайзерам.

Ниже еще раз кратко повторены важнейшие требования, предъявляемые к современным экономайзерам.

Высокое качество материалов. Хотя экономайзеры и являются составной частью полной котельной установки, но не в смысле действующих в Германии «Общих полицейских постановлений по устройству паровых котлов». Поэтому правила, касающиеся материалов и сооружения стационарных паровых котлов, к ним не относятся. Однако повышение давления и температуры в современных котельных установках сделало желательной выработку «директив», которые, не представляя собой предписаний закона, могли бы тем не менее служить твердой основой в отношениях между изготовителями и потребителями экономайзеров. Такие директивы, касающиеся материалов и устройства экономайзеров, разработаны в 1927 г. «Подкомиссией

¹ См. Bergmann, «Papierfabrikant», 25, 64, 1927, далее, Bartel, Arch. f. Wärmewirtschaft, 8, 14, 1927.

² См. Hoffmann, Arch. f. Wärmewirtschaft, 6, 313, 1925, далее Jossé, Festschrift der Vereinigung der Elektrizitätswerke zur Münchener Hauptversammlung, 1925.

³ См. Zement, 17, 1611 и 1644, 1928.

⁴ См. стр. 190.

по вопросам, касающимся экономайзеров» при Союзе германских инженеров, в сотрудничестве со всеми заинтересованными учреждениями.¹ Сюда же относятся разработанные Объединением германских обществ по надзору за паровыми котлами единые «Образцы для описания, разрешений на установку и приемных испытаний экономайзеров»,² а также выпуск норм по материалам DIN 1691.

Почти исключительно применяемые в последнее время для устройства экономайзеров высококачественные сорта чугуна, из которых наиболее известны перлитовый чугун, электро-чугун и центробежное литье, в отношении прочности на растяжение и изгиб, твердости, стойкости против разбедания и против разбухания удовлетворяют требованиям даже при весьма высоких давлениях и иногда обладают большей прочностью, чем это предписывается «Директивами».³

Безопасность в отношении высоких давлений и колебаний давления. До сих пор рабочее давление экономайзеров почти всегда вычислялось неправильно, так как его приравнивали к давлению в котле и затем для испытания к этой величине прибавляли 5 атм. Проверка, однако, сразу же покажет, что в экономайзере давление, в зависимости от типа питательного насоса и регулирующего приспособления, значительно выше.

По этой причине Объединение владельцев крупных котлов и производственная комиссия Союза германских инженеров предложили применять пробное давление, равное 1,3-кратному давлению в котле плюс 10 атм.⁴

Таким образом, при рабочем давлении в котле, равном 30 атм., пробное давление для собранного и готового к эксплуатации экономайзера составит $1,3 \times 30 + 10 = 49$ раб. атм.

Предупреждение разбедания и парообразования. Важнейшими требованиями с этой точки зрения являются: хорошая очистка и дегазация питательной воды, достаточно высокие температуры на входе воды и на выходе дымовых газов, чтобы предупредить потение труб (не допускать температуры ниже точки росы) и не слишком высокая температура выхода воды (по крайней мере на 10—20° ниже температуры парообразования).

Хорошая теплопередача и малое сопротивление тяги. Оба эти требования находятся в некотором взаимном противоречии. Тесно и в шахматном порядке расположенные ряды труб повышают теплопередачу, но одновременно увеличивают и сопротивление тяги. Насколько велика та потеря тяги, которую можно допустить, зависит от местных условий. Для того чтобы удовлетворить обоим указанным требованиям, необходима постоянная основательная очистка экономайзера от сажи и летучей золы, а кроме того достаточная плотность обмуровки, так как проникание воздуха ухудшает тягу и понижает температуру дымовых газов и необходимый для теплопередачи температурный перепад.

Легкость доступа, удобство очистки, включение без нарушения работы котла. Внутренняя очистка труб должна осуществляться без затруднений (устройство лючков). Для продувания грязи целесообразно устанавливать легкую и быструю разборку, или же должны быть предусмотрены особые обходные каналы для дымовых газов, дающие возможность выключать экономайзер во время работы котла. Экономайзеры, устанавливаемые в борове, также должны иметь обходный канал для дымовых газов. Однако эти обходные каналы во время работы экономайзера должны плотно закрываться и, лучше всего, замуровываться, в целях устранения потерь тепла и тяги.

Предохранение от охлаждения во время рабочих перерывов. Тяга дымовой трубы сильно охлаждает наполненный водой экономайзер. Устройством за экономайзером плотно закрывающейся заслонки, так называемого шибер, можно достигнуть значительного уменьшения тепловых потерь и ускорения готовности котла к действию после перерывов, так как в этом случае с самого начала растопки подается горячая питательная вода.

Принадлежности. Важными принадлежностями экономайзера являются предохранительный клапан, манометр и термометры — по одному у мест входа и выхода воды. Целесообразно также устанавливать термометры для измерения температуры отходящих газов перед экономайзером и за ним.

¹ Вышло в изд. Beuth в Берлине.

² Вышло в изд. Otto Hammerschmidt в Гегене, Вюртембург.

³ См. также том III публикаций Центрального объединения прусских союзов по надзору за паровыми котлами в Галле на Заале.

⁴ Это предложение вошло в «Директивы».

5. Конструктивные типы подогревателей воздуха.

Существуют три принципиально различных конструктивных типа подогревателей воздуха, которые все оправдались на практике: трубчатые подогреватели воздуха, подогреватели воздуха с воздушными карманами и регенеративные подогреватели воздуха.

Трубчатые подогреватели воздуха. Трубчатые подогреватели воздуха по своей конструкции тесно примыкают к экономайзерам. Подлежащий нагреванию воздух обычно направляется по многочисленным, тесно расположенным—иногда в шахматном порядке—трубам, снаружи омываемым дымовыми газами, из одной камеры в другую, а оттуда в топку. В некоторых случаях по трубам направляются дымовые газы, тогда как воздух омывает трубы снаружи.

Среди известных трубчатых подогревателей воздуха можно назвать конструкцию Феге (рис. 133), особенность которой состоит в каплеобразном и перпендикулярном сечении труб, благодаря чему уменьшаются потери тяги. Воздушные трубы расположены горизонтально и своими концами входят в оборотную камеру. Трубы, расположенные в более холодном потоке дымовых газов, принимают поступающий воздух и направляют его в камеру, где он изменяет нап्रा-

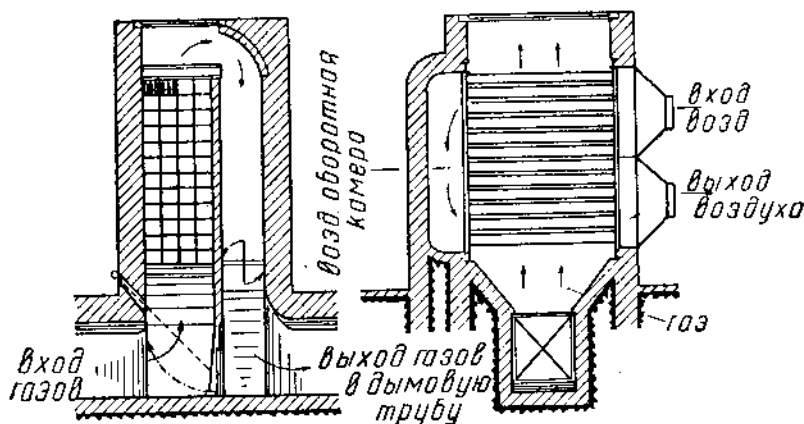


Рис. 138. Подогреватель воздуха Феге, с горизонтальными трубами каплеобразного сечения.

вление своего движения. После этого воздух проходит по трубам, расположенным в более горячем потоке дымовых газов. Таким образом, воздух входит и выходит с одной стороны подогревателя.

Воздушный подогреватель с пластинами или карманами. ¹ Эта конструкция до сих пор преимущественно применяется в Германии. Подогреватели этого типа состоят из большого числа узких карманов из тонкого листового железа, сквозь которые просасывается воздух, тогда как отходящие газы движутся в противотоке к воздуху по промежуткам между карманами. Таким образом, газовый поток разделяется на возможно большее число тонких слоев. Для очистки пластин, так же как в экономайзерах и трубчатых подогревателях воздуха, применяют скребки или продуватели для сажи. Однако при угле, дающем мало сажи, частой очистки не требуется, так как вследствие большой скорости дымовых газов и вибрации крупных пластин достигается автоматическая очистка. Пластины всегда устанавливают вертикально, чтобы сажа и летучая зола могли падать вниз. В зависимости от желательной степени подогревания воздуха применяется система противотока, перекрестного включения или параллельного включения. Противоточная система особенно уместна в тех случаях, когда желательно получить высокую температуру воздуха. Необходимостью она становится тогда, когда температура воздуха должна быть выше температуры охлажденных дымовых газов.

Большим преимуществом пластинчатого подогревателя воздуха является то, что при нем потери тяги весьма малы. Плоские стенки оказывают минимальное сопротивление трению. Исключены также вихревые движения и мертвые углы, почти не устранимые в трубчатых воз-

¹ См. Н. М. Савельев, Д. А. Самойлов и Н. А. Семенко, Испытание пластинчатого воздухоподогревателя «Rotator», площадью нагрева 720 м^2 , на Шатурской ГЭС. «Изв. Теплотехнич. инст.», № 6 (20), 1927. Прим. ред.

духоподогревателях. Благодаря этому является возможность работать без больших потерь тяги, применяя тонкие слои газов и высокие скорости. Вместе с тем удается поместить в малом пространстве большую поверхность нагрева и в то же время достигнуть хорошей теплопередачи. Поэтому пластинчатые подогреватели воздуха в отношении занимаемого ими небольшого пространства не уступают трубчатым подогревателям и с выгодой могут быть установлены в старые котлы, где мало свободного места (рис. 139).

Регенеративные подогреватели воздуха. Третий тип подогревателей воздуха представляют регенеративные подогреватели, в которых теплота не передается по поверхности нагрева,

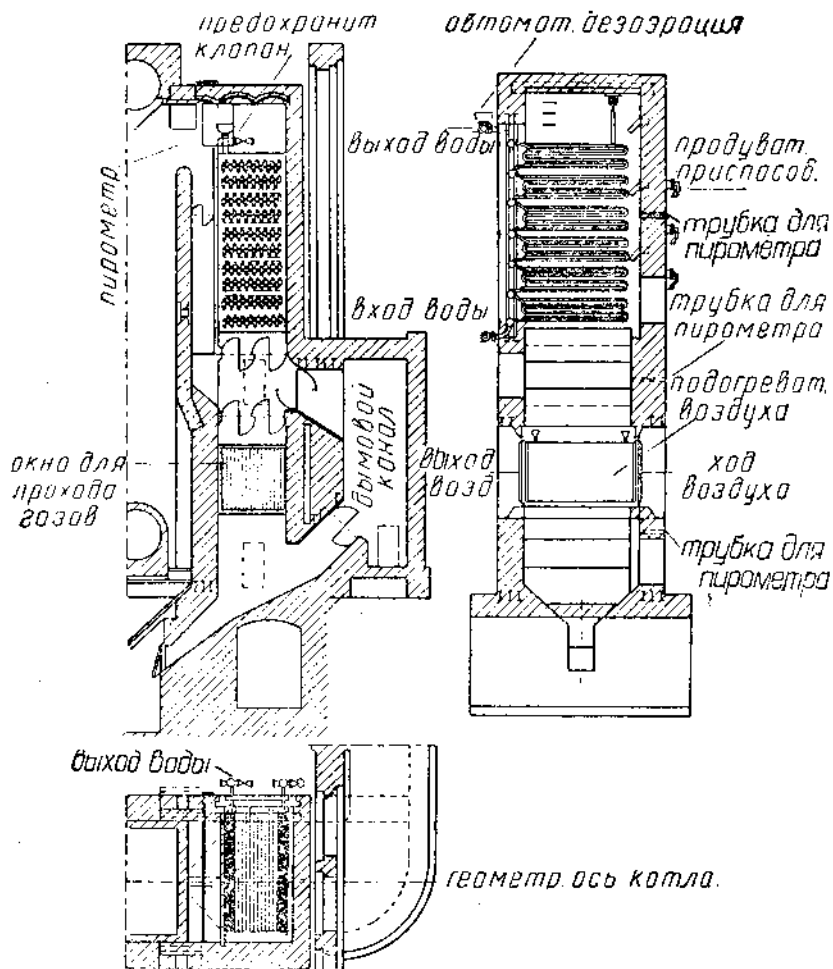


Рис. 139. Подогреватель воздуха Штейнмюллера, с карманами (поверхность нагрева 140 м^2), встроенный в старую котельную установку (поверхность нагрева котла 240 м^2).

а накапливается в твердых телах и затем уже отдается холодному воздуху. Таким образом, здесь происходит периодический процесс заряжения подогревателя теплотой отходящих газов и разряжения его. Этот принцип напоминает применяемые в металлургии подогреватели, но только смена периодов происходит гораздо быстрее. Поэтому аккумуляторами здесь служат не кирпичи, а лишь тонкие металлические поверхности, способные быстро нагреваться и столь же быстро вновь охлаждаться. Среди подогревателей воздуха этого типа наиболее известен *воздушный подогреватель Юнгстрема* (Ljungström, рис. 140). Он состоит из цилиндрического кожуха и барабанообразного тела вращения, наполненного нагревательными элементами. Процесс теплопередачи заключается в том, что отдельные, служащие нагревательными поверхностями листы, вращаясь, попеременно подвергаются действию горячего потока газов и холодного потока воздуха. Отходящие газы и воздух протекают в противоположном направлении по разным сторонам кожуха и при этом омывают медленно вращающееся нагревательное тело.

Большим преимуществом воздушного подогревателя воздуха Юнгстрема является весьма высокая теплопередача и, в связи с этим, малое занимаемое место; при этом получается также хорошее использование теплоты отходящих газов. Очистка и содержание в исправности весьма просты, так как все части легко доступны. Кроме того в большинстве случаев устанавливают продуватели для сажи. Регенеративные подогреватели имеют, затем, то большое преимущество, что загрязнение поверхности нагрева при содержании много газов угле, неустрашимое полностью даже посредством сажепродувателей, почти не влияет на теплопередачу, так как в регенераторах теплота дымовых газов не переходит к воздуху через стенку, а аккумулируется и впоследствии течет обратно. Таким образом, значение имеет не сопротивление теплопередаче, а аккумуляционная способность поверхности нагрева, причем осаждение сажи влияет на эту способность весьма значительно.¹

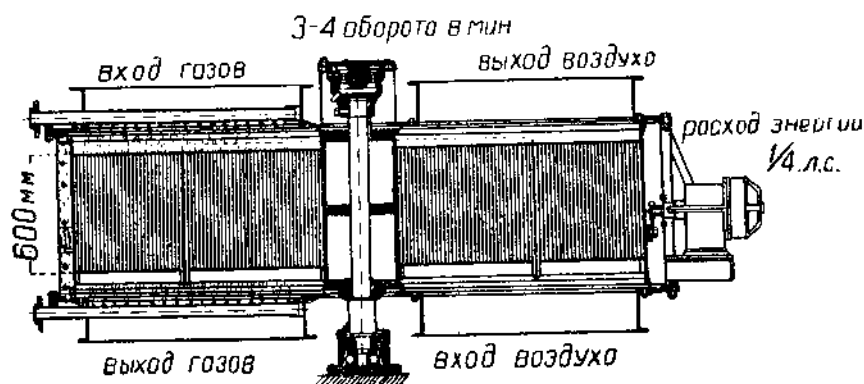


Рис. 140. Разрез подогревателя воздуха Юнгстрема.

Недостатком ротативных регенераторов является утечка воздуха, сменяющегося с дымовыми газами. Эту утечку можно ограничить, но совсем устранить ее нельзя. Кроме того эти подогреватели воздуха расходуют несколько больше энергии, чем неподвижные подогреватели.

6. Требования, предъявляемые к подогревателям воздуха.

Эти требования, в общем, мало отличаются от тех, которые предъявляются к экономайзерам, но они не столь строги в виду полной безопасности работы этих аппаратов и чрезвычайно малого давления, независимого от давления в котле.

Требования, предъявляемые к подогревателям воздуха, носят поэтому преимущественно экономический характер. Они сводятся к хорошей теплопередаче при возможно малой потере тяги, к тому, чтобы аппарат занимал мало места, к возможности содержания поверхности нагрева всегда чистой, к легкости монтажа и разборки и доступности всех важных частей, к защищенности поверхности нагрева от разъедания и, наконец, к хорошему уплотнению, предупреждающему утечку воздуха к газам.

7. Экономия горючего и повышение коэффициента полезного действия при экономайзерах и подогревателях воздуха.

Экономия горючего от установки экономайзера легко вычислить, если известны температуры питательной воды перед экономайзером и за ним t_1 и t_2 , а также теплосодержание пара i'' . Она получится равной

$$\Delta B_s = \frac{B_1 - B_2}{B_1} = \frac{t_2 - t_1}{i'' - t_1} \cdot 100\%, \quad (66)$$

где B_1 и B_2 — расходы горючего без экономайзера и с экономайзером.

¹ Некоторое ухудшение теплопередачи все же происходит оттого, что уменьшается скорость поглощения теплоты, так как при сильно закопченной сажной поверхности в данный промежуток времени аккумулируется меньше теплоты, чем при чистой поверхности нагрева. А так как, далее, осаждение летучей золы и сажи обычно уменьшает стойкость поверхности нагрева, то следует и при регенераторах заботиться об основательной и частой очистке.

Формула (66) достаточно точна, так как температуры и теплосодержания воды приблизительно до 200° почти одинаковы.¹ Чтобы получить процентное повышение коэффициента полезного действия котла следует умножить экономию горючего ΔB_2 на $\frac{B_1}{B_2}$, т. е. на отношение расхода горючего до устройства экономайзера к тому же расходу после устройства экономайзера:

$$\Delta \eta_2 = \Delta B_2 \cdot \frac{B_1}{B_2} \% . \quad (67)$$

Таким образом, повышение к. п. д. всегда оказывается больше экономии горючего.²

Вычисление обоих этих значений для подогревателя воздуха несколько сложнее, так как, строго говоря, при этом следует принимать во внимание теплоемкости дымовых газов и воздуха, а также изменение этих теплоемкостей в зависимости от температуры. Если пренебречь этими едва ли имеющими практическое значение изменениями и принять, далее, что разность между температурой горения и температурой воздуха при подогреве последнего и без него равна

$$t_r - t_{\text{воз}} = t'_r - t'_{\text{воз}} , \quad (68)$$

что, впрочем, лишь приблизительно верно, то для процентного повышения коэффициента полезного действия получится простая формула:

$$\Delta \eta_{\text{воз}} = \frac{\eta' - \eta}{\eta} = \frac{t'_{\text{воз}} - t_{\text{воз}}}{t_r - t_d} \cdot 100 \% . \quad (69)$$

Здесь η и η' — значения к. п. д. котла до и после устройства подогревателя воздуха, $t_{\text{воз}}$ и $t'_{\text{воз}}$ — температуры воздуха, t_r — температура горения и t_d — температура отходящих газов при работе без подогрева воздуха. Экономия горючего вычисляется из процентного повышения к. п. д. с помощью формулы (70):

$$\Delta B_{\text{воз}} = \Delta \eta_{\text{воз}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\eta_{\text{воз}}}{100}} \% \quad (70)$$

Пример 1. Паровой котел с рабочим давлением в 10 атм. и перегревом пара до 350° питается водой со средней температурой в 40°. Каковы экономия горючего и повышение к. п. д., если благодаря устройству экономайзера температура воды повышается до 150°?

Согласно таблицам пара, теплосодержание пара с давлением в 10 раб. атм. и температурой в 350° равно $q'' = 755$ кал/кг. На основании уравнения (66) имеем:

$$\Delta B_2 = \frac{150 - 40}{755 - 40} \cdot 100 = 15,4 \% .$$

$$\text{Отношение } \frac{B_1}{B_2} \text{ равно } \frac{100}{100 - 15,4} = \frac{100}{84,6} ,$$

а из уравнения (67) получаем:

$$\Delta \eta_2 = 15,4 \cdot \frac{100}{84,6} = 18,2 \% .$$

Пример 2. В топке парового котла температура горения равна $t_r = 1200^\circ$, температура воздуха $t_{\text{воз}} = 20^\circ$ и температура отходящих газов $t_d = 300^\circ$. Чему равны экономия горючего и повышение к. п. д. при подогреве воздуха на $t'_{\text{воз}} - t_{\text{воз}} = 200^\circ$?

Из уравнений (69) и (70) получаем:

$$\Delta \eta_{\text{воз}} = \frac{200}{1200 - 300} = \frac{200}{900} = 22,2 \% ,$$

$$\Delta B_{\text{воз}} = 22,2 \cdot \frac{1}{1 + 0,222} = 18,3 \% .$$

¹ Для особенно точных расчетов, вместо температур воды, следует подставить соответствующие значения теплосодержания.

² Во избежание недоразумений, подчеркнем, что при этом всегда вычисляется процентное повышение коэффициента полезного действия. Если, например, к. п. д. улучшается с 50% на 60%, то процентное его повышение составит $\frac{60 - 50}{50} = 20\%$.

Применение этих формул для переводных расчетов облегчается рисунками 141 и 142.

Левая и средняя части рис. 141 относятся к подогреву воды до 100° , те же части рис. 142 относятся к подогреву воздуха до 200° . Для меньшего или большего подогрева пользуются переводными коэффициентами, представленными на обоих рисунках справа. Для примера 1 переводной коэффициент получаем равным 1,1 (см. пунктир рис. 141, справа), а умножив его на отсчитанные по диаграммам числа 14 % и 16,5 %, получим правильные значения $\Delta B_g = 15,4\%$ и $\Delta \eta_g = 18,2\%$. Для примера 2 получаем значения $\Delta B_{\text{воз}} = 18,3\%$ и $\Delta \eta_{\text{воз}} = 22,2\%$ умножением на 2 чисел, отсчитанных по левой и средней частям рис. 142.

Обе фигуры не только служат удобным средством для быстрого определения экономии горючего и повышения коэффициента полезного действия, но дают также наглядную картину разнообразного влияния температуры входа, температуры горения, температуры отходящих газов, теплосодержания пара и т. д.

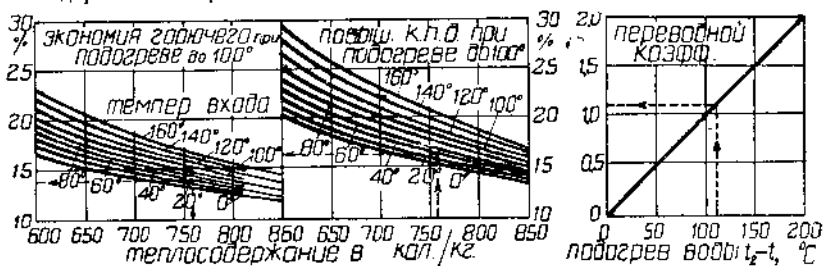


Рис. 141. Экономайзер.

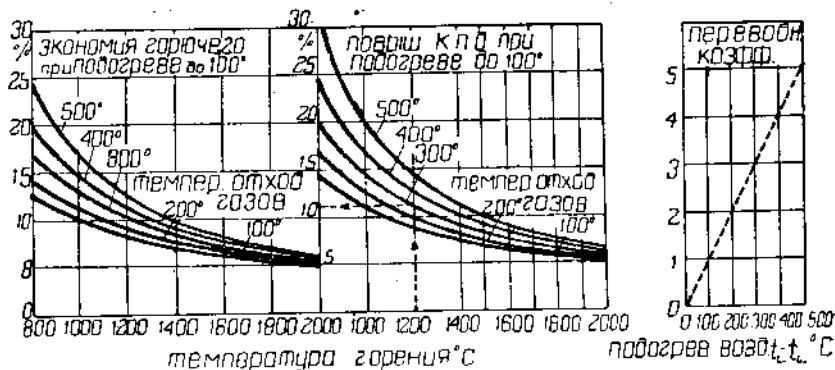


Рис. 142. Подогреватель воздуха.

Рис. 141 и 142. Экономия горючего и процентное повышение коэффициента полезного действия при экономайзере и подогревателе воздуха. Левые и средние части фигур относятся к подогреву воды и воздуха до 100° . При более высокой температуре подогрева и при более низкой исходной температуре отсчитанные значения следует умножить на переводной коэффициент, взятый на правой части фигуры.

Пунктирные кривые относятся к значениям примеров 1 и 2 в тексте.

Пример 3. Для котельной установки с давлением в 9 раб. атм. можно располагать для производства насыщенного пара водой с температурой около 20° . Средняя температура воздуха достигает также 20° , температура горения 1100° и температура отходящих газов 400° . Подогрев воздуха ни в коем случае не должен превышать (по условиям прочности колосниковой решетки) 150° , подогрев воды 130° (считая с температурой парообразования в 180°). Требуется выяснить, при экономайзере или при подогревателе воздуха можно достигнуть большей экономии.

Теплосодержание пара по таблицам равно $i'' = 663,4$ ккал/кг. По рис. 141 для $t_2 = 20^\circ$ и $i' = 663,4$ ккал/кг получаем экономию топлива в 15,5%, отнесенную к подогреву до 100° . Для $\eta_g - t_1 = 130^\circ$ этот результат следует умножить на 1,3. Таким образом, достижимая экономия составляет $15,5 \cdot 1,3 = 20,1\%$.

По рис. 142 для $t_g = 1100^\circ$ и $t_1 = 400^\circ$ получаем повышение к. п. д. (отнесенное к подогреву до 100°) в 12,5%, которое для $t_{\text{воз}} - t_{\text{кол}} = 150^\circ$ следует умножить на 1,5. Таким образом получается экономия горючего, равная $12,5 \cdot 1,5 = 18,75\%$.

Итак, в этом случае экономайзер термически превосходит подогреватель воздуха, так как при нем экономия горючего выше на $20,1 - 18,75 = 1,35\%$.

Можно говорить об экономическом превосходстве, но должно показать расчет рентабельности, при котором учитываются все расходы, факторы экономии и преимущества.

Пример 4. Произведем такой же расчет для котла, дающего перегретый пар в 350° . Все остальные условия эксплуатации остаются такие же, как и в примере 3.

Теплосодержание перегретого пара (350° , 9 раб. атм.) равно $i' = 755$ кал/кг. Экономия горючего, по рис. 141, получается равной $13,5 \cdot 1,3 = 17,55\%$.

При подогреве воздуха ничего не изменяется. Таким образом, экономия и здесь составит $18,75\%$. Это показывает, что в данном случае подогрев воздуха термически выгоднее на $18,75 - 17,55 = 1,2\%$.

Оба эти примера свидетельствуют о том, что подогревание воды представляет большие термические преимущества, главным образом для котлов насыщенного пара.

IV. АККУМУЛЯЦИЯ ТЕПЛОТЫ. ¹

1. Выгоды аккумуляции.

Аккумуляция представляет собой одну из важнейших и интереснейших областей техники. Самые разнообразные формы ее применения мы встречаем во всех тех случаях, когда ставится задача уравнивать колебания между производством и потреблением. В тепловом хозяйстве способы аккумуляции, развившиеся преимущественно за последние годы, приобрели особенно большое значение. Ими пользуются как силовые станции, так и разнообразные промышленные предприятия, достигающие этим не только обычно весьма значительной экономии топлива, но и значительного повышения надежности работы котлов, их готовности к работе и производительности. Эксплуатационный опыт, приобретенный за последние несколько лет в отношении тепловых аккумуляторов, особенно аккумуляторов Рутса, показывает, что расходы на топливо часто уменьшаются на $20-30\%$, тогда как продукция одновременно может быть существенно повышена благодаря лучшему использованию производственного оборудования. К этому присоединяются многочисленные другие преимущества: экономия поверхности нагрева котлов, имеющийся в любой момент резерв, лучшее сохранение котлов и т. д.

Для эксплуатации котельных установок аккумуляция настолько важна, что здесь было бы уместно подробное рассмотрение этой области и детальное описание наиболее употребительных способов. Но так как аккумуляция энергии уже подробно рассмотрена в томе VI данной серии руководств, ² мы ограничимся здесь лишь сжатым обзором и указанием руководящих идей.

2. Аккумуляция в котле.

Каждый котел имеет некоторую аккумуляционную способность, заключенную как в воде котла, так и в обмуровке его топки и дымоходах. Чем больше водяное содержание котла и масса обмуровки, тем выше будет эта аккумуляционная способность.

Аккумуляция в воде котла. Если потребность предприятия в паре внезапно возрастает, то прежде всего падает давление пара. Вследствие этого в воде котла освобождается теплота, благодаря которой и без воздействия топки начинается усиленное выделение пара.

Пример. В котле с водяным содержанием в 100 м^3 и давлением в 10 раб. атм. давление падает на 1 атм. Тогда температура испарения упадет с $183,2$ до 179° , а соответствующее теплосодержание — с $185,7$ до $181,3$ кал/кг. Поскольку вся вода в котле имеет приблизительно температуру парообразования, а удельный вес воды при 180° равен, примерно, 885 кг/м^3 , от указанного понижения давления освободится $(185,7 - 181,3) \cdot 885 \cdot 100 = 381\,000$ кал. Теплота парообразования при 9 раб. атм. составляет $483,1$ кал/кг. Таким образом, освободившейся теплоты достаточно для превращения в пар $\frac{381\,000}{483,1} = 790$ кг воды. ³

Пример показывает, что даже при сравнительно небольшом понижении давления иногда образуются большие добавочные количества пара, без всякого изменения режима топки. Особенно значительную аккумуляционную способность имеют вследствие своего большого водяного

¹ На русском языке по аккумуляторам имеется перевод книги В. Пауэра, Аккумуляция энергии, Ленинград, 1930. Кроме того см. проф. И. Н. Бутаков, Паровые аккумуляторы, Свердловск, 1927; В. В. Дмитриев, Паровые аккумуляторы, Ленинград 1924. Прим. ред.

² Raue, Die Energiespeicherung, изд. Th. Steinkopff, Дрезден и Лейпциг, (1928. Эта книга представляет собой первый и до сих пор единственный труд, посвященный вообще важному вопросу накопления энергии. (Русский перевод: Пауэр, Аккумуляция энергии, Госиздат, 1930.)

³ Этот расчет математически не точен, но вполне достаточен для приблизительных выкладок. Весьма наглядную и для подобных целей удобную диаграмму приводит Пауэр на стр. 119 своей книги. Аналогичную, разработавшую мною диаграмму содержит серия TWL R 183 Wärmespeicherung, № 25915.

содержания жаротрубные котлы и котлы Мак-Николя. У водотрубных котлов аккумуляционная способность уже значительно меньше, а в новейших конструкциях без барабанов (котел Бенсона, котел Леффлера и т. д.) ее почти совсем нет.

Аккумуляция в обмуровке. Если работа котельной топki внезапно нарушится, например вследствие порчи привода движущихся колосников, засорения горелок для пылевидного угля и т. п., то парообразование в течение значительного времени может еще поддерживаться обратным излучением горячей обмуровки, хотя и в слабой степени, без подвода нового горючего. Этой аккумуляционной способностью кладки объясняется часто наблюдаемое повышение давления пара во время рабочих перерывов. Обычно уже задолго до окончания дневной работы можно уменьшить или совсем прекратить подвод горючего, именно в виду того, что накопленной в кладке теплоты хватает на парообразование в течение остатка рабочего времени. Благодаря этому находящейся на передней части колосниковой решетки топливо имеет возможность полностью выгореть.

В котлах новых конструкций и этот вид аккумуляции возможен в значительно меньшей степени, чем в прежних котлах, так как применение поверхностей нагрева, нагреваемых излучением, и уменьшение толщины стен привели к значительному понижению температуры обмуровки и уменьшению ее массы. В экранных котлах аккумуляционной способности у обмуровки вообще почти нет.

Разделение аккумуляции и парообразования. Развитие современного котлостроения и точных конструкций характеризуется стремлением отделить аккумуляцию от котла на том же самом основании, что парообразование и аккумуляция — два принципиально различных процесса, часто весьма противоположные один другому. Чем выше аккумуляционная способность топki и котла, тем больше и инерция котла, и тем меньше его способность приспособления к внезапно меняющимся условиям. Время растопки чрезвычайно удлинится, и часто, например, после выключения котла, аккумуляция проявляется, когда она вовсе нежелательна и приводит к большим убыткам (выпуск пара через предохранительные клапаны, высокие потери от охлаждения и т. д.).

По современным воззрениям котел должен служить только для производства пара. Поэтому он должен быстро подготовиться к работе и обладать приспособляемостью к меняющимся условиям эксплуатации. Аккумуляция имеет такое же важное значение, как и генерирование, но должна строго отделяться от последнего и, что особенно важно, должна допускать совершенно произвольную регулировку. При аккумуляции же в самом котле это невозможно.

3. Аккумуляторы постоянного давления.

Экономайзеры. Выше уже указывалось на то, что экономайзеры обладают не малой аккумуляционной способностью, особенно экономайзеры с гладкими трубами, отличающиеся значительным водяным содержанием и представляющие собой, в известном смысле, аккумуляторы горячей воды. Если при внезапно возросшей потребности в паре приходится усиливать питание, чтобы предупредить слишком сильное понижение водяного уровня, то на экономайзере с большим водяным содержанием лежит функция постоянного доставления котлу горячей воды, благодаря чему самый котел в значительной мере разгружается от задачи предварительного нагревания воды.

Аккумуляторы питательного пространства. На таком же принципе основаны разные типы аккумуляторов постоянного давления. Их действие заключается в том, что они доставляют котлу при малой нагрузке сравнительно холодную воду, а при высокой нагрузке — горячую воду приблизительно при температуре кипения. Аккумулятор конструкции Киссельбаха (Kieselbach), например, работает следующим образом. При пониженном потреблении пара вода перетекает из котла в аккумулятор и нагревает в нем питательную воду до температуры кипения, в то время как котел питается более холодной водой, подаваемой в него непосредственно от питательного насоса или из экономайзера. При повышенном потреблении пара в котел подается содержащаяся в аккумуляторе горячая вода. Аналогично действует аккумулятор постоянного давления К. Кристианса.

Этот способ обладает тем недостатком, что при высоком расходе пара через экономайзер проходит очень мало воды (или совсем не проходит), вследствие чего в нем может образоваться пар. Кроме того страдает и самый котел, часто подвергаясь попеременно очень горячему и очень холодному питанию. При внезапных переходах к холодному питанию случались даже взрывы.

Другой недостаток состоит в том, что при пользовании этим аккумулятором всегда колеблется количество проходящего через перегреватель пара, отчего получается неравномерное

напряжение перегревателя и возникают колебания в температуре перегретого пара, заставляющие прибегать к особым регуляторам перегретого пара. Поэтому в последнее время Кисельбах стал строить также аккумуляторы, в которых нагревание питательной воды производится уже не перетекающей водой, а избыточным паром.

Производительность аккумуляторов постоянного давления. Укажем здесь же на одну специфическую особенность всех аккумуляторов постоянного давления, а именно на их малую производительность.

Производительность и «способность к перегрузке»¹ аккумулятора всецело зависят от того, до какой температуры подогревается вода в экономайзере. Если, например, питательная вода подогревается в экономайзере до 120°, а температура кипения в котле равна 180° (что соответствует давлению в 9,5 атм., теплосодержанию воды в 183 кал/кг и теплосодержанию пара в 665 кал/кг), то с помощью экономайзера можно достигнуть максимального повышения производительности на $\frac{183 - 120}{665 - 120} \cdot 100 = 11,5\%$. Другими словами, нормальную наибольшую

производительность котла, равную, например, 10 000 кг/ч, можно повысить до максимума в 11 500 кг. При подогреве воды до 150° повышение производительности составляет всего лишь 5,9 %, а при подогреве воды в экономайзере до 180° оно стало бы равным 0%. Таким образом, только при сравнительно слабом подогревании питательной воды аккумуляторы постоянного давления способны уравнивать значительные колебания нагрузки.

Новые конструкции. Указанный недостаток присущ и всем новейшим типам аккумуляторов высокого давления. Их способность принимать на себя пики нагрузки ограничена степенью подогрева питательной воды. Но новейшие аккумуляторы питательной воды силовой станции в Гейдельберге отличаются рядом других высоких преимуществ. При них в котел всегда подается питательная вода точно одинаковой температуры (приблизительно равной температуре кипения) и всегда производится одинаковое количество пара. При малом расходе пара избыток его направляется в аккумулятор и нагревает поступающую из экономайзера воду до температуры кипения, после чего лишь эта вода поступает в котел. При высоком же расходе пара весь произведенный пар направляется на потребление, а аккумулятор доставляет из своего запаса воду для котла при температуре кипения. Таким образом, этот способ основан на том, что произведенный пар, в зависимости от нагрузки, служит или для подогревания питательной воды, или для потребления, различно распределяясь для выполнения этих задач.

Аккумуляторы этого рода обычно строят в качестве так называемых *аккумуляторов вытеснения*; более холодная вода подводится в них и отводится снизу, а более теплая — сверху. Это само по себе целесообразное и простое решение имеет, однако, тот недостаток, что вследствие возрастания температур по направлению сверху, в корпусе аккумулятора образуются тепловые напряжения, которые легко могут привести к неплотностям в заклепочных швах.

Аккумуляторы питательной воды можно с выгодой применять и в сочетании с регенеративным способом. Кроме того вследствие независимости аккумулятора от давления в котле аккумулятор может работать при произвольно низком давлении, что особенно ценно для уста-

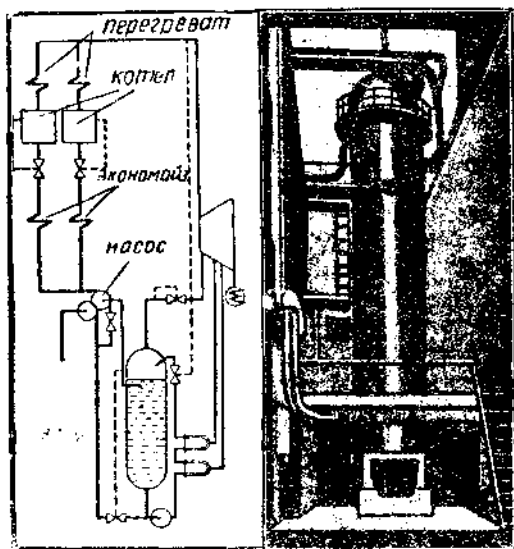


Рис. 143. Аккумулятор постоянного давления, принадлежащий установке высокого давления на Мангеймской центральной силовой станции в сочетании с регенеративной системой.

¹ Выражением «способность к перегрузке» аккумулятора часто пользуются, хотя оно нелогично. Дело в том, что аккумулятор сам не перегружается, нагрузка же котла увеличивается благодаря аккумулятору, в виду чего, в лучшем случае, следовало бы говорить о «способности котла к перегрузке благодаря аккумулятору».

новок высокого давления в виду уменьшения капитальных затрат. Впрочем, в этих случаях приходится уже работать и при более низких температурах (соответствующих давлению в аккумуляторе). На рис. 143 изображен аккумулятор питательной воды Мангеймской центральной силовой станции, работающей при 110 атм. ман. Применение аккумулятора здесь сочетается с регенеративным способом.¹

По сравнению с уже рассмотренными системами, аккумулятор постоянного давления Рутса имеет то преимущество, что между ним и котлом помещается перепускной клапан, являющийся также одной из самых существенных деталей аккумулятора Рутса с падением давления. Благодаря этому клапану весь избыточно образующийся в котле пар направляется в аккумулятор и нагревает питательную воду. Такая регулировка, посредством перепускного клапана, весьма проста и дает возможность применять в установках высокого давления аккумуляторы произвольно низкого давления.

Преимущества и недостатки. Принципиально все аккумуляторы постоянного давления пригодны для разгрузки котла от сравнительно мелких колебаний. Кроме того они представляют еще то преимущество, что котлы без потерь от выпуска пара можно весьма заблаговременно растапливать и внезапно выключать из работы, так как излишек пара всегда может быть использован для подогрева воды. Такие аккумуляторы часто требуют лишь небольших капитальных затрат, а иногда даже можно преобразовать в аккумулятор старый жаротрубный котел. Благодаря этому указанные аккумуляторы экономичны и целесообразны для применения в предприятиях с малыми колебаниями нагрузки. Напротив, для предприятий с сильными колебаниями нагрузки и потребления пара они не подходят в виду своей ограниченной производительности (малой «способности к перегрузке»).

Взаимодействие с аккумуляторами Рутса. При сильных колебаниях нагрузки иногда бывает целесообразно часть пика покрывать с помощью аккумулятора постоянного давления, а остаток компенсировать посредством аккумуляторов Рутса. Например, если случаются пики в 100% сверх нормальной нагрузки и если максимальное повышение производительности с помощью аккумулятора постоянного давления составляет, как в приведенном выше числовом примере, 11,6 %, то на аккумулятор Рутса падает задача покрыть 88,4 % пиковой нагрузки. Поскольку аккумуляторы постоянного давления, если исходить из равных количеств пара, дешевле аккумуляторов Рутса, представляется целесообразным покрывать нижнюю, широкую часть пика посредством аккумуляторов постоянного давления, а верхнюю, высокую, но узкую часть пика — аккумуляторами Рутса. Поэтому аккумулятор Рутса может быть сравнительно малого объема, и в случае появления пиковой нагрузки он вступает в действие лишь тогда, когда бывает превзойдена производительность аккумулятора постоянного давления.

4. Аккумулятор Рутса.

В противоположность аккумуляторам постоянного давления, аккумуляторы с падением давления, из которых самый известный — аккумулятор Рутса, совершенно независимы от котла. Только в них разделение генерации пара и его аккумуляции проведено до конца. Аккумулятор уже не является составной частью котла, а вполне самостоятельным органом всей паровой установки, наряду с аппаратами для производства и для использования пара. Главное значение аккумулятора Рутса лежит не в теплотехнической, а в производственной области, вследствие чего мы можем коснуться этого вопроса лишь в кратких словах.

Способ действия. Аккумулятор Рутса (рис. 144) представляет собой наполненный на 95 % своего объема водою цилиндрический резервуар. Обычно он располагается горизонтально, но в последнее время встречаются и вертикальные конструкции. Его действие основано на том, что в периоды малой потребности в паре излишек последнего направляется по так называемому заряжающему трубопроводу в горизонтальную распределительную трубу внутри аккумулятора и через ряд сопел вырывается в воду, подвергаясь при этом конденсации. Одновременно температура в аккумуляторе, а следовательно и давление, возрастают. При большой потребности в паре давление в аккумуляторе падает, и от этого освобождается теплота. Часть воды снова испаряется, и пар из сухопарника через снабженный предохранительным соплом клапан заряжающий трубопровод направляется к местам потребления. Таким образом, давление в аккумуляторе должно иметь возможность колебаться между двумя заданными пределами, зависящими от эксплуатационных условий. При максимальном давлении аккумулятор под-

¹ См. Koch, Arch. f. Wärmewirtschaft, 8, 394, 1927; Marguerre, und Koch, Die Wärme, 52, 334, 1929.

ностью заряжен и наполнен водою примерно на 96—98 % своего объема; при минимальном давлении он полностью разгружен, причем уровень воды расположен ниже, и степень заполнения водою составляет примерно 92—94%.

Выбор предельных давлений. Выбор предельных давлений определяется, главным образом, эксплуатационными и экономическими соображениями, а кроме того зависит от способа включения аккумулятора. Чем больше перепад давления, тем меньше при равной аккумуляционной способности будут размеры аккумулятора, так как, например, на промежутке между 10 и 5 атм. абс. 1 м³ воды способен аккумулировать приблизительно 50 кг, на промежутке между 10 и 2 атм. абс. — уже 100 кг, а на промежутке между 10 и 1 атм. абс. — даже 130 кг. Чем меньше давление, тем выше удельная аккумуляционная способность воды. Понижение давления на 1 атм. дает при 10 атм. абс. 8 кг/м³, при 5 атм. абс. — приблизительно 13 кг/м³ и при 2 атм. абс. — приблизительно 33 кг/м³ пара. С другой стороны, слишком сильное понижение давления часто невозможно, так как условия производства требуют пара определенного мини-

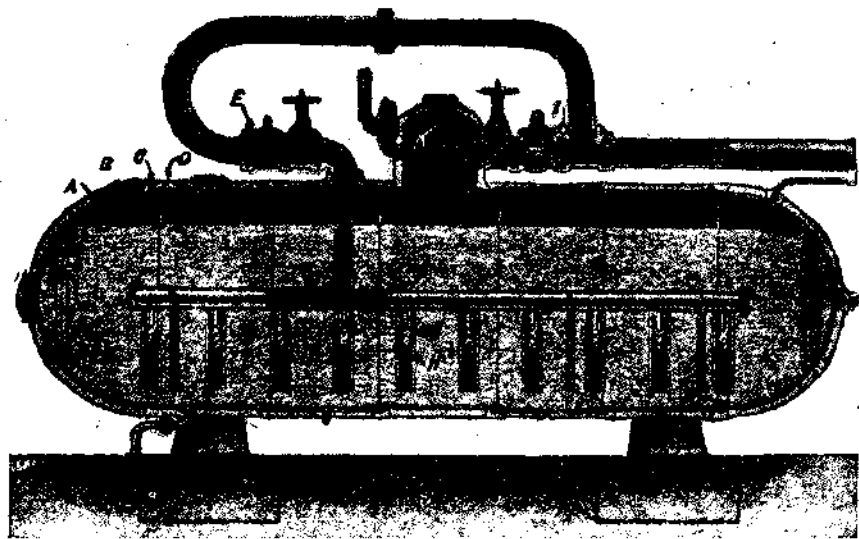


Рис. 144. Разрез аккумулятора Рутса горизонтального типа.

А — корпус аккумулятора; В — изоляция; С — изолирующие крышки; D — защитный кожух из жести для рубероида; Е — возвратный клапан заряжающего трубопровода; F — распределительная труба; G — сопла; H — циркуляционные трубы; I — возвратный клапан разряжающего трубопровода; K — сопло клапана.

мального давления. Что же касается верхнего предела давлений, то он определяется или давлением в котле, или же, если аккумулятор включен за машиной с противодавлением, максимальным значением этого противодавления. Но и в таком случае, если аккумулятор получает пар непосредственно от котла, обычно не выходят за предел в 15 или 18 атм. абс., так как аккумуляционная способность при высоких давлениях незначительна, а кроме того с повышением давления возрастает толщина стенок, а следовательно и стоимость первоначального оборудования.

Автоматические регулирующие вентили. Важную принадлежность аккумуляторов Рутса представляют приводимые в действие при помощи масла клапаны, реагирующие на изменения давления пара вплоть до самых слабых колебаний ($\frac{1}{10}$ атм.) и благодаря этому весьма точно и автоматически регулирующие распределение пара.¹ Между котлом или машиной с противодавлением и аккумулятором помещен перепускной клапан, который при превышении известного давления в трубопроводе котла или машины открывается и выпускает излишек пара в аккумулятор. Между аккумулятором и местами потребления пара обычно располагают редукционный клапан, находящийся под действием давления в потребляющем трубопроводе и служащий для того, чтобы потребители получали пар всегда одинакового давления. Ограничительные

¹ Хорошо зарекомендовали себя так называемые клапаны «AVA», изготавливаемые в Швеции акц. об-вом «Ruthsaccumulator» в Стокгольме, а в Германии фирмой «Шуман» в Лейпциге-Плагвице.

клапаны предупреждают также образование в аккумуляторе слишком высокого давления и обеспечивают подвод пара к местам потребления даже в случае полной разгрузки аккумулятора. Далее, в заряжающем и разряжающем трубопроводах должно быть по возвратному клапану, из которых при зарядке и разрядке всегда один бывает открыт, а другой закрыт.

Манометр аккумулятора. Важным вспомогательным прибором аккумулятора является манометр, помещенный в коцегарке и соединенный с аккумулятором. При обслуживании топков коцегар в данном случае должен руководствоваться показаниями не котельного манометра, а манометра аккумулятора. В общем, коцегару и не приходится менять режим топки, так как аккумулятор Рутса сам уравнивает все колебания. Лишь в том случае, если при исключительно

высоком расходе пара аккумулятор оказывается почти совсем разряженным, коцегар немного усиливает топку, а в обратном случае, при полностью заряженном аккумуляторе, он несколько ослабляет огонь.

В предприятиях с чисто силовым потреблением пара, где пар из аккумулятора направляется не к тепловым потребителям, а в так называемые турбины Рутса,¹ редукционного клапана не требуется, так как турбины Рутса конструируются для колеблющегося начального давления.

Способы включения в сеть. В предприятиях с силовым и тепловым потреблением пара следует различать два принципиально различных способа включений: аккумулятор Рутса за участком трубопровода, по которому идет пар с противодавлением или отъемный пар (рис. 145), или же аккумулятор Рутса — параллельный такому же участку трубопровода (рис. 146).

Рис. 145. Аккумулятор Рутса за машиной с противодавлением.

Перепускные клапаны обозначены пунктирной линией со знаком «плюс» в кружке, редукционный клапан — пунктирной линией со знаком «минус» в кружке.

На рис. 145 изображена простая схема включения, часто применяемая на заводах целлюлозы, на текстильных фабриках и в тому подобных предприятиях с приблизительно постоянным расходом энергии. В виду того, что количество расходуемого пара в сетях среднего или низкого давления (а иногда и в обеих сетях) обычно сильно колеблется, при работе без аккумулятора Рутса не представляется возможным производить всю потребную энергию в одной машине с противодавлением. В таких случаях устанавливают машину с отъемом пара, причем ее ступень низкого давления принимает на себя задачу уравнивания расхода, с потерей отходящей теплоты в конденсации. При работе с аккумулятором Рутса последний уравнивает все колебания в обеих сетях и дает возможность вести коцегарку на равномерном режиме. При этом весь произведенный пар до своего использования в качестве нагревательного пара совершает работу в машине с противодавлением. Если завод потребляет много энергии, а котельное давление сравнительно низко, то простой машиной с противодавлением уже не обойтись, и тогда даже при пользовании аккумулятором Рутса приходится устанавливать машину с отъемом пара и с конденсацией.

При схеме включения по рис. 146 пар разделяется. Одна часть проходит с использованием своего давления через машину, другая же часть направляется через перепускной вентиль в аккумулятор, причем соответствующая разность давлений остается неиспользованной. Таким образом, здесь образуется некоторая потеря перепада давления (но не теплоты), величина которой зависит от проходящих при зарядке и разрядке количеств пара.

Включение за машинами с противодавлением применяется, главным образом, при высоких давлениях в котлах и высоком противодавлении. Имеющаяся в распоряжении для аккумуля-

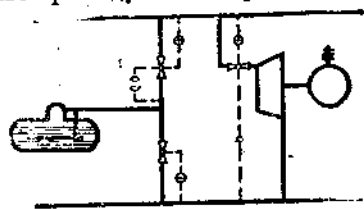


Рис. 146. Аккумулятор Рутса, включенный параллельно с машиной с противодавлением.

Перепускной клапан — «плюс» в кружке; редукционный клапан — «минус» в кружке; ограничительные клапаны — «минус» в кружке.

¹ Подробнее см. Melan, Siemens-Zeitschr., 7, 417, 1927, Mattersdorff, Arch. f. Warmewirtschaft, 8, 375, 1927, и Föhl, Ruthsturbinen, Arch. f. Warmewirtschaft, 9, 248, 1928.

тора разность давлений обычно не особенно велика, вследствие чего аккумулятору приходится придавать сравнительно крупные размеры. Включение параллельно машинам противодействия целесообразно при сравнительно низком давлении в котлах (примерно от 10 до 15 раб. атм.). Благодаря возможности использовать значительную разность давлений при этом способе включения аккумулятору могут быть приданы небольшие размеры, но при этом возникает тот недостаток, что теряется часть пригодного для производства энергии перепада давлений.

На электрических станциях, где аккумуляторы Рутса в последнее время часто применяются для покрытия пиков и для мгновенного резерва, аккумулятор обычно включают параллельно турбинам основной нагрузки. Произведенный в котлах пар при нормальной нагрузке направляется через перепускной вентиль к турбинам основной нагрузки, не нужный же здесь избыток его через второй перепускной вентиль посылается в аккумулятор. При высокой нагрузке вследствие некоторого падения при этом давления в котле перепускной вентиль перед аккумулятором закрывается, и аккумулятор разряжается, питая пиковые турбины (турбины Рутса) аккумулятированным паром, причем отдельные впускные трубы турбин Рутса автоматически открываются по мере падения давления в аккумуляторе.

В последнее время применяют также вертикальные аккумуляторы Рутса, занимающие очень мало места. Интересным примером может служить большая аккумуляторная установка Рутса на силовой станции в Шарлоттенбурге. Эта установка состоит из 16 вертикальных аккумуляторов высотой в 21 м и диаметром в 5 м, которые вместе могут подавать 610 т пара, соответственно производительности в 67 000 квт-ч.

Преимущества и недостатки. Значение аккумулятора Рутса в энергетическом хозяйстве и эксплуатации котлов можно кратко резюмировать следующим образом.

Повышение производительности. В противоположность аккумуляторам постоянного давления, аккумулятор Рутса компенсирует пиковые нагрузки всякого рода. Вследствие этого такие установки могут быть полностью использованы, независимо от производительности котла, а продолжительность разогрева и растопки может быть часто сокращена. От этого производительность, по сравнению с установками без аккумуляторов Рутса, существенно повышается.

Качественное улучшение продукции. Благодаря автоматическому и точному регулированию установки с аккумуляторами Рутса могут давать пар вполне постоянного давления. Для многих отраслей производства это весьма важно, но при работе без аккумуляторов это не достигается полностью, особенно при сильных колебаниях нагрузки. Кроме того в таких установках никогда не может произойти недохватки пара, даже при внезапном одновременном включении многих его потребителей, что в установках без аккумулятора может привести к серьезным нарушениям работы. Наконец, и качество пара остается всегда равномерным, тогда как в установках без аккумуляторов качество пара часто сильно колеблется в зависимости от колебания нагрузки (при высоком расходе пара последний часто бывает очень влажным вследствие вспенивания и выплескивания в котле).

Покрывание пиков на силовых станциях. Вследствие своей мгновенной готовности к работе аккумулятор Рутса весьма пригоден для покрытия пиков на силовых станциях, тем более, что оборудование им обычно обходится дешевле установки особых котлов или применения иных средств для покрытия пиков.

Мгновенный резерв. Аккумулятор Рутса имеет то особое преимущество, что в случае внезапных перебоев может в кратчайший срок (доли секунды) дать любую потребную мощность, тогда как, например, котел для покрытия пиков предварительно требует продолжительного времени на растопку, т. е. не годится в качестве мгновенного резерва. Равным образом, в периоды, когда не топится ни один котел, аккумулятор Рутса в любое время может доставлять пар, что имеет большое значение для предприятий, работающих с перерывами в течение дня и во время этих перерывов потребляющих малое количество пара (например для отопления помещений).

Экономия в поверхности нагрева. Благодаря тому, что котлы при взаимодействии с аккумуляторами Рутса всегда могут работать с одинаково высокой нагрузкой, а также тому, что сам аккумулятор обеспечивает часть всегда необходимого резерва, обычно удается достигать значительной экономии в величине поверхностей нагрева.

Экономия горючего. Вследствие равномерности нагрузки котла упрощается управление топкой, повышается к. п. д. котла и лучше сохраняется материал котла. К этому присоединяется экономия горючего, так как под парами можно держать меньшее число котлов, вследствие чего в предприятиях, работающих с перерывами, отпадает часть потерь, вызываемых охлаждением и растопкой.

Наряду с этими преимуществами, аккумуляторы Рутса имеют и недостатки, а именно сравнительно высокую стоимость и иногда довольно высокий создаваемый в них перепад давления. Поскольку условия в разных предприятиях различны, следует в каждом отдельном случае проверить экономическую целесообразность установки аккумулятора Рутса. В предприятиях, которым приходится считаться с сильными колебаниями потребления пара, обычно применение аккумуляторов Рутса оказывается выгодным.¹

5. Другие паровые и водяные аккумуляторы.

Аккумуляторы тепловой воды. При водяном отоплении применяют так называемые аккумуляторы тепловой воды, т. е. простые водяные резервуары, которые включаются или прямо в водяной цикл или параллельно ему. Их аккумуляционная способность всецело зависит от их вместимости. Непосредственно включенные аккумуляторы удлиняют время растопки и не дают возможности регулирования, т. е. действуют подобно аккумуляции в самом котле. Аккумуляторы же, включенные параллельно, поддаются произвольному регулированию и в любое время могут быть включены и выключены.

Чисто паровые аккумуляторы. Для весьма кратковременных колебаний нагрузки иногда еще применяют чисто паровые аккумуляторы, и притом или аккумуляторы постоянного давления, так называемые аккумуляторы с колоколом, действующие наподобие больших газгольдеров (их объем изменяется в зависимости от наполнения), или же аккумуляторы с перепадом, у которых величина аккумулирующего пространства остается постоянной. Если не прибегать к чрезвычайно большим размерам, то аккумуляционная способность обоих типов крайне мала. Крупными недостатками таких аккумуляторов являются, далее, высокие потери от охлаждения и неизбежность обильного образования конденсата.

Аккумуляторы Рато. Подобно аккумулятору Рутса аккумулятор Рато также представляет собой аккумулятор с перепадом давления. Более старые его конструкции имеют водяное пространство, распределенное на большое число чугунных «тарелок». В более новых конструкциях, например в конструкции, разработанной фирмой «Бальке», пар, как и в аккумуляторах Рутса, вдувается через распределительные трубы в водяное пространство.

Область применения аккумулятора Рато в общем ограничивается весьма кратковременными колебаниями (несколько секунд), так как величина перепада в этом аккумуляторе, а значит, и его аккумуляционная способность весьма малы. Аккумулятор Рато, так же как и аккумулятор Рутса, может принять сколь угодно высокую нагрузку, но лишь на несколько секунд. Поэтому им пользуются, главным образом, для очень сильных, но коротких скачков нагрузки у прокатных станов и рудничных подъемных машин.

Электро-паровые аккумуляторы. Подобно аккумулятору Рутса работают изготавливаемые фирмами «Зульцер», «Эшер-Вис» и другими электро-паровые аккумуляторы, связанные с электро-паровыми котлами и служащие для аккумулярования на гидростанциях избыточной электрической энергии (например, в ночные часы) с целью использования ее затем для отопления и тому подобных целей.² Они представляют собой аккумуляторы с перепадом давления и обычно работают на широком интервале давлений. Аккумуляторы Рутса часто также применяются для указанной цели.

Аккумуляторы растворения. В заключение упомянем еще о так называемых аккумуляторах растворения, основанных на том, что при разбавлении растворов, например едкого натра или едкого кали, освобождается теплота, при выпаривании же необходимо подводить не только теплоту испарения, но и так называемую теплоту разбавления. Пригодных для эксплуатации установок в настоящее время еще указать нельзя, но все же заслуживают внимания и с точки зрения тепловой аккумуляции недавно предложенные Кэнеманом³ трансформаторы давления,

¹ Относительно практических результатов, достигнутых с аккумуляторами Рутса, см., между прочим, R u t h s, Dampfspeicher, VDI-Zeitschr., 66, 509, 537, 597, 1921; R u t h s, Spitzendeckung in Grosskraftwerken, Elektrotechnische Zeitschr., 48, 916, 1927. Особый выпуск «Speicherung» журнала Arch. f. Wärmewirtschaft, 8, 364—389, 1927. Praetorius, Arch. f. Wärmewirtschaft, 10, 111, 1929; Di Wärme, 52, 341, 1929; Elektrizitätswirtschaft, 28, 401 и 432, 1929; S t e n d e r, Siemens-Zeitschr., 7, 278 и 482, 1927; Burghardt, Siemens-Zeitschr., 7, 402, 1927; B e u t h n e r, Elektrizitätswirtschaft, 28, 407, 1929.

² См. W a l d e r, Ausnutzung elektrischer Ueberschussenergie durch Wärmespeicherung. Arch. f. Wärmewirtschaft, 8, 392, 1927.

³ См. M a r x, Mechanical Engineering, 49, 600, 1927; M e r k e l, VDI-Zeitschr., 72, 109, 1928; H a u s e n, Die Wärme, 51, 436, 1928, S t e n h a g e n, Teknisk Tidskrift, 59, 293, 311 и 318.

предназначенные главным образом для использования мятого пара, а также для повышения термического к. п. д. паровых машин.

6. Аккумуляция теплоты во время рабочих перерывов.

Эта специальная область аккумуляции имеет особое значение для всех предприятий, работающих с перерывами. Мы уже пояснили, почему в современном котлостроении стремятся к сильному сокращению аккумуляционной способности котла, поскольку она зависит от водосодержания и объема кладки. С другой стороны, однако, стремятся и к возможно полному сохранению во время рабочих перерывов накопленной за время работы теплоты, с целью устранения больших потерь ее, сокращения времени растопки и повышения быстроты подготовки котла к работе и, наконец, для того, чтобы не подвергать материалы котла и кладку частым и вредным температурным колебаниям.

Изоляционные материалы. Средством аккумуляции могут служить изолирующие материалы, препятствующие внешнему охлаждению. Обмуровка, барабаны котла, водяные камеры, камеры перегревателя и трубопроводы подлежат тщательной изоляции. Изолирующие материалы, применяемые для этой цели, должны удовлетворять ряду требований: они должны обладать малым коэффициентом теплопроводности (не выше, примерно, 0,06 или 0,08 кал/м ч.°C), малым объемным весом (примерно, от 200 до 600 кг/м³) и малой теплоемкостью, для того чтобы в них самих не происходило слишком большого накопления теплоты. Далее, они должны быть стойкими при тех температурах, действию которых они постоянно подвергаются (пробка, например, несмотря на свои хорошие изоляционные свойства, не годится для температур выше 100°, и ею можно пользоваться при высоких температурах лишь при условии устройства промежуточной изоляции, отделяющей ее от горячих стенок), и не должны терять от времени своей изолирующей способности и стойкости.

Необходима также, особенно при наружной изоляции, и некоторая механическая прочность.

Толщина изоляции определяется экономическими соображениями. Наиболее экономичной будет такая толщина изоляции, при которой получается наибольшая экономия, с учетом процентов на капитал и амортизации. В зависимости от цены и теплопроводности, от удельного веса и теплоемкости, от стойкости материалов, от температуры изолируемого тела и окружающего воздуха и, наконец, от продолжительности рабочего времени применяется совершенно разная толщина изоляции. Соответствующие, часто весьма сложные расчеты целесообразно поручать специалистам.¹

Тяговой шибер Штобера. Весьма действительным средством для уменьшения потерь от внутреннего остывания является тяговой шибер конструкции Штобера, изготавливаемый заводом «Union». Рис. 147 изображает способ его действия. Внутренность котла *a*, как обычно, соединена бором *b* с дымовой трубой *c*. Во время рабочих перерывов нормальная заслонка *d*

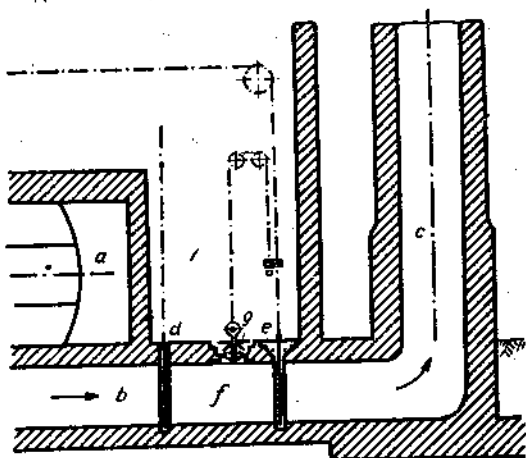


Рис. 147. Тяговой шибер конструкции Штобера.

a — котел; *b* — бор; *c* — дымовая труба; *d* — тяговая заслонка; *e* — предохранительная заслонка; *f* — воздушный клапан.

¹ В последнее время в литературе появились указания на простые способы аналитического расчета и графические методы, доступные без затраты большого труда и хозяйственным. См. между прочим публикации института «Forschungsheim für Wärmeschutz» в Мюнхене, далее Deutsche Priiform-Werke, Wärme- und Kälteschutz in Wissenschaft und Praxis, Кельн, 1928; Cammerer, Der Wärme- und Kälteschutz in der Industrie, изд. J. Springer, Берлин 1928; Borschke, Berechnung der wirtschaftlichsten Isolierdicken, Arch. f. Wärmewirtschaft, 9, 117, 1928; Praetorius, Die Strahlungs- und Leitungsverluste in der Anheiz- und Abkühlzeit, Die Wärme, 52, 405, 427, 1929. Недавно Союз германских инженеров назначил комиссию, издавшую «Правила испытания устройств для защиты от тепла и холода» (вышла в свет в издании VDI). См. также Arch. f. Wärmewirtschaft, 10, 279, 1929.

и предохранительная заслонка e отделяют от остального борова особую плюзовую камеру, посредством вентилей f сообщаящуюся с наружным воздухом. Воздушный вентиль посредством ролика и каната связан с предохранительной заслонкой и открывается автоматически, когда заслонка закрывается. Во время же работы котла, когда заслонка обычно выдвинута из борова, воздушный вентиль закрыт. Благодаря такому устройству предупреждается засасывание воздуха сквозь внутренность котла даже в том случае, когда заслонка, как это обычно бывает, имеет неплотности. Предохранительная заслонка отливается из особого чугуна с низким коэффициентом расширения и вставляется между направляющими с весьма малым зазором. По данным опыта эта заслонка отлично держит плотность. Но даже если бы по какой-нибудь причине появилась небольшая неплотность, внутренность котла все-таки остается отделенной от дымовой трубы, и воздух через вентиль f проникает в плюзовую камеру, а оттуда в дымовую трубу.

Данные опыта с тяговым шиббером Штобера вполне благоприятны. Весьма значительная экономия горючего в течение нескольких месяцев окупает сравнительно небольшие капитальные затраты. Помимо этого можно указать на ряд других эксплуатационных преимуществ: сокращение времени растопки, увеличение долговечности обмуровки, уменьшение изнашивания материала котла (экономия на заработной плате), ускорение подготовки котла к действию, равномерность температуры перегревателя сейчас же после начала работы и т. д.¹

V. АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ.

1. Общие сведения.

Потери от колебаний нагрузки. При колебаниях нагрузки кочегар должен все время регулировать ход котельных топок. При высокой нагрузке приходится открывать шире тяговую заслонку, повышать скорость колосниковой решетки, а иногда и изменять толщину слоя горючего на ней. В топках для угольной пыли необходимо приспосабливать подачу пыли и воздуха к расходу пара в данный момент времени. Если кочегар вынужден часто вмешиваться, таким образом, в ход топки, то даже при тщательном обслуживании неизбежны потери и задержки в выработке пара. Невнимательность кочегара может даже привести к серьезным нарушениям эксплуатации.

Лучшим и самым надежным средством для устранения таких затруднений, потерь и повреждений является включение аккумулятора между котельным помещением и местами потребления, благодаря чему котел получает возможность работать всегда с вполне равномерной нагрузкой, а следовательно и без изменений в ходе топки. Однако в некоторых случаях и при таких условиях могут явиться затруднения, связанные с работой топки, а именно при весьма изменчивом качестве горючего, например при буром угле.

Преимущества автоматического регулирования горения. В таких случаях, а также тогда, когда установка аккумулятора по каким-либо причинам не целесообразна, и, наконец, при крупных котельных единицах уменьшение тепловых потерь, а также повышение быстроты подготовки котла к работе и упрощение обслуживания могут быть достигнуты посредством автоматического регулирования горения. Этот метод, впервые испытанный в Америке, теперь уже неоднократно применялся и в Германии. Кочегары почти освобождаются от физического труда, причем на них остается лишь задача проверять регулирующие органы и наблюдать за ними. Таким образом, в большинстве случаев удастся достигнуть существенной экономии на оплате персонала, так как даже при крупных котлах один кочегар может обслуживать несколько единиц. Наконец, при автоматическом регулировании горения парообразование может мгновенно приспособляться к расходу пара, что при ручном регулировании обычно невозможно.

Механически движущаяся колосниковая решетка с регулировочными электромоторами и топка для пылевидного угля с управлением на расстоянии были предтечами этого прогресса, направленного к полной механизации производства пара, к созданию *котельной машины*, в которой, как в двигателе внутреннего сгорания, все процессы были бы органически связаны между собой и происходили вполне автоматически. Автоматическое регулирование горения представляет собой дальнейший шаг в этом направлении. Поэтому оно уже теперь заслужи-

¹ См. также Niederstrasser, Arch. f. Wärmewirtschaft, 8, 285, 1927; Praetorius, Die Wärme, 50, 127, 1927, Melland Textilberichte, 9, 265, 1928, и Der Werksleiter, 3, 6, 1929; Burdorf, Elektrizitätswirtschaft, 27, 505, 1928 и Arch. f. Wärmewirtschaft, 8, 349, 1928.

васт серьезного внимания, хотя покамест область его применения ограничена, и для средних и мелких предприятий оно пока еще мало применимо.

Ниже кратко описаны две американские и три европейские из числа наиболее известных систем. ¹

2. Регулирование системы Бэйли. ²

При этой широко распространенной в Америке системе, регулирования колебания давления в паровой магистрали, т. е. небольшие нарастания и убывания давления в течение кратких интервалов времени, служат мерой для отношения расхода пара к его выработке. В виду того, что всякое повышение расхода при равном производстве пара (или всякое понижение производства пара при равном его расходе) влечет за собой падение давления в паровой магистрали (равно как и обратно: уменьшение расхода пара и повышение его производства приводят к повышению давления) и так как, далее, величина этого нарастания или убывания пропорциональна увеличению или уменьшению производства или расхода пара, эти колебания давления действительно являются безупречным мерилом расхождения между производством и потреблением.

Дифференциальное давление передается на электрический механизм, регулирующий приводные моторы насосов для угольной пыли и одновременно переставляющий соответствующим образом дымовую заслонку. Кроме того положение дымовой заслонки корректируется объединенным воздухо-паромером.

Эта система пока разработана только применительно к тошкам для пылевидного угля. Регулирующее устройство стоит чрезвычайно дорого, так как, кроме упомянутого главного регулятора и корректирующего механизма, необходимы еще всякие другие устройства, например для уменьшения избытка воздуха при очень малой нагрузке, а также для того, чтобы при нормальной нагрузке устранять недостаток воздуха, проявляющийся вначале при одновременном регулировании поступления воздуха и горючего. Кроме того для уравнивания постепенно создающихся изменений необходима бывает и перестановка механизма вручную.

3. Регулирование системы Смута. ³

В появившейся также в Америке системе регулирования Смута (Smoot) все органы, изменяющие приток воздуха и горючего, находятся под действием главного регулятора нагрузки. Здесь мерилом для регулирования служит давление в магистральной паровой трубе. Последнее оказывает воздействие на трубопровод сжатого воздуха, связанный с главным регулятором и управляющий им. Для предупреждения возникающего вначале при одновременном регулировании воздуха и горючего недостатка или избытка воздуха применяют так называемые обратные передачи, т. е. устройства, которые действие регулировки обращают обратно на регулятор, вследствие чего последний своевременно задерживается (тормозится) в своем действии. Для торможения служат масляные катаракты. Для измерения давления — диафрагмы.

И эта система, хотя она проще и дешевле регулятора Бэйли, все-таки еще слишком дорога, чтобы оказаться экономичной для мелких установок.

4. Регулирование системы Роуэка. ⁴

Регулирующее устройство Роуэка состоит из двух совершенно независимых одна от другой частей. С одной стороны, тяга при меняющихся нагрузках поддерживается постоянным действием давления в магистральной паровой трубе. С другой стороны, воздухо-паромер регулирует поступление угля, т. е. скорость колосниковой решетки, причем воздухомер проявляет свое действие раньше, чем более инертный паромер, вследствие корректирующей установки. Здесь также для торможения регулятора и для замены регуляторных пружин применены масляные катаракты.

Регулирование системы Роуэка, в противоположность рассмотренным выше системам, пригодно и для колосниковых топок. Оно хорошо оправдалось, между прочим, на имеющей много котлов электрической станции города Праги. Однако стоимость и этого регулятора только немногим меньше регулятора Смута.

¹ См. по этому вопросу Treitel, Arch. f. Wärmewirtschaft, 9, 249, 1928.

² Более подробные сведения об этой системе см. Schulz, VDI-Zeitschr., 70, 720, 1926, и Die Wärme, 50, 28, 1927.

³ См. Schulz, VDI-Zeitschr., 70, 857, 1927.

⁴ См. Stein, Regelung und Ausgleich in Dampfanlagen, изд. J. Springer, Берлин, 1926.

5. Регулирование системы AEG-Аскания.

Эта система возникла на основе параллельных работ АЕГ и заводов «Аскания». Она получила уже широкое распространение, в частности и на малых установках.¹

Система АЕГ-Аскания характеризуется последовательным включением регулирования угля и воздуха. Сперва устанавливается скорость органов подачи угольной пыли и лишь в зависимости от нее — приток воздуха. Регулирующее устройство состоит, соответственно этому, из двух частей: из регулятора подачи угольной пыли и из регулятора избытка воздуха. Если регулирование подачи угольной пыли производится вручную, то регулятор воздуха может быть устроен как самостоятельный регулятор. Такой регулятор избытка воздуха изображен на рис. 148. Для правильного соотношения воздуха происходит дополнительное регулирование, в зависимости от содержания в дымовых газах CO_2 .

Давление в паровой магистрали передается через диафрагму-пароструйному регулятору особого устройства, который работает напорным маслом и действует или непосредственно

на прибор, подающий угольную пыль, или же, в случае очень крупных размеров, посредством распределительного золотника для масла. Расход угля измеряется по нагнетательному давлению, развиваемому особым мерительным вентилятором, и это же давление регулирует, путем перестановки дымовой заслонки, подвод воздуха. Регулирование избытка воздуха осуществляется автоматически, посредством газоанализатора «Ранарекс», также связанного с пароструйным прибором. Это регулирующее устройство крайне чувствительно и отзывается уже на изменения содержания CO_2 в 0,1%. Впрочем, для этой цели пригодны только очень быстродействующие газоанализаторы, дающие достаточной силы механический импульс для перестановок (все аппараты, осно-

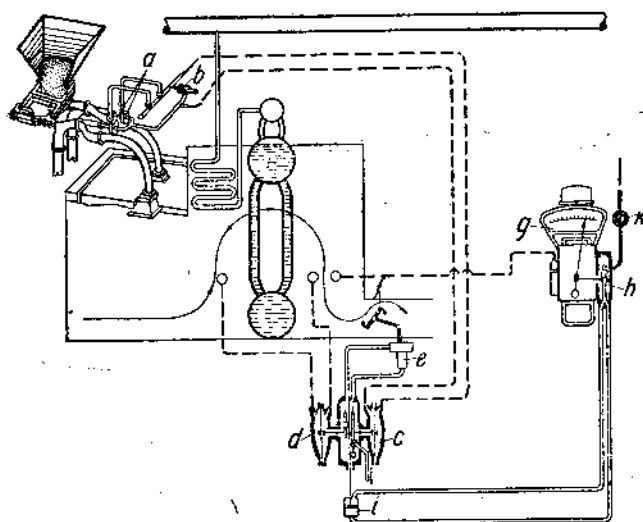


Рис. 148. Регулятор избытка воздуха АЕГ-Аскания.

a — прибор для определения числа оборотов распределителя угольной пыли; b — переставная диафрагма; c — мембранный регулятор расхода угля; d — мембранный регулятор расхода воздуха; e — рабочий цилиндр; f — дымовая заслонка; g — газоанализатор «Ранарекс»; h — жектор; i — цилиндр и перестановочное устройство; k — прерыватель тока масла.

ванные на химическом анализе газов, здесь, конечно, отпадают). Способ АЕГ-Аскания хорошо оправдался во многих установках. Подробные испытания показали в некоторых случаях удивительно высокие степени полезного действия при сильно колебавшейся нагрузке.² Равным образом, и капитальные затраты хотя и не малы, все же значительно ниже стоимости других описанных выше аппаратов, благодаря чему регуляторы АЕГ-Аскания иногда могут оказаться экономичными и для сравнительно мелких котельных установок.

6. Регулирование системы Сименс.

Способ, недавно разработанный фирмой Сименс и Гальске, основан на остроумном применении известного мостика Уитстона. Объяснение довольно сложной схемы электрического

¹ Подробное изложение теоретических работ, приведших в результате к конструкции регулятора АЕГ-Аскания, содержит прекрасная книга: Stein, Regelung und Ausgleich in Dampfanlagen, изд. J. Springer, Берлин, 1926. Ее можно рекомендовать всем желающим подробнее заняться вопросами регулирования, так как она не только дает обзор всей этой области и хорошее изложение уже достигнутого, но и намечает веки для будущего развития. Штейн дал впоследствии еще сводку своих последних работ (см. VDI-Zeitschr., 72, 165, 209, 1927).

² См., между прочим, Die Wärme, 49, 863, 1926, Arch. f. Wärmewirtschaft, 8, 251, 1927; Burdorf, Arch. f. Wärmewirtschaft, 8, 399, 1927.

включения завело бы нас слишком далеко.¹ Упомянем лишь, что одно из изменяемых сопротивлений мостика Уитстона делают зависимым от нагрузки котла (посредством регулятора давления пара), а включаемое за ним сопротивление приводят в зависимость от количества горючего и воздуха. Если обеспечить постоянное сохранение равновесия мостика, то каждой нагрузке будет соответствовать вполне определенное количество горючего или воздуха. Мостик поддерживается в равновесии посредством расположенного на его диагонали реле.

Устройство мостика дает возможность в крупных установках посредством включения переменных сопротивлений достигать любого распределения нагрузки между котлами, а также легкого и простого приспособления к меняющемуся качеству горючего.

Регулятор Сименса состоит из следующих главных частей:

1. Главный регулятор — весьма чувствительный, отыскивающийся на малейшие колебания давления поршневой манометр.

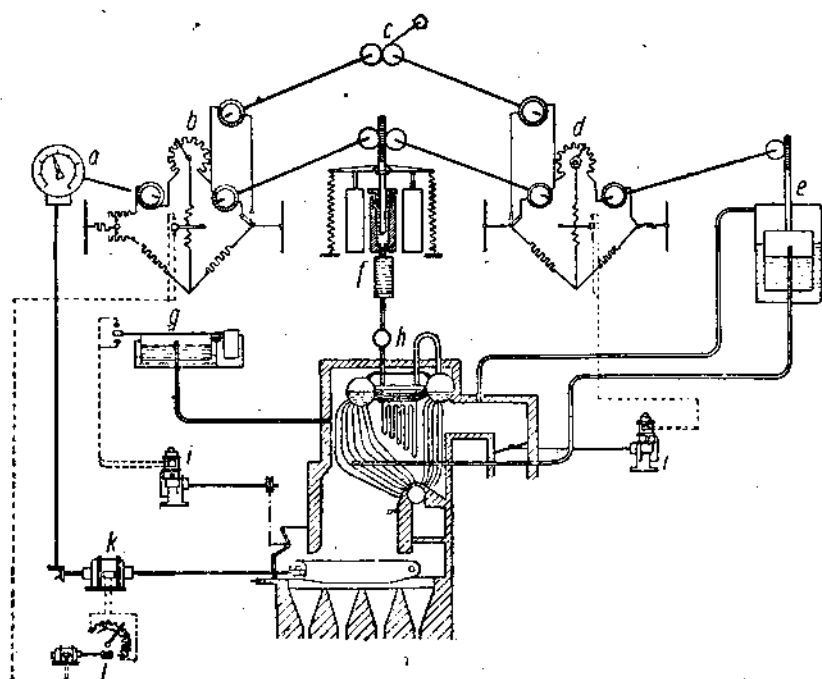


Рис. 149. Схема автоматического регулятора Сименса для котла с цепной топкой.

a — тахометр; b — мостик для горючего; c — твердая установка нагрузки от руки; d — мостик для воздуха; e — дифференциальный тягомер; f — главный регулятор; g — регулятор разрежения; h — паровая магистраль; i — перестановочный механизм; k — привод цепной топки; l — перестановочный мотор.

2. Мостовое реле — прибор с вращающимися катушками, через который проходит измеряемый ток.

3. Тахометр, связанный с приводом колосниковой решетки или, в топках для пылевидного угля, с прибором, подающим горючее в топку, и служащий обратным приводом для расхода горючего.

4. Дифференциальный измеритель тяги для обратного отвода регулировки расхода воздуха.

5. Моторный привод для управления дымовыми заслонками.

6. Присоединяемый к газоанализатору Сименса регулятор, служащий для регулирования содержания CO_2 (только в топках для угольной пыли и в газовых топках).

7. Регулятор разрежения, обеспечивающий постоянное давление в топочном пространстве.

На рис. 149 изображена схема регулировки Сименса для котла, снабженного топкой с движущимися колосниками. Присоединяемый к паровой магистрали h главный регулятор f приводит в движение две кольцевые трубки: одну — b, входящую в состав мостика для горючего,

¹ Подробное описание этого способа содержит статья Möller'a, Siemens-Zeitschr., 9, 408, 1929. В более поздней статье Мёллер касается области применения этого регулятора и первых опытов его практического использования (см. Siemens-Zeitschr., 9, 457, 1929).

и другую d , входящую в состав мостика для воздуха.¹ Вследствие этого одна из ветвей каждого мостика ставится в зависимость от нагрузки. Реле мостика для горючего изменяет ход маленького перестановочного мотора l , посредством которого изменяется скорость движения колосниковой решетки. С приводным валом k решетки связан тахометр a , который вызывает изменения второй кольцевой трубки мостика для воздуха, потребного для горения. Таким образом достигается обратный отвод регулировки горючего. Толщина слоя угля на решетке устанавливается вручную, в зависимости от свойств горючего.

Реле мостика для воздуха переставляет привод воздушной заслонки. Обратный отвод достигается здесь посредством кольцевой трубки, находящейся под воздействием дифференциального тигмера. Разность давлений, как это видно из рис. 149, берется за первым рядом труб x у конца котла.

Вместо устанавливаемых от главного регулятора кольцевых трубок, можно при работе на постоянно установленной нагрузке с включать и другие кольцевые трубки. Кроме того в мостиках для горючего и для воздуха предусмотрены сопротивления для изменения нагрузки.

Регулятор разрежения g управляет вторым механизмом i , который устанавливает заслонку для впуска воздуха таким образом, чтобы в верхней части топочного пространства поддерживалось постоянное разрежение. Эта часть регулировки не зависит от главного регулятора, а следовательно, и от нагрузки.

Совершенно аналогичным образом действует регулятор Сименса при топках для пылевидного угля и для газа. Однако в этих топках, кроме ручной перестановки для изменения пропорции между горючим и воздухом, предусмотрена и автоматическая регулировка этого соотношения, действующая от газонализатора.²

Регулятор Сименса испытывался в течение продолжительного времени на разных силовых станциях и оказался вполне пригодным как при топках для пылевидного угля, так и при топках с движущимися колосниками. Он сравнительно прост по конструкции и дешевле описанных выше американских автоматических регуляторов горения.

VI. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ В КОТЕЛЬНОЙ.³

1. Основные требования.

В противоположность всем рассмотренным выше вспомогательным устройствам, измерительные приборы лишь косвенно влияют на эксплуатационную безопасность и экономичность котельной установки. Другими словами, они только дают указания, но сами не могут влиять на происходящие явления в благоприятном или неблагоприятном смысле. Поэтому приобретение измерительных приборов только тогда приносит пользу, когда их показания не только точны и верны, но и могут быть отчетливо прочтены. Кроме того обслуживающий персонал должен быть хорошо осведомлен о значении этих показаний, он должен постоянно наблюдать за приборами, а руководители эксплуатацией в свою очередь должны постоянно контролировать и утилизировать результаты измерений.

Эти важнейшие требования на практике чрезвычайно часто нарушаются. Я приведу лишь следующие случаи несообразной измерительной техники, которые я сам наблюдал на многих предприятиях.

Неправильная измерительная техника. 1. Места, где помещены измерительные приборы, расположены неудачно, вследствие чего приборы малодоступны для персонала. В результате за такими приборами обычно плохо смотрят и за их показаниями не следят.

2. Измерительные приборы помещены в местах, где всегда грязно. Вследствие этого сами приборы вскоре перестают показывать точно и портятся, а с другой стороны их показания с трудом удается прочесть.

¹ Очень простую форму электрических сопротивлений, хорошо приспособленную для переключения на расстояние, см. Siemens-Zeitschr., 8, 716, 1928.

² Для топок с колосниковыми решетками это не целесообразно, так как ход горения зависит не только от подачи колосниковой решетки, но и от работы кочегара.

³ В этом разделе будет дан лишь обзор важнейших видов и особенностей измерительных приборов. В виду недостатка места от изображений и более детального разбора конструкций пришлось отнестись. Желающих получить более подробные сведения можно отсылать к прекрасной книге Gramberg'a, Maschinentechnisches Versuchswesen, изд. J. Springer (русский перевод: А. Грамберг, Технические измерения при испытании машин и контроле их в производстве, Москва, 1927. См. также книгу: инж. В. Л. Темкин, Контроль работы котельных установок, Москва, 1931. Прим. ред.).

3. Измерительные приборы недостаточно проверяют, чистят и оберегают. Следствием этого являются неправильные показания и в конце концов — отказ аппаратов от действия. Особенно часто можно наблюдать такие беспорядки в мелких предприятиях, устанавливающих сложные измерительные приборы и не располагающих достаточно сведущим персоналом для работы с ними.

4. Измерительные приборы устанавливаются неправильно и показывают совсем неверно. Особенно часто это случается с термометрами для измерения температуры дымовых газов и перегретого пара, причем ошибки в показаниях достигают 100° и больше.

5. Часто можно встретить, даже в мелких предприятиях, большое количество измерительных приборов, предъявляющих к персоналу слишком большие требования. В результате, показания этих приборов не наблюдаются и не используются, а сами приборы остаются без ухода. *Излишние приборы бесполезны* и часто приносят такой же вред, как и отсутствие важных приборов, не говоря уже о том, что их высокая стоимость ни в какой мере не оправдывается достигаемой экономией или преимуществами.

Общие указания. Эти примеры неправильного применения измерительной техники показывают, что недостаточно купить и установить хорошие, испытанные на практике и точные измерительные приборы. Необходимо основательно взвесить, есть ли подходящие места для установки этих приборов, откуда они были бы хорошо видны обслуживающему персоналу и где они были бы хорошо защищены от загрязнения. При установке приборов надлежит следить за тем, чтобы они показывали правильно (в большинстве ошибок виноваты не сами приборы, а их неправильная установка). Кроме того еще до приобретения приборов следует взвесить, располагает ли предприятие достаточно знающими людьми, которые могли бы взять на себя уход за приборами, их проверку и использование результатов измерения.

2. Цель измерений.

Следует различать измерения, необходимые для *бесперебойности работы*, измерения, способствующие *экономичности* эксплуатации котлов, и измерения, потребные для ведения *точной эксплуатационной статистики*. К первой группе (бесперебойность) принадлежит, например, измерение давления в котле посредством манометра, ко второй (экономичность) — анализ дымовых газов, измерение термометрами температуры дымовых газов и питательной воды и т. д., к третьей (статистика) — измерение количества сожженного угля, израсходованной питательной воды и т. д.

Служебные измерительные приборы. Измерительные приборы можно также различать по цели их применения. Измерительными приборами пользуются как вспомогательным средством для обслуживания котельной, и тогда приборы должны показывать состояние того или иного измеряемого фактора в каждый данный момент. Для такой цели достаточно удовлетворительны простые указательные приборы. Они должны быть установлены таким образом, чтобы обслуживающий персонал в любое время мог видеть их показания. Так, например, котельные манометры, а по возможности также парометры, газоанализаторы и т. д., должны быть видны непосредственно с места котельной. Важное требование, предъявляемое к этим приборам, заключается в том, чтобы они давали показания без запоздания, т. е. показания, всегда относящиеся действительно к моменту отсчета.

Измерительные приборы для надзора и эксплуатационной статистики. Другая группа измерительных приборов предназначена для управления предприятием, т. е. отчасти для надзора за работой, а отчасти для статистических целей. Такие приборы следует помещать, по возможности, не в самом котельном помещении, а в конторе технического руководителя или, если этих приборов очень много, в особой центральной аппаратной камере, с тем чтобы заведующий инженер мог с одного места контролировать всю работу котельной. Для этой цели обычно недостаточно простых указательных приборов. При наблюдениях этого рода пользуются самопишущими приборами, чтобы можно было иметь показания, относящиеся не только к данному моменту, но и к целому периоду рабочего времени, а также проверять прежние показания. Для статистики бывают кроме того полезны особые механические счетчики, облегчающие учет расхода угля, воды, пара и т. д. В отношении всех этих измерительных приборов, служащих для надзора и особенно для статистики, небольшое отставание показаний не имеет существенного значения.

Измерительные приборы для испытаний. Третья группа измерительных приборов служит для временных измерений, производимых только при испытаниях. Для этой цели необходимо применять аппараты без запаздывания показаний, допускающие быструю и легкую установку

на место. При установке этих приборов необходимо весьма внимательно следить за тем, чтобы приборы показывали без больших ошибок, которые могут значительно исказить результаты опытов и дать совершенно ложное представление об экономичности установки. Так, например, необходимо, чтобы термометры доходили до оси потока газов или жидкости и чтобы в месте установки не происходило теплоотдачи наружу, вредно отражающейся на точности показаний термометров. Место отъема дымовых газов для газоанализатора должно быть выбрано так, чтобы получились возможно близкие к средним значения состава газов (отъем должен производиться приблизительно посередине потока дымовых газов).¹ Необходимо иметь большой опыт в измерительном деле, чтобы при помощи установленных собственными средствами измерительных приборов получать безупречные результаты. Руководителям эксплуатации, не располагающим таким опытом, можно поэтому рекомендовать к точным испытаниям всегда привлекать специалистов.

3. Приборы для измерения давлений.

Манометры. Манометр представляет собой измерительный и указательный прибор, обязательный, согласно официальным постановлениям, при всяком котле. Помимо этого, целесообразно еще измерять давление в паропроводах, а также в разных точках пути дымовых газов определять так называемую силу тяги. В виду того, что при измерениях давления пара почти всегда приходится иметь дело с высокими рабочими давлениями, при измерениях же силы тяги, напротив, с очень малыми давлениями (разрежениями) или разностями давлений, для манометров принимают за единицу атмосферу ($1 \text{ атм.} \approx 1 \text{ кг/см}^2 = 10\,000 \text{ мм вод. ст.}$), тогда как для тягомеров, а часто и для вакуумметров² единицей служит $1 \text{ мм вод. ст.} = 1 \text{ кг/м}^2$. При измерении давлений всегда нужно помнить о том, что манометры и тягомеры показывают только *избыток давления или недостаток давления* по сравнению с атмосферным, но не абсолютное давление. Если, например, котельный манометр показывает 10 атм. и мы хотим определить теплосодержание пара, то в таблицах пара следует смотреть под 11 атм. абс., что соответствует 10 атм. изб.

В трубопроводе, непосредственно за перегревателем, также целесообразно установить манометр, чтобы, сравнивая его показания с показаниями котельного манометра, наблюдать за падением давления в перегревателе. Если давление в котле не должно переходить определенных максимальных и минимальных пределов, то рекомендуется для надзора за обслуживанием котла установить самопишущий манометр. Для того, чтобы в любое время можно было проверить показания манометров, каждый из них должен быть снабжен контрольным фланцем для присоединения выверенного контрольного манометра, необходимого в каждом предприятии.

Тягомеры. Тягомеры служат для облегчения и улучшения наблюдения за процессом горения. Каждой нагрузке котла, каждой толщине слоя угля соответствует определенное разрежение или положительное давление в разных частях топки и дымоходов. Эти значения зависят от конструкции топки и от того, работает ли она только на естественной тяге или же и на нижнем дутье, но для одной и той же топки они могут служить мерилем для хода горения. Для каждой топки можно опытами определить наиболее выгодную силу тяги при разных нагрузках, а затем регулировать ход котла на основании показаний тягомера.

Сила тяги, по крайней мере при одной естественной тяге, в известной степени зависит от атмосферных условий. Поэтому более целесообразно пользоваться так называемыми *дифференциальными тягомерами*, которые показывают не абсолютное разрежение в какой-нибудь части топочной камеры или дымохода, боровы и т. д., а разность разрежений в двух точках, например между измерительным пунктом над колосниковой решеткой и другим пунктом, позади дымовой заслонки. Эта разность (перепад) давлений представляет собой вполне надежную меру для количества дымовых газов, а вместе с тем (для данной топки и при постоянных свойствах угля) и для избытка воздуха и успешности процесса горения.

В общем, для каждого котла достаточно иметь один дифференциальный тягомер и два измерительных пункта. При точных испытаниях иногда измеряют также разрежение в отдельных дымоходах. Для этого можно пользоваться и *самодельными тягомерами*, представляющими

¹ Интересные опыты по поводу искажения результатов испытаний благодаря газоанализаторам были произведены недавно в Америке, см. P o w e r, 64, 775, 1926, и E g g e n, Arch. f. Wärmewirtschaft, 8, 192, 1927.

² При употреблении вакуумметров часто ведут расчет также в процентах вакуума или в миллиметрах ртутного столба.

собой обыкновенные U-образные стеклянные трубки, наполненные водой и снабженные миллиметровой шкалой. Один конец трубки посредством резинового рукава и металлической трубки сообщают с точкой, где должно быть измерено давление, другой конец сообщен с атмосферным воздухом.

Для особых целей можно пользоваться еще *сборными тягомерами* и сборными дифференциальными тягомерами. Они имеют или несколько измерительных пунктов и один указательный аппарат, по мере надобности переключаемый на тот или иной измерительный пункт, или же несколько указательных аппаратов, что дает возможность непрерывно сравнивать показания по разным пунктам. Иногда целесообразно также применение самопишущих аппаратов.

Покупные тягомеры показывают или непосредственно, с помощью столбика жидкости, как и самодельные приборы, или же имеют стрелки, подобные манометрам.

Тягомеры, применяемые в качестве измерительных приборов для обслуживания котлов, целесообразно помещать на щите перед местом кочегара, рядом с котельным манометром и указательными аппаратами газоанализаторов, чтобы кочегар постоянно имел их перед глазами. Самопишущие манометры и тягомеры, служащие для надзора за эксплуатацией, следует устанавливать в особой центральной камере или в бюро, причем передача показаний на расстояние достигается электрическим путем.

4. Приборы для измерения температуры.

Наблюдение за всевозможными температурами — воды, пара, воздуха и дымовых газов принадлежит к важнейшим задачам руководства эксплуатацией. Для обслуживания котлов эти температуры также имеют иногда большое значение, в особенности температура дымовых газов за котлом, за экономайзером или за подогревателем воздуха, так как эти температуры, наряду с силой тяги и химическим составом дымовых газов, могут служить масштабом для суждения о ходе горения и о теплопередаче.

В каждой более или менее крупной установке подлежат измерению и частому наблюдению по крайней мере следующие температуры: температура дымовых газов за дымовой заслонкой, впереди или позади экономайзера или подогревателя воздуха, а также у основания дымовой трубы, далее, температура воды впереди и позади экономайзера, температура воздуха впереди и позади подогревателя воздуха и, наконец, температура перегретого пара. Целесообразнее всего регистрировать эти температуры посредством самопишущих термометров. Для более точных исследований иногда приходится измерять еще температуру в топочной камере, температуру дымовых газов, а иногда и температуру воды в разных местах (температуру свежей воды, конденсата, питательной воды впереди и позади водоочистительного аппарата и т. д.).

Ртутные термометры. Для измерения температуры воды и пара служат обыкновенные ртутные термометры, для измерения температуры дымовых газов применяют также графитовые, металлические и ртутные термометры с газом (нейтральным азотом, уголекислотой) под давлением, которые все основаны на расширении соответствующего вещества (ртути, графита, металла) от нагревания. Высший предел температур для термометров этого рода лежит приблизительно при 400° или 500°. Эти инструменты дешевы, их легко установить в любом месте, а затем снова убрать, и при тщательной монтажке они довольно надежны в своих показаниях. Однако, поскольку отсчет в измерительных пунктах обычно неудобен, а передавать показания этих приборов на расстояние невозможно, поскольку, далее, все стеклянные термометры чувствительны и при длительном употреблении легко повреждаются, поскольку, наконец, почти всегда при отсчетах необходима зависящая от температуры поправка на выходящий из трубки столбик жидкости, затрудняющая использование показаний, — такие приборы, в сущности, годятся только для кратковременных измерений, т. е. главным образом для испытаний.

Электрические термометры. Если же необходимо постоянное наблюдение температур, то можно рекомендовать установку электрических термометров (термоэлементов или термометров сопротивления), показания которых могут быть сделаны видимыми с любого расстояния от измерительного пункта, например с места кочегара, в кабинете управляющего, в особых аппаратных камерах и т. п. Эти приборы также могут быть снабжены самопишущими механизмами, благодаря которым управление эксплуатацией в течение всего рабочего времени может контролировать ход изменений температур. Хорошо оправдались в многочисленных предприятиях многокрасочные самопишущие термометры, снабженные автоматическим переключателем. Указательный аппарат и пишущий штифт таких термометров через регулярные короткие периоды времени поочередно соединяются при помощи электрического механизма с любым числом приключенных измерительных пунктов. Штифт чертит при этом на медленно движущейся

диаграмме особой для каждого измерительного пункта краской множество тесно нанизанных точек, вследствие чего на общей диаграмме ясно можно видеть ход температур во всех приложенных измерительных пунктах.

Электрические термометры сопротивления основаны на том, что электрическое сопротивление большинства металлов с температурой возрастает. Они отличаются чрезвычайной точностью и применимы приблизительно до 600° .

Термоэлектрические термометры, в противоположность только что рассмотренным, пригодны и для очень высоких температур (примерно до 1600°). При измерении температур выше 1000° для термоэлементов необходимо пользоваться платиной и сплавом платины с родием, тогда как примерно до 800° можно применять железо и константан, а до 1000° — никель и хромо-никель. Таким образом при помощи термоэлементов можно измерять температуру в самых горячих дымоходах, а иногда даже в самой тонке. Эти приборы удобно переносить и их легче устанавливать, чем термометры сопротивления. Поэтому их можно применять и для кратковременных измерений. Кроме того с их помощью можно измерять температуру на малых, тесно ограниченных участках. Однако их точность не столь высока, как термометров сопротивления.

Оптические термометры. Для измерения очень высоких температур часто применяют также оптические термометры, или так называемые пиromетры излучения, очень удобные для кратковременных измерений, так как их легко переносить и они не требуют особых приспособлений. Различают *пиromетры с нитью накаливания*, у которых измеряющий элемент визируется зрительной трубкой. Последнюю, с помощью установочного винта, наводят таким образом, чтобы находящаяся в поле зрения нить накаливания приобретала такую же яркость, как раскаленный элемент, вследствие чего нить перестает быть видимой. Установив так зрительную трубу, можно непосредственно прочесть температуру на указательном аппарате. В приборах другой конструкции, так называемых *ардометрах*, температура может быть отсчитана немедленно после наводки трубы на измерительный пункт. Этот прибор может быть также снабжен самопишущим аппаратом.

Вообще говоря, измерение температуры в топочном пространстве бывает необходимо только при точных испытаниях топок, тем более, что эту температуру можно сравнительно просто определить приближенно и расчетом.¹

5. Газоанализаторы.

Текущий контроль содержания в дымовых газах углекислоты для установок новейшего времени представляет собой нечто само собой разумеющееся, так как хорошее управление тонкой возможно только в том случае, если кочегар имеет соответствующие показания прибора все время перед глазами. Самый способный кочегар без газоанализатора не избежит больших потерь от чрезмерного избытка воздуха, т. е. от слишком низкого содержания в газах CO_2 . Приобретение газоанализаторов можно поэтому рекомендовать даже для средних и мелких установок, причем оно в самое короткое время оправдается на экономии горючего.

Аппарат Орса. Для эпизодического анализа дымовых газов существует ряд измерительных приборов, из которых наиболее известен аппарат Орса. Он состоит из мензурки и нескольких поглотительных сосудов, наполненных раствором едкого кали (для поглощения углекислоты), раствором пирогалловой кислоты (для поглощения кислорода) и аммиачным раствором полухлористой меди (для поглощения окиси углерода).² Прибор засасывает точно отмеренное по объему количество дымовых газов, которое по несколько раз проходит сквозь каждый из трех поглотительных сосудов и после каждого поглощения подвергается измерению. Отсюда определяются поглощенные количества газов, а вместе с тем и содержание CO_2 , O и CO . Для получения точного анализа поглощающие жидкости должны быть хорошего качества (их необходимо часто сменять), нужна большая поглощающая поверхность, создаваемая помещением в поглотительные сосуды пучков стеклянных трубок, и необходимы достаточное для поглощения время (поэтому газы и пропускают сквозь сосуды по несколько раз) и полная плотность всех соединительных трубок, пробок и т. д. В первую очередь газы направляют в сосуд с едким кали, так как и обе другие жидкости поглощают углекислоту.

При хороших реагентах и заботливом обращении аппарат Орса работает вполне удовлетворительно и является вполне достаточным для большинства практических измерений. При

¹ См. стр. 57 и след.

² Удобнее и точнее содержание кислорода определяется посредством фосфора.

более точных испытаниях иногда пользуются прибором Гемпеля, в котором устранены мелкие ошибки, получающиеся в аппарате Орса вследствие того, что не учитывается объем коммункаций. Для приближенного определения углекислоты применяют также измеритель углекислоты Крамера, который еще меньше, легче и удобнее для переноски, чем аппарат Орса.

Автоматические газоанализаторы. Для непрерывного наблюдения за ходом топки указанные выше приборы непригодны, так как они обслуживаются вручную, а для этого во время работы нет ни времени, ни людей. Поэтому приходится пользоваться автоматическими аппаратами. За последние годы нашел себе практическое применение целый ряд таких аппаратов, оказавшихся вполне целесообразными.

Автоматические газоанализаторы измеряют содержание одной углекислоты или же углекислоты и окиси углерода. Содержания кислорода обычно не определяют. В зависимости от способа действия различают следующие типы измерителей углекислоты:

- 1) аппараты, которые, подобно прибору Орса, работают с абсорбирующими жидкостями, чаще всего раствором едкого кали;
- 2) аппараты, основанные на том, что вес дымовых газов различен в зависимости от содержания углекислоты;
- 3) аппараты, основанные на том, что углекислота обладает меньшей теплопроводностью, чем воздух, и что омическое сопротивление зависит от температуры;
- 4) аппараты, основанные на различной вязкости и плотности дымовых газов.

Определение окиси углерода всегда заключается в том, что ее сжигают посредством электрического нагревательного приспособления, а затем или определяют образовавшееся количество углекислоты, равное первоначальному количеству окиси углерода, или же пользуются влиянием получившегося при сжигании повышения температуры на омическое сопротивление нагревательной проволоки, служащее тогда масштабом для определения содержания СО.

Химические газоанализаторы. Из указанных в п. 1 химических газоанализаторов упомянем, как наиболее известные, аппараты «Моно» и «Адос», которые автоматически, через определенные (произвольно изменяемые) промежутки времени (обычно через каждые 3 или 5 мин.), засасывают одинаковое количество дымовых газов, прогоняют его сквозь абсорбционный сосуд и отмечают объем поглощенной углекислоты на полосе бумаги. Аппарат «Моно-Дуплекс» показывает кроме того и содержание окиси углерода. Оба аппарата пользуются широким распространением и работают надежно, но требуют тщательного ухода и крайне чувствительны в виду наличия множества легко засоряющихся стеклянных и металлических трубок. Поэтому при них следует устанавливать фильтры для дымовых газов и тщательно наблюдать за их исправностью, так как в газопроводящие трубки могут проникнуть крупные частицы сажи или летучей золы. Механизм, передающий показания на диаграмму и состоящий из зубчатых колес, цепочек и т. д., также весьма сложен и чувствителен. Как служебные аппараты эти газоанализаторы непригодны прежде всего потому, что они не имеют указателя, а только вычерчивают диаграмму,¹ но, главным образом, потому, что вследствие большой длины газопроводов, достигающей нескольких метров, и промежутков в несколько минут между показаниями, они дают анализ газов со значительным опозданием. В зависимости от местных условий эти запоздания могут составить 10—20 мин.² Между тем для котелгара крайне важно всегда иметь перед глазами содержание СО₂ и СО в каждый данный момент, чтобы сейчас же сообразоваться с этими показаниями при обслуживании топки. Запоздалое показание может принести скорее вред, чем пользу. Но как контрольные аппараты и как аппараты, дающие материал для исчисления премий котелгарам, для статистики и т. п., химические газоанализаторы вполне применимы.

Газоанализатор «Ранарекс». Попытки определения состава дымовых газов на основе разного удельного веса привели прежде всего к устройству «газовых весов», которые, однако, очень чувствительны и поэтому не удовлетворяют требованиям котельного хозяйства. Напротив, газоанализатор «Ранарекс» компании АЕГ, в котором газы приобретают в центробежном колесе большую скорость и, в зависимости от своего веса, с различной силой воздействуют на мерительное колесо, оправдался в большей степени. Аппарат отличается очень прочной конструкцией и нечувствителен к сотрясениям, высокой температуре, сырости и пыли. Кроме того вследствие большой скорости газов показания аппарата запаздывают не на много и осуществляются не периодически, а непрерывно. Наконец, «Ранарекс» имеет ясно видимое указательное приспособ-

¹ В последнее время появились аппараты Моно с указательным приспособлением.

² Новейшие химические газоанализаторы дают показания уже с гораздо меньшим опозданием.

собление, которое удобно поместить перед кочетаром, например рядом с манометром, и самопишущее регистрирующее приспособление. Поэтому названный аппарат одинаково пригоден как для служебной работы, так и для контроля.

Электрические газоанализаторы. К третьей группе газоанализаторов, основанной на разной теплопроводности газов, принадлежат газоанализаторы Сименса и Бёме. Оба эти прибора определяют или одну углекислоту, или же и углекислоту и окись углерода. В них сопоставляются электрические сопротивления двух проволок, одна из которых омывается дымовыми газами, а другая атмосферным воздухом. Разность электропроводностей служит мерой содержания CO_2 . Содержание CO также определяется изменением омического сопротивления особой нагревательной проволоки.

Эти измерительные приборы обладают теми же преимуществами, что и «Ранарекс», и поэтому также пригодны в качестве контрольных и служебных приборов. Запаздывание показаний у них также значительно меньше, чем у химических газоанализаторов, и по опытам Пфлаума (Pflaum)¹ составляет около 2,2 мин. Однако эти аппараты имеют тот недостаток, что показание углекислоты, даже при весьма малом содержании в газах водорода, сильно искажается, так как высокая теплопроводность водорода может полностью уравновесить малую теплопроводность углекислоты.² Поэтому газоанализаторы Сименса и Бёме теперь стали снабжать особым приспособлением, без остатка отделяющим весь наличный водород до поступления газов в измеритель углекислоты.

Газоанализаторы, основанные на вязкости. К последней группе газоанализаторов, основанных на вязкости газов, принадлежит *унограф* компании «Унион». В этом аппарате мериллом для содержания углекислоты служит поведение газов при их проходе через сопло и капиллярную трубку. Углекислота, протекая по капиллярной трубке, испытывает, вследствие своей меньшей вязкости, меньшее сопротивление, чем воздух, при протекании же через сопло—большее сопротивление, в виду своей более высокой плотности. Эти аппараты довольно чувствительны и требуют тщательного ухода. Их также в последнее время изготовляют комбинированными, для измерения CO_2 и CO .

Выбор газоанализатора. При выборе газоанализатора, наряду с его стоимостью, важно его назначение, а также имеющиеся в распоряжении свободное место и наличие персонала для ухода и наблюдения за аппаратом. Важнейшими требованиями, предъявляемыми к служебным аппаратам этого рода, являются высокая точность показаний, малое их запаздывание, нечувствительность аппарата к пыли и температурным колебаниям, а также отчетливая видимость показаний. К контрольным аппаратам, устанавливаемым в особых, хорошо защищенных помещениях, не предъявляются столь высокие требования.

Измерители избытка воздуха. Говоря о газоанализаторах, коснемся и широко распространенных, особенно в Америке, измерителей избытка воздуха, определяющих не содержание углекислоты, а избыток воздуха. Весьма известен паро-воздухомер Вэйли, применяемый также для автоматического регулирования топки. Однако, так как этот метод весьма ненадежен и не может вполне заменить работу газоанализатора, он и не получил до сих пор распространения.³

6. Количественные измерительные приборы.

Количественные измерительные приборы применяются в котельном хозяйстве для самых разнообразных целей, но, главным образом, для надзора за работой и для статистики. Однако и в качестве служебных приборов они приобрели за последнее время большое значение. Помимо указательных и самопишущих приборов, к числу этих измерительных приспособлений принадлежит еще третья важная группа, а именно счетчики. Важнейшими для котельного хозяйства количественными измерительными приборами являются измерители расхода горючего, водомеры и паромеры.

Измерение расхода горючего. Количество сожженного горючего обычно определяется простым взвешиванием на автоматических весах. Наряду с этим существуют различные способы

¹ См. Arch. f. Wärmewirtschaft, 8, 304, 1927.

² См. Fickert, Arch. f. Wärmewirtschaft, 9, 124, 1928.

³ Упомянем и об оптическом способе оценки горения, недавно кратко описанном Боллингером (Bollinger). Он заключается в фотографической передаче яркости пламени на движущейся диаграмме. Применяемый для этого прибор, «люмограф», по сведениям упомянутого автора, хорошо зарекомендовал себя в опытной установке и в виду своей малой стоимости представляет особый интерес для мелких предприятий. См. Arch. f. Wärmewirtschaft, 8, 143, 1927.

объемного определения количества угля, например посредством аппаратов, помещаемых под угольными воронками. Эти измерительные приборы работают более или менее точно лишь при угле вполне однородного качества. Для измерения количества жидкого и газообразного горючего можно пользоваться приборами, вроде хорошо известных водомеров и парометров. Большие затруднения связаны до сих пор с измерением угольной пыли. Вполне безукоризненного и надежного способа для этой цели еще не выработано. Все измерители количества горючего целесообразно снабжать самопишущими аппаратами или счетчиками.

Измерение расхода питательной воды. Измерение расхода питательной воды имеет для эксплуатационной статистики не меньшее значение, чем измерение расхода горючего. Из обоих этих измерений выводят весьма важный *коэффициент кратности испарения*, дающий уже довольно ясную картину экономичности установки. В то время как при измерении расхода пара приходится пренебрегать паром, выпускаемым через предохранительные клапаны, измерение притока воды точно дает действительно испаренное в котле ее количество, конечно, при том условии, что между водомером и котлом нет утечки воды через неплотности.

Водомеры обычного устройства реагируют или на вес, или на объем. При этом следует иметь в виду, что удельный объем воды довольно значительно увеличивается с возрастанием температуры. С точки зрения устройства, приходится прежде всего различать водомеры непрерывного и периодического действия. Периодические водомеры, как, например, автоматические весы или опрокидные водомеры, часто применявшиеся раньше в котельных, вышли из употребления, так как теперь стремятся по возможности предупреждать соприкосновение питательной воды с наружным воздухом. Кроме того эти водомеры занимают сравнительно много места.

К водомерам непрерывного действия принадлежат *измерители силы течения*. Эти приборы пользуются созданным посредством сопла или трубки Вентури падением давления жидкости для измерения протекающего в данный момент ее количества. Результаты измерения вычерчиваются посредством передаточного механизма на диаграмме и сосчитываются механическим счетчиком. Недостаток этих приборов заключается в довольно сложном устройстве счетчика.

Весьма распространены также работающие непрерывно *моторные счетчики*, из которых наиболее известны поршневые водомеры, моторы с вертушкой, крыльчатые водомеры и диафрагменные или дисковые водомеры. Разные конструкции этих приборов имеют то общее, что все они представляют собой как бы маленькие двигатели, число оборотов которых возрастает с количеством протекающей жидкости. Моторные водомеры имеют перед измерителями силы течения то преимущество, что непосредственно интегрируют, т. е. сосчитывают количество протекающей воды. Кроме того новые конструкции этих приборов отличаются большой точностью измерений, не требуют сложного ухода и занимают мало места. Наиболее известны и лучше всего зарекомендовали себя поршневой водомер Экардта, диафрагменный водомер «Бопп и Рейтер» и дисковый водомер для горячей воды «Сименс».

Измерение расхода пара. Измерение расхода пара производится аналогично измерению текущих жидкостей. Однако оно связано с гораздо большими затруднениями, чем измерение расхода воды, во-первых, из-за сравнительно высоких температур, во-вторых, вследствие частых колебаний давления и температуры в весьма широких пределах, но, главным образом, потому, что при насыщенном паре образование конденсата легко может ввести в измерение неточность, а все подвижные части прибора находятся под угрозой ржавления. Иногда успешно применяемые для измерения жидкостей и газов поршневые, скоростные и диафрагменные измерительные приборы оказываются поэтому для пара неприменимыми. По крайней мере, пригодных конструкций этого рода пока еще нет. Единственные два способа, применяемые в настоящее время для измерения расхода пара, основаны на *истечении из устья* и на *действии поплавка*. Аппараты обоих типов работают как измерители силы течения. Но они принципиально отличаются тем, что в поплавковых парометрах свободное поперечное сечение изменяется в зависимости от количества проходящего пара вследствие перемещения поплавка, тогда как в парометрах с насадкой поперечное сечение остается постоянным и переменная разность давлений впереди и позади измерительного поперечного сечения измеряется дифференциальным манометром.

В качестве измерительных поперечных сечений применяют диафрагмы, измерительные фланцы, насадки и трубки Вентури, из которых первые два приспособления выгодно отличаются тем, что занимают мало места, тогда как насадки и трубки Вентури дают большую точность измерений.

Простейшую форму парометра с насадкой представляет собой изготовляемый фирмами «Гальвакс» и «Беме» *дифференциальный манометр* с ртутным указателем. Образующаяся в паропроводе у места измерения разность давлений оказывает воздействие на U-образную трубку с

ртутию. Высота ртутного столба, измеряемая по шкале, непосредственно указывает протекающее количество пара. Этот простой и легкий переносный аппарат особенно удобен для кратковременных измерений в разных местах трубопровода.

В качестве служебного прибора для котелгаров обычно применяется *паромер с циферблатом*, изготавливаемый разными фирмами приблизительно одинаково. Он имеет внешний вид манометра и обычно укрепляется на особых аппаратных досках непосредственно около котла, рядом с манометрами, телетермометрами, газоанализаторами и т. д. Часто пользуются также объединенным паромером и водомером с двумя стрелками, взаимноотносительное положение которых показывает, что перевеливает: расход пара или подвод питательной воды. Таким образом котелгар получает возможность регулировать работу котельных питательных насосов в зависимости от расхода пара.

В качестве контрольных приборов применяют *самопишущие паромеры*, устройство которых, естественно, сложнее устройств простых дифференциальных манометров и паромеров. Широко известен, например, паромер «Дебро», состоящий из кольцеобразного, до половины наполненного ртутью поворотного сосуда. Последний покоится без трения на опорной призме, будучи разделен перегородкой на две полости, соединенные с трубками, ведущими к измерительным сечениям.

Всякое изменение количества протекающего пара вызывает перемещение ртути внутри сосуда и поворот последнего, причем размах этого поворота двуплечим рычагом передается на барабан с бумагой. В паромере «Бёме»¹ разность давлений в двух мерительных трубках вызывает перетекание ртути из особого резервуара через поперечную ось в основание подвижно укрепленного трубчатого треугольника, подвешенного на пружинных пружинах. В зависимости от величины разности давлений трубчатый треугольник опускается или поднимается и посредством рычажной передачи чертит кривую на барабане. Для корректирования при сильных колебаниях давления предусмотрен коршневой манометр с кулиской, перемещающей центр вращения пишущего рычага.

В паромере «Гальвакс» передача на пишущий прибор достигается электрическим путем. Простой дифференциальный манометр присоединен с одной стороны к обоим мерительным пунктам, а с другой стороны посредством электрических проводов соединен с распределительной доской, на которой укреплены счетчик, несколько сопротивлений и переключатель. Мерительная трубка снабжена залитыми в нее пластинчатыми контактами, снаружи связанными посредством сопротивлений подходящей величины. Эти сопротивления ртутным столбом замыкаются поочередно накоротко, вследствие чего по мере повышения ртутного столба усиливается ток в замкнутой цепи. Различная сила тока и служит для вычерчивания диаграммы количества проходящего пара. На совершенно аналогичном принципе основан паромер «Электрофло».

Паромеры с поплавком имеют перед паромерами с насадками то большое преимущество, что они с большой точностью показывают даже весьма малые количества пара, так как толкательные импульсы, используемые в них для указательного прибора, у них гораздо значительнее, чем у паромеров с насадками, часто располагающих для передачи действия лишь весьма малой разностью давлений. Недостатком паромеров с поплавком является то, что они занимают сравнительно много места, и это делает их пригодными лишь для более крупных паропроводов. Среди наиболее известных конструкций можно назвать паромеры «Байер» и «Пондо». Паромер «Пондо» строится различно для насыщенного и перегретого пара. В то время как в паромере для насыщенного пара пишущее приспособление расположено над измерителем, в паромерах для перегретого пара оно помещено под измерительным устройством. Этим достигается то, что вал указателя, передающий наружу движение поплавка, и при перегретом паре работает в конденсате. Пишущее приспособление, как и в большинстве паромеров с насадками, автоматически учитывает давление.

Паромер может быть связан как с электрическим счетчиком, передающим показания на расстоянии, так и с электрическим паромером.

Точность показаний большинства паромеров даже при самых неблагоприятных условиях составляет около 5%. При постоянном количестве проходящего пара и постоянном давлении она часто бывает даже значительно выше. Такая точность в большинстве случаев вполне достаточна. Необходимой предпосылкой для хорошей работы паромера является тщательный уход за ним и безукоризненный монтаж при сборке его отдельных частей.

¹ Раньше он был известен под названием паромера «Герс».

7. Другие измерительные приборы.

Есть еще много других измерительных приборов, правда, не принадлежащих к совершенно необходимым принадлежностям каждой установки, но все же имеющих большое значение для разных надобностей. Чтобы начать с двух главнейших в паровом хозяйстве факторов, т. е. воды и горючего, упомянем прежде всего об аппаратах, служащих для химического анализа этих веществ, для определения жесткости воды, теплотворной способности топлива и т. д.

Исследование воды. Обычно для тщательного исследования воды необходима простая аппаратура, позволяющая определить общую жесткость. Целесообразно еще определение щелочности по фенолфталеину и щелочности по метилоранжу, согласно предложениям Блахера (Blacher). Этому исследованию подвергают от одного до двух раз в день свежую воду, очищенную и котельную воду, а иногда также конденсат и известковую воду. Сообразно результатам этого исследования регулируют работу водоочистительной установки.

Для указанной цели пользуются несколькими десятичными капельницами, мерной бюреткой и резиновым насосом для продувания воздуха, а также химическими: соляной кислотой, фенолфталеином, спиртовым раствором едкого кали, пальмитатом калия, красной метиловой или метилоранжем.¹

Исследование горючего. Исследование разных видов горючего в отношении их химического состава, содержания влаги, золы и жидких составных частей, равно как исследование золы в мелких и средних установках обычно не производят, так как необходимые для этого аппараты дороги, а их обслуживание и уход за ними требуют большого знания дела. Но при всех точных испытаниях, а также для текущего эксплуатационного контроля целесообразно брать пробы горючего и золы и посылать их в специальные лаборатории учреждений надзора за паровыми котлами, высших технических учебных заведений и т. п. Взятие проб должно производить весьма тщательно. Предметом исследования служат теплотворная способность, химический состав горючего, содержание горючих частей в золе и т. д. В больших предприятиях, располагающих собственными лабораториями с опытными химиками и лаборантами, целесообразно производить исследования пробы горючего и золы через регулярные промежутки времени.

Для эксплуатационной статистики особенно важно определение теплотворной способности, производимое в известных *калориметрических бомбах* или в *калориметрах Юнкера*.

Измерители теплового потока. Из других измерительных приборов следует упомянуть еще о появившихся лишь несколько лет назад измерителях теплового потока, посредством которых можно измерять потери от излучения и теплопроводности через котельные стенки, трубопроводы и т. д. В этой области известны приборы Шмидта и Байера, оправдавшиеся на практике, но все же чрезвычайно чувствительные и дающие правильные показания только в том случае, если испытания производятся с полным знанием дела и большой тщательностью.

Прочие измерительные приборы. Для вспомогательных машин юечгарок, например питательных насосов, бывают нужны контрольные приборы в виде известных *индикаторов*, *счетчиков оборотов* и т. д.

Часто представляется надобность определить влажность воздуха или пара. Для воздуха применяют *психрометры* разных устройств, для пара большей частью *дрессельные калориметры*, а иногда и электрические измерительные приборы.

В заключение нельзя не упомянуть еще о разных, часто весьма остроумных автоматических измерительных приборах, соединенных с *оптическими* или *акустическими сигнальными приспособлениями*, служащими, главным образом, для повышения надежности эксплуатации.

Сигнальные приспособления могут быть связаны с термометрами, измерителями количества пара или воды, измерителями давления и т. д.

¹ Точное описание этого способа исследования воды можно найти в книгах В l a s c h e r'a, например, «Das Wasser in der Dampf- und Wärmetechnik», стр. 86, Лейпциг, 1925; далее, «Vom Laboratoriumspraktikum zur praktischen Wärmetechnik», стр. 153, Лейпциг, 1928. Обе книги выпущены изд. «Otto Spamer» в серии «Monographien zur Feuerungstechnik».

РУКОВОДСТВО И НАДЗОР ЗА ЭКСПЛУАТАЦИЕЙ.¹

1. ОБЩИЕ СООБРАЖЕНИЯ.

Экономичность и бесперебойность работы парокотельной установки в равной степени зависит как от рационального и тщательного обслуживания и надзора, так и от правильного монтажа и целесообразной конструкции котлов и их принадлежностей. Самое лучшее техническое оборудование может прийти в расстройство при неправильном обслуживании. Самые лучшие измерительные приборы при плохом уходе могут испортиться. Как и во всех других областях техники, при эксплуатации котельной необходимо руководствоваться тем правилом, что всякая машина, всякий аппарат и всякое приспособление должны быть устроены так, чтобы их можно было безукоризненно обслуживать, содержать в порядке и регулярно контролировать с помощью имеющихся в распоряжении людей.

Эксплуатация и тепловая экономика. Эксплуатация тесно связана с тепловой экономикой, так как термическое использование содержащейся в горючем теплоты и величина потерь зависят от способа эксплуатации не в меньшей мере, чем от конструктивного совершенства установки. Однако эксплуатационная экономика гораздо шире, чем тепловая экономика в узком смысле слова. Она влияет на все эксплуатационные расходы, отражаясь и на капитальных расходах, поскольку от нее зависит долговечность установки, а следовательно также размер списаний на амортизацию и стоимость содержания и ремонта.

Поэтому надо остерегаться сводить руководство эксплуатацией только к хорошему тепловому хозяйству. Сокращение тепловых потерь полезно и выгодно с экономической точки зрения, но только в том случае, если предпринимаемые для этой цели изменения, затраты и т. д. находятся в должном отношении к достигаемой экономии и если, далее, от этого не возникают какие-либо другие недостатки, например быстрый износ материала котлов, влекущий за собой повышение ремонтных расходов или понижение надежности эксплуатации. Многие руководители эксплуатацией гордятся, если котлы работают у них с особенно высоким коэффициентом полезного действия и особенно низким расходом горючего. Но при этом они часто не замечают, что усиленное использование основного капитала уничтожает всю достигаемую экономию, что расходы на ремонт недопустимо высоки, а иногда и то, что высокий коэффициент полезного действия покупается ценой падения надежности работы.

Задача руководства эксплуатацией. В противоположность чистой теплотехнике, область эксплуатации не носит определенного характера, а допускает бесконечные вариации. Ее нельзя охватить уравнениями и формулами, она не может получить определенного графического выражения, так как для этого нет твердых основ. Каждое предприятие работает в иных условиях, которые все время меняются. Задача руководителя эксплуатацией и сводится к приспособлению его котельной установки к этим непрерывно колеблющимся условиям таким образом, чтобы достигалась наивысшая, практически возможная степень экономичности и бесперебойности. Для этого необходимы понимание всех технических процессов, знание экономических соотношений, а также постоянный технический и экономический контроль эксплуатации. Кроме чисто личного надзора за персоналом и установкой, необходима хорошо поставленная эксплуатационная статистика, с использованием ее от времени до времени в виде экономических балансов. Для проверки статистики следует, далее, проводить через определенные промежутки времени точные опыты испарения и испытания отдельных частей котельной установки.

II. РАСТОПКА ПАРОВЫХ КОТЛОВ.¹

Чувствительность котельной установки. Паровой котел представляет собой довольно сложную конструкцию, состоящую из самых разнообразных по форме и материалу частей. Помимо этого он еще подвержен чрезвычайно высоким напряжениям, в особенности вследствие частых и быстрых температурных изменений, совершенно разных в отдельных частях котла. Эти температурные изменения легко могут вызвать термические напряжения в частях котла и тонки, приводящие к скорому разрушению этих частей, а иногда и всего котла.

¹ В предыдущих главах также неоднократно приводились экономические соображения. Настоящая глава содержит краткую сводку важнейших задач, лежащих на руководстве эксплуатацией и на обслуживающий персонал котельных.

Высокая чувствительность котла, с одной стороны, и сами по себе весьма высокие термические напряжения, с другой стороны, заставляют обращаться с котлом во время работы с особой тщательностью. Поскольку вообще быстрые изменения температуры вреднее воздействия высоких, но равномерных температур, период растопки представляется особенно опасным и требует особой внимательности. Котлы, непрерывно находящиеся в работе, отличаются значительно большей долговечностью по сравнению с котлами, работающими с частыми перерывами.

Мероприятия, необходимые во время рабочих перерывов и при растопке. Можно указать два средства для уменьшения вреда и опасности при растопке:

1) охлаждение во время рабочих перерывов предупреждается, насколько это возможно, устройством плотных заслонок и хорошей изоляцией;

2) время растопки по возможности растягивается, причем заботятся о том, чтобы развитие теплоты в топочной камере происходило возможно более равномерно и постепенно.

Всегда, когда это возможно, следует пользоваться обоими этими средствами. Однако при этом нельзя забывать о том, что удлинение времени растопки одновременно замедляет готовность котла к работе, что часто бывает весьма нежелательным. Во многих случаях, в особенности при неожиданных неисправностях, приходится, насколько это возможно, ускорять растопку резервных котлов. Поскольку, однако, первое средство, т. е. уменьшение охлаждения, одновременно ускорит готовность котла и, кроме того, дает также большую экономию топлива, следует вообще все работающие с короткими перерывами котлы, в особенности же подлежащие быстрой растопке, снабжать устройствами для закрывания от доступа воздуха внутренней части котла на время перерывов.

Особенности разных типов котлов. Чувствительность котла к топке к температурным изменениям, естественно, зависит в первую очередь от конструкции. Чем выше упругость котла и чем больше способность обмуровки расширяться без возникновения вредных напряжений, тем быстрее могут происходить температурные изменения, и тем короче может быть время растопки. С этой точки зрения, подвижные секционные котлы превосходят довольно жесткие двухкамерные котлы. Точно так же вертикальноводотрубные котлы с изогнутыми трубами превосходят котлы с прямыми трубами, а топочные камеры с подвижными подвесными потолками — топочные камеры со сводами и т. д. Далее, чем меньше масса обмуровки, тем быстрее можно растапливать котел. Поэтому экранные котлы, быстро приводимые в рабочую готовность, особенно пригодны в качестве котлов для пиковой нагрузки и для резерва.

Растопка холодных котлов. Растопка совершенно холодных котлов требует особой осторожности. При более долгих рабочих перерывах (несколько дней или недель) даже самые лучшие тяговые шлюзы и системы изоляции не могут защитить котлы от полного остывания. Поэтому растапливать их надо с большой постепенностью. Если есть достаточно времени, то перед настоящей растопкой сначала прогревают котел, разводя на неподвижной колосниковой решетке небольшой огонь сперва на дровах, а затем на угле. Это особенно важно в том случае, если часть обмуровки топочной камеры была заменена новой и осталась еще сырой. Рекомендуется просушивать такую кладку в течение нескольких дней. Все это время наполненные водою котлы остаются сверху открытыми, для того чтобы в них не образовалось давления. Затем лишь начинается растопка в собственном смысле слова, для чего по всей решетке распределяют тонкий и возможно более равномерный слой горючего, которое и зажигают. Вначале необходима совсем слабая тяга, т. е. заслонка должна оставаться почти совсем закрытой, чтобы предупредить быстрое и неравномерное развитие теплоты. Этим одновременно препятствуют образованию чрезмерных потерь с отходящими газами.

Решетку пускают вначале с очень небольшой скоростью, чтобы избежать слишком высоких потерь в остатках. Лишь постепенно начинают повышать силу тяги, подачу горючего, скорость решетки и т. д.

Продолжительность растопки. Продолжительность растопки цилиндрических и жаротрубных котлов, находящихся в совершенно холодном состоянии, составляет, в среднем, 6—8 часов. Для двухкамерных котлов, жестких вертикальноводотрубных котлов и т. д. это время должно составлять около 4 часов, для современных секционных и вертикальноводотрубных котлов 1—2 часа. Современные экранные котлы бывают готовы к работе иногда уже по прошествии 15—30 минут. В особенно спешных случаях указанные сроки иногда могут быть еще сокращены, но, конечно, за счет большего расхода горючего и более высоких напряжений в материале.

Пользуясь для растопки нефтью или угольной пылью (добавочные топки), вдувая теплый воздух, питая котлы горячей водой или же вдувая в котельную воду пар, время растопки можно ускорить, но при этом необходимо внимательно следить за расширением частей котла. Руководителем эксплуатации должен точно знать предельные значения расширения каждого котла установки, в том числе и железных частей каркаса, обмуровки и связей, и заботиться о том, чтобы эти пределы ни в коем случае не превышались быстрыми температурными изменениями.

Обращение с перегревателями. Особенно чувствительна при растопке поверхность нагрева перегревателей. Поскольку вначале пар не производится, он в течение всего начального периода растопки по змеевикам перегревателя совсем не проходит. Чтобы предупредить прогорание

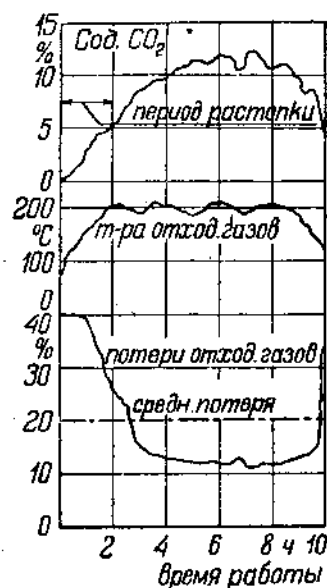


Рис. 150. Неправильное ведение огня. Большой избыток воздуха, малое содержание CO_2 , высокие потери в отходящих газах.

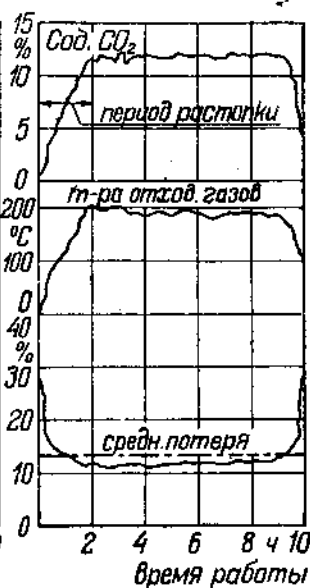


Рис. 151. Правильное ведение огня. Малый избыток воздуха, большое содержание CO_2 , низкие потери в отходящих газах.

Рис. 150 и 151. Содержание CO_2 , температура отходящих газов и потери в отходящих газах в виде свободной теплоты сухих дымовых газов (с отношением к нижнему пределу теплотворной способности) при растопке. Результаты двух сравнительных испытаний топки с движущимися колосниками.

Особые мероприятия. Перед введением в работу холодного котла необходимо точно проверить, в порядке ли все предохранительные и вспомогательные приспособления, измерительные приборы и т. д., работают ли безукоризненно приводные механизмы колосниковой решетки, питательных насосов, вентиляторов и т. д., удалены ли все заглушки и т. д. Котел и перегреватель во время растопки должны быть освобождены от воздуха. Необходимо внимательно наблюдать за манометром. Когда достигнута примерно половина рабочего давления, перегреватель, если он был наполнен водой, опорожняют и приключают его к паровому пространству котла. Если паровая магистраль тоже выключалась из работы, то вентиль, устанавливающий сообщение с ней, следует открыть уже по достижении небольшого давления в котле с целью прогреть трубопровод. Если же паровая магистраль уже находится под паром, то этот клапан надлежит открывать лишь по достижении полного рабочего давления. Во всяком случае открыва-

¹ Часто представляется возможность предохранить перегреватель пропусканием через него пара соседних, уже находящихся в работе котлов. Пар пропускают через трубки перегревателя растапливаемого котла до тех пор, пока в нем самом не начинается парообразование.

ние этого клапана, как и все процессы во время растопки должно происходить медленно и постепенно. Необходимы безукоризненно работающие конденсационные горшки, обеспечивающие освобождение трубопроводов от воздуха и воды в первое время работы.

Наблюдение за газоанализаторами. В течение всего периода растопки необходимо непрерывно наблюдать за газоанализаторами. Малое содержание в газах CO_2 заставляет предполагать, что тяговая заслонка открыта слишком широко или что на колосниковой решетке есть непокрытые топливом места. По правильной растопке узнают дельного кочегара. Фактически возможно почти с первой же минуты работать с высоким содержанием CO_2 . На рис. 150 и 151 показаны изменения содержания CO_2 во время растопки и потери в отходящих газах при двух испытаниях одинаковых котлов — один раз при руководстве кочегаром и другой раз без такого руководства. Мы видим, что при втором испытании, без руководства (рис. 150), нормальное содержание CO_2 было достигнуто лишь через 4 часа после начала растопки, и уже примерно за $1\frac{1}{2}$ часа до окончания работы оно снова значительно упало. Вследствие этого потери в отходящих газах, в среднем, весьма высоки (20%), тогда как при втором испытании содержание CO_2 очень быстро достигает своего нормального значения, благодаря чему потери в отходящих газах составляют, в среднем, всего 13%, т. е. на 7% меньше, чем при первом испытании.

III. ОСТАНОВКА ПАРОВЫХ КОТЛОВ.

Мероприятия и наблюдения. В отношении остановки котлов действительны те же соображения, которыми руководствуются при растопке: здесь также особенно важно избегать всяких резких температурных изменений. Кроме того с точки зрения тепловой экономики необходимо стремиться к возможно полному использованию теплоты сгорания оставшегося на колосниковой решетке горючего. Вообще во всех предприятиях, работающих с периодическими перерывами, представляется возможность уже за один или два часа до окончания работ несколько уменьшить количество сжигаемого на колосниковой решетке в единицу времени горючего, так как и расход пара в большинстве случаев становится к этому времени меньше. При механических топках с колосниками решетку можно совсем остановить сравнительно задолго до окончания работ и, уменьшив тягу, дать углю полностью выгореть. Уровень воды следует держать при этом возможно ниже и уменьшать давление пара, насколько это допускается условиями работы. К моменту окончания работ слой топлива должен настолько выгореть, чтобы, кроме горячей золы, на решетке находился лишь легкий огонь в передней части. Питанием котла в этот момент до высшей метки можно значительно повысить аккумуляционную способность воды в котле, благодаря чему дальнейшего испарения уже почти не будет. Тяговую заслонку, которую в течение последнего часа все больше прикрывали, чтобы до конца сохранить содержание в газах CO_2 возможно более высоким, теперь совсем закрывают. Небольших неплотностей, неизбежных при всех заслонках, обычно бывает достаточно для обслуживания оставшегося на решетке слабого огня потребной тягой. Когда этот огонь погаснет, закрывают и заслонку у дымовой трубы, а также тяговый шлюз, если таковой имеется. Теперь топочная камера и дымоходы котла совершенно отделены от дымовой трубы, вследствие чего охлаждение может происходить вполне постепенно путем излучения наружу и теплопроводностью.

Как только питание котла закончено, закрывают вентиль к паропроводу. Поскольку давление в котле, постепенно опускавшееся в течение последних часов работы и последующего питания, упало значительно ниже своей нормы, а температура воды вследствие упомянутого питания также довольно низка, котел получает возможность принять в себя довольно много тепла, накопившегося в обмуровке и в слое горячего шлака. Поэтому в течение первых часов перерыва давление будет медленно возрастать, причем не приходится опасаться необходимости тепловых потерь вследствие выпуска пара через предохранительный клапан.

Совместная работа с аккумуляторами Рутса. Если установка располагает аккумуляторами Рутса, то котлы выводятся из работы еще проще. В этом случае котел до окончания работ может идти под полным давлением и при нормальном режиме топки. Затем топку останавливают, тяговую заслонку постепенно прикрывают и заряжают аккумулятор избыточным паром до тех пор, пока не выгорит без остатка — едой горючего на решетке. Последующего питания котла в этом случае не требуется, так как аккумулятор принимает в себя весь пар. В этом случае выпуск пара через предохранительный клапан совершенно исключается.

В предприятиях, работающих непрерывно, часто применяют следующий способ для сохранения котлов готовыми в любой момент к работе. Выключенные котлы с погашенным огнем не разобщают с паропроводом, а продолжают держать их под полным давлением. Этот способ

не только бесполезен, так как готовность котла к работе от этого нисколько не повышается, но даже опасен, так как одностороннее нагревание сверху может вызвать в таких котлах вредные тепловые напряжения.¹

Горячий резерв. При коротких рабочих перерывах целесообразно не давать огню полностью выгореть и поддерживать совсем слабый резервный огонь на задней части колосниковой решетки. При этом следует остерегаться образования взрывчатых газовых смесей, для чего необходимо заботиться о достаточном подводе воздуха и отводе газов (заслонку немного открыть!). С другой стороны, избыток воздуха также не должен быть слишком высок, так как это повлекло бы за собой значительные тепловые потери (наблюдать за газоанализатором!). По сравнению с полной остановкой резервный огонь имеет то преимущество, что котел не охлаждается и быстро может быть подготовлен к работе. Но при более долгих рабочих перерывах расход горючего был бы довольно велик. Кроме того при неправильном обслуживании, с которым всегда приходится считаться, потери от внутреннего отхлаждения часто бывают больше, чем у остановленных котлов с закрытым тяговым шлюзом. Это объясняется тем, что при огне только на задней части решетки засасывается в большом количестве холодный воздух, отнимающий у котла гораздо больше тепла, чем отдает ему слабый резервный огонь.

IV. ПАРОВОЙ КОТЕЛ В РАБОТЕ.

Задачи кочегара. В виду того большого значения, которое паровой котел имеет для всего предприятия, и в виду высокой чувствительности он нуждается в тщательном и компетентном обслуживании. Кочегар должен быть не просто чернорабочим, механически выполняющим свои обязанности и бросающим в топку уголь, иногда шурующим огонь, выпускающим шлаки и следящим, в лучшем случае, за уровнем воды и манометром. Напротив, он должен иметь такую теоретическую подготовку, чтобы понимать сущность процесса сгорания, знать особенности разных видов горючего, иметь понятие о причинах возникновения тепловых потерь, о составе дымовых газов, о характере напряжений, испытываемых материалом котла, и т. д. Современное котлостроение с полным основанием стремится к тому, чтобы по возможности освободить кочегара от физического труда и все более приучать его к сознательной умственной деятельности.

Соображения надежности. Первой задачей кочегара должна быть забота о полной надежности работы самого котла и всей котельной установки. Он должен регулярно проверять предохранительные приспособления, постоянно следить за водяным уровнем и по крайней мере раз в день проверять его спуском пара. Понижение уровня воды ниже установленного предела может привести к большим повреждениям и даже к взрыву, тогда как чрезмерное питание приводит к захлестыванию воды в трубопроводы, водяным ударам, разрывам труб и т. д. Манометры также требуют непрерывного наблюдения. Почти во всех предприятиях крайне важное значение имеет поддержание в котлах равномерного давления. Поэтому верность показаний манометра следует ежедневно проверять. Для избежания засорений подводящих трубок следует по разу в день производить продувку через контрольный кран, причем стрелка манометра должна возвращаться на нулевое деление. С другой стороны, при достижении отмеченного красным максимального давления предохранительный клапан должен открываться для выпуска пара. Таким образом, существуют две контрольные точки (нулевое и максимальное давления), и благодаря этому можно с достаточной надежностью установить, правильно ли показывает манометр. Кроме того рекомендуется через определенные промежутки времени испытывать котельные манометры при разных давлениях с помощью официально проверенного контрольного манометра. Неверные манометры необходимо немедленно заменять.

Постоянство давления в котле. Кочегар должен всегда вести топку таким образом, чтобы даже при колеблющейся нагрузке давление в котле оставалось по возможности постоянным. Падения давления при возрастании нагрузки следует так же избегать, как и выпуска пара через предохранительный клапан при малой нагрузке.

Если нет аккумуляторов, то постоянство давления кочегар должен поддерживать регулированием питания или топки. При малой нагрузке он усиливает питание и, если этого недостаточно, прикрывает тяговую заслонку, уменьшает скорость колосниковой решетки и поддерживает более тонкий слой топлива на решетке. При высокой нагрузке он поступает наоборот. При этом он должен следить за тем, чтобы уровень воды ни в коем случае не опускался ниже и не

¹ Подробнее см. Praetorius, Die Wärme, 50, 834, 1927.

поднимался выше установленных пределов. Слишком быстрого питания холодной водой также необходимо избегать вследствие возникающих при этом тепловых напряжений. Если нагрузка испытывает сильные и внезапные колебания, то даже при гибко работающих топках никогда нельзя полностью избежать колебаний давлений. Если давление пара в разных сетях должно быть постоянным, как это обычно требуется по производственным соображениям, то рекомендуется установка аккумулятора Рутса. Тогда котелу приходится обслуживать топку не по котельному манометру, а по находящемуся в котелке манометру аккумулятора. Другими словами, при нормальных условиях он должен вести топку совершенно равномерно, независимо от колебаний в расходе пара, и лишь при почти разряженном или полностью заряженном аккумуляторе несколько усиливать или ослаблять огонь.¹

Малые тепловые потери. К эксплуатационным задачам присоединяются теплоэкономические. Производство пара при различных нагрузках должно происходить с возможно малыми тепловыми потерями. Потери в отходящих газах и несгоревших остатках должны быть сильно сокращены, потери от неполного сгорания, от сажи и летучей золы, по возможности, совсем устранены. В виду этого важно поддерживать на решетке равномерный слой горючего и устанавливать тяговую заслонку таким образом, чтобы содержание в газах CO_2 оставалось на одинаковой высоте и составляло, в зависимости от рода топлива, примерно, 12—18%.² Котелу должно быть точно указано, какое содержание CO_2 наиболее выгодно для котла при данном горючем. Кроме того при топках с движущимися колосниками он должен так регулировать скорость колосниковой решетки, чтобы топливо успевало полностью выгореть за то время, которое ему для этого предоставляется. Регулируя приток воздуха и горючего, котел должен заботиться о том, чтобы топливо, находящееся на передней части решетки, немедленно воспламенялось. Если шлаки приходится спускать вручную, то это должно происходить через равномерные промежутки времени и возможно быстрее, причем тяговую заслонку необходимо сильно прикрывать. Обратное, при ручном забрасывании топлива заслонка должна быть широко открыта, чтобы сквозь свежий слой топлива проходил в достаточном количестве воздух и быстро вызывал воспламенение. В противном случае пришлось бы иметь дело с недостатком воздуха и неполным сгоранием, неизбежным следствием чего явилось бы образование сажи, а иногда даже взрывы дымовых газов.

В особенности необходимо следить за тем, чтобы в топочную камеру не засасывался воздух, так как это не только увеличивает избыток воздуха, а следовательно, и потери в отходящих газах, но и чувствительно нарушает процесс горения. Чрезмерный избыток воздуха может охладить горючие составные части ниже температуры воспламенения, что приводит к большим потерям от неполного сгорания. Воздух может проникать через тонкие или совсем непокрытые места на поверхности решетки, а также через трещины в обмуровке, через неплотные топочные дверцы, смотровые отверстия и т. д. Поэтому котел должен следить за плотностью обмуровки и за тем, чтобы все дверцы, заслонки и смотровые лючки были непроницаемы для воздуха.

При работе с нижним дутьем прежде всего необходимо иметь в виду, что слишком сильное дутье при мелком угле может дать очень большие потери в летучей золе, не говоря уже о сильном загрязнении поверхности нагрева. Равным образом, и потери в отходящих газах при слишком сильном нижнем дутье весьма велики. Поэтому подвод и толщина слоя горючего всегда должны быть урегулированы таким образом, чтобы воздух в достаточном количестве проникал сквозь слой горючего, но с настолько малой скоростью, чтобы мелкие частицы угля не увлекались в дымоходы.

Все изменения в установившемся состоянии должны производиться постепенно. Даже при самом сильном увеличении нагрузки внезапное открытие заслонки было бы ошибкой, так как оно привело бы только к усилению подвода воздуха при равном количестве горючего, что дало бы вместо повышения понижение производительности топки. Внезапное закрытие заслонки при падении нагрузки может вызвать недостаток воздуха, большие потери, а иногда и взрыв дымовых газов. Следствием внезапного и сильного повышения скорости колосниковой решетки может явиться бесцельное скопление на ней горючего, следствием же внезапной остановки — образование больших просветов в слое горючего. Всякая регулировка должна быть связана с другими изменениями, всякий переход от одного состояния к другому должен происходить постепенно, иначе неизбежны большие потери и неисправности в работе.

¹ См. стр. 260.

² При твердых видах горючего содержание CO_2 должно составлять 12—15%, при работе на угольной пыли 14—16%, в газовых топках, в зависимости от рода газа, до 18%.

Обслуживание котлов становится существенно проще и дает больший экономический эффект, если прибегнуть к установке аккумуляторов, устраняющих надобность в регулировании в зависимости от изменений нагрузки. При наличии аккумуляторов нагрузка котлов может поддерживаться постоянной.

Экономические указания. Для хорошего, с точки зрения тепловой экономики, обслуживания необходимо иметь в виду следующие краткие указания.

1. *Большие потери в отходящих газах* возникают от чрезмерного избытка воздуха, т. е. от малого содержания CO_2 и высокой температуры отходящих газов. Низкое содержание CO_2 вызывается чрезмерной силой тяги (вследствие слишком широкого открывания заслонки или слишком сильного нижнего дутья), неравномерностью слоя горючего и прониканием постороннего воздуха (просветы в слое горючего, неплотности, открытые дверцы и люки, неумелая шуровка). Высокая температура отходящих газов обычно является следствием сильного загрязнения поверхности нагрева.

2. *Большие потери от неполного сгорания и сажи* возникают при слишком малом избытке воздуха, при недостатке воздуха, а также при внезапном охлаждении полусгоревших топочных газов ниже температуры воспламенения. Причинами этого бывают недостаточная сила тяги (вследствие недостаточного открытия тяговой заслонки), слишком толстый слой горючего и забрасывание свежего горючего при сильно прикрытой заслонке.

3. *Большие потери в очаговых остатках* возникают от чрезмерной скорости колосниковой решетки или от слишком частой и неумелой шуровки.

4. *Большие потери с уносом* получаются, главным образом, при мелком угле и чрезмерной тяге (при слишком сильном нижнем дутье).

Надлежащее состояние котла. К другим важным задачам кочегара во время эксплуатации принадлежит забота о хорошем состоянии котла. Кочегар должен неустанно наблюдать за самим котлом, за топкой и всеми вспомогательными устройствами и немедленно исправлять мелкие повреждения, а о более крупных тотчас же сообщать технадзору. Он должен через регулярные промежутки времени (от 1 до 2 раз в смену) тщательно обдувать поверхность нагрева и выпускать, также через предписанные промежутки времени, часть содержимого котла¹ (с целью удаления грязи и предупреждения чрезмерной концентрации солей). О неправильных показаниях измерительных приборов (газоанализаторов, парометров, термометров) кочегар должен немедленно сообщать.

Особое внимание должно быть обращено на хорошее состояние материалов котла. Обмуровка требует постоянного наблюдения. При подвесных перекрытиях сильно поврежденные кирпичи необходимо заменять немедленно по прекращении работ. Отложения шлаков на обмуровке надлежит удалять с большой осторожностью. Колосниковую решетку также необходимо регулярно очищать от сильных отложений. Поврежденные колосники цепных решеток желательно заменять во время работы, а колосники возвратно-поступательно движущихся решеток и неподвижных решеток — при первой возможности. Следует, по возможности, избегать накаливания колосников. В особенности же необходимо следить за безукоризненным состоянием поверхности нагрева. О появлении отдулин, а тем более о неплотности звеньев жаровых труб, кипятильных труб, мест соединения труб с водяными камерами и т. д. немедленно должен быть оповещен руководитель эксплуатации. В большинстве таких случаев, для предупреждения крупных повреждений или даже взрывов, приходится немедленно прекращать действие топки и останавливать котел.]

У. НАДЗОР ЗА ЭКСПЛУАТАЦИЕЙ И ПРЕМИИ ДЛЯ КОЧЕГАРОВ.

Задачи управления во время эксплуатации заключаются в инструктировании кочегаров и всего котельного персонала с целью соблюдения указанных выше правил. Кроме того управление должно контролировать работу персонала и всей установки, заботиться о быстрой замене поврежденных частей и вообще безукоризненном состоянии всего оборудования. В целях упрощения обслуживания котлов, уменьшения тепловых потерь и повышения экономичности целесообразно, поскольку это возможно без нарушения интересов производства, таким образом воздействовать на потребителей пара, чтобы сократить колебания в расходе пара. К важнейшим задачам управления принадлежит принятие таких организационных мер в области производства, чтобы устранить одновременное включение или выключение крупных потребителей пара.

¹ Необходимость выпуска воды отпадает лишь при наличии постоянной продувки.

Лучшим способом разгрузки котельного отделения, попутно делающим потребителей пара совершенно независимыми от котелгарки и устраняющим задержки в производстве, является установка паровых аккумуляторов.

Существенным средством для приучения котелгаров к экономичной работе служит назначение для них премий за высокое содержание CO_2 и низкое содержание CO . Премии следует строить таким образом, чтобы в их основе лежало определенное, легко достижимое при всех условиях содержание CO_2 . Чем более среднее содержание CO_2 за определенный промежуток времени, например за день, приближается к своему наивыгоднейшему значению, тем выше оказывается премия. Премии оказывают поощряющее влияние и вполне оправдались во многих предприятиях. При этом необходимо иметь в виду, что для справедливости оценки нужен безукоризненно работающий газоанализатор и необходимо более или менее равномерное качество горючего. Затруднения представляет также оценка работы котелгара при сильных и непредвиденных колебаниях нагрузки, когда значительные колебания в содержании CO_2 бывают почти неустраняемы. С другой стороны, особенно просто и целесообразно назначение премий для котелгаров в котельных установках, работающих с аккумуляторами Рутса, так как в таких установках нагрузка котлов не меняется совсем или же меняется весьма постепенно.¹

VI. ИСПЫТАНИЕ КОТЛОВ.

Цель и польза испытаний. Для проверки качества работы котельной установки целесообразно проводить от времени до времени точные испытания, составлять тепловые балансы и, на основании полученных данных для коэффициента полезного действия, потерь, расхода горючего и т. д., определять, нужны ли какие-нибудь улучшения и какие именно. Такие испытания требуют времени и иногда обходятся довольно дорого, особенно если управление, для большей уверенности, поручает их приглашенным специалистам (например с теплотехнических станций обществ по надзору за паровыми котлами² и если приходится приобретать особые измерительные приборы. Помимо этого производство точных испытаний почти всегда нарушает нормальную работу. Все же такая добавочная нагрузка оказывается почти для всех предприятий вполне посильной, а преимущества точного испытания всей котельной установки так велики, что с некоторыми неудобствами легко примириться. Только тщательно проведенное испытание показывает, что может дать та или иная котельная установка. Лишь путем испытания обнаруживаются часто легко устранимые недостатки. Котелгары при этих испытаниях учатся наиболее целесообразному обслуживанию котлов, а руководитель эксплуатационной, что особенно важно, получает точное представление о производительных возможностях своей котельной установки, о ее коэффициенте полезного действия, о зависимости этого коэффициента от нагрузки, продолжительности работы и т. д.

Правила для приемочных испытаний. Союз германских инженеров уже в 1919 г. издал «Правила для приемочных испытаний паровых установок», второе, значительно улучшенное и расширенное издание которых вышло в 1925 г.³ Эти правила получили в Германии общее признание. В виду этого и в целях создания единообразной основы ими следовало бы пользоваться не только для приемочных, но и для всех других котельных испытаний. Конечно, при этом вполне допустимы небольшие отклонения в деталях, в зависимости от целей испытаний.

Здесь мы коснемся лишь некоторых основных обстоятельств, связанных с принимаемыми испытаниями котлов. В остальном мы отсылаем читателя к упомянутому «Правилам».

Приготовление. Для подготовки к точным котельным испытаниям прежде всего необходимо произвести (если только задачей испытаний не ставится исследование котла во время эксплуатации, когда котел испытывается в том состоянии, в каком он находится) основательную очистку котла от накипи и летучей золы. Вообще котел во всех своих частях должен быть приведен в надлежащий порядок. Прежде всего необходима полная плотность всех трубопроводов, соединительных частей и т. д., для того чтобы результаты испытания не искажались потерями

¹ Вопрос о премировании за экономию топлива разрабатывался на всех Всесоюзных теплотехнических съездах и нашел отражение во многих «Трудах» этих съездов (см. общий обзор этого вопроса в специальном издании Теплотехнического института «Труды комиссии по премированию за экономию топлива», Москва, 1928).

² В СССР такие испытания ведутся теплотехническими институтами (Московским и Ленинградским), Оргэнерго, лабораториями вузов и т. п. учреждениями.

³ Изд. VDI, Берлин, 1925.

Прим. ред. В СССР при испытании котельных установок следует руководиться «Нормами испытания котельных агрегатов», принятыми (в виде проекта) на IV Всесоюзном теплотехническом съезде. Эти нормы напечатаны в «Изв. Теплотехн. инст.», № 4 (37), 1928.

через неплотности. Все венужные для испытания трубопроводы лучше всего выключать посредством глухих фланцев. Наконец, необходимо тщательно установить измерительные приборы, предварительно подвергнутые точной выверке. Все измерения должны давать приемлемые средние значения. Например, термометры надлежит установить так, чтобы они, по возможности, показывали температуру посередине газового, парового или водяного потоков. Целесообразно еще до испытания произвести измерения, позволяющие судить о состоянии установки.

Испытания при установившемся состоянии. При большинстве испытаний, особенно при всех приемочных испытаниях, котлы надлежит испытывать при установившемся режиме. Для этого необходимо дать котлу после чистки поработать один или, лучше, даже несколько дней. Также и в день самого испытания таковое следует начать не ранее, чем через шесть часов после растопки котла. Частыми промежуточными подсчетами результатов надлежит при этом еще выяснить, действительно ли достигнуто установившееся состояние.

Эксплуатационные и специальные испытания. При чисто эксплуатационных испытаниях, равно как и при всех испытаниях, при которых желательно установить влияние рабочих перерывов, испытание целесообразно начинать с момента растопки, причем должно быть точно известно и рабочее состояние при выключении накануне.

Надлежит делать различие между приемочными, эксплуатационными и специальными испытаниями. Во время приемочных испытаний желательно, по возможности, устранять всякие случайные влияния на котел. Нагрузка должна быть равномерной, питание, плавки и т. д. должны производиться нормально. Во время эксплуатационных испытаний следует в точности сохранять нормальные условия эксплуатации. Поэтому такие испытания меньше всего нарушают нормальную работу завода. При специальных испытаниях иногда даже искусственно создают нарушения режима и вводят внезапные колебания нагрузки и т. п., в зависимости от целей испытания.

Сравнительные испытания. Важную группу представляют собой сравнительные испытания, проводимые при прочих равных условиях до и после установки какого-либо нового устройства, например экономайзера, подогревателя воздуха, тягового шлюза. Во многих случаях, например когда сделаны обходные каналы, такие сравнительные испытания могут выполняться и после установки устройства, влияние которого подлежит исследованию. При подобных испытаниях важна не абсолютная точность всех результатов испытания, а главным образом *относительная точность*. Поэтому проверка всех измерительных приборов не представляет такого значения, как надлежащая организация самого испытания, соблюдение одинаковой нагрузки, применение одинакового горючего, точно одинаковое состояние установки при обоих испытаниях и т. д. Даже условия погоды должны быть, по возможности, одинаковыми, или же их различное влияние должно быть учтено при обработке результатов.

Допуски. Поскольку даже при самых тщательных испытаниях всегда еще остаются источники ошибок, приходится и при приемочных испытаниях принимать известные допуски, которые, если это не обусловлено иначе, не должны, согласно правилам, превышать $\pm 5\%$.

Продолжительность испытаний. Желательно делать испытание возможно более продолжительным, так как наибольшие ошибки в оценке состояния происходят в начале и в конце испытания. Их влияние на общий результат будет тем меньше, чем продолжительнее было испытание. Приемочные испытания, согласно германским «Правилам», должны продолжаться не менее 6 часов. Только при частичных испытаниях допускается сокращение этого времени. Следует отметить, что во многих случаях испытание может быть сделано более продолжительным, лишь если начать его сравнительно скоро после растопки. В таких случаях лучше ограничить время испытания, но зато в течение всего испытания работать при установившемся состоянии.

Отсчеты и записи. Для получения точного результата необходимо отсчитывать и записывать через возможно короткие промежутки времени (примерно через каждые 5 или 10 минут) показания всех измерительных приборов. Важнейшие цифры рекомендуются фиксировать графически немедленно после отсчета (рис. 152), чтобы сразу же распознавать сильно отклоняющиеся от нормы значения и иметь возможность исправить ошибку повторным испытанием. В таблице 21 приведены отсчитываемые величины, полученные при одном испытании на паробразование. Отсчеты производились каждые 10 минут. Важнейшие из них представлены на рис. 152 графически, в зависимости от времени.

Промежуточные итоги. При сравнительно длительных испытаниях весьма полезно проводить промежуточные итоги, при которых строго определяются израсходованные до того или иного момента количества воды и горючего. Таким образом все испытание разбивается на

несколько самостоятельных частей, и при последующей обработке результатов это дает возможность судить о том, находился ли котел в течение всего испытания в установившемся состоянии. При этом можно исправлять более крупные ошибки и, в случае надобности, совсем исключать те отрезки испытания, в которых наблюдались такие ошибки.

Определение расхода горючего и воды. Особые трудности представляет точное определение количества сожженного за отдельные периоды испытания и в течение всего испытания топлива и испаренной за те же отрезки времени воды. Причина этого заключается в том, что измерением можно определить только количество поданного в топку, но не количество сожженного топлива. Что же касается измерения количества питательной воды, то и здесь определяется не количество испаренной, а только количество поданной в котел воды.¹

Для того чтобы подводить правильные промежуточные и окончательные итоги и достигнуть соответствия между количествами израсходованного и действительно сожженного угля и между количествами израсходованной и действительно испаренной воды, необходимо позаботиться о том, чтобы к моменту окончания данного периода испытания в котле находились точно такие же количества угля и воды, как и в начале испытания, и, далее, чтобы уголь находился в первоначальной же фазе сгорания, а вода имела первоначальное же теплосодержание.

Указания для подведения итогов. При подведении промежуточных и окончательных итогов следует соблюдать следующие правила:

1. Слой топлива должен иметь такую же толщину, как и в момент начала испытания. При ручной засыпке горючего в топку необходимо кроме того так выбирать моменты засыпки, чтобы они были распределены во времени равномерно относительно момента начала испытания и заключительных моментов отдельных частей испытания (например за полчаса до начала испытания и за полчаса до конца каждой части испытания).

2. Высота уровня воды, давление и расход пара должны быть в последний момент такими же, как при начале испытания. Если конечное давление, как это часто бывает неизбежно, несколько отличается от начального давления, то отдельные части испытания заканчивают при точно одинаковом уровне воды и соответственно перечисляют полученные значения. В моменты окончания отдельных частей испытания необходимо обращать особое внимание на то, чтобы уровень воды заметно не колебался, так как в противном случае невозможен точный отчет. Спокойного уровня воды можно достигнуть в случае равномерного и не слишком большого расхода пара и при выключенном питании. Если расход пара при начале и при конце испытания различен, то будет различно и содержание в воде паровых пузырьков, и тогда уровень воды не представит надежного масштаба для веса содержащегося в котле пара. Одинаковый расход пара в виду этого весьма важен.

Определение количества золы. Определение количества золы также требует особой тщательности. Уже за полчаса или за час до начала испытания котел должен находиться под действием равномерного огня в топке, соответствующего испытательной нагрузке. В момент начала испытания весь шлак должен быть удален. Затем количество шлака определяется в заключительные

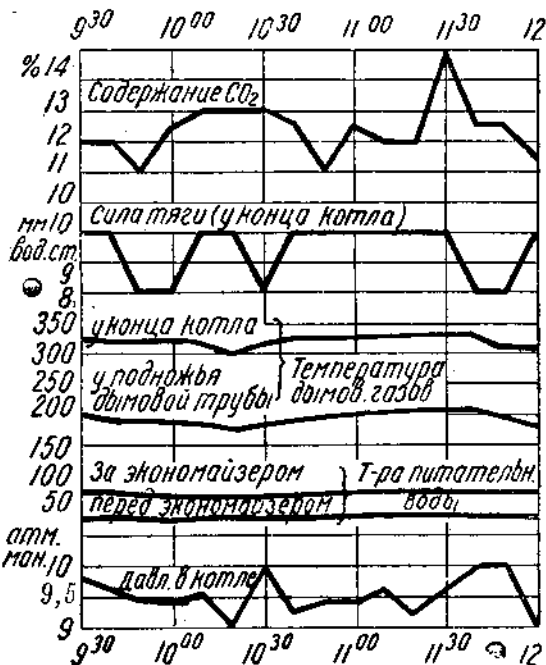


Рис. 152. Графическое изображение значений, отсчитанных при испытании на парообразование.

¹ Правда, во время испытания можно применять выверенные паромеры, но и они не дают количества испаренной воды, так как некоторые потери, например от выпуска пара через предохранительные клапаны, все равно не могут быть измерены.

ТАБЛИЦА 21.

Пример записи отсчитанных показаний при испытании на парообразование.

Время	Состав дымовых газов у конца котла		Сила тяги				Температура газов			Температура питательной воды		Давление в котле	Температура перегретого пара	Примечания
	CO ₂	CO ₂ + O ₂	под решеткой	над решеткой	у конца котла	у основания дымовой трубы	воздух для горения	отхо- дящие газы		перед	за			
								у конца котла	у основания дымовой трубы					
ч. м.	%		мм вод. ст.				°C			°C		атм. изб.	°C	
9 31	12	19,6	0	3	10	22	28	325	198	28	70	9,8	—	Начало испытания (Устан. состояние)
40	12	19,6	0	3	10	22	29	320	190	28	70	9,6	—	
50	11	19,7	0	2	8	22	29	320	188	26	65	9,4	—	
10 00	12,5	19,6	0	2	8	22	30	320	188	24	65	9,4	—	Заслонка прикрыта
10	13	19,0	0	3	10	22	30	315	185	29	65	9,5	—	
20	13	19,6	0	3	10	22	30	300	178	27	65	9,0	—	
30	13	19,8	0	2	8	22	30	320	183	26	65	10,0	—	Заслонка открыта шире
40	12,5	19,7	0	3	10	22	30	325	192	28	68	9,2	—	
50	11	19,8	0	3	10	22	31	325	198	27	70	9,4	—	
11 00	12,5	19,5	0	3	10	22	31	325	198	31	69	9,4	—	Заслонка прикрыта
10	12	19,7	0	3	10	22	31	330	202	30	70	9,6	—	
20	12	19,6	0	3	10	22	31	330	203	30	70	9,2	—	
30	15	18,8	0	3	10	22	32	330	203	30	70	9,6	—	Заслонка открыта шире
40	12,5	19,6	0	2	8	22	32	330	204	30	71	10,0	—	
50	12,5	19,5	0	2	8	22	32	310	191	29	70	10,0	—	
12 00	11,5	19,7	0	3	10	22	32	310	183	29	71	8,8	—	Заслонка открыта шире
10	11,5	19,8	0	3	10	22	33	315	180	27	69	10,0	—	
20	12	19,6	0	2	8	22	33	320	183	26	68	10,0	—	
30	14	19,0	0	2	8	22	33	330	190	26	69	10,0	—	Заслонка прикрыта
40	13	19,4	0	3	10	22	33	330	198	26	67	9,6	—	
50	12	19,5	0	3	10	22	34	330	203	28	65	10,0	—	
13 00	12	19,6	0	2	8	22	34	320	201	28	66	10,0	—	Заслонка открыта шире
10	13	19,5	0	2	8	22	34	325	198	28	65	10,0	—	
20	12,5	19,6	0	2	8	22	34	310	188	28	64	10,0	—	
30	12	19,7	0	3	10	22	34	315	186	28	65	9,0	—	Заслонка прикрыта
40	13	19,4	0	3	10	22	34	320	190	28	67	9,6	—	
50	14	19,2	0	3	10	22	34	330	197	28	64	9,2	—	
14 00	12	19,7	0	2	8	22	34	330	202	28	70	10,0	—	Заслонка открыта шире
10	13	19,5	0	2	8	22	34	320	197	27	70	10,0	—	
20	12	19,6	0	3	10	22	34	310	188	26	70	8,4	—	
30	15	18,8	0	2	7	22	34	325	193	27	68	9,0	—	Заслонка открыта шире
40	13	19,6	0	3	10	22	33	325	198	28	66	8,8	—	
50	13	19,5	0	4	12	22	33	325	198	28	65	8,5	—	
15 00	13	19,4	0	4	12	22	33	340	208	28	65	9,0	—	Заслонка открыта шире
10	13	19,4	0	4	12	22	32	355	220	27	66	9,4	—	
20	13	19,5	0	3	10	22	32	345	220	28	65	9,6	—	
30	12	19,7	0	2	8	22	33	320	203	29	65	9,2	—	Заслонка прикрыта
40	14	19,0	0	2	8	22	33	310	188	28	64	9,0	—	
50	14	18,0	0	1	6	22	33	300	180	28	63	10,0	—	
16 00	14	18,5	0	1	6	22	33	300	178	28	60	10,0	—	Заслонка открыта шире
10	12,5	19,7	0	2	8	22	32	315	183	27	60	9,4	—	
20	12	19,7	0	3	10	22	33	315	186	28	61	9,6	—	
32	12	19,6	0	3	10	22	33	325	195	28	61	9,8	—	Конец испытания

моменты отдельных частей испытания, причем необходимо иметь в виду, что, строго говоря, определяется образование шлака не за время испытания, а за несколько более ранний отрезок времени, в зависимости от скорости колосниковой решетки. При вполне равномерной нагрузке это не играет никакой роли, так как лишь передвигается отрезок времени, а величина его остается та же. Но при испытаниях с сильно меняющейся нагрузкой для определения количества шлака целесообразно вычислить, исходя из скорости колосниковой решетки, продолжительность процесса сгорания и измерение количества шлака передвинуть на этот отрезок времени. Таким образом, при продолжительности горения в 30 мин. воронка зольника опорожняется через 30 мин. после начала испытания. Через 30 мин. после окончания первой части испытания определяют количество шлака, затем его определяют через 30 мин. после окончания второй части испытания и т. д.

При горизонтальных колосниковых решетках, когда удаление шлаков производится вручную, эту операцию следует выполнять особенно осторожно и регулярно, так как всякая шуровка влечет за собой значительное нарушение режима. Кроме того необходимо удалять шлак в моменты времени, одинаково отстоящие от начала и конца испытания.

Взятие проб горючего и золы. Особого внимания требует еще взятие проб горючего и золы для определения теплотворной способности и для химического анализа. Вследствие неизбежных неравномерностей и непостоянного состава горючего и золы при этом легко могут произойти крупные ошибки. Поэтому необходимо стремиться к получению возможно лучшего и правильного среднего значения, для чего можно рекомендовать следующий способ. В течение всего испытания через определенные промежутки времени, например через каждые 15 мин., откладывают в сторону небольшое количество топлива (например лопату угля). Полученная таким образом куча угля представляет собой хорошую среднюю пробу, но это количество слишком велико для определения теплотворной способности. Поэтому кучу перелопачивают, затем плоско рассыпают ее по полу и берут около $\frac{1}{4}$ ее количества. Полученную таким способом пробу можно еще подобным же образом неоднократно сокращать, пока не останется один или два килограмма. После этого пробу мелко дробят на металлической плите и насыпают в воздухопроницаемую закрывающуюся жестянку, которую запаивают и тотчас же отправляют в испытательную лабораторию. Если берут несколько проб, например при сравнительных испытаниях, то каждую жестянку необходимо снабдить точным обозначением, чтобы отдельные пробы ни в коем случае нельзя было спутать.

Аналогичным образом берут одну или несколько средних проб золы.

Обработка результатов. Способ обработки результатов испытаний зависит от их цели. При весьма точных испытаниях следует пользоваться формулами, приведенными в приложении к книге.¹ Однако для большинства исследований достаточны приведенные в главе 3 части I более удобные диаграммы, дающие возможность определить различные тепловые потери. Обработка результатов испытания на паробразование, соответственно записям, приведенным в таблице 21, показана в таблице 22.

VIII. ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ СТАТИСТИКА.

Постоянный надзор за котельной установкой можно назвать совершенным только тогда, когда он сопровождается рациональной и наглядной эксплуатационной статистикой, четко отражающей условия в данный момент и в предшествующие периоды времени. Тогда руководитель эксплуатацией, действительно, имеет возможность судить об экономичности работы на основании цифровых данных. Он может быстро заметить всякое изменение в производительности или расходе и своевременно установить, не нужны ли более широкие испытания, очистка и т. д.

Ежедневные записи. Важнейшими объектами ежедневных записей являются расход горючего и воды или пара и вычисляемый отсюда коэффициент кратности испарения. Итоги следует подводить периодически, например еженедельно, ежемесячно и ежегодно, причем по ежедневным записям выводят средние значения.

Расчет специфических показателей. Очень важно вычисление специфических показателей, могущих служить мерилем качества и состояния установки. Внезапное повышение расхода горючего еще не доказывает уменьшения коэффициента полезного действия котла, так как мог повыситься и расход пара. Повышение расхода пара, в свою очередь, не является доказательством увеличения потерь у потребителей пара, так как могло повыситься и производство изделий.

¹ См. стр. 299 до 305.

ТАБЛИЦА 22.

Обработка результатов испытаний на наробразовании котла насыщенного пара с экономайзером.¹
(Средние значения из табл. 21.)

			Примечания
№ испытания дата испытания продолжительность испытания час.			1 15 мая 1924 г. 7,016
Система и заводской номер котла Система топки			В установленном состоянии В работе с 1909 г.
Вологубинский котел № 3727 системы Штеинмюллер Решетка с движущимися колос- вниками и удлиненными отраж. сводам 242,2 — 160,0 — 6,2 1:39			
поверхность нагрева котла м ² " перегревателя м ² " экономайзера м ² " подогревателя воздуха м ² площадь колосниковой решетки м ² отношение площади колосниковой решетки к по- верхности нагрева			
Горючее: род и крупность горючие составные части % вода % золь % верхний предел теплотворной способности ккал/кг нижний " " " " " ккал/кг			Орешек III, копь Рабдох 89,68 2,3 8,02 7608 7376
сожжено всего кг " " " " " кг/час			Согласно исследованию горючего в Ганноверском высшем техническом училище 4700 670

¹ Образец бланка для примочных испытаний паровых котлов, содержащий еще точные данные о гарантийной производительности, расходе энергии и т. д., опубликован в Arch. f. Wärmewirtschaft, 7, 209, 1926.

		Примечания	
Остатки:			
зола и шлаков всего	кг	61,4	
" " " "	кг/час	9,15	
в процентах количества горючего	%	9,15	
способного к горению	%	26,83	
		Согласно исследованию в Ганновском высшем техническом училище	
Питательная вода:			
испирено всего	кг	42 640	Среднее по измерениям питательной воды и пара
" " " "	кг/час	6 080	
температура перед экономайзером	°C	28	
" " за экономайзером	°C	66,5	
Воздух для горения:			
температура перед подогревателем воздуха	°C	32	
" " за подогревателем воздуха	°C	—	
Пар:			
давление в котле	атм. вб.	9,5	
температура за перегревателем	°C	—	
передано тепла в котло	кал/кг	663 — 66,5 = 596,5	
" " перегревателя	кал/кг	—	
" " экономайзера	кал/кг	66,5 — 28 = 38,5	
Всего	кал/кг	635	
Горячие газы:			
температура за котлом	°C	321	
" " у подогревателя воздуха	°C	—	
" " у экономайзера	°C	195	

		Примечания
Горючие газы: Содержание CO_2 за котлом % CO_2 у экономайзера % $(\text{CO}_2 + \text{O}_2)$ за котлом % $(\text{CO}_2 + \text{O}_2)$ у экономайзера % CO за котлом %	12,63 12,1 19,45 — 0	Не измерялось. Аппаратом ОРСА не обнаружено
Сила тяги над колосниковой решеткой . мм вод. ст. " " под " . мм вод. ст. " " за котлом мм вод. ст. " " за экономайзером мм вод. ст.	2,6 0 9 22	
Результаты Коэффициент испарения: коэффициент испарения брутто " " нормальный Напряжение поверхности нагрева: значение брутто $\text{кг}/\text{м}^2 \text{ ч.}$ " " отнесенное к нормальному пару . $\text{кг}/\text{м}^2 \text{ ч.}$ Стоимость топлива за 1 франко кочегарка г. марок/м Стоимость пара г. марок/т Стоимость теплоты: за 1 миллион калорий горючего г. марок	42 640 : 4700 = 9,07 9,07 · 640 : 596,5 = 9,74 9,07 · 640 : 635 = 9,14 6080 : 242,2 = 25 25 · 640 : 596,5 = 26,85 30,75 30,75 : 9,07 = 3,39 30,75 : 7,608 = 4,04	Без экономайзера С экономайзером При отнесении ко всей поверхности нагрева получается: 6080 : (242,2 + 160) · 640 : 635 = 15,1 · 640 : 635 = 15,2 $\text{кг}/\text{м}^2 \text{ ч.}$ При отнесении к нормальному пару, без экономайзера 3,15 г. марок/м При отнесении к нормальному пару, с экономайзером 3,36 г. марок/м Отнесено к верхнему пределу теплотворной способности (при отнесении к нижнему пределу теплотворной способности 4,16 г. марок/м)

	С отнесением к верхнему пре- делу теплотворной способности		С отнесением к нижнему пре- делу теплотворной способности		Примечания
	ккал/кг	%	ккал/кг	%	
Тепловой баланс:					
Получено					
в горючем	7608	100	7376	100	
с воздухом для горения	—	—	—	—	
Всего	—	—	—	—	
Использовано:					
в котле	5410	71	5410	73,3	
в нагревателе	—	—	—	—	
в экономайзере	350	4,6	350	4,74	
Всего	5760	75,6	5760	78,04	
Потерно:					
в свободной теплоте отходящих газов	1047	13,75	815	11,08	С экономайзером
в несоревнившихся газах	0	0	0	0	
в остатках на решетке	184	2,42	184	2,50	
с уносом в сырой	617	8,23	617	8,40	
от охлаждения клапана					
Всего	1848	24,60	1616	21,96	

Кратность испарения уже представляет собой специфический показатель, но и она не всегда решает вопрос об экономичности, так как могли измениться теплосодержание пара и теплотворная способность горючего. Нормальная кратность испарения, отнесенная к нормальному пару в 640 кал/кг, уже более ценна, так как она учитывает теплосодержание пара. Для получения этого показателя необходимы постоянные записи температуры воды и пара. Целесообразно также ежедневно записывать (как основу для исчисления премий котелам) среднее содержание CO_2 и CO , далее — температуру дымовых газов за котлом, за экономайзером и за подогревателем воздуха (для суждения о чистоте поверхностей нагрева). Записывая стоимость горючего и производя от времени до времени испытания его теплотворной способности, можно определить стоимость тепла, т. е. себестоимость определенного количества тепловой энергии (например 1 миллиона калорий), а отсюда и стоимость пара. Наконец, следует вести точную отчетность по расходу энергии в котельной и в цехах, по количеству изготовленных изделий, по расходам на заработную плату, на эксплуатацию и на текущий ремонт. Важнейшими специфическими показателями, подлежащими исчислению в месячных или годовых сводках, являются следующие:

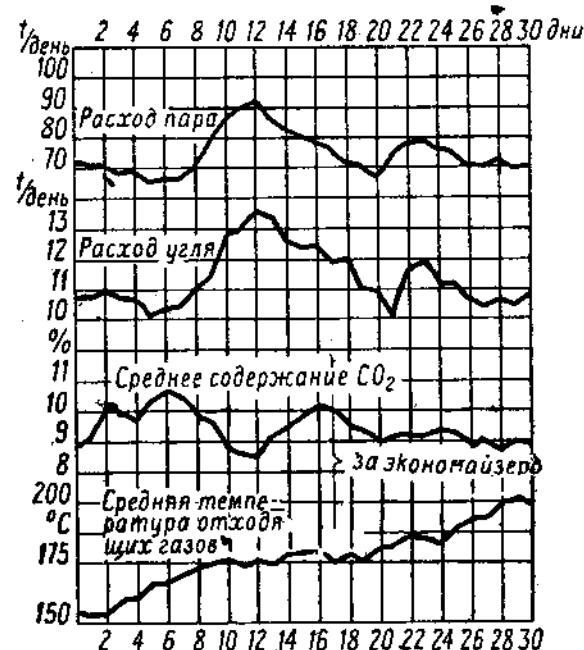


Рис. 153. Графическая эксплуатационная статистика.

Ход кривых показывает, что, несмотря на меньший в течение последних 10 дней расход пара, средняя температура отходящих газов сильно возросла, что свидетельствует о все возрастающем загрязнении поверхности нагрева.

котельной, отнесенный к 1 кг горючего, 1 кг пара или же к израсходованным и произведенным количествам теплоты.

9. Расход теплоты и энергии на 1 кг произведенных изделий.

10. Удельный расход на заработную плату, эксплуатацию и содержание в исправности, отнесенный к 1 кг произведенного пара или же к 1 квт/ч или 1 л.с. ч.

Условные единицы могут быть выбраны различно, в зависимости от местных условий и особых целей статистики. В крупных установках, вместо килограммов, считают на тонны, при электрических машинах — на киловатты и киловатт-часы, при непосредственном приводе от паровой машины — на лошадиные силы и лошадиные силы-часы.

Графическая эксплуатационная статистика. Часто бывает целесообразно выполнение графической сводки по эксплуатационной статистике (рис. 153) с целью лучшего суждения об изменениях тех или иных величин, например температуры дымовых газов. Из рис. 153, например, видно, что температура отходящих газов, несмотря на меньший в последние дни расход пара, сильно возросла, что позволяет заключить о значительном загрязнении поверхности нагрева. Часто бывает даже достаточно только сопоставить полученные цифры в виде целесо-

1. Непосредственно получаемый коэффициент испарения.

2. Нормальный коэффициент испарения.

3. Эксплуатационный к. п. д., т. е. отношение ушедшего из котла за данный период времени количества теплоты к подведенному за то же время ее количеству.

4. Продетные тепловые потери через теплоту в отходящих газах, неполное сгорание, остатки, сажу, унос, лучеиспускание и теплопроводность вследствие перерывов в работе и т. д.

5. Стоимость 1 миллиона калорий горючего.

6. Стоимость 1 миллиона калорий в паре (или 1 т пара).

7. Расход теплоты на производство энергии (в кал/квт ч. или кал/л. с. ч.).

8. Расход теплоты или энергии на все вспомогательные устройства

образно расположенных таблиц. Большую пользу при составлении таких таблиц может принести книга: Michel, Dampfke selbstelektbuch.¹ Однако предлагаемые в ней таблицы не следует заимствовать без критики. Условия в каждом предприятии иные, в виду чего твердых стандартов установить нельзя.

Упомянем еще, что эксплуатационная статистика при сравнительных испытаниях, далеко отстоящих во времени одно от другого, дает хорошее средство для оценки изменений в состоянии котла с течением времени.

VIII. ОБСЛЕДОВАНИЕ И ЧИСТКА КОТЛА.

Для обеспечения эксплуатационной бесперебойности обязательны наружные и внутренние осмотры котла. Частота таких осмотров предписывается соответствующими учреждениями по надзору за паровыми котлами, в зависимости от давности постройки и свойств котла. Сам осмотр также производится служащими котлонадзора. Помимо этих предписанных обследований, управление эксплуатацией само должно пользоваться всякой длительной остановкой котла для детальной проверки состояния всех его ответственных частей. Во время работы состояние котла также должно быть предметом постоянного наблюдения. При всякой неисправности, заставляющей заключить о внутренних повреждениях, сильном образовании накипи и т. д., котел следует возможно скорее остановить и подвергнуть очистке.

Наружный осмотр котла. Наружный осмотр котла, который может производиться и во время работы, начинают с проверки состояния обмуровки топки, дымоходов котла, перегревателя, экономайзера, подогревателя воздуха, борова и дымовой трубы. Неплотности, при работе котла на сильном нижнем дутье, легко обнаруживаются поднесением горячей свечи. Их можно устранять промазыванием пазовым раствором или забивкой изоляционными веществами.

Далее, следует проверить плотность корпуса котла и кипятильных труб. Неисправности этого рода часто обнаруживаются в виде мокрых мест на обмуровке или изоляции, а иногда и звуками капания или ливенья. Очень слабые шумы этого рода можно заметить на слух во время коротких перерывов в работе.

Удаление сажи и летучей золы. При более долгих перерывах в работе наружная поверхность нагрева котла, перегревателя, экономайзера, подогревателя воздуха и т. д. подлежит тщательной очистке от сажи и летучей золы, если эти осадки не были удалены уже во время работы. Впрочем, и при хороших продувателях для сажи и аккуратной ежедневной продувке после более продолжительного периода работы всегда можно обнаружить некоторое осадение сажи. При современном устройстве котельных дымоходов, отличающихся легкостью доступа, очистку можно производить вручную посредством стальных щеток или иных инструментов или же посредством сжатого воздуха. В последнее время в Америке с успехом стали применять промывку, причем промывательная вода вводится сверху под давлением, омывает поверхность нагрева и стекает в жолоба таким образом, что всякое соприкосновение воды с кладкой устранено.²

При очистке неплотные места вдоль сварных и заклепочных швов и у мест ввальцовки обычно обнаруживаются отложением солей.

Все неплотности необходимо немедленно устранять. В местах ввальцовки трубы можно подвальцевать, при более значительной неплотности их сменяют. Выпучившиеся или уже разорвавшиеся кипятильные трубы, само собой разумеется, должны быть немедленно заменены новыми. Неплотности в заклепочных швах, в местах сварки и у подчеканиваемых кромок не следует исправлять силами своих рабочих, особенно если предприятие мелкое, а необходимо приглашать монтеров с котельных заводов. Иногда же следует уведомить и котлонадзор. То же самое относится к весьма опасным трещинам в заклепочных швах, кромок и т. д.

Очистка от сажи, уноса и приставших шлаков не должна ограничиваться одной поверхностью нагрева, а должна распространяться на топочную камеру, зольник, обмуровку дымоходов котла, боров и нижнюю часть дымовой трубы. Очистка борова и дымовой трубы должна производиться, в зависимости от рода горючего, не реже 4—8 недель, и если путем открытия всех заслонок позаботиться о хорошем проветривании, то к очистке можно приступить уже через сутки после остановки котла. В борове иногда уже за короткое время накапливается в большом количестве сажа, сужающая сечение для прохода газов и иногда препятствующая плотному закрыванию дымовых заслонок. Кладку в топочной камере и котельных дымохо-

¹ Изд. R. Oldenbourg, Мюнхен и Берлин, 1927.

² См. Power, 67, 677, 1928.

дах также надлежит очищать постукиванием и посредством щеток от приставших сажи и плаков, но при этом необходимо действовать весьма осторожно, чтобы не повредить самой кладки.

Очистка принадлежностей котелгарки. От времени до времени надлежит осматривать и очищать и прочие части котельной установки, например фильтры водоочистительного устройства, баки для питательной воды, трубопроводы для свежей воды, резервуары водоочистительной установки и т. д. Все эти работы обычно могут производиться в течение самых коротких перерывов, а при наличии обходных трубопроводов их иногда можно выполнять и во время работы.

Во время более долгих рабочих перерывов следует осматривать колосниковую решетку и заменять все поврежденные колосники, чинить изоляцию котла, топочной камеры и трубопроводов, а также проверять состояние скребков, топочных порогов, механизмов топок с движущимися колосниками и всех вспомогательных машин (питательных насосов, вентиляторов и т. д.) и выполнять необходимые исправления.

Чем основательнее проверяется, очищается и исправляется во время более долгих рабочих перерывов вся установка, тем более бесперебойно и экономично она будет работать, тем более обеспечена будет ее надежность, и тем меньше будет опасность крупных повреждений, вызывающих значительные ремонтные расходы.

Внутренний осмотр котла. Наряду с наружным осмотром котла, а также проверкой и содержанием в порядке всей установки, весьма важное значение имеет и внутренний осмотр котла. Этот осмотр обычно производят раз в два года, причем его выполняет учреждение по надзору за паровыми котлами. Этот осмотр охватывает проверку состояния днищ, заклепочных и сварных швов, кофлов водоуказательных и питательных труб, манометров, предохранительных клапанов и обследование внутренних стенок в отношении разъедания и образования ржавчины. Особое внимание надлежит обращать при этом на борта днищ, особенно у старых котлов, которые, вопреки правилам, имеют слишком малый радиус переходных закруглений.

Удаление грязи и накипи. Осмотру должна предшествовать основательная внутренняя очистка, причем должна быть удалена промывкой грязь, а из кипятильных труб и верхних барабанов должна быть устранена накипь. Хорошая очистка от накипи представляет собой одну из самых насущных задач. Цилиндрические и жаротрубные котлы, а также барабаны водотрубных котлов освобождают от накипи вручную, с помощью молотка и зубила, щеток и т. п. Для кипятильных труб целесообразно пользоваться маленькими электрическими, пневматическими или гидравлическими фрезами или ударными инструментами, посредством гибкого вала связанными с двигателем и вводимыми внутрь водяных труб. Эти приборы хорошо оправдались на практике, но, пользуясь ими, надо следить за тем, чтобы не повредить самих металлических стенок. Поэтому фрезы всегда должны иметь несколько меньший диаметр, чем трубы. После удаления фрезой накипи кипятильные трубы надлежит основательно промыть водой, чтобы внутри котла не осталось и отделенной от стенок накипи. При очень жесткой накипи, вместо механических инструментов, применяют пятипроцентный раствор едкого натра, растворяющего накипь.

Хотя при безукоризненной очистке котельной питательной воды в котле не должно образовываться накипи, тем не менее следует пользоваться всяким случаем для проверки в этом отношении состояния внутренности котла, так как очистка воды не всегда совершенна, даже в образцовых предприятиях, особенно при сильных колебаниях в составе свежей воды. Поэтому можно рекомендовать подвергать котлы не реже одного раза в год, а при усиленной работе и неблагоприятных условиях снабжения питательной водой — и чаще, внутреннему осмотру и, в случае надобности, очистке. При этом случае руководитель эксплуатации должен детально обследовать котел в отношении разъедания, ржавчины, трещин в закраинах и заклепочных швах и, обнаружив какое-либо повреждение, немедленно уведомлять об этом котлонадзор.

Помимо кипятильных труб котла, надлежит от времени до времени очищать от грязи и накипи и трубы экономайзера. Грязь можно удалять промывкой непосредственно после окончания работы. Накипь снимают, так же как и в водяных трубах, с помощью фрез.

Плотное закрытие после чистки. После внутренней очистки и осмотра котла надлежит с особой тщательностью позаботиться о том, чтобы снова плотно закрыть его. В особенности это относится к лазам, лючкам перегревателя, а также к коническим лючкам водяных камер и экономайзеров. Крышки этих лючков должны быть хорошо отфрезерованы и пригнаны. Плотность всех затворов после наполнения котла водой проверяется холодной гидравлической пробой. Если для наполнения применяют горячую воду, то вводить ее следует весьма медленно, во избежание образования тепловых напряжений. Если при гидравлической пробе обнаруживаются значительные неплотности, то необходимо снова выпустить воду и уплотнить неплотные места.

При мелких неплотностях можно медленно начинать растопку и, по мере нагревания воды, от времени до времени подтягивать уплотнительные соединения, благодаря чему обычно удается устранить неплотности.

IX. НЕИСПРАВНОСТИ И ВЗРЫВЫ КОТЛОВ.

Причины. При тщательном обслуживании и надзоре крупные повреждения котлов представляют собой редкость. Большинство серьезных несчастных случаев объясняется неправильным обслуживанием котельной установки и недостаточной очисткой воды и котла. В первые послевоенные годы случился ряд серьезных повреждений и тяжелых по своим последствиям взрывов, которые большей частью были вызваны непригодным материалом и дефектами изготовления. Однако, после того как в последние годы предписания, касающиеся материалов, изготовления и надзора были существенно изменены в смысле повышения требований, число взрывов сильно сократилось, несмотря на постоянное увеличение давлений и напряжений.

Тем не менее, вследствие непредвиденных обстоятельств, неосмотрительности и невнимательности при обслуживании, котлы и теперь могут получить повреждения, и руководитель эксплуатации должен ясно представлять себе, какие меры ему следует принять при внезапных серьезных повреждениях.

Мероприятия. При всяких предвестниках взрыва котла, особенно же при появлении отдулин на поверхности нагрева, мелких трещин, из которых выходит пар или вода, и других подозрительных и непонятных явлений, необходимо немедленно прекратить действие котельной топки, т. е. при топках для угольной пыли, нефтяных и газовых топках прервать подачу горючего, при колосниковых решетках — выгresti жар из топочных дверей. Затем котел изолируют от паровой магистрали, для чего закрывают паровой вентиль и медленно выпускают пар через постепенные разгружаемые предохранительные клапаны или же часть воды — через водоспускные трубы. Благодаря этому давление падает. Лишь после полного устранения опасности взрыва можно осмотреть поврежденные места и, насколько это возможно, исправить их. Во многих случаях необходимы полная остановка и детальный ремонт с привлечением к нему завода, изготовившего котел, и котлонадзора.

Взрывы дымовых газов. Взрывы дымовых газов чаще всего вызываются неполным сгоранием и внезапным прониканием постороннего воздуха. Иногда они бывают безвредны и проявляются лишь глухим шумом. Но иногда обмуровка, а в особенно серьезных случаях и весь котел повреждаются и разрушаются внезапным толчком взрыва. Если мелкие взрывы случаются слишком часто, котел следует выключить из работы и детально обследовать. Обычно в таких случаях оказывается, что топочная камера слишком низка, или что дымоходы слишком тесны, например сильно забиты сажей, вследствие чего газы не имеют свободного прохода. В подобных случаях дымоходы котла необходимо очистить, а иногда и надлежащим образом перестроить. Кроме того рекомендуется установка в высоко расположенных местах особых предохранительных клапанов, которые при образовании положительного давления автоматически открываются наружу. Во время работы необходимо следить за тем, чтобы сгорание было полным и чтобы в топочную камеру не мог проникнуть посторонний воздух. Настоятельно необходима ежедневная очистка поверхности нагрева от сажи посредством продувателей и частое устранение из котельных дымоходов твердых отложений летучей золы.¹

Недостаток воды. Весьма опасно падение уровня воды ниже нижней метки, что может случиться вследствие внезапной порчи питательного насоса, вследствие засорения или неплотности питательного трубопровода или вследствие неплотностей в самом котле. Еще опаснее может быть порча водосказательного прибора вследствие засорения, так как кочегар при этом вообще не заметит понижения водяного уровня. Если недостаток воды удалось заметить, то котел необходимо немедленно разобщить с паровой магистралью и заглушить огонь или, в особенно спешных случаях, выгresti жар. После этого, если не обнаруживается никаких видимых повреждений и если питательные приборы в порядке, следует медленно начать питание, но только

¹ Мелкими, но непрерывными взрывами дымовых газов и явлениями резонанса объясняется, повидимому, наблюдаемое в некоторых котлах весьма неприятное *гудение*, которое обычно удается устранить перемеской угля (сжиганием тощих углей вместо газовых, крупнокускового угля вместо мелкого) или изменением подвода воздуха. См. по этому вопросу весьма подробные исследования W e s k'a, *Das Brummen der Dampfkessel*, изд. VDI, Берлин, 1927, далее Arch. f. Wärmewirtschaft, 8, 290, 1927, и Maschinenschaden, 5, 223, 1928. Более старые материалы о гудении паровых котлов можно найти в Zeitschr. d. Bayer. Rev.-Vereins, 15, 1911; 16, 1912 и 20, 1925.

в том случае, если водовпускное отверстие еще находится ниже уровня воды. Если же изнутри котла доносится глухой шум, это показывает, что вода поступает в паровое пространство. В этом случае питание необходимо приостановить и котел выключить из работы.

Чрезмерное питание котла. Питание котла выше верхней метки может привести к увлечению воды в паропровод, к водяным ударам и серьезным повреждениям перегревателя, арматуры, трубопроводов, турбин и т. д. В таких случаях питание необходимо немедленно приостановить, а при особенно значительном избытке воды — заглушить огонь и начать понемногу закрывать главный запорный клапан. Затем воду через спускную трубу осторожно спускают, пока уровень не понизится до нормы.

Другие неисправности. Аналогичные меры принимают при разрывах труб, повреждении труб перегревателя и экономайзера, порче важнейших органов арматуры (возвратных клапанов, предохранительных клапанов, водоуказательных стекол, манометров и т. д.). Самой надежной мерой при всех крупных повреждениях является немедленное выгребание жара или тушение огня и изоляция поврежденных частей от остальной установки. Быстрое, но осмотнительное вмешательство заведывающего эксплуатацией в большинстве случаев может предупредить крупные аварии. Кочегар и все занятые в кочегарке рабочие должны быть знакомы с важнейшими предохранительными мерами при непредвиденных случайностях, чтобы в крайнем случае, при невозможности уведомить старших служащих, действовать самостоятельно. Большинство этих мер не требует научной подготовки, а лишь здравого смысла, присутствия духа и быстрых, но разумных действий.¹

¹ На стр. 192 была уже сделана ссылка на «Правила устройства, установки, содержания и освидетельствования паровых котлов, пароперегревателей и водяных экономайзеров» (обязательное постановление НКТ СССР от 2 сентября 1929 г., № 287). Правила эти полностью перепечатаны в 3-м издании книги: Те ц и е р и Г е й н р и х, Паровые котлы, Москва 1930. На русском языке имеется также ряд специальных трудов, посвященных вопросам безопасности котельных установок: 1) В. Н. Ш р е т е р, Паровые котлы и пароприемники, изд. «Вопросы труда», Москва, 1928. 2) «Проблемы безопасности в эксплуатации котельных установок». Перевод с нем. под редакцией инж. М. С. Горфинкеля, Ленинград, 1928. 3) Б. А. М и х а й л о в, Безопасность паровых котлов, Москва, 1928. 4) О. А. Р и в о ш, Техника безопасности, вып. 1 (статья проф. А. А. Радцига), Ленинград, 1927. *Прим. ред.*

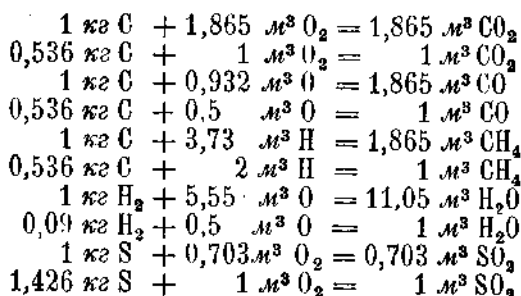
ПРИЛОЖЕНИЯ.

1. ВАЖНЕЙШИЕ ФОРМУЛЫ.¹

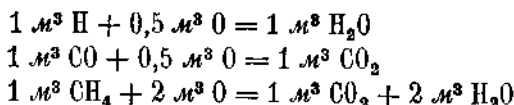
(Все объемные меры отнесены к 0° и 760 мм рт. ст.).

1. Формулы горения.

Для твердых и жидких топлив.



Для газообразных топлив.



2. Теоретическое количество кислорода и воздуха на 1 кг (1 м³) горючего

(исчисляется по составным частям горючего).

Для твердых и жидких топлив (С, Н, S и О в весовых процентах топлива).

$$\begin{aligned}
 \text{О}_{\text{теор}} &= 0,02667 \text{ С} + 0,08 \text{ Н} + 0,01 \text{ S} - 0,010 \text{ кг/кг} \\
 &= 0,0187 \text{ С} + 0,056 \text{ Н} + 0,007 \text{ S} - 0,0070 \text{ м}^3/\text{кг} \\
 \text{L}_{\text{теор}} &= 0,125 \text{ С} + 0,345 \text{ Н} + 0,0431 \text{ S} - 0,04310 \text{ кг/кг} \\
 &= 0,089 \text{ С} + 0,267 \text{ Н} + 0,0333 \text{ S} - 0,03330 \text{ м}^3/\text{кг}.
 \end{aligned}$$

Для газообразных топлив (СО, СН₄; Н и О в объемных процентах топлива).

$$\begin{aligned}
 \text{О}_{\text{теор}} &= 0,005 \text{ СО} + 0,02 \text{ СН}_4 + 0,005 \text{ Н} - 0,010 \text{ м}^3/\text{м}^3 \\
 \text{L}_{\text{теор}} &= 0,0238 \text{ СО} + 0,0952 \text{ СН}_4 + 0,0238 \text{ Н} - 0,05760 \text{ м}^3/\text{м}^3.
 \end{aligned}$$

¹ См. единицы мер, их обозначения, химические символы и прочие обозначения во вступлении, стр. 6 и след.

3. Коэффициент избытка воздуха $\alpha = \frac{L_{\text{действ}}}{L_{\text{мин}}}$

(исчисляется по составу топлива и дымовых газов).

Для твердых и жидких видов горючего (k_1 , k_2 , ch , h , o и n — в объемных процентах сухих газообразных продуктов горения, C и C_0 — в весовых процентах горючего).

$$\alpha = \frac{\frac{21}{79} n}{\frac{21}{79} n - o - k_1 - \frac{k_2}{2} + ch + \frac{h}{2} + \frac{C}{C_0} (k_1 + k_2 + ch)}$$

для неполного сгорания,

$$\alpha = \frac{\frac{21}{79} n}{n - \frac{79}{21} o}$$

для полного сгорания.

Для газообразных топлив (k_1 , k_2 , ch , o и n — в объемных процентах сухих газообразных продуктов горения, CO , CO_2 , CH_4 и N — в объемных процентах топлива).

$$\alpha = \frac{\frac{21}{79} \left[n - \frac{N}{CO + CO_2 + CH_4} (k_1 + k_2 + ch) \right]}{\frac{21}{79} \left[n - \frac{N}{CO + CO_2 + CH_4} (k_1 + k_2 + ch) \right] - \left[o - \frac{k_2}{2} - 2ch - \frac{h}{2} \right]}$$

для неполного сгорания,

$$\alpha = \frac{n - \frac{N}{CO + CO_2 + CH_4} \cdot k_1}{n - \frac{N}{CO + CO_2 + CH_4} \cdot k_1 - \frac{79}{21} o}$$

для полного сгорания.

4. Количество дымовых газов на 1 кг (1 м³) горючего.

Для твердых и жидких видов горючего.

$$V_r = \frac{C_0}{0,536 (k_1 + k_2 + ch)} + \frac{1}{100} \left[\frac{9H + W}{0,804} - \frac{C_0}{0,536} \cdot \frac{k_1 + 2ch}{k_1 + k_2 + ch} \right] \dots \text{м}^3/\text{кг}$$

для неполного сгорания;

$$V_r = \frac{C_0}{0,536 k_1} + \frac{9H + W}{80,4} \dots \text{м}^3/\text{кг}$$

для полного сгорания.

Первый член правой стороны обоих уравнений представляет собой объем сухих дымовых газов $V_{c.r}$, второй член — объем влажных дымовых газов $V_{в.r}$.

Для приближенных расчетов $V_{c.r}$ можно определять по теплотворной способности Q , причем получается

$$V_{c.r} = \frac{1,1Q \cdot n}{1000} \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Для газообразных топлив.

$$V_r = \frac{CO + CO_2 + CH_4}{k_1 + k_2 + ch} + \frac{1}{100} \left[H + 2CH_4 - \frac{CO + CO_2 + CH_4}{k_1 + k_2 + ch} (h + 2ch) \right] + 1,25W \dots \text{м}^3/\text{м}^3$$

для неполного сгорания,

$$V_r = \frac{CO + CO_2 + CH_4}{k_1} + \frac{1}{100} [H + 2CH_4] + 1,25W \dots \text{м}^3/\text{м}^3$$

для полного сгорания.

5. Максимальное содержание углекислоты.

Для твердых и жидких топлив.

$$k_{1\max} = \frac{21}{1 + 2,369 \frac{H - O}{C}}$$

Для всех видов топлива.

$$k_{1\max} = \frac{k_1 + k_2 + ch}{20,9 - o + 0,5955 k_2 + 1,582 ch + 0,1865 h}$$

6. Теплосодержание дымовых газов, горючего и воздуха для горения.

Дымовые газы: $I_x = C_{p_{cp}}' \cdot t_x$. . . кал/м³ ($C_{p_{cp}}'$ между 0° и t_x)

Горючее: $I_r = C_{p_{cp}}'' \cdot t_r$. . . кал/м³ ($C_{p_{cp}}''$ между 0° и t_r)

Воздух для горения: $I_v = C_{p_{cp}}''' \cdot t_{воз}$. . . кал/м³ ($C_{p_{cp}}'''$ между 0° и $t_{воз}$)

7. Теплотворная способность.

Формула германского объединения обществ котлонадзора (для твердых видов горючего верна лишь приближенно, для жидких и газообразных горючих не применима)

$$Q_n = 80,8 C + 342 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 22,2 S \quad \text{ кал/кг}$$

$$Q_n = 80,8 C + 288 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 22,2 S - 6 W \quad \text{ кал/кг}$$

8. Теоретическая температура горения.

$\{C_{p_{cp}}', C_{p_{cp}}'' \text{ и } C_{p_{cp}}'''\text{ — теплоемкости газообразных продуктов сгорания (между 0° и } t_r), \text{ горючего (между 0° и } t_r) \text{ и воздуха для горения (между 0° и } t_{воз})\}$

$$t_r = \frac{Q_n}{V_r \cdot C_{p_{cp}}'} \quad ^\circ\text{C}$$

для $t_{воз}$ и $t_r = 0^\circ$,

$$t_r = \frac{Q_n + C_{p_{cp}}'' \cdot t_r}{V_r \cdot C_{p_{cp}}'} \quad ^\circ\text{C}$$

для подогретого топлива (при твердых горючих $C_{p_{cp}}''$ вместо $C_{p_{cp}}''$),

$$t_r = \frac{Q_n + L_{мин} \cdot C_{p_{cp}}''' \cdot t_{воз}}{V_r \cdot C_{p_{cp}}'} \quad ^\circ\text{C}$$

для подогретого воздуха,

$$t_r = \frac{Q_n + C_{p_{cp}}'' \cdot t_m + L_{мин} \cdot C_{p_{cp}}''' \cdot t_{воз}}{V_r \cdot C_{p_{cp}}'} \quad ^\circ\text{C}$$

для подогретого горючего и подогретого воздуха (при твердых горючих $C_{p_{cp}}''$ вместо $C_{p_{cp}}''$).

9. Сожженный углерод.

Для твердых и жидких топлив.

$$C_o = \frac{\left[3 \left(H - \frac{O}{8} \right) + \frac{3}{8} S + \frac{9}{79} N \right] (k_1 + k_2 + ch)}{\frac{21}{79} n - k_1 - \frac{k_2}{2} + ch + \frac{h}{2} - o}$$

10. Потеря с теплотой отходящих газов V_A .

Для твердых и жидких топлив.

а) Теплота сухих отходящих газов:

$$V_{r_1} = \frac{C_0}{0,536(k_1 + k_2 + ch)} \cdot C_{\text{ср}}(t_A - t_{\text{воз}}) \dots \text{кал/кг}$$

для неполного сгорания;

$$V_{r_1} = \frac{C_0}{0,536 k_1} \cdot C_{\text{ср}}(t_A - t_{\text{воз}}) \dots \text{кал/кг}$$

для полного сгорания.

б) Теплота влажных отходящих газов:

$$V_{r_2} = \frac{0,46}{100} \left[9H + W - 1,5C_0 \frac{b + 2ch}{k_1 + k_2 + ch} \right] (t_A - t_v) \dots \text{кал/кг}$$

для неполного сгорания;

$$V_{r_2} = \frac{0,46}{100} (9H + W)(t_A - t_v) \dots \text{кал/кг}$$

для полного сгорания.

в) Теплота испарения влажных отходящих газов:

$$V_{r_3} = 6 \left(9H + W - 1,5C_0 \frac{h + 2ch}{k_1 + k_2 + ch} \right) \dots \text{кал/кг}$$

для неполного сгорания;

$$V_{r_3} = 6(9H + W) \dots \text{кал/кг}$$

для полного сгорания.

При расчете по нижней теплотворной способности эта потеря отпадает.

Для газообразного горючего.

($C'_{\text{ср}}$, $C''_{\text{ср}}$ и $C'''_{\text{ср}}$ — теплоемкости сухих газообразных продуктов горения, влажного топлива и воздуха).

а) Теплота сухих отходящих газов

$$V_{r_1} = \frac{CO + CO_2 + CH_4}{k_1 + k_2 + ch} \cdot C'_{\text{ср}} \cdot t_A - C''_{\text{ср}} \cdot t_v - L_{\text{мпп}} \cdot \lambda \cdot C'''_{\text{ср}} \cdot t_{\text{воз}} \dots \text{кал/м}^3$$

для неполного сгорания;

$$V_{r_1} = \frac{CO + CO_2 + CH_4}{k_1} \cdot C'_{\text{ср}} \cdot t_A - C''_{\text{ср}} \cdot t_v - L_{\text{мпп}} \cdot \lambda \cdot C'''_{\text{ср}} \cdot t_{\text{воз}} \dots \text{кал/м}^3$$

для полного сгорания.

б) Теплота влажных отходящих газов:

$$V_{r_2} = \frac{0,804}{100} \cdot 0,46 \left[H + 2CH_4 - \frac{CO + CO_2 + CH_4}{k_1 + k_2 + ch} (h + 2ch) \right] t_A + 0,46 W (t_A - t_v) \dots \text{кал/м}^3$$

для неполного сгорания;

$$V_{r_2} = \frac{0,804}{100} \cdot 0,46 (H + 2CH_4) t_A + 0,46 W (t_A - t_v) \dots \text{кал/м}^3$$

для полного сгорания.

в) Теплота испарения влажных отходящих газов:

$$V_{г_1} = 6 \cdot 0,804 \left[H + 2CH_4 - \frac{CO + CO_2 + CH_4}{k_1 + k_2 + ch} (h + 2ch) \right] \dots \text{кал/м}^3$$

для неполного сгорания;

$$V_{г_1} = 6 \cdot 0,804 (H + 2CH_4) \dots \text{кал/м}^3$$

для полного сгорания.

При расчете по нижней теплотворной способности эта потеря отпадает.

11. Потеря от химической неполноты сгорания V_n .

Для твердых и жидких топлив.

$$V_n = \frac{C_o}{0,536 (k_1 + k_2 + ch)} (30,5k_2 + 94,8ch + 30,5h) \dots \text{кал/кг}$$

с отнесением к верхней теплотворной способности;

$$V_n = \frac{C_o}{0,536 (k_1 + k_2 + ch)} (30,5k_2 + 85,16ch + 25,68h) \dots \text{кал/кг}$$

с отнесением к нижней теплотворной способности.

Для газообразных топлив.

$$V_n = \frac{CO + CO_2 + CH_4}{k_1 + k_2 + ch} (30,5k_2 + 94,8ch + 30,5h) \dots \text{кал/м}^3$$

с отнесением к верхней теплотворной способности;

$$V_n = \frac{CO + CO_2 + CH_4}{k_1 + k_2 + ch} (30,5k_2 + 85,16ch + 25,68h) \dots \text{кал/м}^3$$

с отнесением к нижней теплотворной способности.

12. Потеря от недожога топлива в очаговых остатках V_{o_1} .

$$V_{o_1} = C' \cdot 81 \dots \text{кал/кг}$$

(C' — содержащийся в золе углерод в объемных процентах);

$$V_{o_1} = Q_o \cdot \frac{R}{B} \dots \text{кал/кг}$$

(Q_o — теплотворная способность остатков, B — расход горючего и R — количество остатков за одинаковое время).

13. Потеря с теплотой в остатках V_{o_2} .

$$V_{o_2} = \frac{R}{B} \cdot (t_o - t_{воз}) \cdot c_{ср} \dots \text{кал/кг}$$

(t_o — температура остатков, $c_{ср}$ — их средняя теплоемкость).

14. Коэффициенты полезного действия.

(Объяснение обозначений см. стр. 113).

Общая формула:

$$\eta = \frac{\text{использованная теплота}}{\text{вся подводимая теплота}}$$

Для котла, включая перегреватель, экономайзер и подогреватель воздуха,

$$\eta_{\text{общ}} = \frac{D(i'' - i')}{B \cdot Q}$$

Частичные коэффициенты полезного действия:
для котла

$$\eta_k = \frac{D(i''_{n.p.} - i'_2)}{B(Q + I_{воз_1})}$$

для перегревателя

$$\eta_n = \frac{D(i''_{n.p.} - i'_{n.p.})}{B(Q + I_{воз_1})}$$

для экономайзера

$$\eta_o = \frac{W(i'_2 - i'_1)}{B(Q + I_{воз_1})}$$

для подогревателя воздуха

$$\eta_{в} = \frac{I_{воз_2}}{Q}$$

$$\eta_{общ} = \eta_k + \eta_n + \eta_o + \eta_{в} (\eta_k + \eta_n + \eta_o).$$

Аналогичным образом могут быть вычислены относительные коэффициенты полезного действия (ϵ) и индивидуальные коэффициенты полезного действия (η).

Относительные коэффициенты полезного действия:

для перегревателя

$$\epsilon_n = \frac{D(i''_{n.p.} - i'_{n.p.})}{B(I_1 - I_2)}$$

для экономайзера

$$\epsilon_o = \frac{W(i'_2 - i'_1)}{B(I_2 - I_3)}$$

для подогревателя воздуха

$$\epsilon_{в} = \frac{I_{воз_2}}{I_3 - I_4}$$

Индивидуальные коэффициенты полезного действия:

для перегревателя

$$\eta'_n = \frac{D(i''_{n.p.} - i'_{n.p.})}{B \cdot I_1}$$

для экономайзера

$$\eta'_o = \frac{W(i'_2 - i'_1)}{B \cdot I_2}$$

для подогревателя воздуха

$$\eta'_{в} = \frac{I_{воз_2}}{I_3}$$

Отнесены к количеству
подведенной в топку
теплоты.

Отнесены к количеству
затраченной в отдельных
частях установки
теплоты.

Отнесены к количеству
подведенной к отдельным
частям установки
теплоты.

15. Испарительная способность.

Действительная испарительная способность

$$e_d = \frac{D}{B}.$$

Нормальная испарительная способность

$$e_n = \frac{D(i'' - i')}{B \cdot 640}$$

16. Теплопередача.

Формула излучения Стефана-Больцмана:

$$Q = F_1 \cdot z \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot C' \dots \dots \dots \text{кал}$$

$$C' = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C}}$$

для параллельно расположенных одно против другого равновеликих тел с коэффициентами излучения C_1 и C_2 ,

$$C' = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C} \right)}$$

для двух тел, когда излучающее тело (с поверхностью F_1) совершенно окружено облучаемым телом (с поверхностью F_2).

Коэффициент теплоотдачи через лучеиспускание:

$$\alpha_x = \left(\frac{t_1 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_2 + 273}{100} \right)^4 \cdot \frac{1}{t_1 - t_2} \cdot C' \dots \dots \text{кал/м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Теплоотдача через лучеиспускание:

$$Q_x = F \cdot z \cdot (t_1 - t_2) \cdot \alpha_x \dots \dots \dots \text{кал}$$

Теплоотдача соприкосновением от стенки (ϑ_2) воздуху (t_2):

$$Q_r = F \cdot z (\vartheta_2 - t_2) \alpha_r \dots \dots \dots \text{кал}$$

Общая теплоотдача лучеиспусканием и соприкосновением от стенки воздуху:

$$Q_{\text{общ}} = F \cdot z (\vartheta_2 - t_2) (\alpha_x + \alpha_r) = F \cdot z (\vartheta_2 - t_2) \alpha_{\text{общ}} \dots \dots \dots \text{кал}$$

Общая теплоотдача лучеиспусканием и соприкосновением от газа (или жидкости) (t_1) стенке (ϑ_1):

$$Q_{\text{общ}} = F \cdot z (t_1 - \vartheta_1) (\alpha_x + \alpha_r) = F \cdot z (t_1 - \vartheta_1) \alpha_{\text{общ}} \dots \dots \dots \text{кал}$$

Теплопередача через твердую стенку:

$$Q = F \cdot z (\vartheta_1 - \vartheta_2) \cdot \frac{\lambda}{\delta} \dots \dots \dots \text{кал}$$

Общий коэффициент теплопередачи для сложной стенки:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \dots + \frac{1}{\alpha_2}} \dots \dots \dots \text{кал/м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Общая теплопередача:

$$Q = F \cdot z (t_1 - t_2) \cdot k \dots \dots \dots \text{кал}$$

Вычисление коэффициентов теплоотдачи по температурам, коэффициенту теплопроводности и толщине стенок:

$$\alpha_1 = \frac{\lambda}{\delta} \cdot \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{t_1 - \vartheta_1} \quad \alpha_2 = \frac{\lambda}{\delta} \cdot \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{\vartheta_1 - t_2} \dots \dots \dots \text{кал/м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

17. Теплосодержание воды и пара.

Насыщенный пар:

$$i''_{\text{н.п}} = i' + r \dots \dots \dots \text{кал/кг}$$

Перегретый пар:

$$i''_{\text{п.п}} = i' + r + i'' \dots \dots \dots \text{кал/кг}$$

Влажный пар:

$$i''_{\text{н.п}} = i' + \frac{x \cdot r}{100} \dots \dots \dots \text{кал/кг}$$

(x — паросодержание).

II. ТАБЛИЦА СВОЙСТВ ВОДЫ И НАСЫЩЕННОГО ВОДЯНОГО ПАРА.

Давление атм. абс.	Температура насыщен- ного пара °C	Удельный объем		Удельный вес		Теплосодержание		Теплота испарения кал/кг
		воды л/кг	пара м³/кг	воды кг/л	пара кг/м³	воды кал/кг	пара кал/кг	
0,01	6,6	1,000	131,60	1,000	0,00780	6,6	589,0	591,4
0,015	12,7	1,000	89,64	0,999	0,01116	12,7	600,9	588,2
0,02	17,1	1,001	68,27	0,999	0,01465	17,1	602,9	585,8
0,025	20,7	1,002	55,28	0,998	0,01809	20,7	604,6	583,9
0,03	23,7	1,003	46,53	0,997	0,02149	23,7	606,0	582,3
0,04	28,6	1,004	35,46	0,996	0,02820	28,6	608,2	579,6
0,05	32,5	1,005	28,73	0,995	0,03481	32,5	610,0	577,5
0,06	35,8	1,006	24,19	0,994	0,04133	35,8	611,5	575,8
0,08	41,1	1,008	18,45	0,992	0,05420	41,1	614,0	572,8
0,10	45,4	1,010	14,96	0,990	0,06686	45,4	616,9	570,5
0,12	49,0	1,012	12,60	0,989	0, 7937	49,0	617,6	568,5
0,15	53,6	1,014	10,22	0,986	0,09789	53,6	619,6	566,0
0,20	59,7	1,017	7,797	0,983	0,1283	59,7	622,3	562,7
0,25	64,6	1,020	6,325	0,981	0,1581	64,6	624,5	559,9
0,30	68,7	1,022	5,331	0,979	0,1878	68,7	626,8	557,6
0,35	72,3	1,024	4,614	0,977	0,2167	72,3	627,8	555,6
0,40	75,4	1,026	4,072	0,975	0,2456	75,4	629,2	553,8
0,50	80,9	1,029	3,304	0,971	0,3027	80,9	631,5	550,6
0,60	85,5	1,032	2,785	0,968	0,3590	85,5	633,4	548,0
0,70	89,5	1,036	2,411	0,966	0,4147	89,5	635,1	545,6
0,80	93,	1,039	2,128	0,963	0,4699	93,0	636,5	543,6
0,90	96,2	1,041	1,906	0,961	0,5246	96,2	637,8	541,7
1,0	99,1	1,043	1,727	0,959	0,5790	99,1	639,0	539,9
1,1	101,8	1,045	1,580	0,957	0,6329	101,8	640,1	538,3
1,2	104,2	1,047	1,457	0,955	0, 6865	104,3	641,1	536,7
1,3	106,6	1,049	1,352	0,953	0,7399	106,7	642,0	535,3
1,4	108,7	1,051	1,261	0,952	0,7931	108,9	642,8	533,9
1,5	110,8	1,052	1,182	0,950	0,846	110,9	643,6	532,7
1,6	112,7	1,054	1,113	0,949	0,898	112,9	644,3	531,4
1,8	116,3	1,057	0,997	0,946	1,003	116,6	645,7	529,1
2,0	119,6	1,060	0,903	0,944	1,107	119,9	646,9	527,0
2,2	122,6	1,063	0,826	0,941	1,210	123,0	648,0	525,0
2,4	125,5	1,065	0,7616	0,939	1,313	125,8	649,0	523,1
2,6	128,1	1,068	0,7066	0,937	1,415	128,5	649,9	521,4
2,8	130,5	1,070	0,6592	0,935	1,517	131,0	650,8	519,7
3,0	132,9	1,072	0,6180	0,933	1,618	133,4	651,6	518,1
3,2	135,1	1,074	0,5817	0,931	1,719	135,7	652,3	516,6
3,4	137,2	1,076	0,5495	0,929	1,832	137,8	653,0	515,2
3,6	139,2	1,079	0,5208	0,927	1,920	139,9	653,7	513,8
3,8	141,1	1,081	0, 4951	0,925	2,020	141,8	654,3	512,4
4,0	142,9	1,084	0,4718	0,923	2,120	143,7	654,9	511,1
4,5	147,2	1,087	0,4224	0,920	2,368	148,1	656,2	508,0
5,0	151,1	1,091	0,3825	0,916	2,614	152,2	657,3	505,2
5,5	154,7	1,095	0,3497	0,913	2,860	155,9	658,4	502,5
6,0	158,1	1,100	0,3222	0,910	3,104	159,4	659,3	499,9
6,5	161,2	1,104	0,2987	0,906	3,348	162,7	660,2	497,5
7,0	164,2	1,108	0,2785	0,903	3,591	165,7	660,9	495,2
7,5	167,0	1,111	0,2609	0,900	3,833	168,7	661,7	493,0
8,0	169,6	1,115	0,2454	0,898	4,075	171,4	662,3	490,9
8,5	172,1	1,118	0,2317	0,895	4,316	174,0	662,9	488,8
9,0	174,5	1,121	0,2195	0,893	4,556	176,6	663,4	486,8
9,5	176,8	1,124	0,2085	0,890	4,797	179,0	663,9	484,9

Давление в тм. абс.	Темпе- ратура насыщен- ного пара С°	Удельный объем		Удельный вес		Теплосодержание		Теплота испарения кал/кг
		воды л/кг	пара м³/кг	воды кг/л	пара кг/м³	воды кал/кг	пара кал/кг	
10	179,0	1,127	0,1985	0,888	5,037	181,3	664,4	483,1
11	183,2	1,132	0,1813	0,883	5,516	185,7	665,2	479,5
12	187,1	1,138	0,1668	0,878	5,996	189,8	665,9	476,1
13	190,7	1,143	0,1545	0,874	6,474	193,6	666,6	472,8
14	194,1	1,150	0,1438	0,870	6,952	197,3	667,0	469,7
15	197,4	1,154	0,1346	0,866	7,431	200,7	667,4	466,7
16	200,4	1,159	0,1264	0,862	7,909	204,0	667,8	463,8
17	203,4	1,164	0,1192	0,858	8,389	207,1	668,1	460,9
18	206,2	1,170	0,1128	0,855	8,868	210,1	668,3	458,2
19	208,8	1,174	0,1070	0,852	9,349	213,0	668,5	455,5
20	211,4	1,180	0,1017	0,848	9,83	215,8	668,7	452,9
22	216,2	1,188	0,0927	0,842	10,79	221,0	668,9	447,9
24	220,8	1,196	0,0850	0,836	11,76	226,0	669,0	443,0
26	225,0	1,205	0,0785	0,830	12,74	230,6	669,0	438,4
28	229,0	1,213	0,0729	0,825	13,72	235,0	668,8	433,9
30	232,8	1,221	0,06802	0,820	14,70	239,1	668,6	429,5
32	236,4	1,229	0,06372	0,814	15,69	243,1	668,3	425,2
34	239,8	1,136	0,05991	0,809	16,69	246,9	668,0	421,1
36	243,1	1,243	0,05651	0,804	17,70	250,5	667,6	417,0
38	246,2	1,250	0,05345	0,800	18,71	254,1	667,1	413,0
40	249,2	1,257	0,05069	0,795	19,73	257,4	666,6	409,2
42	252,1	1,265	0,04817	0,791	20,76	260,7	666,0	405,3
44	254,9	1,271	0,04588	0,787	21,80	263,9	665,5	401,6
46	257,6	1,277	0,04378	0,783	22,84	266,9	664,8	397,9
48	260,2	1,283	0,04185	0,779	23,89	269,8	664,1	394,3
50	262,7	1,290	0,04007	0,775	24,96	272,7	663,4	390,7
55	268,7	1,302	0,03616	0,765	27,65	279,6	661,5	381,9
60	274,3	1,318	0,03289	0,756	30,41	286,1	659,5	373,5
65	279,6	1,336	0,03009	0,746	33,23	292,2	657,5	365,3
70	284,5	1,356	0,02769	0,737	36,12	298,0	655,3	357,3
75	289,2	1,377	0,02559	0,728	39,08	303,5	653,0	349,5
80	293,6	1,395	0,02374	0,719	42,13	308,8	650,6	341,8
85	297,9	1,413	0,02210	0,710	45,24	313,9	648,1	334,2
90	301,9	1,428	0,02064	0,702	48,45	319,0	645,6	326,7
95	305,8	1,445	0,01933	0,693	51,73	323,9	643,0	319,2
100	309,5	1,460	0,01815	0,685	55,11	328,7	640,5	311,8
110	316,5	1,495	0,01609	0,668	62,15	338,1	635,1	297,0
120	323,1	1,538	0,01437	0,651	69,60	347,3	629,7	282,4
130	329,3	1,576	0,01290	0,635	77,50	356,4	624,2	267,8
140	335,0	1,620	0,01164	0,618	85,91	365,3	618,6	253,3
150	340,5	1,665	0,01054	0,600	94,87	374,1	612,9	238,8
160	345,7	1,716	0,00956	0,582	104,60	383,4	606,3	222,8
180	355,4	1,837	0,00782	0,544	128,00	401,9	592,6	190,7
200	364,2	2,010	0,00614	0,501	162,90	425,6	572,8	147,3
225	374,0	3,100	0,00310	0,323	322,60	501,1	501,1	0

III. ОБЪЕМ ПЕРЕГРЕТОГО ВОДЯНОГО ПАРА.

Давление атм. абс.	Объем сухого на- сыщенного пара м³/кг	Объем перегретого пара м³/кг						
		200°	250°	300°	350°	400°	450°	500°
1,0	1,727	2,217	2,455	2,693	2,930	3,166	3,403	3,639
1,2	1,457	1,845	2,045	2,243	2,441	2,638	2,835	3,032
1,4	1,261	1,580	1,751	1,922	2,091	2,261	2,430	2,598
1,6	1,113	1,381	1,532	1,681	1,829	1,978	2,126	2,273
1,8	0,997	1,226	1,360	1,493	1,626	1,758	1,889	2,020
2,0	0,903	1,103	1,224	1,343	1,463	1,581	1,700	1,818
2,5	0,7330	0,8798	0,9773	1,074	1,169	1,264	1,359	1,454
3,0	0,6180	0,7313	0,8131	0,8937	0,9736	1,053	1,132	1,211
3,5	0,5347	0,6252	0,6957	0,7651	0,8339	0,9022	0,9702	1,038
4,0	0,4718	0,5456	0,6078	0,6688	0,7291	0,7890	0,8486	0,9080
5	0,3825	0,4341	0,4846	0,5338	0,5824	0,6305	0,6783	0,7260
6	0,3222	0,3598	0,4025	0,4439	0,4846	0,5248	0,5648	0,6046
7	0,2785	0,3067	0,3438	0,3796	0,4147	0,4493	0,4837	0,5179
8	0,2454	0,2668	0,2998	0,3314	0,3623	0,3928	0,4229	0,4529
9	0,2195	0,2357	0,2655	0,2939	0,3215	0,3487	0,3756	0,4024
10	0,1985	0,2108	0,2381	0,2639	0,2889	0,3135	0,3378	0,3619
12	0,1668	0,1734	0,1970	0,2189	0,2400	0,2607	0,2810	0,3012
14	0,1438	0,1465	0,1676	0,1867	0,2051	0,2229	0,2405	0,2579
16	0,1264	—	0,1455	0,1626	0,1788	0,1946	0,2101	0,2254
18	0,1128	—	0,1283	0,1439	0,1585	0,1726	0,1864	0,2001
20	0,1017	—	0,1145	0,1288	0,1422	0,1550	0,1675	0,1799
25	0,0816	—	0,0894	0,1017	0,1128	0,1233	0,1335	0,1434
30	0,06802	—	0,07257	0,08360	0,09318	0,1021	0,1104	0,1192
35	0,05816	—	0,06030	0,07060	0,07916	0,08703	0,09454	0,1018
40	0,05069	—	0,05088	0,06079	0,06863	0,07567	0,08236	0,08882
50	0,04007	—	—	0,04669	0,05383	0,05980	0,06533	0,07061
60	0,03289	—	—	0,03788	0,04389	0,04918	0,05396	0,05846
70	0,02769	—	—	0,03035	0,03672	0,04156	0,04582	0,04979
80	0,02374	—	—	0,02485	0,03126	0,03583	0,03972	0,04338
90	0,02064	—	—	—	0,02694	0,03135	0,03496	0,03820
100	0,01815	—	—	—	0,02341	0,02773	0,03113	0,03415
110	0,01609	—	—	—	0,02044	0,02475	0,02800	0,03082
120	0,01437	—	—	—	0,01789	0,02224	0,02538	0,02805
130	0,01290	—	—	—	0,01565	0,02008	0,02315	0,02570
140	0,01164	—	—	—	0,01366	0,01821	0,02123	0,02368
150	0,01054	—	—	—	0,01184	0,01656	0,01956	0,02192
160	0,00956	—	—	—	0,01018	0,01509	0,01808	0,02039
180	0,00782	—	—	—	—	0,01266	0,01560	0,01781
200	0,00614	—	—	—	—	0,01043	0,01358	0,01573
225	0,00310	—	—	—	—	0,00815	0,01149	0,01364

IV. ТЕПЛОСОДЕРЖАНИЕ ПЕРЕГРЕТОГО ВОДЯНОГО ПАРА.

Давление атм. абс.	Температура насыщенного пара °C	Теплосодер- жание сухого насыщенного пара кал/кг	Теплосодержание перегретого пара кал/кг						
			200°	250°	300°	350°	400°	450°	500°
1,0	99,1	639,0	687,9	711,7	735,4	759,0	782,6	806,2	829,8
1,2	104,2	641,1	687,6	711,5	735,3	759,0	782,6	806,2	829,7
1,4	108,7	642,8	687,4	711,4	735,2	758,9	782,5	806,1	829,7
1,6	112,7	644,3	687,2	711,2	735,0	758,8	782,4	806,1	829,6
1,8	116,3	645,7	686,9	711,0	734,9	758,7	782,4	806,0	829,6
2,0	119,6	646,9	686,7	710,9	734,8	758,6	782,3	805,9	829,6
2,5	126,8	649,5	686,1	710,5	734,5	758,4	782,1	805,8	829,4
3,0	132,9	651,6	685,6	710,0	734,2	758,1	781,9	805,7	829,3
3,5	138,2	653,3	685,0	709,6	733,9	757,9	781,8	805,5	829,2
4,0	142,9	654,9	684,4	709,2	733,6	757,7	781,6	805,4	829,1
5	151,1	657,3	683,2	708,4	733,0	757,2	781,2	805,1	828,9
6	158,1	659,3	682,0	707,6	732,4	756,8	780,9	804,8	828,7
7	164,2	660,9	680,7	706,7	731,8	756,3	780,5	804,6	828,4
8	169,6	662,3	679,4	705,9	731,1	755,8	780,2	804,3	828,2
9	174,5	663,4	678,1	705,0	730,5	755,4	779,8	804,0	828,0
10	179,0	664,4	676,8	704,1	729,9	754,9	779,5	803,7	827,8
12	187,1	665,9	673,9	702,4	728,7	754,0	778,8	803,2	827,3
14	194,1	667,0	670,8	700,5	727,4	753,1	778,0	802,6	826,9
16	200,4	667,8	—	698,6	726,1	752,1	777,3	802,0	826,4
18	206,2	668,3	—	696,7	724,8	751,2	776,6	801,5	826,0
20	211,4	668,7	—	694,6	723,5	750,2	775,9	800,9	825,5
25	222,9	669,0	—	689,0	720,1	747,8	774,1	799,5	824,4
30	232,8	668,6	—	682,7	716,5	745,4	772,3	798,1	823,3
35	241,4	667,8	—	675,6	712,6	742,8	770,4	796,7	822,2
40	249,2	666,6	—	667,4	708,4	740,2	768,5	795,3	821,1
50	262,7	663,4	—	—	699,1	734,6	764,7	792,4	818,8
60	274,3	659,5	—	—	688,1	728,5	760,6	789,4	816,5
70	284,5	652,2	—	—	675,2	721,8	756,4	786,3	814,2
80	293,6	650,6	—	—	660,1	714,4	751,9	783,2	811,8
90	301,9	645,6	—	—	—	706,2	747,1	780,0	809,4
100	309,5	640,5	—	—	—	697,1	742,1	776,7	807,0
110	316,5	635,1	—	—	—	686,0	736,6	773,2	804,5
120	323,1	629,7	—	—	—	675,7	730,9	769,6	801,9
130	329,3	624,2	—	—	—	663,4	724,7	765,8	799,3
140	335,0	618,6	—	—	—	649,5	718,0	761,9	796,6
150	340,5	612,8	—	—	—	634,4	710,9	757,8	793,9
160	345,7	606,3	—	—	—	617,7	703,3	753,5	791,1
180	355,4	592,6	—	—	—	—	686,4	744,4	785,2
200	364,2	572,8	—	—	—	—	667,0	734,3	779,0
225	374,0	501,1	—	—	—	—	638,9	720,3	770,7

ОГЛАВЛЕНИЕ.

	Стр.
Предисловие редактора	3
Из предисловия автора к немецкому изданию	4
Обозначения (в алфавитном порядке)	6
1. Латинский алфавит	6
2. Греческий алфавит	8

ЧАСТЬ I.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ.

Глава первая.

Сущность, цель и значение теплового хозяйства.

I. Историческое развитие	9
II. Смысл и сущность теплового хозяйства	10
III. Экономические пределы сбережения тепла	10
1. Влияние затрат на капитал	10
2. Влияние степени нагрузки	11
3. Независимость от коэффициента использования	12
IV. Тепловое хозяйство в самом широком смысле этого слова	13
1. Бесперебойность производства	13
2. Повышение качества продукции	14
3. Увеличение производительности	14
V. Заключение	15

Глава вторая.

Топливо.

I. Общие замечания	15
II. Твердое топливо	17
1. Классификация и состав естественных твердых топлив	17
2. Классификация, добыча и состав искусственных твердых топлив	19
3. Свойства твердых топлив	20
Газовые и негазовые угли (21). Температуры горения (21). Балластные вещества (21). Форма и величина (22). Прочность (23). Теплотворная способность (23). Свойства угольной пыли (23).	
III. Жидкое топливо	25
IV. Газообразное топливо	26
V. Отбросные топлива	28
Дополнения редактора	29

Глава третья.

Тепловое хозяйство котельных установок.

I. Значение котельной установки для всего производства в целом	34
II. Основные понятия	35
1. Процесс производства пара	35
2. Потери при горении	36
3. Потери при теплопередаче	36
4. Коэффициент полезного действия	37
5. Коэффициент полезного действия установившегося состояния и эксплуатационный коэффициент полезного действия	37
6. Потери вследствие перерывов в работе	38
7. Изменения коэффициента полезного действия и потерь	38

	Стр.
8. Напряжение поверхности нагрева	39
9. Испарительная способность топлива	40
10. Экономический баланс	41
III. Горение топлива	42
1. Уравнения горения	43
2. Теплотворная способность	45
3. Избыток воздуха и состав дымовых газов	49
Избыток воздуха (49). Количество дымовых газов (50). Состав дымовых газов (52). Максимальное содержание CO_2 (53).	
4. Теплоемкость и теплосодержание дымовых газов	56
5. Температура горения	57
Теоретические температурные уравнения (58). Действительные температуры (59). Избыток воздуха (59). Влажность и зольность (61). Лучистая теплоотдача (62). Подогрев воздуха (62).	
6. Температура воспламенения и продолжительность горения	63
Дополнения редактора	64
IV. Теплопередача	65
1. Теплоотдача теплопроводностью и конвекцией	67
2. Теплоотдача лучеиспусканием	69
Лучеиспускание газов (75)	
3. Общая (суммарная) теплоотдача	75
4. Теплопроводность	78
5. Теплопередача	80
6. Термические сопротивления	82
7. Теплопередача в ходах котла (пример)	82
V. Термические свойства воды и водяного пара	85
VI. Тепловые потери в установившемся состоянии	91
1. Потери с теплотой отходящих газов	91
Общие соображения (91). Потери с теплотой сухих отходящих газов (93). Потери с теплотой влажных отходящих газов (95). Потери с теплотой испарения воды (97). Общие потери с отходящими газами (98).	
2. Потери от химической неполноты горения	100
3. Потери от недожога топлива в очаговых остатках	104
4. Потери тепла от нагрева очаговых остатков	107
5. Потери с уносом и сажей	108
6. Потери лучеиспусканием и теплопроводностью	110
VII. К. п. д. установившегося состояния	113
1. Общий коэффициент полезного действия котла	113
2. Частичные коэффициенты полезного действия	114
3. Относительные коэффициенты полезного действия	116
4. Индивидуальные коэффициенты полезного действия	117
5. Коэффициент полезного действия топки и коэффициент полезного действия поверхности нагрева	118
6. Экономический коэффициент полезного действия установившегося состояния	118
VIII. Тепловой баланс установившегося состояния	119
IX. Тепловые потери, возникающие при перерывах в работе	120
1. Общие потери и их последствия	120
2. Потери от внешнего охлаждения	124
3. Потери от внутреннего остывания	125
4. Дополнительные потери при растопке и пуске	127
5. Дополнительные потери при выключении котла	128
6. Характеристический индекс	128
7. Влияние числа котлов	130
8. Аккумуляция тепла в обмуровке и в прочих частях котельной	130
9. Заключение	134
X. Влияние степени нагрузки и ее колебаний	134
1. Общие соображения	134
2. Влияние степени нагрузки	135
3. Влияние колебаний нагрузки	136
XI. Эксплуатационный коэффициент полезного действия	139
XII. Испарительная способность	140
XIII. Эксплуатационный тепловой баланс	141
XIV. Экономический баланс	142

ЧАСТЬ II.

ПРАКТИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ.

Глава первая.

Составные части котельной.

I. Топки	145
1. Разнообразие типов топок	145

	Стр.
2. Колосниковые топки	146
Горизонтальные колосниковые решетки с ручной загрузкой и топки с механическим забрасыванием горючего (148). Ценные колосниковые решетки и решетки с движущимися колосниками (148). Колосниковые решетки для каменного угля с проталкиванием вперед (150). Топки с проталкиванием назад (152). Топки с нижней подачей (153). Неподвижные и механические ступенчатые колосниковые решетки (156). Лотковые колосниковые решетки (159). Заключение (160).	
3. Пылеугольные топки	160
Подготовка угольной пыли (161). Сжигание угольной пыли (162).	
4. Добавочные топки для угольной пыли	166
5. Нефтяные и газовые топки	168
6. Напряжение колосниковой решетки и топочной камеры	169
Дополнения редактора	—
II. Паровые котлы	173
1. Общие сведения	173
2. Более старые конструкции котлов	175
Цилиндрический котел (175). Котлы с жаровыми трубами (176). Котлы с дымогарными трубками (178). Котел Мак-Николя (178).	
3. Водотрубные котлы	178
Однокамерные котлы (179). Двухкамерные котлы (179). Секционные котлы (179). Вертикальноводотрубные котлы (179). Экранированный котел (182). Котел Фельнера (183). Котел Ла Монт (185).	
4. Котлы высокого давления	185
5. Специальные конструкции для котлов высокого давления	185
Котел Шмидта-Гартмана (186). Котел Леффлера (187). Котел «Атмос» (187). Котел Бенсона (189).	
6. Котлы специального назначения	190
Котлы на отходящих газах (190). Добавочные котлы высокого давления (190). Ртутные котлы (191). Электропаровой котел (191).	
7. Арматура котлов	192
Питательные устройства (192). Запорные и спускные приспособления (192). Водоуказатели (192). Предохранительный клапан (193). Манометр (193). Фирменная табличка (193).	
8. Производительность котла	193
III. Обмуровка топки и котла	194
Требования (194). Огнеупорная обмуровка (195). Раствор (195). Кирпичная обмуровка (195). Анкерные связи (195). Подвесные перекрытия (195). Охлаждаемые водой стенки (195). Изоляция (196).	
IV. Боров и дымовая труба	196
Гигиеническая проблема (196). Техническая проблема (196). Температура отходящих газов (196). Охлаждение газов (196). Атмосферные влияния (197). Потери от движения газов (197). Тяговая заслонка (197). Плотность обмуровки (197). Плотное закрывание на время остановок (197). Строительные материалы для дымовых труб (197).	
V. Потери тяги и расчет дымовой трубы	198
Общие указания (199). Статическая сила тяги (199). Потери тяги (199). Теоретическое максимальное значение силы тяги (200). Потери тяги от охлаждения в дымовой трубе (200). Потери тяги от образования скорости газов (201). Потери тяги от трения в дымовой трубе (202). Прочие потери тяги (202). Самотяга (203). Внутренний диаметр и высота дымовой трубы (203). Опытные данные (204).	
VI. Искусственная тяга	206
1. Общие сведения	206
Эксплуатационные затруднения (206). Преимущества (207).	
2. Нижнее дутье	207
Способ действия (207). Паровое дутье (207). Центробежные вентиляторы (208). Область применения (208).	
3. Всасывающая тяга	208
Всасывающая тяга прямого и непрямого действия (208). Сравнение с нижним дутьем (208).	
VII. Подготовка питательной воды	209
1. Вред от неочищенной питательной воды	209
Осаждение котельной накипи (210). Разъедание (210). Работа при высоком давлении пара (210).	
2. Способы очистки воды	210
3. Механическая очистка питательной воды	211
4. Химическая очистка питательной воды	211

Известково-содовый способ (211). Способ с применением едкого натра и соды (212). Регенеративный способ (212). Содовый способ с непрерывной продувкой (213). Известково-содовый способ с непрерывной продувкой (213). Пермутитовый способ (214).	214
5. Установки для удаления газов Вред от кислорода (214). Нагревание воды (215). Фильтр с железными опилками (215). Нагревание воды при вакууме (215). Другие способы (215). Кипячение воды при вакууме (215).	216
6. Испарители Область применения (216). Преимущества и недостатки (216). Конструкции (216).	217
7. Электролитическая защита от образования котельной накипи	217
8. Средства, предупреждающие образование накипи	218
9. Внутренняя окраска	218
10. Освобождение пара и питательной воды от масла Вредность масла (218). Маслоотделители для пара (219). Маслоотделители для воды (219).	219
11. Заключение и руководящие указания	219
<i>Дополнения редактора</i>	
VIII. Хранение и доставка горючего	221
1. Хранение угля Поглощение кислорода и повышение температуры (221). Отношение разных сортов угля к хранению (222). Другие причины самовозгорания (222). Предупредительные меры (222).	222
2. Подача угля Ручная подача (222). Автоматическая подача (222).	223
3. Доставка и хранение угольной пыли Доставка (223). Хранение в бункерах (223). Опасность от взрывов и ее предупреждение (223). Самовозгорание и его предупреждение (223). Затруднения эксплуатационного характера (224).	224
IX. Удаление остаточных продуктов горения	225
1. Приспособления для удаления золы Предъявляемые требования (225). Пневматическое удаление золы (225). Удаление золы промывкой (225). Удаление золы напорной водой (226). Механические способы удаления золы (226). Размельчение шлака (226).	226
2. Удаление летучей золы с поверхностей нагрева Вредное влияние загрязнения поверхностей нагрева (226). Трубки для продувки (227). Постоянные паровые продуватели для сажи (227). Пневматические и паро-газовые продуватели для сажи (227). Очистители для летучей золы и направляющие конуса (227).	228
3. Обеспыливание отходящих газов Электростатические способы (228). Мокрый механический способ (228). Сухие механические способы (228).	229
<i>Дополнения редактора</i>	

Глава вторая.

Экономические и эксплуатационные мероприятия и специальные устройства.

I. Переход к более высоким давлениям	231
1. Преимущества пара высокого давления и экономически рациональные давления Виды паровых хозяйств (231). Экономические соображения (231).	233
2. Термические свойства пара высокого давления	234
II. Перегрев пара	234
1. Преимущества перегрева и свойства перегретого пара Преимущества для эксплуатации котлов (234). Термодинамические преимущества (234). Сохранение материала турбин (235). Уменьшение сопротивления в трубопроводах (235). Перегреватели для установок с чисто тепловым потреблением пара (235).	236
2. Промежуточный перегрев	236
3. Конструктивные типы перегревателей Перегреватели в котельных дымоходах (236). Радиационные перегреватели (237). Промежуточные перегреватели (238).	239
4. Требования, предъявляемые к перегревателям Высокая производительность и высокий коэффициент полезного действия (239). Надежность и долговечность (239). Регулирование температуры пара (239). Легкая смена труб перегревателя (240). Малое падение давления пара (240).	240
5. Влияние нагрузки котла	241
III. Подогревание питательной воды и воздуха дымовыми газами	241

	Стр.
1. Общие сведения	241
Потери в отходящих газах (241). Использование отходящих газов в котле (241). Использование отходящих газов в подогревателях (241). Точка росы (242).	
2. Что лучше—подогревать питательную воду или воздух?	242
Преимущества подогревания воды (243). Регенеративный способ (243). Сравнение регенеративного способа с экономайзером (243). Преимущества подогревания воздуха (244). Сравнение подогревателя воздуха с экономайзером (244). Область применения экономайзеров (245).	
3. Конструктивные типы экономайзеров	245
Экономайзер Грина (245). Новые конструкции (245). Чугунные экономайзеры с гладкими трубами (246). Экономайзеры с ребристыми трубами (246). Экономайзеры с гладкими трубами (247). Специальные конструкции (248).	
4. Требования, предъявляемые к экономайзерам	248
Высокое качество материалов (248). Безопасность в отношении высоких давлений и колебаний давления (249). Предупреждение разгедания и парообразования (249). Хорошая теплопередача и малое сопротивление тяги (249). Легкость доступа, удобство очистки, включение без нарушения работы котла (249). Предохранение от охлаждения во время рабочих перерывов (249). Принадлежности (249).	
5. Конструктивные типы подогревателей воздуха	250
Трубчатые подогреватели воздуха (250). Воздушный подогреватель с пластинами или карманами (250). Регенеративные подогреватели воздуха (251).	
6. Требования, предъявляемые к подогревателям воздуха	252
7. Экономия горючего и повышение коэффициента полезного действия при экономайзерах и подогревателях воздуха	252
IV. Аккумуляция теплоты	255
1. Выгоды аккумуляции	—
2. Аккумуляция в котле	—
Аккумуляция в воде котла (255). Аккумуляция в обмуровке (256). Разделение аккумуляции и парообразования (256).	
3. Аккумуляторы постоянного давления	256
Экономайзеры (256). Аккумуляторы питательного пространства (256). Производительность аккумуляторов постоянного давления (257). Новые конструкции (257). Преимущества и недостатки (258). Взаимодействие с аккумулятором Рутса (258).	
4. Аккумулятор Рутса	258
Способы действия (258). Выбор предельных давлений (259). Автоматические регулирующие вентили (259). Манометр аккумулятора (260). Способы включения в сеть (260). Преимущества и недостатки (261).	
5. Другие паровые и водяные аккумуляторы	262
Аккумуляторы теплой воды (262). Чисто паровые аккумуляторы (262). Аккумуляторы Рато (262). Электро-паровые аккумуляторы (262). Аккумуляторы растворения (262).	
6. Аккумуляция теплоты во время рабочих перерывов	263
Изоляционные материалы (263). Тяговой шибер Штобера (263).	
V. Автоматическое регулирование горения	264
1. Общие сведения	—
Потери от колебаний нагрузки (264). Преимущества автоматического регулирования горения (264).	
2. Регулирование системы Бэйли	265
3. Регулирование системы Смута	265
4. Регулирование системы Роуэка	265
5. Регулирование системы АЕГ-Аскания	266
6. Регулирование системы Сименс	266
VI. Измерительные приборы в котельной	268
1. Основные требования	268
Неправильная измерительная техника (268). Общие указания (269).	
2. Цель измерений	269
Служебные измерительные приборы (269). Измерительные приборы для надзора и эксплуатационной статистики (269). Измерительные приборы для испытаний (269).	
3. Приборы для измерения давлений	270
Манометры (270). Тягомеры (270).	
4. Приборы для измерения температуры	271
Ртутные термометры (271). Электрические термометры (271). Оптические термометры (272).	
5. Газоанализаторы	272
Аппарат Орса (272). Автоматические газоанализаторы (273). Химические газоанализаторы (273). Газоанализатор «Ранарекс» (273). Электрические газоанализаторы (274). Газоанализаторы, основанные на вязкости (274). Выбор	

газоанализатора (274). Измерители избытка воздуха (274).	
6. Количественные измерительные приборы	274
Измерение расхода горючего (274). Измерение расхода питательной воды (275).	
Измерение расхода пара (275).	
7. Другие измерительные приборы	277
Исследование воды (277). Исследование горючего (277). Измерители теплопотока (277). Прочие измерительные приборы (277).	

Глава третья.

Руководство и надзор за эксплуатацией.

I. Общие соображения	278
Эксплуатация и тепловая экономика (278). Задачи руководства эксплуатацией (278).	
II. Растопка паровых котлов	278
Чувствительность котельной установки (278). Мероприятия, необходимые во время рабочих перерывов и при растопке (279). Особенности разных типов котлов (279). Растопка холодных котлов (279). Продолжительность растопки (279). Обращение с перегревателями (280). Наблюдение за уровнем воды (280). Особые мероприятия (280). Наблюдение за газоанализаторами (281).	
III. Остановка паровых котлов	281
Мероприятия и наблюдения (281). Совместная работа с аккумулятором Рутса (281). Горячий резерв (282).	
IV. Паровой котел в работе	282
Задачи кочегара (282). Соображения надежности (282). Постоянство давления в котле (282). Малые тепловые потери (283). Экономические указания (284). Надлежащее состояние котла (284).	
V. Надзор за эксплуатацией и премии для кочегаров	284
VI. Испытание котлов	285
Цель и польза испытаний (285). Правила для приемочных испытаний (285). Пригодления (285). Испытания при установившемся состоянии (286). Эксплуатационные и специальные испытания (286). Сравнительные испытания (286). Допуски (286). Продолжительность испытаний (286). Отчеты и записи (286). Промежуточные итоги (286). Определение расхода горючего и воды (287). Указания для подведения итогов (287). Определение количества золы (287). Взятие проб горючего и золы (289). Обработка результатов (289).	
VII. Эксплуатационная статистика	289
Ежедневные записи (289). Расчет специфических показателей (289). Графическая эксплуатационная статистика (294).	
VIII. Обследование и чистка котла	296
Наружный осмотр котла (295). Удаление сажи и летучей золы (295). Очистка принадлежностей кочегарки (296). Внутренний осмотр котла (296). Удаление грязи и накипи (296). Плотное закрытие после чистки (296).	
IX. Неисправности и взрывы котлов	297
Причины (297). Мероприятия (297). Взрывы дымовых газов (297). Недостаток воды (297). Чрезмерное питание котла (298). Другие неисправности (298).	

ПРИЛОЖЕНИЕ.

I. Важнейшие формулы	299
1. Формулы горения	—
2. Теоретическое количество кислорода и воздуха на 1 кг (1 м ³) горючего	—
3. Коэффициент избытка воздуха $\alpha = L_{\text{действ.}} / L_{\text{мин}}$	300
4. Количество дымовых газов на 1 кг (1 м ³) горючего	300
5. Максимальное содержание углекислоты	301
6. Теплосодержание дымовых газов, горючего и воздуха для горения	—
7. Теплотворная способность	—
8. Теоретическая температура горения	—
9. Сожженный углерод	—
10. Потеря с теплотой отходящих газов V_x	302
11. Потеря от химической неполноты сгорания V_H	303
12. Потеря от недожога топлива в очаговых остатках V_{α}	—

13. Потери с теплотой в остатках V_{o_2}	Стр. 303
14. Коэффициенты полезного действия	—
15. Испарительная способность	304
16. Теплопередача	305
17. Теплосодержание воды и пара	—
II. Таблица свойств воды и насыщенного водяного пара	306
III. Объем перегретого водяного пара	308
IV. Теплосодержание перегретого водяного пара	309



Сдано в набор 2 апреля 1932 г.
 Поступило к печати 30 сентября 1932 г.
 Формат бумаги 72×105 .
 Количество бумажных листов 97.
 Количество печатных знаков в листе 166736.

Илл. ЭТ-25-5-3.

Ленторлант № 52919.

Ответственный редактор Лазаревич И.
 Технический редактор М. В. Рабинович.

ОПТИ № 506/Д.

Заказ № 508. Тираж 10000 экз.