

а
339573

КОТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ

ТОМ I

КОТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ

ПОД ОБЩЕЙ РЕДАКЦИЕЙ
М. В. КИРПИЧЕВА,
Э. И. РОММА и Т. Т. УСЕНКО

В ДВУХ ТОМАХ

1/305408

ГОТ 3395708

Депозитарий

Т О М П Е Р В Ы Й.

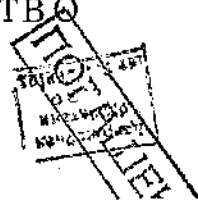
Ф. Д. ДУБЫНИН, А. И. КАРЕЛИН, Ю. М. КОСТРИКИН,
В. П. РОМАДИН, Э. И. РОММ, Т. Т. УСЕНКО

РАБОЧИЕ ТЕЛА И ПРОЦЕССЫ КОТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ТОПОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА

*Утверждено Всесоюзным комитетом
по делам высшей школы при СНК СССР
в качестве учебника для энергетических вузов*

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1941 ЛЕНИНГРАД



1305708

ОТ РЕДАКЦИИ

За последние 15—20 лет развитие техники генерации пара идет чрезвычайно быстро. Как конструкции паровых котлов, так и наши представления о процессах, происходящих в котельных установках, подвергаются непрерывному изменению и усовершенствованию. В последние годы появились и нашли распространение разнообразные новые конструкции элементов котельных установок, разрабатываются новые способы расчета котельных агрегатов и их элементов. Этот быстрый процесс развития продолжается и в настоящее время.

В таких условиях трудно создать отвечающий современному уровню техники курс котельных установок для энергетических вузов. Объем и характер материала сделали задачу создания курса „Котельные установки“ практически недоступной для отдельного лица.

Кафедра котельных установок МЭИ в 1937 г. предполагала приспособить для удовлетворения нужд советских энергетических вузов давно известный курс паровых котлов Тецнера и Гейнриха, переработанный в 1936 г. Лошге.

Однако новые задачи, выдвинутые тов. В. М. Молотовым в его речи на Всесоюзном совещании работников высшей школы в 1938 г., привели к необходимости переработки почти всего материала курса, и от первоначальных предположений осталось очень мало. Необходимо было создать курс, освещающий значение советской котельной техники в развитии нашего энергетического хозяйства и работу советской промышленности и научно-исследовательских организаций в этой области. Упомянутый выше курс был лишь незначительно использован как в части иллюстративного материала, так и по содержанию. Таким образом в течение 1938—1940 гг. был составлен данный курс „Котельные установки“.

Книга эта предназначена для ознакомления с современными котельными установками в объеме основного курса тепловых факультетов энергетических вузов. Одновременно она содержит значительное количество справочного и дополнительного материала, который, как правило, выделен мелким шрифтом, что должно облегчить пользование книгой.

Над книгой работал авторский коллектив. Это облегчило составление курса, но затруднило редакционную работу. В связи с этим не исключены отдельные несогласованности, а возможно и ошибки, которые не удалось устранить в настоящем издании.

Ввиду значительного объема книга разбита на два тома. В первом томе даны общие сведения о котельных установках, освещены свойства рабочих тел и рабочие процессы, протекающие в котельных установках, и описаны топочные устройства. Второй том содержит разделы, посвященные конструкциям и работе котельных агрегатов и их элементов, материалам и расчету котельных агрегатов, вспомогательным устройствам котельных установок, управлению их работой и эксплуатации.

В составлении книги принимали участие: Дубынин Ф. Д., Карелин А. И., Кострикин Ю. М., Роддатис К. Ф., Ромадин В. П., Ромм Э. И., Семененко Н. А., Усенко Т. Т., Шильдкрет М. М. и Цыганков В. Н. Книга выходит под общей редакцией Кирпичева М. В., Ромма Э. И. и Усенко Т. Т. В подготовке рукописи книги к печати, наряду с редакторами, принял участие К. Ф. Роддатис.

В первом томе перечисленные ниже параграфы написали следующие лица¹:

Дубынин Ф. Д.	§§ 14—17, 24—27	Ромадин В. П.	§§ 37—63, 65
Карелин А. И.	§ 12 (таблицы)	Ромм Э. И.	§§ 1, 13, 24—29, 35—36
Кострикин Ю. М.	§§ 18—23	Усенко Т. Т.	§§ 2—13, 28, 30—44, 56, 64, 65.

Часть материалов в отдельных параграфах добавлена при редактировании.

В составлении второго тома принимали участие: Дубынин Ф. Д., Роддатис Н. Ф., Ромм Э. И., Семененко Н. А., Усенко Т. Т., Шильдкрет М. М. и Цыганков В. Н.

¹ Отдельные параграфы написаны двумя или несколькими авторами совместно.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Раздел первый

Рабочие тела и процессы котельной установки

Глава первая. Общее понятие о котельной установке. Свойства рабочих тел

- | | |
|--|----|
| 1. Котельные установки, их типы и назначение | 11 |
| 2. Котельная установка и ее части | 13 |
| 3. Рабочие вещества в паровой технике | 17 |
| 4. Теплосодержание и теплоемкость жидкости и пара | 18 |
| 5. Свойства газов | 24 |
| 6. Теплопроводность и вязкость жидкости, пара и газа | 27 |

Глава вторая. Топливо и его техническая характеристика

- | | |
|---|----|
| 7. Общие сведения о топливе | 29 |
| 8. Твердые, жидкие и газообразные энергетические топлива | 31 |
| 9. Основные месторождения и запасы топлива в СССР | 33 |
| 10. Состав топлива и оценка его элементов | 35 |
| 11. Теплотворная способность топлива | 39 |
| 12. Классификация и маркировка энергетических топлив СССР | 42 |
| 13. Влияние свойств топлива на его использование в котельных установках | 50 |

Глава третья. Реакции горения. Продукты горения

- | | |
|---|----|
| 14. Горение углерода, его окиси, водорода, серы и метана | 59 |
| 15. Теоретически и практически необходимое количество воздуха. Состав и объем продуктов горения при полном и неполном горении | 59 |
| 16. Определение характеристики топлива β и избытка воздуха | 65 |
| 17. Состав продуктов горения топлив, содержащих карбонаты. Горение газового топлива и смесей топлив | 68 |

Глава четвертая. Вода в котельных установках

- | | |
|--|----|
| 18. Значение воды в теплосиловом хозяйстве. Естественная вода и ее примеси | 71 |
| 19. Показатели, применяемые для характеристики воды, и проверка ее анализа | 73 |
| 20. Процесс накипобразования и отложения солей в пароперегревателях, паропроводах и на лопатках турбин | 75 |
| 21. Процесс коррозии металла | 78 |
| 22. Требования к водоподготовке и водный режим паровых котлов | 80 |
| 23. Схемы водоподготовки | 83 |

Глава пятая. Тепловой баланс котельной установки

- | | |
|--|----|
| 24. Составные части теплового баланса. Полезно использованное тепло | 87 |
| 25. Потеря тепла от механической и химической неполноты горения и с физическим теплом твердых остатков горения топлива | 88 |
| 26. Потеря тепла с уходящими газами и в окружающую среду | 91 |
| 27. Потеря тепла на неустойчившееся состояние. Коэффициент полезного действия котельного агрегата | 92 |

Глава шестая. Теплообмен в котельном агрегате. Теплопередача соприкосновением

- | | |
|--|-----|
| 28. Процесс теплообмена в котельном агрегате | 94 |
| 29. Средняя разность температур греющего и нагреваемого тел при теплопередаче соприкосновением | 96 |
| 30. Коэффициент теплопередачи и коэффициент теплоотдачи | 98 |
| 31. Коэффициент теплоотдачи соприкосновением от дымовых газов к металлической стенке | 101 |
| 32. Коэффициент теплоотдачи от поверхности нагрева к нагреваемому телу. Зависимость теплоотдачи от газовых сопротивлений | 113 |

Глава седьмая. Теплопередача излучением

- | | |
|---|-----|
| 33. Роль излучения в топках паровых котлов. Излучение твердых тел | 117 |
| 34. Расчет лучистого теплообмена по Поляку | 120 |
| 35. Излучение газов и паров. Совместная теплопередача соприкосновением и излучением в газоходах котла | 130 |
| 36. Теплоизлучение в топках | 136 |

Раздел второй

Топочные устройства

Глава первая. Характеристика топок и процессов, совершающихся в них. Топки с неподвижным слоем топлива

- | | |
|---|-----|
| 37. Виды топочных устройств и общая характеристика их | 141 |
| 38. Общая характеристика процесса горения в котельных топках | 144 |
| 39. Работа слоя топлива на колосниковой решетке | 146 |
| 40. Толщина и сопротивление слоя топлива. Питание воздухом | 148 |
| 41. Топка с неподвижной колосниковой решеткой. Процесс горения в ней | 152 |
| 42. Конструкции топок с неподвижной колосниковой решеткой и регулирование процесса горения в эксплуатации | 155 |

Глава вторая. Топки с подвижным слоем топлива	161
43. Полумеханические топки	161
44. Цепные решетки. Процесс горения в топках с цепными решетками и общая характеристика их работы	166
45. Регулирование работы цепных решеток. Конструктивные детали их	173
46. Решетки, переталкивающие топливо	182
47. Выбор типа слоевой топки для топлив СССР	188
Глава третья. Подготовка топлива к сжиганию его в виде пыли	192
48. Значение пылесжигания. Предварительное дробление топлива	192
49. Свойства и характеристика угольной пыли	197
50. Мельницы для размолва топлива	200
51. Основы расчета барабанных мельниц и характеристика их работы	205
52. Системы пылеприготовления	207
53. Пылеприготовление при влажных топливах. Взрывобезопасность системы пылеприготовления	213

54. Подача пыли к топке	214
55. Основы теплового расчета пылеприготовления	218
Глава четвертая. Процесс горения, работа и детали пылеугольных топок	220
56. Процесс горения в пылеугольной топке	220
57. Характеристика работы пылеугольной топки	225
58. Пылеугольные горелки и их работа	231
59. Типы пылеугольных горелок	233
60. Типы пылеугольных топок. Топочные экраны	241

Глава пятая. Разные способы камерного сжигания твердых топлив. Сжигание жидких и газообразных топлив	250
61. Топки с жидким шлакоудалением	250
62. Конструкции топок с упрощенным пылеприготовлением. Сжигание фрезерного торфа	256
63. Сжигание сланцев и взвешенное сжигание	261
64. Сжигание жидких топлив	264
65. Сжигание газов. Сжигание доменного газа в пылеугольных топках	271
Алфавитный указатель	278

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ, ПРИНЯТЫЕ В КНИГЕ

Удельный объем насыщенного пара — v_n $\text{м}^3/\text{кг}$.	
„ вес „ „ — γ_n $\text{кг}/\text{м}^3$.	
„ объем перегретого пара — v_{ne} $\text{м}^3/\text{кг}$.	
„ вес „ „ — γ_{ne} $\text{кг}/\text{м}^3$.	
„ объем влажного пара — v_w $\text{м}^3/\text{кг}$.	
„ вес „ „ — γ_w $\text{кг}/\text{м}^3$.	
„ объем воды — $v_{\text{в}}$ $\text{м}^3/\text{кг}$.	
„ вес „ „ — $\gamma_{\text{в}}$ $\text{кг}/\text{м}^3$.	
„ пароводяной смеси — $\gamma_{\text{см}}$ $\text{кг}/\text{м}^3$.	
Степень сухости — x .	
Полная теплота насыщенного пара — λ_n $\text{ккал}/\text{кг}$.	
„ „ влажного пара — λ_w $\text{ккал}/\text{кг}$.	
„ „ перегретого пара — λ_{ne} $\text{ккал}/\text{кг}$.	
„ „ испарения — r $\text{ккал}/\text{кг}$.	
Внутренняя теплота испарения — r $\text{ккал}/\text{кг}$.	
Внешняя „ „ — ψ $\text{ккал}/\text{кг}$.	
Теплосодержание в критической точке — $i_{кр}$ $\text{ккал}/\text{кг}$.	
Критическая температура — $t_{кр}$ $^{\circ}\text{C}$.	
Критическое давление — $p_{кр}$ $\text{кг}/\text{см}^2$.	
Газовая постоянная — R $\text{кгм}/^{\circ}\text{C}$.	
Молекулярный вес — μ .	
Объем моля — $\bar{V}$ $\text{м}^3/\text{моль}$.	
Универсальная газовая постоянная — $\bar{R}$.	
Весовая теплоемкость газов — c' $\text{ккал}/\text{кг}^{\circ}\text{C}$.	
Объемная „ „ — c $\text{ккал}/\text{м}^3^{\circ}\text{C}$.	
„ „ „ „ — c_g $\text{ккал}/\text{м}^3^{\circ}\text{C}$.	
Теплосодержание продуктов горения — I $\text{ккал}/\text{кг}$ топлива.	
Абсолютная (динамическая) вязкость — μ $\text{кг сек}/\text{м}^2$.	
Кинематическая вязкость — ν $\text{м}^2/\text{сек}$.	
Плотность — ρ $\text{кг сек}^2/\text{м}^4$.	

Состав органической массы топлива — $\text{C}_o\%$; $\text{H}_o\%$; $\text{O}_o\%$; $\text{N}_o\%$.	
Выход летучих на органическую массу — $\text{Л}_o\%$.	
Теплотворная способность органической массы топлива высшая — Q_o° $\text{ккал}/\text{кг}$.	
Теплотворная способность органической массы топлива низшая — $Q_o^{\text{н}}$ $\text{ккал}/\text{кг}$.	
Состав горючей массы топлива — $\text{C}_g\%$; $\text{H}_g\%$; $\text{O}_g\%$; $\text{N}_g\%$; $\text{S}_g\%$.	
Выход летучих на горючую массу — $\text{Л}_g\%$.	
Теплотворная способность горючей массы топлива высшая — Q_g° $\text{ккал}/\text{кг}$.	
Теплотворная способность горючей массы топлива низшая — $Q_g^{\text{н}}$ $\text{ккал}/\text{кг}$.	
Состав сухой массы топлива — $\text{C}_c\%$; $\text{H}_c\%$; $\text{O}_c\%$; $\text{N}_c\%$; $\text{S}_c\%$; $\text{A}_c\%$.	
Выход летучих на сухую массу — $\text{Л}_c\%$.	
Теплотворная способность сухой массы топлива высшая — Q_c° $\text{ккал}/\text{кг}$.	
Теплотворная способность сухой массы топлива низшая — $Q_c^{\text{н}}$ $\text{ккал}/\text{кг}$.	
Состав рабочей массы топлива — $\text{C}_p\%$; $\text{H}_p\%$; $\text{O}_p\%$; $\text{N}_p\%$; $\text{S}_p\%$; $\text{A}_p\%$; $\text{W}_p\%$.	
Выход летучих на рабочую массу — $\text{Л}_p\%$.	
Температура:	
начала деформации золы — $t_1^{\circ}\text{C}$,	
размягчения золы — $t_2^{\circ}\text{C}$,	
жидкоплавкого состояния золы — $t_3^{\circ}\text{C}$.	
Теплотворная способность рабочей массы топлива высшая — Q_p° $\text{ккал}/\text{кг}$.	
Теплотворная способность рабочей массы топлива низшая — $Q_p^{\text{н}}$ $\text{ккал}/\text{кг}$.	

Состав рабочей массы топлива с учетом механического недожога — C_p^0/o ; H_p^0/o ; O_p^0/o ; N_p^0/o ; S_p^{II0}/o ; A_p^0/o ; W_p^0/o .

Механический недожог углерода топлива — $\Delta C^0/o$.

Рабочие составы топлив при сжигании в смеси — C_p^{I0}/o ; H_p^{I0}/o ; O_p^{I0}/o ; N_p^{I0}/o ; S_p^{II0}/o ; A_p^{I0}/o ; W_p^{I0}/o ; C_p^{II0}/o ; H_p^{II0}/o ; O_p^{II0}/o ; N_p^{II0}/o ; S_p^{III0}/o ; A_p^{II0}/o ; W_p^{II0}/o и т. д.

Процентное содержание в топливе карбонатной углекислоты — CO_2^{II0}/o .

Процентное содержание в сухих газах: углекислоты — CO_2^0/o , сернистого ангидрида — SO_2^0/o , кислорода — O_2^0/o , окиси углерода — CO^0/o , водорода — H_2^0/o , метана — CH_4^0/o , азота — N_2^0/o , трехатомных газов — $RO_2^0/o = CO_2^0/o + SO_2^0/o$.

Парциальное давление углекислоты — p_{CO_2} ат.

Парциальное давление сернистого ангидрида — p_{SO_2} ат.

Парциальное давление трехатомных газов — p_{RO_2} ат.

Парциальное давление водяных паров — p_{H_2O} ат.

Процентное содержание в топливе: общей серы — S^{000}/o , сульфатной серы — S^{SO}/o , колчеданной серы — S^{S0}/o , органической серы — S^{00}/o , летучей серы — $S^{A0}/o = S^{00}/o + S^{S0}/o$.

Характеристика топлива — β .

Влагосодержание воздуха — d_L г/кг воздуха.

Влага, внесенная в котлоагрегат: с воздухом — W_L кг/кг воздуха, с паровым дутьем — W_ϕ кг/кг воздуха.

Условное обозначение суммы — $C_p + 0,368 S_p^{\text{II}} = K_p^0/o$.

Влажность газообразного топлива — d_m г/нм³ сухого газа.

Зольность газообразного топлива — a_m г/нм³ сухого газа.

Зольность провала — A_{np}^0/o , шлаков — $A_{шл}^0/o$, уноса — $A_{ун}^0/o$.

Содержание горючего в провале — Γ_{np}^0/o , в шлаках — $\Gamma_{шл}^0/o$, в уносе — $\Gamma_{ун}^0/o$.

Вес провала — G_{np} кг/час; g_{np} кг/кг топлива.

Вес шлаков — $G_{шл}$ кг/час; $g_{шл}$ кг/кг топлива.

Вес уноса — $G_{ун}$ кг/час; $g_{ун}$ кг/кг топлива.

Удельный вес сухого газообразного топлива — $\gamma_{с.г}$ кг/нм³.

Состав газообразного топлива — CO^{m0}/o ; H_2^{m0}/o ; CH_4^{m0}/o ; $(C_n H_m)^{m0}/o$; CO_2^{m0}/o ; N_2^{m0}/o ; O_2^{m0}/o .

Температура газов при входе в рассматриваемую поверхность — $t' ^\circ C$.

Температура газов при выходе из рассматриваемой поверхности — $t'' ^\circ C$.

Теоретическая температура горения топлива — $t_e ^\circ C$.

Температура газов по выходе из топки (перед первым котельным пучком) — $t_m ^\circ C$.

Температура газов перед пароперегревателем — $t_n ^\circ C$.

Температура газов: за собственно котлом — $t_k ^\circ C$, перед водяным экономайзером — $t_o' ^\circ C$, после водяного экономайзера (перед воздухоподогревателем) — $t_o'' = t_o' ^\circ C$.

Температура газов после воздухоподогревателя — $t_a ^\circ C$.

Температура уходящих газов — $t_y ^\circ C$.

Температура газов у входа в дымовую трубу — $t_{np} ^\circ C$.

Температура газов на выходе из дымовой трубы — $t_{mnp} ^\circ C$.

Температура топлива — $t_B ^\circ C$.

Температура газов в любой точке — $t_g ^\circ C$.

Средняя температура газов — $t_g^{cp} ^\circ C$.

Разность температур — $\Delta t ^\circ C$.

Температура воздуха перед воздухоподогревателем — $t_{an} ^\circ C$.

Температура воздуха после воздухоподогревателя — $t_{en} ^\circ C$.

Температура воздуха в котельной — $t_L ^\circ C$.

Температура воздуха перед топкой — $t_L^{m0} ^\circ C$.

Температура наружного воздуха — $t_L^n ^\circ C$.

Температура питательной воды перед водяным экономайзером — $t_w ^\circ C$.

Температура: питательной воды после водяного экономайзера — $t_w'' ^\circ C$, насыщенного пара — $t_n ^\circ C$, перегретого пара — $t_{ne} ^\circ C$.

Поверхность нагрева котла перед пароперегревателем — H_k^I м².

Поверхность нагрева котла после пароперегревателя — H_k^{II} м².

Полная поверхность нагрева собственно котла — $H_k = H_k^I + H_k^{II}$ м².

Радиационная поверхность нагрева котла — H_k^p м².

Поверхность нагрева пароперегревателя — H_n м².

" " водяного экономайзера — $H_{в.э}$ м².

" " воздухоподогревателя — $H_{в.п}$ м².

Суммарная радиационная поверхность — H_p м².

Полная строительная поверхность экрана — $H_э$ м².

Поверхность заэкранированных стен — $H_{э.з}$ м².

Шаг труб в ряду — s_1 мм.
 Шаг труб в глубину — s_2 мм.
 Шаг экранных труб — s^p мм.
 Эффективная толщина излучающего слоя — l мм.
 Тепловое сопротивление — $R_t \frac{m^2 \text{ час } ^\circ\text{C}}{\text{ккал}}$.
 Коэффициент теплоотдачи конвекцией от газов к поверхности нагрева — $\alpha_1 \text{ ккал/м}^2 \text{ час } ^\circ\text{C}$.
 Коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием от газов к поверхности нагрева — $\alpha_n \text{ ккал/м}^2 \text{ час } ^\circ\text{C}$.
 Суммарный коэффициент теплоотдачи от нагревающего вещества (от газов) к поверхности нагрева — $\alpha \text{ ккал/м}^2 \text{ час } ^\circ\text{C}$.
 Коэффициент теплоотдачи от поверхности нагрева к нагреваемому веществу — $\alpha_2 \text{ ккал/м}^2 \text{ час } ^\circ\text{C}$.
 Толщина стенки поверхности нагрева — δ м.
 Толщина стенки золь и сажи — $\delta_с$ м.
 Толщина слоя накипи — δ_n м.
 Коэффициент теплопроводности стенки поверхности нагрева — $\lambda \text{ ккал/м час } ^\circ\text{C}$.
 Коэффициент слоя золь и сажи — $\lambda_с \text{ ккал/м час } ^\circ\text{C}$.
 Коэффициент слоя накипи — $\lambda_n \text{ ккал/м час } ^\circ\text{C}$.
 Наружный диаметр трубы — d_n мм.
 Наружный радиус трубы — r_n мм.
 Внутренний диаметр трубы — $d_{вн}$ мм.
 Внутренний радиус трубы — $r_{вн}$ мм.
 Теоретический коэффициент теплоотдачи — $k_m \text{ ккал/м}^2 \text{ час } ^\circ\text{C}$.
 Коэффициент использования — ξ .
 Расчетный коэффициент теплопередачи — $k_d \text{ ккал/м}^2 \text{ час } ^\circ\text{C}$.
 Критерий Рейнольдса — Re .
 Критерий Нуссельта — Nu .
 Число труб — n .
 Коэффициент излучения черного тела — $C_0 = 4,96 \text{ ккал/м}^2 \text{ час } ^\circ\text{K}^4$.
 Коэффициент излучения серого тела — $C \text{ ккал/м}^2 \text{ час } ^\circ\text{K}^4$.
 Поглощательная способность тела — $A = \frac{E_{\text{под}}}{E_{\text{полл}}}$.
 Степень черноты тела — $\varepsilon = \frac{E}{E_0}$.
 Взаимный коэффициент излучения двух тел 1 и 2 — $C_{1-2} \text{ ккал/м}^2 \text{ час } ^\circ\text{K}^4$.
 Степень черноты двух тел 1 и 2 — ε_{1-2} .
 Тепло, излучаемое данным объемом газа на 1 м² его поверхности в час — $q_g^p \text{ ккал/м}^2 \text{ час}$.
 То же для CO₂ и H₂O — $q_{\text{CO}_2}^p$; $q_{\text{H}_2\text{O}}^p$.
 Степень черноты стенки — $\varepsilon_{\text{ст}}$.
 Степень черноты факела — $\varepsilon_{\text{ф}}$.
 Коэффициент облученности поверхности топочного экрана с учетом обратного излучения обмуровки — φ_a .
 Степень экранирования (коэффициент охлаждения) топки — $\psi = \frac{H^p}{H_{\text{ст}}}$.

Объем топочной камеры — $V_m \text{ м}^3$.
 Площадь зеркала горения — $R \text{ м}^2$.
 Доля тепла на 1 кг топлива, передаваемая радиацией в топке и отнесенная к величине $Q_p \eta_m' - \mu$.
 Коэффициент тепловыделения в топке — η_m' .
 Коэффициент отлученности поверхности нагрева — φ .
 Коэффициент излучения — $\sigma_s = C \cdot 10^{-8} \text{ ккал/м}^2 \text{ } ^\circ\text{K}^4$.
 Коэффициент охлаждения объема топки — $\chi = \frac{H^p}{V_m}$.
 Коэффициент загрязнения — κ .
 Коэффициент использования поверхности нагрева — ξ .
 Коэффициент омывания поверхности — ζ .
 Коэффициент облученности экранированной стенки — $\psi_s = \frac{H_s^p}{H_{с. \text{ ст}}}$.
 Расстояние между экраном и стеной топки — e мм.
 Теплосодержание котловой воды — $i_{\text{кв}} \text{ ккал/кг}$.
 Теплосодержание питательной воды перед водяным экономайзером — $i_{\text{в}}' \text{ ккал/кг}$.
 Теплосодержание питательной воды после водяного экономайзера — $i_{\text{в}}'' \text{ ккал/кг}$.
 Теплосодержание сухого насыщенного пара — $i_n \text{ ккал/кг}$.
 Теплосодержание влажного пара — $i_x \text{ ккал/кг}$.
 " перегретого пара — $i_{\text{пв}} \text{ ккал/кг}$.
 " пара, идущего на дутье — $i_{\text{д}} \text{ ккал/кг}$.
 Теплосодержание продувочной воды — $i_{\text{пр}} \text{ ккал/кг}$.
 Часовая паропроизводительность котлоагрегата — $D \text{ кг/час}$.
 Часовая паропроизводительность котлоагрегата по нормальному пару — $D_n \text{ кг/час}$.
 Часовой расход топлива — $B \text{ кг/час}$.
 Коэффициент полезного действия котлоагрегата брутто — $\eta_{\text{бп}}$.
 Коэффициент полезного действия котлоагрегата нетто — $\eta_{\text{нт}}$.
 Количество продувочной воды — $d_{\text{пр}} \text{ кг/час}$.
 Видимая испарительность топлива — $I_{\text{в}} \text{ кг/кг топлива}$.
 Испарительность топлива по нормальному пару — $I_n \text{ кг/кг топлива}$.
 Коэффициент полезного действия топки — η_m .
 Удельный вес сухого воздуха при 0°С и 760 мм рт. ст. — $\gamma_0 \text{ кг/м}^3$.
 Теплосодержание присосанного воздуха — $Q_{\text{прис}} \text{ ккал/кг топлива}$.
 Количество тепла, внесенное паровым дутьем — $Q_{\text{ф}} \text{ ккал/кг топлива}$.
 Количество тепла, внесенное топливом — $Q_{\text{в}} \text{ ккал/кг топлива}$.
 Количество тепла, внесенное рециркулирующими газами — $Q_{\text{г реци}} \text{ ккал/кг топлива}$.
 Количество тепла, внесенное воздухом — $Q_{\text{в}} \text{ ккал/кг топлива}$; относительное — $g_s \%$.
 Количество тепла, необходимое для расплавления золь — $r_{\text{ил}} \text{ ккал/кг}$.

Количество тепла, переданное радиацией в топке — Q^p ккал/кг топлива.

Количество тепла, поглощенное первым котельным пучком — Q_1^I ккал/кг топлива.

Количество тепла, поглощенное вторым котельным пучком — Q_1^{II} ккал/кг топлива.

Количество тепла, поглощенное собственно котлом — $Q_1^n = Q_1^I + Q_1^{II}$ ккал/кг топлива.

Количество тепла, поглощенное пароперегревателем — $Q_1^{n.p}$ ккал/кг топлива.

Количество тепла, поглощенное водяным экономайзером — $Q_1^{e.o}$ ккал/кг топлива.

Количество тепла, переданное экрану — Q_1^o ккал/кг топлива.

Полезно использованное тепло — $Q_1 = Q_1^n + Q_1^{n.p} + Q_1^{e.o} + Q_1^o$ ккал/кг.

Количество тепла, поглощенное воздухоподогревателем — $Q_1^{o.n}$ ккал/кг топлива; относительное — $q_1^{o.n}/o$.

Потеря тепла с уходящими газами — Q_2 ккал/кг топлива; q_2^o/o .

Потеря тепла от химической неполноты горения — Q_3 ккал/кг топлива; q_3^o/o .

Потеря тепла от механической неполноты горения со шлаками — $Q_4^{ш.л}$ ккал/кг топлива; $q_4^{ш.л}/o$.

Потеря тепла с провалом — Q_4^{np} ккал/кг топлива; q_4^{np}/o .

Потеря тепла с уносом — Q_4^{yn} ккал/кг топлива; q_4^{yn}/o .

Полная потеря от механической неполноты горения — $Q_4^n = Q_4^{ш.л} + Q_4^{np} + Q_4^{yn}$ ккал/кг топлива; относительная $q_4^n = q_4^{ш.л} + q_4^{np} + q_4^{yn}/o$.

Потеря физического тепла шлаков — $Q_4^ф$ ккал/кг топлива; $q_4^ф/o$.

Потеря тепла в окружающую среду топочной камерой — Q_5^n ккал/кг топлива; q_5^n/o .

Потеря тепла в окружающую среду первым газом — Q_5^I ккал/кг топлива; q_5^I/o .

Потеря тепла в окружающую среду пароперегревателем — Q_5^n ккал/кг топлива; q_5^n/o .

Потеря тепла в окружающую среду вторым газом — Q_5^{II} ккал/кг топлива; q_5^{II}/o .

Потеря тепла в окружающую среду водяным экономайзером — $Q_5^{e.o}$ ккал/кг топлива; $q_5^{e.o}/o$.

Потеря тепла в окружающую среду воздушным подогревателем — $Q_5^{o.n}$ ккал/кг топлива; $q_5^{o.n}/o$.

Полная потеря тепла в окружающую среду — $Q_5 = Q_5^I + Q_5^n + Q_5^{II} + Q_5^{e.o} + Q_5^{o.n} + Q_5^{ш.л} + Q_5^{np} + Q_5^{yn} + Q_5^ф$ ккал/кг топлива; $q_5 = q_5^I + q_5^n + q_5^{II} + q_5^{e.o} + q_5^{o.n} + q_5^{ш.л} + q_5^{np} + q_5^{yn} + q_5^ф/o$.

Потеря тепла от неустановившегося состояния — Q_6 ккал/кг топлива; q_6^o/o .

Скорость воды — w_w м/сек.

Начальная скорость воздуха — w_L' м/сек.

Конечная скорость воздуха — w_L'' м/сек.

Средняя скорость воздуха — w_L^{cp} м/сек.

Скорость насыщенного пара — w_n м/сек.

Начальная скорость перегретого пара — $w_{n.p}'$ м/сек.

Конечная скорость перегретого пара — $w_{n.p}''$ м/сек.

Средняя скорость перегретого пара — $w_{n.p}^{cp}$ м/сек.

Начальная скорость пароводяной смеси — $w_{a.n}'$ м/сек.

Конечная скорость пароводяной смеси — $w_{a.n}''$ м/сек.

Средняя скорость пароводяной смеси — $w_{a.n}^{cp}$ м/сек.

Напорное объемное паросодержание — φ .

Расходное объемное паросодержание — ψ .

Кратность циркуляции — c кг воды на 1 кг пара.

Приращение скорости воды вследствие парообразования — k м/сек.

Внутреннее сечение труб элемента котельного агрегата — f м².

Коэффициент гидравлического сопротивления от трения — λ .

Коэффициент местного гидравлического сопротивления — ξ .

Начальная скорость газов в рассматриваемом газомеханизме — w_g' м/сек.

Конечная скорость газов в рассматриваемом газомеханизме — w_g'' м/сек.

Средняя скорость газов в рассматриваемом газомеханизме — w_g^{cp} м/сек.

Среднее сечение газотока первого котельного пучка — F_1^{cp} м².

Среднее сечение газотока пароперегревателя — F_2^{cp} м².

Среднее сечение второго котельного пучка — F_{II}^{cp} м².

Среднее сечение водяного экономайзера — $F_{e.o}^{cp}$ м².

Среднее сечение воздушного подогревателя — $F_{o.n}^{cp}$ м².

Средняя теплоемкость жидкости — c_w ккал/кг °С.

» » перегретого пара при постоянном давлении — c_p ккал/кг °С.

Истинная теплоемкость перегретого пара при постоянном давлении — c_p^w ккал/кг °С.

Средняя теплоемкость перегретого пара при постоянном объеме — c_v ккал/кг °С.

Истинная теплоемкость перегретого пара при постоянном объеме — c_v^w ккал/кг °С.

Абсолютное давление — p_a кг/см².

Избыточное (рабочее или манометрическое) давление — p_n кг/см².

Теоретически необходимый воздух — V_0 нм³/кг топлива; L_0 кг/кг топлива.

Действительно необходимый воздух — V_a нм³/кг топлива; L_a кг/кг топлива.
 Коэффициент избытка воздуха в топке — α_m .
 " " " по выходе из топки (перед первым котельным пучком) — α_m' .
 Коэффициент избытка воздуха перед пароперегревателем — α_n' .
 Коэффициент избытка воздуха за пароперегревателем — α_n'' .
 Коэффициент избытка воздуха перед водяным экономайзером — $\alpha_{e.o.}$.
 Коэффициент избытка воздуха за собственно котлом — α_n'' .
 Коэффициент избытка воздуха перед воздушным подогревателем (за водяным экономайзером) — $\alpha_{v.n.} = \alpha_{v.o.}$.
 Коэффициент избытка воздуха после воздушного подогревателя — $\alpha_{a.n.}$.
 Коэффициент избытка воздуха в уходящих газах — α_y .
 Присос воздуха в первом газоходе — $\Delta\alpha^I$.
 " " в газоходе пароперегревателя — $\Delta\alpha_n$.
 Присос воздуха во втором газоходе — $\Delta\alpha^{II}$.
 " " в газоходе водяного экономайзера — $\Delta\alpha_{e.o.}$.
 Присос воздуха воздушного подогревателя — $\Delta\alpha_{v.n.}$.
 " " в золоуловителе циклонного типа — $\Delta\alpha_{z.y.}$.
 Присос воздуха в электрофильтре — $\Delta\alpha_{\phi}$.
 Присос воздуха в сушильно-мельничной системе — $\Delta\alpha_{s.m.c.}$.
 Полный объем газов — V_g нм³/кг топлива.
 Полный объем газов по выходе из топки — $(V_g)_m$ нм³/кг топлива.
 Полный объем газов перед пароперегревателем — $(V_g)_n'$ нм³/кг топлива.
 Полный объем газов за пароперегревателем — $(V_g)_n''$ нм³/кг топлива.

Полный объем газов за собственно котлом — $(V_g)_k$ нм³/кг топлива.
 Полный объем газов перед водяным экономайзером — $(V_g)_{e.o.}$ нм³/кг топлива.
 Полный объем газов перед воздушным подогревателем и за водяным экономайзером — $(V_g)_{v.n.} = (V_g)_{v.o.}$ нм³/кг топлива.
 Полный объем газов после воздушного подогревателя — $(V_g)_{a.n.}$ нм³/кг топлива.
 Полный объем уходящих газов — $(V_g)_y$ нм³/кг топлива.
 Полный объем газов, возвращаемых в топку при рециркуляции — $V_{g.pec}$ нм³/кг топлива.
 Средний объем газов — V_{cp} нм³/кг топлива.
 Объем сухих газов — $V_{c.v.}$ нм³/кг топлива.
 Объем двухатомных газов — $V_2 = V_{O_2} + V_{N_2} + V_{H_2} + V_{CO}$ нм³/кг топлива.
 Объем трехатомных газов — $V_3 = V_{SO_2} + V_{CO_2} = V_{H_2O}$ нм³/кг топлива.
 Объем водяных паров — V_{H_2O} нм³/кг топлива.
 Объем метана — V_{CH_4} нм³/кг топлива.
 Объем тяжелых углеводородов — $V_{C_nH_m}$ нм³/кг топлива.
 Вес двухатомных газов — $G_2 = G_{O_2} + G_{N_2} + G_{H_2} + G_{CO}$ кг/кг топлива.
 Вес трехатомных газов — $G_3 = G_{SO_2} + G_{CO_2} = G_{H_2O}$ кг/кг топлива.
 Вес водяных паров — G_{H_2O} кг/кг топлива.
 Вес метана — G_{CH_4} кг/кг топлива.
 Вес тяжелых углеводородов — $G_{C_nH_m}$ кг/кг.
 Суммарная теплоемкость газов — $(V_g C_g)_m$; $(V_g C_g)_n'$ и т. д. ккал/кг топлива.
 Концентрация пыли — μ кг топлива/кг воздуха.
 Доля газов, протекающих через воздухоподогреватель — μ_g .
 Доля газов, возвращаемая в топку при рециркуляции — $\mu_{g.pec}$.

Настоящий список не исчерпывает всех обозначений, встречающихся в книге. Обозначения, не вошедшие в список, помещены в соответствующих местах текста.

РАЗДЕЛ ПЕРВЫЙ

РАБОЧИЕ ТЕЛА И ПРОЦЕССЫ КОТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ОБЩЕЕ ПОНЯТИЕ О КОТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ. СВОЙСТВА РАБОЧИХ ТЕЛ

1. Котельные установки, их типы и назначение

Котельной установкой называется часть паросиловой установки, в которой производится пар, используемый затем в паровых двигателях или в различных тепловых аппаратах. Рабочим телом в паросиловых установках является почти исключительно вода, которая путем нагрева переводится из жидкого состояния в состояние насыщенного или перегретого пара. Нагрев осуществляется обычно за счет физического тепла продуктов горения топлива, получаемого благодаря выделению химической энергии топлива при его сжигании.

Производимый в котельных установках пар имеет давление выше атмосферного и чаще всего находится в перегретом состоянии. Этот пар обычно используется:

а) в паровых двигателях, т. е. паровых турбинах или поршневых паровых машинах, для производства механической энергии;

б) для отопления помещений и для различных производственных процессов, требующих затраты тепла: нагревания, варки, выпаривания, сушки, ректификации, вулканизации и др., осуществляющихся в специальных нагревательных приборах и теплообменниках (для этих целей пар иногда передается на большие расстояния и распределяется из одного центра по специальным сетям паропроводов);

в) для приготовления силового или водяного горючего газа в газогенераторах.

Котельные установки чрезвычайно разнообразны по размерам, назначению и производительности. Имеются установки производительностью от нескольких десятков кг до 500 тыс. кг пара в час в одном агрегате.

По назначению стационарные котельные установки бывают следующих типов:

а) энергетические, обслуживающие тепловые электрические станции; эти установки обычно имеют высокое или повышенное давление пара;

б) производственно-отопительные — для снаб-

жения паром различных технологических процессов и отопления промышленных предприятий; эти котельные установки в большинстве случаев бывают средних и малых размеров, обычно при невысоком давлении пара за исключением специальных случаев;

в) отопительные котельные установки, служащие для отопления отдельных помещений или группы зданий; эти котельные установки чаще всего бывают небольшой производительности, и давление пара в них низкое.

Очень часто котельные установки одновременно снабжают паром паровые двигатели, технологические нагревательные приборы и отопительно-вентиляционные установки. Такие установки смешанного типа распространены в промышленных предприятиях.

В современных теплоэлектроцентралях, производящих механическую и электрическую энергию и снабжающих теплом технологические аппараты и отопительные приборы, весь пар из котельной установки поступает в паровые двигатели, а потребители пара для чисто тепловых целей получают пар из отборов паровых двигателей, главным образом, паровых турбин. При этом за счет комбинированного использования тепла повышается общий к. п. д. паросиловой установки и достигается значительная экономия топлива. Такие установки получили широкое распространение в СССР, так как социалистическая система экономики и планирования дает широкие возможности рационального построения теплового хозяйства. Котельные установки теплофикационных станций по своему типу относятся к группе энергетических.

Особо приходится выделить передвижные и транспортные котельные установки. Паросиловые установки доминируют в железнодорожном и занимают значительное место в водном транспорте. Даже на автомобили и самолеты, где до сих пор безраздельно господствовали легкие двигатели внутреннего горения, в последние годы начинают проникать паровые двигатели.

В настоящем курсе рассматриваются, главным образом, стационарные котельные установки энергетического и производственно-отопительного типов и лишь частично затронуты чисто отопительные установки, с одной стороны, и разнообразные типы транспортных установок — с другой.

Существенными величинами, или параметрами, определяющими характер котельной установки, являются давление и температура производимого ею пара. Современное развитие теплотехники характеризуется широким применением высоких давлений и температур пара.

Назначение котельной установки — экономично производить пар требуемого давления и температуры. Экономичность котельной установки с точки зрения использования в ней тепла топлива не зависит от параметров пара, производимого ею. Вместе с тем повышение давления и температуры пара усложняет задачу создания дешевой и экономичной котельной установки. Экономичность силовой установки при повышении давления и температуры пара всецело определяется экономичностью использования такого пара в паровой машине или турбине, т. е. улучшением термодинамического к. п. д. теплового двигателя.

Из термодинамики известно, что для данного рабочего тела, например, водяного пара, при заданных общими климатическими условиями температурах окружающего воздуха и воды в конденсаторе, т. е. нижней температурной границе термодинамического цикла, повышение к. п. д. цикла парового двигателя возможно за счет повышения температуры и давления пара, поступающего в двигатель. Этим и определяется развитие котельных установок высокого давления и с перегревом пара. Введение регенеративного подогрева питательной воды, улучшая к. п. д. парового двигателя, определяет температуру воды, поступающей в котельную установку. От указанных обстоятельств в значительной мере зависит облик и характер котельной установки.

Чисто отопительные и производственные потребители обычно используют насыщенный пар низкого давления — от 1 до 12 *ати*. Системы отопления требуют пар не выше 4—6 *ати*, обычно даже 1—2 *ати*. Давление пара для производственных потребителей определяется температурами, которые необходимо обеспечить для протекания технологических процессов. Эти температуры редко превышают 200° С. Температура греющего насыщенного пара должна быть выше температуры, необходимой для технологического процесса. Давление греющего насыщенного пара вполне определяется его температурой. Так как перегретый пар отдает тепло стенкам гораздо слабее, чем насыщенный или влажный пар, то перегрев пара в котлах производственно-отопительных установок чаще всего применяется лишь для того, чтобы на пути от котельной установки

до потребителя пара не было больших потерь тепла. Некоторое дополнительное повышение давления пара требуется для преодоления сопротивления паропроводов.

Отопительные котлы, обслуживающие помещения, сосредоточенные на небольшой площади, обычно дают насыщенный пар давлением от 0,2 до 2 *ати* и обладают малой производительностью. Центральные паровые отопительные установки, обслуживающие ряд зданий, разбросанных на большой площади, имеют обычно давление до 6—8 *ати* и иногда производят перегретый пар температурой до 250° С. Чисто производственные и производственно-отопительные котельные редко должны давать пар давлением выше 12 *ати*; обычно бывает достаточно 2—6 *ати*. Такие установки иногда обслуживают и мелкие паровые двигатели. Когда от установки требуется пар различных параметров, давление и температура пара, даваемого установкой, определяются по максимальным параметрам потребителей. Остальным потребителям пар подается после соответствующего торможения (дресселирования).

В отдельных случаях при относительно большой потребности в паре низкого давления, например, 2—3 *ати*, котельные установки все же работают при более высоком давлении (8—15 *ати*), так как конструирование и эксплуатация агрегатов большой производительности при низком давлении встречают некоторые затруднения.

В котельных установках, обслуживающих двигатели, главным образом, паровые турбины, применяется давление пара выше 15 *ати*. В таких установках давление и температура пара котлов определяются паровой турбиной.

При малых мощностях турбин значительное повышение давления пара не дает преимуществ вследствие значительных потерь пара в зазорах между вращающейся и неподвижной частями турбины и повышенных потерь на трение пара. Но при турбинах большой мощности повышение давления и температуры пара не только увеличивает экономичность теплового цикла, но иногда даже несколько облегчает осуществление турбин высоких мощностей. Поэтому повышение давления и температуры пара в значительной мере связано с укрупнением единичных агрегатов.

Котельные агрегаты производительностью до 20—30 *т* пара в час обычно строятся на давление не выше 30 *ати* и температуру пара не выше 375—400° С. Начиная с производительности 40 *т* пара в час нормальное давление пара в котельной установке принято пока в СССР в 32 *ати* при температуре перегретого пара 425° С. Построение советской энергетики на базе использования местных топлив и теплофикации в настоящее время приводит к переходу на более высокие параметры пара для мощных агрегатов теплоэлектроцентралей. Ряд новых станций строится и проектируется с агрегатами на пара-

метры 100—140 *ати* и 500°С. Это дает до 10—12% экономии топлива по сравнению с параметрами 32 *ати* и 425°С. Некоторые опытные установки работают с температурой перегретого пара до 600°С.

В небольших транспортных установках с паровыми машинами применение высокого давления пара выгодно и при малых мощностях агрегатов. Такие установки высокого давления в последние годы начали развиваться за границей.

2. Котельная установка и ее части

На фиг. 1 и 2 (см. вклейку) показана схема стационарной котельной установки с пылевидным сжиганием твердого топлива. Ознакомление с такой схемой позволит без особого труда разобраться в схемах других котельных.

В котельной установке необходимо обеспечить следующие условия:

1. Подачу в топку необходимого количества топлива и воздуха для его горения; правильное протекание процесса горения в топке; отдачу тепла поверхностям нагрева, расположенным в топке и в газоходах, по которым движутся газы из топки; удаление из установки охлажденных продуктов горения и очаговых остатков.

2. Подачу в установку рабочего тела — воды в жидком виде; подогрев этой воды до температуры кипения; испарение воды и выделение из нее сухого пара; перегрев полученного пара необходимого давления до заданной температуры.

3. Надежную работу агрегата и в первую очередь металлических поверхностей нагрева, через которые происходит передача тепла от продуктов горения к рабочему телу.

Для работы котельной установки необходимы устройства, связанные с хранением топлива, подачей его в топку и подготовкой к сжиганию, с подготовкой питательной воды и т. п. Таким образом котельная установка состоит из котельных агрегатов и ряда вспомогательных устройств.

А. Котельный агрегат

Котельный агрегат (фиг. 1) включает собственно паровой котел 1, пароперегреватель 2, водяной экономайзер 3, воздухоподогреватель 4, топочное устройство 5, а также обмуровку 6, газоходы 7, каркас 8, арматуру и гарнитуру.

Паровой котел 1 служит для превращения поступающей в него жидкости, нагретой в ряде случаев до температуры, близкой в точке кипения при давлении в котле, в насыщенный пар этого давления. По соображениям прочности частей котла, изготавливаемых обычно из стали, придают чаще всего цилиндрическую форму в виде барабанов 9, коллекторов 10 и труб 11. Для возможности работы внутри котла и очистки внутренней поверхности его стенок от накипи и шлама (осадков из испаряющейся воды) в ба-

рабанах делают лазы 12 такого размера, чтобы через них мог пролезть человек, а в коллекторах и других более мелких частях котла — люки 13. Лазы и люки плотно закрываются крышками с прокладками.

Та часть внутреннего объема котла, которая занята водой, называется водяным¹ пространством 14, а та, которая занята паром, — паровым пространством 15. Поверхность 16, отделяющая паровое пространство от водяного, носит название зеркала испарения. Уровень воды в работающем котле колеблется между двумя крайними положениями — высшим 17 и нижним 18 уровнями. Низший уровень устанавливается так, чтобы при нем были еще покрыты водой металлические стенки котла, обогреваемые горячими газами. Этим достигается достаточное для безопасной работы котла охлаждение стенок. Высший уровень устанавливается так, чтобы вода не увлекалась паром в места отбора пара из барабана и влажность пара не переходила за допустимые пределы. Разность между нижним и высшим уровнями воды определяет так называемый запас питания.

Для отделения воды от пара, выходящего из котла, часто устанавливаются специальные сепарирующие устройства 19 и сухопарники 20. В прежнее время были сильно распространены котлы с большим объемом воды. Они были приспособлены для устойчивой работы с колеблющейся нагрузкой при ручном регулировании горения топлива и подачи воды в котел. Такие котлы могут быть изготовлены лишь на малую производительность. Котлы средних и больших размеров нерационально изготовлять с большим объемом воды. В случае применения котлов с малым объемом воды для работы при очень сильно колеблющейся нагрузке требуется автоматическое регулирование подачи воды в котел и горения в топке, а иногда и установка аккумуляторов пара.

Производительность котла определяется количеством тонн пара, производимого котлом в час, — D т/час. Величину котла часто характеризуют размерами его поверхности нагрева в квадратных метрах H_k м².

Поверхностью нагрева котла называется площадь всех поверхностей металлических стенок, омываемых с одной стороны горячими газами, с другой — рабочим телом. Величина поверхности нагрева обычно подсчитывается со стороны, обогреваемой газами. Поверхность нагрева, получающая тепло главным образом или исключительно за счет излучения пламени или горящего слоя топлива, носит название радиационной 21; поверхность, которая получает тепло, главным

¹ Во время работы котла водяное пространство частично заполнено смесью воды с паром.

образом, от соприкосновения с нею горячих движущихся газов, носит название конвективной 22. Радиационные поверхности нагрева, воспринимающие тепло исключительно за счет излучения тепла в топке, называются топочными экранами.

Металлические стенки котла обогрываются газами, имеющими в отдельных частях котла очень высокую температуру. Между тем при нагреве стальных стенок котла выше 400—500° С прочность их сильно понижается. Для предупреждения перегрева сверх допустимого предела стенки котла должны обязательно охлаждаться, что достигается за счет интенсивного движения вдоль поверхностей нагрева воды или пароводяной смеси, отнимающих тепло от стенок. Это движение воды и пароводяной смеси в котле называется циркуляцией.

По способу создания циркуляции паровые котлы делятся на две основные группы: а) котлы с естественной циркуляцией и б) котлы с принудительной циркуляцией.

Естественная циркуляция происходит за счет того, что пузырьки пара, имеющие меньший удельный вес, чем вода, поднимаются по трубам или барабанам котла, увлекая за собой воду. В одних частях котла (подъемные трубы 23) это вызывает движение смеси пара с водой вверх, а в других (опускные 24) движение воды вниз. Таким образом вода непрерывно движется по поверхности нагрева, многократно оборачиваясь в водяном пространстве котла.

Принудительная циркуляция воды и пароводяной смеси вдоль поверхности нагрева производится насосами. Имеются котлы с многократной принудительной циркуляцией и котлы прямоточные. В котлах с многократной принудительной циркуляцией вода до испарения несколько раз перекачивается вдоль поверхности нагрева циркуляционным насосом. Эти котлы отличаются от котлов с естественной циркуляцией только наличием насоса, как побудителя многократной циркуляции. В прямоточных котлах нет многократной циркуляции: вода питательным насосом подается в змеевик, образующий поверхность нагрева, и выходит из него в виде сухого насыщенного или перегретого пара.

Пароперегреватель 2 предназначен для перегрева до необходимой температуры насыщенного пара, полученного в котле.

Пароперегреватели обычно состоят из группы параллельно включенных стальных змеевиков, соединенных в начале и конце коллекторами. Змеевики расположены в газоходах и обогрываются газами. Пар, выходящий из котла по паропроводу 25, проходит по змеевикам и нагревается до требуемой температуры. Ввиду менее интенсивного охлаждения змеевиков перегревателя по сравнению с трубами котла эти змеевики при высоких температурах перегрева часто выполняются из специальных теплоустойчивых сталей.

Для надежной работы перегревателя очень важно, чтобы пар, выходящий из котла, уносил минимальное количество воды с растворенными в ней солями. Для предупреждения перегорания труб необходимо также, чтобы по всем змеевикам пар протекал равномерно, скорости пара были достаточно высоки для охлаждения стенки, поверхность змеевиков не испытывала чрезмерных тепловых напряжений и вообще чтобы были устранены все обстоятельства, могущие поднять температуру стенки пароперегревателя выше допустимого предела. Перегреватели бывают радиационные, если они работают, главным образом, за счет лучистой теплопередачи, находясь в топочной камере, и конвективные, работающие за счет теплопередачи соприкосновением при размещении их в газоходах.

Водяной экономайзер 3 служит для подогрева питательной воды за счет теплоты горячих газов. Для повышенных и высоких давлений применяются змеевиковые стальные экономайзеры. При низких давлениях экономайзеры состоят из чугунных труб — гладких или ребристых. Иногда встречаются и стальные ребристые трубы. При конструировании труб стремятся к тому, чтобы увеличить передачу тепла от газов к металлической стенке. Если вода в экономайзере нагревается до точки кипения и даже частично в нем испаряется, то такой водяной экономайзер называется кипящим. Питательная вода подается в водяной экономайзер питательным насосом по трубе 26. Нагретая в экономайзере питательная вода направляется в котел по трубам 27.

Воздухоподогреватель 4. Для улучшения теплоиспользования в паросиловой установке часто применяют регенеративный подогрев питательной воды паром, отбираемым из различных ступеней турбины. Тепло газов тогда вместо подогрева воды используется для подогрева идущего в топку воздуха в воздухоподогревателе. Этим улучшается использование топлива в котельной вследствие снижения температуры продуктов горения и более совершенного процесса сжигания топлива.

Воздухоподогреватели применяются в большинстве котельных установок независимо от того, имеется ли регенеративный подогрев воды или нет. Помещают их обычно в конце котельного агрегата, т. е. после того как газы прошли через водяной экономайзер. Холодный воздух подается в воздухоподогреватель по входному коробу 28, а горячий выходит из него по выходному коробу 29.

Топочные устройства служат для сжигания топлива либо в слое на колосниковых решетках, либо по способу факельного сжигания в топочных камерах. В первом случае топки носят название слоевых, во втором — камерных. Одной из основных частей топочного устройства является топочная камера 5, где происходит сжигание топлива при камерных

топках или дожигание горючих газов уходящих недогоревшими с колосниковой решетки при слоевом сжигании.

При факельном сжигании применяются горелки или форсунки 30, назначение которых — подать в топочную камеру смесь пылевидного, жидкого или газообразного топлива с воздухом. При сжигании пыли через горелку вводится смесь топлива с первичным воздухом — аэросмесь и, кроме того, вторичный воздух; в зависимости от конструкции горелки создается та или иная форма факела. При сжигании газа в горелке происходит перемешивание горючего газа с воздухом, а при сжигании жидкого топлива горелка (форсунка) производит раздробление или распыление жидкого топлива на мельчайшие капли.

Для сжигания кускового твердого топлива в слое топка снабжается механической, полумеханической или ручной колосниковой решеткой, которая поддерживает слой топлива, распределяет по слою воздух, подаваемый под решетку, а при механических топках вводит топливо в топочную камеру и удаляет очаговые остатки.

Топочное устройство должно соответствовать применяемому виду и сорту топлива. От топочного устройства требуется, чтобы оно обеспечило минимум потерь от химической и механической неполноты горения при небольшом избытке воздуха. При конструировании топков необходимо выбрать рациональный подвод топлива и воздуха с тем, чтобы их взаимодействие обусловило полное сгорание, правильно сочетать топку и поверхности нагрева котла, в частности, приняв надлежащий размер радиационных поверхностей нагрева котла 11 и экранов 21, учесть требования компактности, дешевизны и надежности устройства, правильно выбрать огнеупорные материалы и обеспечить облегчение работы обслуживающего котел персонала.

В каждом топочном устройстве для твердого топлива необходимо осуществить, бесперебойный отвод из него очаговых остатков (зола и шлака). Для этого в слоевых механических топках устраиваются специальные золовые и шлаковые бункеры под решеткой. Зола и шлак падают с решетки в эти бункеры и периодически удаляются из них. В новейших конструкциях камерных пылеугольных топков для той же цели устраивают в нижней части топки холодные воронки 31, а под ними помещают шлаковые бункеры 32.

Обмуровка 6 представляет собой стены топочной камеры и газоходов, сложенные из кирпича или составленные из щитков специальной конструкции. Обмуровка должна уменьшить потерю тепла газов во внешнюю среду и препятствовать присосу внешнего воздуха в газоходы. Обмуровка должна быть простой, дешевой, надежной, достаточно плотной и не теплопроводной. В области высоких температур газов от материала и конструкции обмуровки требуется достаточная

стойкость против действия пламени, химического разложения газами, механического истирания золой и т. п.

Газоходы 7 представляют собой каналы, ограниченные обмуровкой и заполненные поверхностями нагрева. Горячие продукты горения из топочной камеры, двигаясь по газоходам, омывают поверхности нагрева, передавая через них тепло пару, воде или воздуху, протекающим по другой стороне этих поверхностей. По выходе из газоходов охладившиеся продукты горения направляются через боровы и тяговые устройства в дымовую трубу.

Каркас 8 выполняется в виде металлической конструкции, служащей для поддержания всех частей котельного агрегата и его обмуровки.

Арматура и гарнитура. Для обслуживания котельного агрегата необходим ряд приспособлений, носящих название арматуры и гарнитуры.

К арматуре относятся: манометр, водоуказательные приборы, которыми чаще всего служат водоуказательные стекла, водопробные краны, спускные и продувные клапаны, запорные вентили, автоматические обратные клапаны и предохранительные клапаны. Предохранительные клапаны устанавливаются для того, чтобы давление в котле не перешло за допустимый для прочности металлического корпуса предел; они открываются автоматически по достижении предельного давления и выпускают часть пара в атмосферу.

К гарнитуре относятся крышки люков и дверки в обмуровке для осмотра и очистки газоходов, заслонки для регулирования тяги, опоры для котла и т. п., а также рабочий инструмент котельщика.

Б. Вспомогательные устройства и цеха котельной установки

Вспомогательные устройства и цеха служат для хранения топлива, подачи и подготовки его к сжиганию, удаления золы и шлаков, для очистки и подачи в котельный агрегат питательной воды, для удаления из котельного агрегата дымовых газов и подачи в топочное устройство воздуха.

Основные вспомогательные устройства (фиг. 2) перечислены ниже.

Склад топлива представляет собой обычно открытую площадку 33 на территории предприятия, на которую помещают запас топлива. Топливо выгружают на склад из вагонов 34 или барж. Склад обслуживается при помощи подъемных кранов и других приспособлений, например, скреперов 36. Иногда, чтобы топливо не выветривалось и не увлажнялось, склады делают закрытыми.

Транспортные установки для подачи топлива на склад и со склада к устройству, подготавливающему топливо к сжиганию. Эти устройства могут включать транспортеры ленточные (38), ковшевые (37) и винтовые, кон-

Таблица 1
Свойства насыщенного водяного пара (по Коху)

Абсолютное давление p в атм	Температура кипения t_n в °C	Удельный объем		Удельный вес пара γ_n в кг/м³	Теплосодержание		Теплота испарения r в ккал/кг
		воды v_w в м³/кг	пара v_n в м³/кг		воды i_w в ккал/кг	пара i_n в ккал/кг	
0,01	6,698	0,0010001	131,7	0,007595	6,73	600,1	593,4
0,02	17,204	0,0010013	68,27	0,01465	17,24	604,8	587,6
0,03	23,772	0,0010027	46,53	0,02149	23,79	607,7	583,9
0,04	28,641	0,0010041	35,46	0,02820	28,65	609,8	581,1
0,05	32,55	0,0010053	28,73	0,03481	32,55	611,5	578,9
0,10	45,45	0,0010101	14,95	0,06688	45,41	617,0	571,6
0,20	59,67	0,0010170	7,795	0,1283	59,61	623,1	563,5
0,30	68,68	0,0010221	5,328	0,1877	68,61	626,8	558,2
0,40	75,42	0,0010261	4,069	0,2458	75,36	629,5	554,1
0,50	80,86	0,0010296	3,301	0,3029	80,81	631,6	550,8
0,75	91,27	0,0010368	2,258	0,4429	91,26	635,6	544,3
1,0	99,09	0,0010428	1,725	0,5797	99,12	638,5	539,4
1,5	110,79	0,0010521	1,180	0,8472	110,92	642,8	531,9
2,0	119,62	0,0010599	0,9016	1,109	119,87	645,9	525,9
2,5	126,79	0,0010666	0,7316	1,367	127,2	648,3	521,1
3,0	132,88	0,0010725	0,6166	1,622	133,4	650,3	516,9
3,5	138,19	0,0010780	0,5335	1,874	138,8	651,9	513,1
4,0	142,92	0,0010828	0,4706	2,125	143,6	653,4	509,8
4,5	147,20	0,0010875	0,4213	2,374	148,0	654,7	506,7
5,0	151,11	0,0010918	0,3816	2,621	152,1	655,8	503,7
6,0	158,08	0,0010999	0,3213	3,112	159,3	657,8	498,5
7,0	164,17	0,0011072	0,2778	3,600	165,6	659,4	493,8
8,0	169,61	0,0011140	0,2448	4,085	171,3	660,8	489,5
9,0	174,53	0,0011203	0,2189	4,568	176,4	662,0	485,6
10,0	179,04	0,0011262	0,1981	5,049	181,2	663,0	481,8
12,5	188,92	0,0011399	0,1600	6,249	191,6	665,1	473,5
15,0	197,36	0,0011524	0,1343	7,446	200,6	666,6	466,0
17,5	204,76	0,0011641	0,1157	8,645	208,6	667,7	459,1
20,0	211,38	0,0011751	0,1016	9,846	215,8	668,5	452,7
25,0	222,90	0,0011952	0,08157	12,26	228,5	669,4	440,9
30	232,76	0,0012142	0,06802	14,70	239,5	669,7	430,2
35	241,42	0,0012320	0,05822	17,18	249,4	669,5	420,1
40	249,18	0,0012493	0,05078	19,69	258,2	669,0	410,8
45	256,23	0,0012661	0,04495	22,25	266,5	668,2	401,7
50	262,70	0,0012828	0,04024	24,85	274,2	667,3	393,1
60	274,29	0,0013150	0,03310	30,21	288,4	665,0	376,6
70	284,48	0,0013467	0,02795	35,78	300,9	662,1	361,2
80	293,62	0,0013786	0,02404	41,60	312,6	658,9	346,3
90	301,92	0,001412	0,02096	47,71	323,6	655,1	331,5
100	309,53	0,001445	0,01845	54,21	334,0	651,1	317,1
110	316,58	0,001480	0,01637	61,08	344,0	646,7	302,7
120	323,15	0,001518	0,01452	68,42	353,9	641,9	288,0
130	329,30	0,001558	0,01312	75,23	363,0	636,6	273,6
140	335,09	0,001599	0,01181	84,68	372,4	631,0	258,6
150	340,56	0,001646	0,01065	93,90	381,7	624,9	243,2
160	345,74	0,001699	0,009616	104,0	390,8	618,3	227,5
170	350,66	0,001756	0,008680	115,2	400,3	610,8	210,5
180	355,35	0,001821	0,007809	128,0	410,2	602,5	192,3
190	359,82	0,001902	0,006994	143,0	420,4	593,2	172,8
200	364,08	0,00201	0,00620	161,2	431,5	582,3	150,8
210	368,16	0,00214	0,00539	185,7	444,7	568,1	123,4
220	372,1	0,00239	0,00449	223	463,4	547	84
224	373,6	0,00261	0,00394	254	478	532	54
225,5	374,2	0,0029	0,0029	344,8	515,5	515,5	0

Таблица 2
Свойства насыщенного пара ртути

Температура t_n в °C	Давление p в кг/см² абс.	Удельный вес γ_n в кг/м³	Удельный объем v_n в м³/кг	Теплосодержание i_n в ккал/кг	Теплота испарения r в ккал/кг
180	0,0120	0,0650	15,4	76,3	72,4
200	0,0235	0,1175	8,5	76,7	71,7
220	0,0337	0,200	5,0	77,1	71,0
240	0,0473	0,370	2,7	77,5	70,4
260	0,131	0,588	1,7	78,0	69,9
280	0,213	0,909	1,1	78,4	69,5
300	0,336	1,54	0,65	78,8	69,1
320	0,512	2,08	0,48	79,3	68,8
340	0,759	2,86	0,35	79,75	68,5
360	1,096	3,85	0,26	80,25	68,3
380	1,548	5,27	0,19	80,7	68,1
400	2,141	7,14	0,14	81,2	67,9
420	2,92	9,09	0,11	81,7	67,75
440	3,86	11,76	0,085	82,2	67,6
460	5,05	15,4	0,065	82,7	67,5
480	6,54	17,4	0,058	83,3	67,4
500	8,36	22,73	0,044	83,85	67,3
520	10,50	27,80	0,036	84,45	67,2
540	13,06	34,5	0,029	85,0	67,1
560	16,01	43,7	0,023	85,6	67,0
580	19,7	52,6	0,019	86,2	66,9
600	23,7	60,6	0,0165	86,7	66,85

вейеры, подъемные краны, различных типов скреперы, подвижной состав внутристанционного транспорта, эстакады, канатные подвесные дороги и т. п.

Топливоподготовительное устройство в большинстве крупных котельных установок, сжигающих твердое топливо в виде пыли, имеет своим назначением приготовление пыли из кускового топлива. Устройство состоит из магнитных сепараторов 39, грохотов 40, дробилок 41, сушильного устройства 42, мельниц 43, циклонов 44, питателей 45, устройства для пневматического транспорта 46, вентиляторов 47 и некоторых других машин. Кроме того, здесь имеется ряд бункеров 48, пыле- и газопроводов 49 и т. п.

Устройства для удаления золы и шлаков из топки и из котельной установки состоят из различных зольных воронок 50, затворов 51 (фиг. 1), шлакоснимателей и шлаковых подпоры 52, шла-

жесточителей, вагонеток 53 и устройств для гидравлического 54 или пневматического удаления золы и шлаков.

Водоподготовительное устройство служит для подготовки питательной воды. Этот процесс в основном заключается в удалении или обезвреживании содержащихся в сырой воде посторонних примесей, загрязняющих экономайзер, котел и перегреватель или разъедающих металл. Подготовка воды обеспечивает бесперебойную работу котла.

Питательные приспособления предназначены для подачи воды в котельный агрегат. Каждая установка должна иметь по крайней мере два независимых питательных приспособления. Для подачи питательной воды в котел применяются при малых установках струйные аппараты — инжекторы, а также поршневые насосы, для больших же котлов применяют почти исключительно центробежные насосы. При высоких давлениях пара иногда ставят и у больших котлов поршневые насосы.

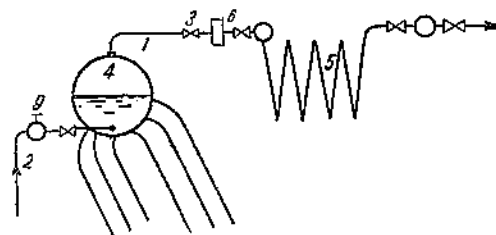
Тяговые устройства и устройства для подачи воздуха в топку. Высокая дымовая труба 55 при естественной тяге, дымососы 56 при искусственной тяге создают разрежение, необходимое для удаления газов, проходящих через агрегат. При этом движении возникают гидравлические сопротивления, преодолеваемые тягой. Дымовые трубы выполняются чаще всего из кирпича, железа или железобетона. При искусственной тяге роль дымовой трубы сводится лишь к отводу дымовых газов в верхние слои атмосферы во избежание засорения окрестности золой. Для уменьшения уноса золы в атмосферу между котельным агрегатом и тяговым устройством устанавливаются золоулавливающие устройства, например, электрофильтры.

Котельный агрегат соединяется с дымовой трубой отводящим газопроводом, который иногда называется бором.

Независимо от тяговых устройств для подачи воздуха в топку устанавливают дутьевые вентиляторы, нагнетающие воздух в воздушный подогреватель и топку через соединительные воздухопроводы. В мелких установках подача воздуха в топку происходит иногда только за счет тяги дымовой трубы и разрежения, создаваемого ею в топочном пространстве.

3. Рабочие вещества в паровой технике

Для получения пара в паросиловых установках применяется почти исключительно вода H_2O как жидкость, распространенная повсеместно. Стремление улучшить использование тепла в паросиловых установках, а также получить пар высокой температуры при низком давлении привело к использованию и других веществ, получивших пока небольшое распространение, главным обра-



Фиг. 3. Схема парового котла.

1 — паровая труба; 2 — питательная труба; 3 — вентилятор; 4 — паровое пространство; 5 — пароперегреватель.

зом, в США: ртути (Hg), дифенила (C_6H_5)₂ и его окиси — дифенилоксида (C_6H_5)₂O.

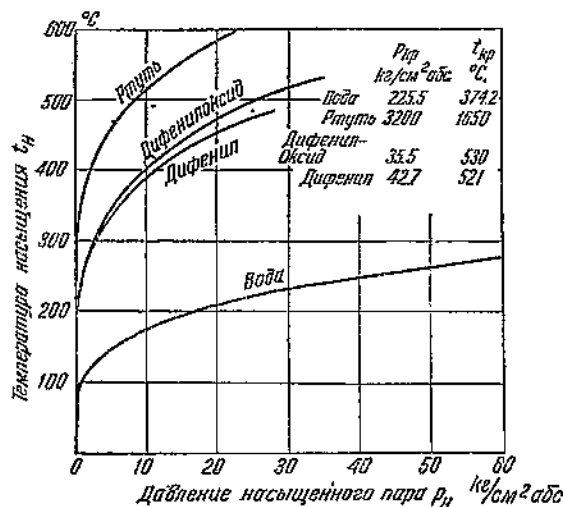
Дифенилоксид при 400°С начинает разлагаться. Дифенил и дифенилоксид ввиду относительно невысоких температур кипения по сравнению с ртутью не дают значительного повышения к. п. д. сравнительно с пароводяными силовыми установками высокого давления. Поэтому они применяются лишь в качестве промежуточных теплоносителей при испарении веществ с высокой температурой кипения.

Основной особенностью ртути, дифенила и т. п. является более низкое давление насыщенного пара, чем у воды, при тех же температурах. Так, например, при температуре 374°С насыщенный водяной пар имеет давление 225 кг/см² абс. (табл. 1), пар ртути всего 1,4 кг/см² абс. (табл. 2), дифенил 8,1 кг/см² абс., а дифенилоксид 7,4 кг/см² абс.

Рабочие тела для получения пара должны быть химически нейтральны по отношению к металлическим поверхностям нагрева.

Если водяное пространство котла заполнено водой, которая подвергается нагреванию, то, достигнув температуры 100°С при атмосферном давлении, она начнет испаряться. При открытом паровыпускном вентиле образующийся водяной пар начнет выходить по паровой трубе 1 (фиг. 3). Для поддержания уровня воды неизменным необходимо пополнять котел водой при помощи питательного насоса по трубе 2. Если усилить обогрев и уменьшить сечение для выхода пара, прикрывая частично вентиль 3, то давление в котле начнет возрастать, так как для прохода через уменьшенное выходное сечение того же количества пара необходимо большее падение давления между паровым пространством котла и тем местом, куда уходит пар. Усиливая обогрев котла и регулируя открытие вентилей, можно довести давление до требуемой величины.

В паровом пространстве 4 котла получается насыщенный пар. Особенностью насыщенного пара является то, что его температура равна температуре испаряющейся жидкости; эта температура растет с увеличением давления и имеет вполне определенное значение для каждого давления. Однозначная функциональная зависимость между давлением и температурой насыщенного пара воды и ртути видна из табл. 1 и 2. На фиг. 4 эта зависимость дана графически для водяного пара и паров ртути, дифенила и дифенилоксида. Насыщенный пар, содержащий в том или ином виде мелкие капли жидкости, носит название влажного пара. Пар, получаемый в паровых котлах, обычно имеет влажность от 0,1 до 3%, т. е. степень сухости его $x = 0,999—0,97$.



Фиг. 4. Зависимость температуры насыщения от давления для насыщенного пара воды, ртути, дифенила и дифенилоксида.

Из котла, пройдя сепаратор 6, пар направляется в пароперегреватель 5 (фиг. 3), куда он попадает обычно с влажностью не выше 0,5%. Некоторое количество тепла, передаваемого пару в пароперегревателе, уходит на испарение этой влаги. Остальное же тепло, получаемое паром в пароперегревателе, идет на его перегрев, при котором температура пара поднимается выше температуры кипения воды для данного давления.

Давление пара измеряется в кг/см^2 или в технических атмосферах.

1 ат технич. = $1 \text{ кг/см}^2 = 10\,000 \text{ кг/м}^2 = 10\,000 \text{ мм вод. ст.} = 735,4 \text{ мм рт. ст.}$

1 ат физич. = $1,0333 \text{ кг/см}^2 = 760 \text{ мм рт. ст.}$

Для измерения давления пользуются манометром. На манометрах паровых котлов шкала проградуирована так, что при давлении в котле, равном барометрическому, близкому к 1 ата, стрелка стоит на нуле. Ввиду этого манометр при работе котла показывает не абсолютное давление пара p_a , а рабочее, т. е. избыточное по сравнению с атмосферным давлением p_w , причем

$$p_n \approx p_a - 1 \text{ кг/см}^2. \quad (1)$$

При расчете частей котла на прочность необходимо пользоваться именно этой величиной давления, так как действующее снаружи давление воздуха частично разгружает стенки котла. Абсолютное же давление p_a применяется во всех термодинамических расчетах и таблицах. Числовые значения избыточного давления сопровождаются обозначением *ати*, абсолютного — *ата*.

Температура пара измеряется по шкале Цельсия и обозначается через $t^\circ\text{C}$. Абсолютная температура, измеряемая по шкале Кельвина, обозначается через $T^\circ\text{K}$, причем

$$t^\circ\text{C} + 273,18 = T^\circ\text{K}.$$

В табл. 1 и 2 приведены удельные веса и удельные объемы нагретой до температуры кипения жидкости v_w и сухого насыщенного пара v_n . Если пар влажный и степень сухости его выражается величиной x , то его удельный объем v_x выразится следующим образом:

$$v_x = v_w + x(v_n - v_w) \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (2)$$

Для давления не свыше 150 ата при степени сухости не ниже 0,97 и для давления до 30 ата при сте-

пени сухости не ниже 0,75 можно применять приближенную формулу

$$v_x = x \cdot v_n, \quad (3)$$

дающую величину v_x с точностью до 0,5%.

Для перегретого пара между давлением p , температурой t , удельным объемом v и удельным весом γ нет однозначной зависимости, как в случае насыщенного пара. Здесь, как и в газах, зависимость между указанными величинами может быть выражена характеристическим уравнением (например, Тумлирица-Линде). Более точные результаты дает упрощенное уравнение, предложенное Вуколовичем:

$$pv = 47,1 T - 0,007 v. \quad (4)$$

Величины p , t , γ и v можно найти в таблицах, например, Коха (табл. 3).

4. Теплосодержание и теплоемкость жидкости и пара

Полное количество тепла, содержащегося в 1 кг сухого насыщенного пара, определяется с учетом тепла i_w , содержащегося в 1 кг жидкости при температуре кипения. Если считать от 0°C , то в жидкости содержится тепло:

$$i_w = c_w t_n \text{ ккал/кг}. \quad (5)$$

Теплоемкость воды c_w зависит от температуры кипения, а именно при

$$\begin{array}{cccc} t_n = & 100 & 200 & 300 & 374^\circ\text{C} \\ c_w = & 1,001 & 1,015 & 1,054 & 1,364 \text{ ккал/кг } ^\circ\text{C} \end{array}$$

Полная теплота парообразования 1 кг насыщенного пара

$$\lambda_n = i_w + r = i_w + p + \psi = c_w \cdot t_n + p + \psi \approx p(v_n - v_w) \approx i_n \text{ ккал/кг}. \quad (6)$$

Полная теплота образования влажного пара

$$\lambda_w = i_w + x r \approx i_w. \quad (7)$$

Для перегрева 1 кг пара от температуры насыщения до заданной температуры t_{ne} необходимо затратить количество тепла $c_p(t_{ne} - t_n)$.

Полная теплота образования перегретого пара

$$\lambda_{ne} = i_n + c_p(t_{ne} - t_n) \approx i_{ne}. \quad (8)$$

Для вычисления i_{ne} применяется средняя удельная теплоемкость пара c_p . Истинная удельная теплоемкость пара c_p'' применяется, например, при вычислении коэффициентов теплопередачи от перегретого пара к стенке. Обе эти теплоемкости зависят от температуры и давления пара. Среднюю удельную теплоемкость пара между t_n и t_{ne} можно найти из соотношения

$$c_p = \frac{i_{ne} - i_n}{t_{ne} - t_n},$$

где i_{ne} , i_n и t_n нужно взять из табл. 1 и 3 для данного давления p и температуры t_{ne} .

Приближенное значение истинной удельной теплоемкости перегретого пара для данного давления p и температуры t_{ne} может быть найдено из выражения

¹ Единицей тепла обычно служит килограммкалория (ккал), т. е. количество тепла, необходимое для нагрева 1 кг воды от $19,5$ до $20,5^\circ\text{C}$.

Таблица 3
Теплоемкость и удельный объем воды и перегретого водяного пара (по Коху)

t в °C	Давление пара $p_{\text{нп}}$ в атм											
	6,0		8,0		10,0		15,0		20,0		25,0	
	v в м³/кг	i в ккал/кг	v в м³/кг	i в ккал/кг	v в м³/кг	i в ккал/кг	v в м³/кг	i в ккал/кг	v в м³/кг	i в ккал/кг	v в м³/кг	i в ккал/кг
0	0,0009999	0,1	0,0009998	0,2	0,0009997	0,2	0,0009994	0,4	0,0009992	0,5	0,0009989	0,6
10	0,0010001	10,2	0,0010000	10,2	0,0009999	10,3	0,0009997	10,4	0,0009994	10,5	0,0009992	10,6
20	0,0010016	20,2	0,0010015	20,2	0,0010014	20,3	0,0010012	20,4	0,0010010	20,5	0,0010007	20,6
30	0,0010041	30,1	0,0010040	30,2	0,0010040	30,2	0,0010037	30,3	0,0010035	30,4	0,0010033	30,5
40	0,0010077	40,1	0,0010076	40,2	0,0010075	40,2	0,0010073	40,3	0,0010070	40,4	0,0010068	40,5
50	0,0010118	50,1	0,0010118	50,1	0,0010117	50,2	0,0010115	50,2	0,0010112	50,4	0,0010110	50,4
60	0,0010168	60,1	0,0010167	60,1	0,0010166	60,1	0,0010164	60,2	0,0010161	60,3	0,0010159	60,4
70	0,0010225	70,1	0,0010224	70,1	0,0010223	70,1	0,0010221	70,2	0,0010218	70,3	0,0010216	70,4
80	0,0010287	80,1	0,0010286	80,1	0,0010285	80,1	0,0010283	80,2	0,0010280	80,3	0,0010278	80,4
90	0,0010356	90,1	0,0010355	90,1	0,0010354	90,1	0,0010352	90,2	0,0010349	90,3	0,0010347	90,4
100	0,0010432	100,1	0,0010431	100,2	0,0010430	100,2	0,0010427	100,3	0,0010425	100,4	0,0010422	100,5
110	0,0010513	110,2	0,0010512	110,2	0,0010511	110,3	0,0010508	110,4	0,0010506	110,4	0,0010503	110,5
120	0,0010601	120,3	0,0010600	120,3	0,0010599	120,4	0,0010596	120,5	0,0010593	120,5	0,0010591	120,6
130	0,0010696	130,5	0,0010695	130,5	0,0010694	130,6	0,0010691	130,6	0,0010688	130,7	0,0010685	130,8
140	0,0010797	140,7	0,0010795	140,7	0,0010794	140,7	0,0010791	140,8	0,0010788	140,9	0,0010785	141,0
150	0,0010906	150,9	0,0010904	151,0	0,0010902	151,0	0,0010899	151,1	0,0010896	151,1	0,0010893	151,2
160	0,3233	659,1	0,0011020	161,3	0,0011018	161,3	0,0011015	161,4	0,0011011	161,4	0,0011008	161,5
170	0,3328	665,2	0,2451	661,1	0,0011142	171,7	0,0011139	171,8	0,0011135	171,8	0,0011131	171,9
180	0,3418	670,7	0,2526	667,5	0,1987	663,6	0,0011271	182,2	0,0011267	182,3	0,0011263	182,3
190	0,3507	676,0	0,2597	673,3	0,2048	670,3	0,0011413	192,8	0,0011409	192,9	0,0011404	192,9
200	0,3594	681,1	0,2665	678,7	0,2105	676,1	0,1355	668,5	0,0011561	203,5	0,0011556	203,6
210	0,3680	686,1	0,2731	684,0	0,2161	681,6	0,1398	675,3	0,0011726	214,3	0,0011720	214,4
220	0,3765	691,1	0,2797	689,2	0,2215	687,2	0,1438	681,5	0,1046	674,9	0,0011899	225,3
230	0,3849	696,1	0,2862	694,3	0,2269	692,4	0,1477	687,4	0,1079	681,7	0,08367	675,0
240	0,3933	701,0	0,2927	699,3	0,2322	697,6	0,1515	693,0	0,1110	688,0	0,08546	682,2
250	0,4017	706,0	0,2991	704,4	0,2375	702,8	0,1552	698,5	0,1140	694,0	0,08909	688,9
260	0,4100	710,9	0,3054	709,4	0,2427	707,9	0,1589	703,9	0,1169	699,8	0,09161	695,2
270	0,4182	715,8	0,3117	714,3	0,2478	712,9	0,1625	709,3	0,1198	705,3	0,09405	701,2
280	0,4265	720,7	0,3180	719,3	0,2529	717,9	0,1661	714,5	0,1226	710,9	0,09642	707,1
290	0,4347	725,5	0,3242	724,2	0,2580	723,0	0,1696	719,7	0,1253	716,4	0,09874	712,9
300	0,4429	730,5	0,3305	729,3	0,2630	728,1	0,1731	725,0	0,1281	721,9	0,1010	718,6
310	0,4510	735,4	0,3367	734,2	0,2681	733,1	0,1766	730,1	0,1308	727,2	0,1033	724,1
320	0,4592	740,3	0,3429	739,2	0,2731	738,2	0,1800	735,3	0,1334	732,6	0,1055	729,6
330	0,4673	745,3	0,3490	744,2	0,2781	743,2	0,1834	740,5	0,1361	737,9	0,1077	733,1
340	0,4754	750,2	0,3552	749,2	0,2830	748,2	0,1868	745,7	0,1387	743,2	0,1098	740,6
350	0,4835	755,1	0,3613	754,2	0,2880	753,3	0,1902	750,9	0,1413	748,5	0,1120	746,0
360	0,4915	760,1	0,3674	759,2	0,2929	758,3	0,1936	756,0	0,1439	753,7	0,1141	751,4
370	0,4996	765,1	0,3735	764,2	0,2979	763,3	0,1970	761,2	0,1465	758,9	0,1162	756,7
380	0,5077	770,0	0,3796	769,2	0,3028	768,4	0,2003	766,3	0,1491	764,2	0,1183	762,1
390	0,5157	775,0	0,3857	774,2	0,3077	773,4	0,2036	771,4	0,1516	769,4	0,1204	767,4
400	0,5237	780,0	0,3918	779,2	0,3126	778,4	0,2070	776,6	0,1542	774,7	0,1225	772,7
410	0,5318	785,0	0,3978	784,3	0,3174	783,5	0,2103	781,7	0,1567	779,9	0,1245	778,0
420	0,5398	790,0	0,4039	789,3	0,3223	788,6	0,2136	786,9	0,1592	785,1	0,1266	783,3
430	0,5478	795,0	0,4099	794,4	0,3272	793,7	0,2169	792,1	0,1617	790,4	0,1286	788,7
440	0,5558	800,1	0,4159	799,5	0,3320	798,8	0,2201	797,3	0,1642	795,6	0,1307	794,0
450	0,5637	805,2	0,4219	804,6	0,3369	804,0	0,2234	802,4	0,1667	800,8	0,1327	799,3
460	0,5717	810,3	0,4280	809,7	0,3417	809,1	0,2267	807,6	0,1692	806,1	0,1347	804,6
470	0,5797	815,4	0,4340	814,8	0,3465	814,3	0,2299	812,8	0,1717	811,4	0,1367	809,9
480	0,5876	820,6	0,4400	820,0	0,3514	819,4	0,2332	818,0	0,1741	816,7	0,1387	815,3
490	0,5956	825,7	0,4460	825,2	0,3562	824,6	0,2365	823,3	0,1766	822,0	0,1407	820,6
500	0,6036	830,9	0,4519	830,4	0,3610	829,8	0,2397	828,6	0,1791	827,3	0,1427	826,0
510	0,6115	836,1	0,4579	835,6	0,3658	835,1	0,2430	833,8	0,1815	832,6	0,1446	831,4
520	0,6194	841,3	0,4639	840,8	0,3706	840,3	0,2462	839,1	0,1840	837,9	0,1466	836,8
530	0,6273	846,5	0,4699	846,0	0,3754	845,6	0,2494	844,4	0,1864	843,3	0,1486	842,2
540	0,6352	851,8	0,4759	851,3	0,3802	850,9	0,2526	849,8	0,1888	848,7	0,1506	847,6
550	0,6431	857,0	0,4819	856,5	0,3850	856,1	0,2558	855,1	0,1912	854,0	0,1526	852,9

Пересчетный пар

Вода

Перегретый пар



t в °C	Давление пара $p_{\text{наг}}$ в атм											
	30,0		35,0		40,0		50,0		60,0		70,0	
	v в м³/кг	i в ккал/кг	v в м³/кг	i в ккал/кг	v в м³/кг	i в ккал/кг	v в м³/кг	i в ккал/кг	v в м³/кг	i в ккал/кг	v в м³/кг	i в ккал/кг
0	0,0009987	0,7	0,0009984	0,8	0,0009982	1,0	0,0009977	1,2	0,0009972	1,4	0,0009967	1,7
10	0,0009990	10,7	0,0009987	10,8	0,0009985	10,9	0,0009981	11,2	0,0009976	11,4	0,0009972	11,6
20	0,0010005	20,7	0,0010003	20,8	0,0010001	20,9	0,0009997	21,1	0,0009992	21,3	0,0009988	21,6
30	0,0010031	30,6	0,0010029	30,7	0,0010027	30,9	0,0010022	31,1	0,0010018	31,3	0,0010014	31,5
40	0,0010066	40,6	0,0010064	40,7	0,0010062	40,8	0,0010057	41,0	0,0010053	41,2	0,0010049	41,4
50	0,0010108	50,6	0,0010106	50,7	0,0010103	50,8	0,0010099	51,0	0,0010095	51,2	0,0010090	51,4
60	0,0010157	60,5	0,0010155	60,6	0,0010152	60,7	0,0010148	60,9	0,0010144	61,1	0,0010139	61,3
70	0,0010213	70,5	0,0010211	70,6	0,0010208	70,7	0,0010204	70,9	0,0010199	71,1	0,0010195	71,3
80	0,0010275	80,5	0,0010273	80,6	0,0010271	80,7	0,0010266	80,9	0,0010262	81,1	0,0010257	81,2
90	0,0010344	90,5	0,0010342	90,6	0,0010339	90,7	0,0010334	90,9	0,0010329	91,1	0,0010325	91,2
100	0,0010419	100,5	0,0010417	100,6	0,0010414	100,7	0,0010409	100,9	0,0010404	101,1	0,0010399	101,2
110	0,0010501	110,6	0,0010498	110,7	0,0010495	110,8	0,0010490	111,0	0,0010485	111,1	0,0010480	111,3
120	0,0010588	120,7	0,0010585	120,8	0,0010582	120,9	0,0010577	121,1	0,0010572	121,2	0,0010566	121,4
130	0,0010682	130,9	0,0010679	131,0	0,0010676	131,0	0,0010670	131,2	0,0010665	131,3	0,0010659	131,5
140	0,0010782	141,1	0,0010779	141,1	0,0010776	141,2	0,0010770	141,4	0,0010764	141,5	0,0010758	141,7
150	0,0010890	151,3	0,0010886	151,4	0,0010883	151,4	0,0010877	151,6	0,0010870	151,7	0,0010864	151,9
160	0,0011004	161,6	0,0011001	161,6	0,0010997	161,7	0,0010990	161,8	0,0010984	162,0	0,0010977	162,1
170	0,0011127	171,9	0,0011124	172,0	0,0011120	172,1	0,0011113	172,2	0,0011105	172,3	0,0011098	172,4
180	0,0011259	182,4	0,0011255	182,5	0,0011251	182,5	0,0011243	182,6	0,0011235	182,8	0,0011226	182,9
190	0,0011400	193,0	0,0011395	193,0	0,0011391	193,1	0,0011382	193,2	0,0011374	193,3	0,0011365	193,4
200	0,0011552	203,6	0,0011547	203,7	0,0011542	203,7	0,0011532	203,8	0,0011522	203,9	0,0011513	204,0
210	0,0011715	214,4	0,0011710	214,4	0,0011704	214,5	0,0011694	214,6	0,0011683	214,6	0,0011673	214,7
220	0,0011892	225,3	0,0011886	225,4	0,0011880	225,4	0,0011868	225,5	0,0011857	225,5	0,0011845	225,6
230	0,0012086	236,4	0,0012079	236,4	0,0012072	236,4	0,0012058	236,5	0,0012045	236,5	0,0012032	236,6
240	0,06930	675,7	0,0012290	247,7	0,0012282	247,7	0,0012266	247,8	0,0012251	247,8	0,0012236	247,8
250	0,07234	683,8	0,06022	676,9	0,05097	669,8	0,0012495	259,2	0,0012478	259,2	0,0012460	259,2
260	0,07463	690,8	0,06238	684,8	0,05308	678,7	0,0012751	271,0	0,0012729	270,9	0,0012709	270,9
270	0,07681	696,8	0,06442	692,0	0,05502	686,8	0,04162	674,6	0,0013014	283,0	0,0012989	282,9
280	0,07892	703,1	0,06635	698,8	0,05685	694,2	0,04335	683,6	0,03409	671,1	0,0013308	295,2
290	0,08096	709,2	0,06820	705,3	0,05858	701,1	0,04496	691,8	0,03567	681,0	0,02882	668,5
300	0,08295	715,2	0,07000	711,6	0,06025	707,8	0,04647	699,5	0,03713	690,0	0,03029	679,2
310	0,08490	721,0	0,07175	717,7	0,06186	714,2	0,04791	706,7	0,03848	698,3	0,03162	688,8
320	0,08681	726,8	0,07346	723,6	0,06341	720,5	0,04928	713,6	0,03976	706,0	0,03285	697,7
330	0,08870	732,4	0,07513	729,5	0,06494	726,6	0,05060	720,2	0,04097	713,4	0,04401	705,9
340	0,09056	738,0	0,07678	733,3	0,06648	732,5	0,05189	726,6	0,04213	720,4	0,03510	713,6
350	0,09240	743,6	0,07840	741,0	0,06789	738,3	0,05314	732,9	0,04325	727,1	0,03614	721,0
360	0,09421	749,1	0,08000	746,6	0,06933	744,1	0,05436	739,1	0,04434	733,7	0,03714	728,1
370	0,09601	754,6	0,08158	752,2	0,07075	749,8	0,05556	745,1	0,04540	740,1	0,03811	734,9
380	0,09780	760,0	0,08315	757,8	0,07215	755,5	0,05673	751,1	0,04643	746,4	0,03905	741,5
390	0,09957	765,4	0,08470	763,3	0,07353	761,2	0,05789	757,0	0,04744	752,6	0,03996	748,0
400	0,1013	770,8	0,08623	768,8	0,07490	766,8	0,05904	762,8	0,04844	758,7	0,04086	754,4
410	0,1031	776,2	0,08776	774,3	0,07627	772,4	0,06017	768,6	0,04942	764,7	0,04173	760,6
420	0,1048	781,6	0,08927	779,8	0,07762	778,0	0,06128	774,3	0,05039	770,6	0,04259	766,8
430	0,1065	787,0	0,09077	785,3	0,07895	783,5	0,06239	780,0	0,05134	776,5	0,04344	772,9
440	0,1083	792,4	0,09227	790,7	0,08028	789,1	0,06349	785,7	0,05228	782,4	0,04427	778,9
450	0,1100	797,7	0,09376	796,1	0,08160	794,6	0,06457	791,4	0,05321	788,2	0,04508	784,9
460	0,1117	803,1	0,09524	801,6	0,08291	800,1	0,06565	797,0	0,05414	793,9	0,04591	790,8
470	0,1134	808,5	0,09671	807,0	0,08421	805,6	0,06672	802,7	0,05505	799,7	0,04672	796,7
480	0,1151	813,9	0,09817	812,5	0,08551	811,1	0,06778	808,3	0,05596	805,5	0,04751	802,6
490	0,1168	819,3	0,09963	818,0	0,08680	816,6	0,06884	813,9	0,05686	811,2	0,04830	808,4
500	0,1184	824,7	0,1011	823,4	0,08809	822,1	0,06989	819,5	0,05776	816,9	0,04909	814,3
510	0,1201	830,1	0,1025	828,9	0,08937	827,6	0,07094	825,1	0,05865	822,6	0,04987	820,1
520	0,1218	835,5	0,1039	834,3	0,09064	833,1	0,07198	830,7	0,05953	828,3	0,05064	825,9
530	0,1235	841,0	0,1054	839,8	0,09191	838,7	0,07301	836,3	0,06040	834,0	0,05141	831,6
540	0,1251	846,5	0,1069	845,3	0,09318	844,2	0,07404	841,9	0,06127	839,7	0,05217	837,4
550	0,1268	851,9	0,1083	850,8	0,09444	849,7	0,07507	847,6	0,06215	845,4	0,05293	843,2

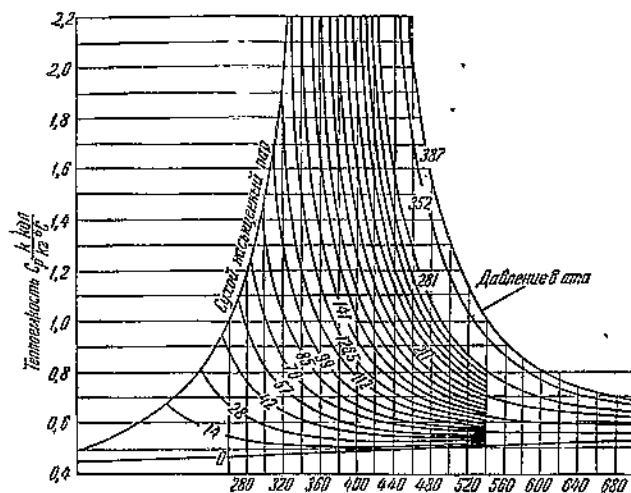
t в °C	Давление пара $p_{\text{на}}$ в атм											
	80,0		90,0		100,0		120,0		130,0		140,0	
	v в м³/кг	i в ккал/кг	v в м³/кг	i в ккал/кг	v в м³/кг	i в ккал/кг	v в м³/кг	i в ккал/кг	v в м³/кг	i в ккал/кг	v в м³/кг	i в ккал/кг
0	0,0009962	1,9	0,0009957	2,2	0,0009952	2,4	0,0009943	2,9	0,0009938	3,1	0,0009933	3,3
10	0,0009967	11,9	0,0009962	12,1	0,0009958	12,3	0,0009949	12,7	0,0009944	13,0	0,0009940	13,2
20	0,0009983	21,8	0,0009979	22,0	0,0009975	22,2	0,0009966	22,7	0,0009962	22,9	0,0009958	23,1
30	0,0010009	31,7	0,0010005	31,9	0,0010001	32,1	0,0009993	32,6	0,0009989	32,8	0,0009985	33,0
40	0,0010045	41,6	0,0010040	41,8	0,0010036	42,1	0,0010028	42,5	0,0010023	42,7	0,0010019	42,9
50	0,0010086	51,6	0,0010082	51,8	0,0010077	52,0	0,0010069	52,4	0,0010065	52,6	0,0010061	52,8
60	0,0010135	61,5	0,0010130	61,7	0,0010126	61,9	0,0010117	62,3	0,0010113	62,5	0,0010109	62,7
70	0,0010190	71,5	0,0010186	71,7	0,0010181	71,8	0,0010172	72,2	0,0010168	72,4	0,0010164	72,6
80	0,0010252	81,4	0,0010248	81,6	0,0010243	81,8	0,0010234	82,2	0,0010229	82,4	0,0010225	82,5
90	0,0010320	91,4	0,0010315	91,6	0,0010311	91,8	0,0010301	92,1	0,0010297	92,3	0,0010292	92,5
100	0,0010394	101,4	0,0010389	101,6	0,0010384	101,8	0,0010375	102,1	0,0010370	102,3	0,0010365	102,5
110	0,0010475	111,5	0,0010470	111,7	0,0010464	111,8	0,0010454	112,2	0,0010450	112,3	0,0010444	112,5
120	0,0010561	121,6	0,0010556	121,7	0,0010550	121,9	0,0010540	122,2	0,0010535	122,4	0,0010529	122,6
130	0,0010653	131,7	0,0010648	131,8	0,0010642	132,0	0,0010631	132,3	0,0010626	132,5	0,0010620	132,6
140	0,0010752	141,8	0,0010746	142,0	0,0010740	142,1	0,0010728	142,4	0,0010723	142,6	0,0010717	142,8
150	0,0010858	152,0	0,0010851	152,2	0,0010845	152,3	0,0010832	152,6	0,0010826	152,8	0,0010820	152,9
160	0,0010970	162,2	0,0010963	162,4	0,0010957	162,5	0,0010943	162,8	0,0010937	162,9	0,0010930	163,1
170	0,0011091	172,6	0,0011083	172,7	0,0011076	172,8	0,0011062	173,1	0,0011055	173,2	0,0011047	173,3
180	0,0011219	183,0	0,0011211	183,1	0,0011203	183,2	0,0011188	183,5	0,0011180	183,6	0,0011172	183,7
190	0,0011356	193,5	0,0011348	193,6	0,0011339	193,7	0,0011322	193,9	0,0011314	194,0	0,0011306	194,1
200	0,0011504	204,1	0,0011494	204,2	0,0011485	204,3	0,0011466	204,5	0,0011457	204,6	0,0011448	204,7
210	0,0011662	214,8	0,0011652	214,9	0,0011642	215,0	0,0011621	215,1	0,0011611	215,2	0,0011601	215,3
220	0,0011833	225,7	0,0011822	225,7	0,0011810	225,8	0,0011788	225,9	0,0011777	226,0	0,0011766	226,1
230	0,0012019	236,6	0,0012006	236,7	0,0011993	236,7	0,0011968	236,8	0,0011955	236,9	0,0011943	237,0
240	0,0012221	247,8	0,0012206	247,9	0,0012192	247,9	0,0012163	248,0	0,0012149	248,0	0,0012136	248,0
250	0,0012443	259,2	0,0012425	259,3	0,0012409	259,3	0,0012377	259,3	0,0012361	259,3	0,0012346	259,3
260	0,0012689	270,9	0,0012669	270,9	0,0012650	270,9	0,0012613	270,8	0,0012594	270,8	0,0012576	270,8
270	0,0012965	282,9	0,0012942	282,7	0,0012919	282,7	0,0012875	282,6	0,0012853	282,5	0,0012832	282,5
280	0,0013279	295,1	0,0013250	295,0	0,0013222	294,9	0,0013169	294,6	0,0013143	294,5	0,0013118	294,5
290	0,0013640	307,9	0,0013604	307,7	0,0013569	307,5	0,0013505	307,1	0,0013474	306,9	0,0013443	306,9
300	0,02502	666,8	0,0014024	320,9	0,0013979	320,7	0,0013897	320,1	0,0013858	319,8	0,0013820	319,5
310	0,02634	678,1	0,02211	665,9	0,01850	651,7	0,001436	333,8	0,001431	333,4	0,001426	332,9
320	0,02755	688,3	0,02334	677,7	0,01985	666,0	0,001495	348,6	0,001487	348,0	0,001481	347,5
330	0,02868	697,6	0,02446	688,5	0,02102	678,3	0,01557	654,0	0,01324	638,1	0,001552	363,3
340	0,02974	706,2	0,02550	698,1	0,02209	689,2	0,01673	668,9	0,01454	657,0	0,01252	642,6
350	0,03074	714,3	0,02650	707,1	0,02307	699,2	0,01775	681,4	0,01562	671,2	0,01372	660,1
360	0,03170	722,0	0,02742	715,5	0,02397	708,4	0,01866	692,7	0,01656	683,8	0,01469	674,3
370	0,03261	729,3	0,02830	723,4	0,02481	717,0	0,01949	703,1	0,01740	695,3	0,01557	686,9
380	0,03348	736,4	0,02913	730,9	0,02561	725,2	0,02027	712,6	0,01817	705,7	0,01637	698,3
390	0,03433	743,3	0,02992	738,2	0,02637	733,0	0,02099	721,5	0,01889	715,3	0,01708	708,7
400	0,03515	750,0	0,03069	745,3	0,02710	740,4	0,02168	730,0	0,01957	724,4	0,01774	718,4
410	0,03595	756,5	0,03144	752,1	0,02781	747,6	0,02234	738,0	0,02021	732,9	0,01837	727,5
420	0,03673	762,9	0,03216	758,8	0,02850	754,6	0,02296	745,7	0,02082	741,0	0,01896	736,1
430	0,03750	769,2	0,03287	765,3	0,02916	761,4	0,02357	753,2	0,02140	748,8	0,01953	744,3
440	0,03826	775,4	0,03357	771,8	0,02981	768,1	0,02415	760,4	0,02196	756,4	0,02008	752,2
450	0,03900	781,6	0,03425	778,1	0,03045	774,7	0,02472	767,4	0,02251	763,6	0,02061	759,8
460	0,03973	787,6	0,03492	784,4	0,03107	781,1	0,02528	774,3	0,02304	770,7	0,02112	767,1
470	0,04046	793,7	0,03558	790,6	0,03168	787,5	0,02582	781,0	0,02356	777,7	0,02161	774,3
480	0,04117	799,7	0,03624	796,8	0,03229	793,8	0,02635	787,7	0,02406	784,5	0,02209	781,3
490	0,04188	805,7	0,03688	802,9	0,03288	800,0	0,02687	794,2	0,02455	791,2	0,02256	788,2
500	0,04258	811,6	0,03752	808,9	0,03347	806,2	0,02738	800,6	0,02504	797,8	0,02303	794,9
510	0,04328	817,5	0,03815	814,9	0,03405	812,4	0,02789	807,1	0,02552	804,3	0,02348	801,6
520	0,04397	823,4	0,03878	820,9	0,03462	818,5	0,02839	813,5	0,02599	810,8	0,02392	808,2
530	0,04465	829,3	0,03940	826,9	0,03519	824,5	0,02888	819,9	0,02645	817,2	0,02437	814,7
540	0,04533	835,2	0,04001	832,9	0,03576	830,6	0,02937	825,9	0,02691	823,5	0,02480	821,1
550	0,04601	841,0	0,04062	838,9	0,03632	836,6	0,02985	832,0	0,02736	829,8	0,02523	827,4

Вода

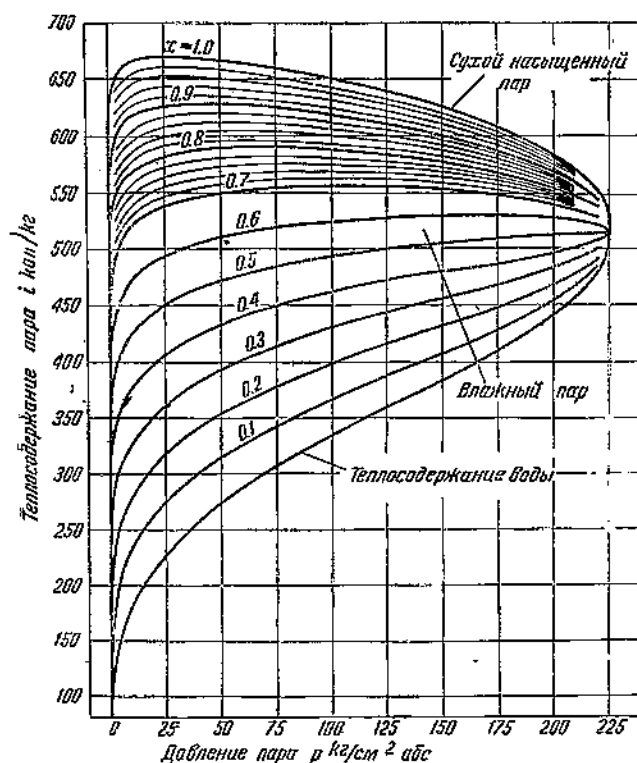
Перегретый пар

t в °C	Давление пара $p_{\text{не}}$ в атм							
	150,0		200,0		250,0*		300,0*	
	v в м³/кг	i в ккал/кг	v в м³/кг	i в ккал/кг	v в м³/кг	i в ккал/кг	v в м³/кг	i в ккал/кг
0	0,0009929	3,6	0,0009905	4,7	0,0009882	5,9	0,0009859	7,1
10	0,0009936	13,4	0,0009914	14,6	0,0009892	15,7	0,0009871	16,8
20	0,0009954	23,3	0,0009933	24,4	0,0009912	25,5	0,0009892	26,6
30	0,0009981	33,2	0,0009960	34,3	0,0009940	35,3	0,0009920	36,4
40	0,0010015	43,1	0,0009995	44,1	0,0009974	45,1	0,0009954	46,2
50	0,0010056	53,0	0,0010036	54,0	0,0010015	55,0	0,0009995	56,0
60	0,0010104	62,9	0,0010083	63,8	0,0010062	64,8	0,0010042	65,8
70	0,0010159	72,8	0,0010137	73,7	0,0010116	74,7	0,0010096	75,7
80	0,0010221	82,7	0,0010198	83,7	0,0010176	84,6	0,0010154	85,5
90	0,0010288	92,7	0,0010265	93,6	0,0010242	94,5	0,0010220	95,4
100	0,0010360	102,7	0,0010337	103,6	0,0010314	104,5	0,0010291	105,4
110	0,0010439	112,7	0,0010415	113,6	0,0010391	114,4	0,0010367	115,3
120	0,0010524	122,7	0,0010498	123,6	0,0010473	124,4	0,0010448	125,3
130	0,0010615	132,8	0,0010588	133,7	0,0010561	134,4	0,0010535	135,2
140	0,0010711	142,9	0,0010682	143,7	0,0010655	144,5	0,0010628	145,2
150	0,0010814	153,1	0,0010784	153,8	0,0010754	154,6	0,0010726	155,3
160	0,0010924	163,2	0,0010892	163,9	0,0010860	164,7	0,0010830	165,4
170	0,0011041	173,5	0,0011006	174,1	0,0010972	174,8	0,0010940	175,5
180	0,0011165	183,8	0,0011128	184,4	0,0011092	185,0	0,0011057	185,7
190	0,0011297	194,2	0,0011257	194,8	0,0011219	195,4	0,0011181	195,9
200	0,0011439	204,8	0,0011395	205,3	0,0011354	205,7	0,0011312	206,2
210	0,0011591	215,4	0,0011548	215,8	0,0011497	216,2	0,0011452	216,6
220	0,0011755	226,1	0,0011701	226,5	0,0011650	226,8	0,0011602	227,1
230	0,0011931	237,0	0,0011871	237,3	0,0011815	237,5	0,0011761	237,8
240	0,0012122	248,0	0,0012055	248,2	0,0011993	248,4	0,0011933	248,6
250	0,0012330	259,3	0,0012254	259,4	0,0012184	259,5	0,0012118	259,6
260	0,0012558	270,8	0,0012472	270,7	0,0012392	270,7	0,0012317	270,7
270	0,0012811	282,5	0,0012712	282,2	0,0012620	282,1	0,0012534	282,0
280	0,0013094	294,4	0,0012977	294,0	0,0012870	293,7	0,0012773	293,5
290	0,0013414	306,7	0,0013274	306,1	0,0013148	305,6	0,0013036	305,2
300	0,0013782	319,3	0,0013612	318,4	0,0013461	317,6	0,0013328	317,0
310	0,001421	332,6	0,001400	331,1	0,001382	330,1	0,001366	329,2
320	0,001474	346,9	0,001446	344,7	0,001423	343,2	0,001403	342,0
330	0,001542	362,5	0,001502	359,2	0,001471	357,0	0,001446	355,3
340	0,001639	380,5	0,001573	375,0	0,001530	371,6	0,001497	369,1
350	0,01198	647,5	0,001671	393,1	0,001606	387,7	0,001558	383,9
360	0,01304	663,9	0,001841	416,6	0,001703	405,8	0,001635	400,2
370	0,01394	677,9	0,00745	610,2	0,001868	428,6	0,00174	418,4
380	0,01474	690,4	0,00868	640,2	0,00255	468,5	0,00190	440,2
390	0,01546	701,7	0,00956	660,7	0,00513	584,6	0,00226	470,2
400	0,01613	712,2	0,01031	676,6	0,00637	622,4	0,00302	524,5
410	0,01676	721,9	0,01096	690,2	0,00720	647,5	0,00429	582,2
420	0,01735	731,0	0,01154	702,4	0,00788	666,7	0,00518	616,8
430	0,01790	739,6	0,01208	713,6	0,00845	682,2	0,00589	641,5
440	0,01843	747,9	0,01258	724,0	0,00897	695,6	0,00648	660,8
450	0,01894	755,8	0,01306	733,7	0,00945	707,8	0,00698	677,4
460	0,01944	763,4	0,01352	743,0	0,00989	719,2	0,00743	692,2
470	0,01992	770,8	0,01395	751,9	0,01029	730,1	0,00784	705,7
480	0,02039	778,0	0,01436	760,5	0,01067	740,5	0,00822	718,1
490	0,02084	785,1	0,01475	768,7	0,01104	750,2	0,00857	729,5
500	0,02128	792,0	0,01513	776,6	0,01138	759,5	0,00890	740,2
510	0,02171	798,8	0,01550	784,2	0,01171	768,3	0,00920	750,3
520	0,02214	805,5	0,01586	791,6	0,01203	776,5	0,00949	759,8
530	0,02256	812,1	0,01621	798,8	0,01234	784,4	0,00978	768,9
540	0,02297	818,6	0,01655	805,8	0,01265	792,1	0,01006	777,6
550	0,02338	825,0	0,01689	812,8	0,01296	799,7	0,01035	786,0

* При давлениях выше критического с ростом температуры нет резкой грани между жидким и газообразным состоянием.

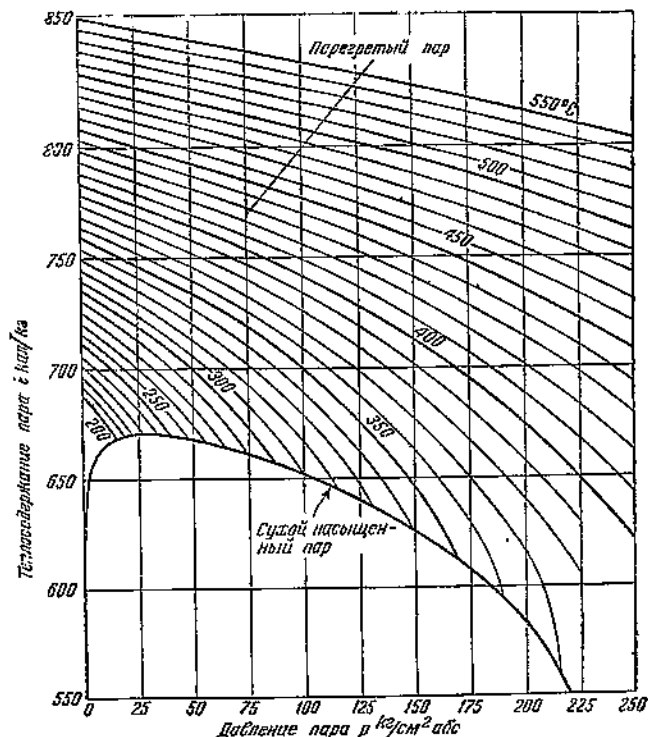


Фиг. 5. Зависимость теплоемкости перегретого водяного пара от температуры и давления при $p = \text{const}$ (по Кинану).



Фиг. 7. Диаграмма $i = f(p, x)$ для влажного пара воды.

$$c_p'' = \frac{i_{no}'' - i_{ne}'}{t_{no}'' - t_{ne}'} = \frac{\Delta i_{no}}{\Delta t_{no}}$$
 Чем ближе t_{ne}'' к t_{no}' , а следовательно, и t_{ne}'' к t_{ne}' , тем точнее значение c_p'' . Среднюю и истинную удельные теплоемкости перегретого пара и воды можно брать по таблицам, помещенным в курсах термодинамики. Зависимость средней удельной теплоемкости перегретого водяного пара при постоянном давлении от давления и температуры дана также на графике фиг. 5 для давлений до 387 ата и температуры до 720°С.



Фиг. 8. Диаграмма $i = f(p, t)$ для перегретого пара воды.

Полную теплоту пара можно находить также по i - s -диаграмме (фиг. 6, см. вклейку).

В табл. 1, 2 значения i для воды и ртути даны отдельно для жидкости и для сухого насыщенного пара, а для водяного пара то же имеется и на диаграмме i - p , помещенной на фиг. 7 и 8.

Между теплосодержанием и полной теплотой пара существует следующее соотношение:

$$\lambda = i - A p \cdot v_0 \text{ ккал/кг, (9)}$$

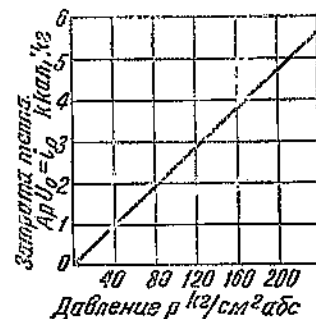
где v_0 — удельный объем некипящей жидкости при 0°С и данном давлении p , а выражение $A p v_0$ представляет собой работу, затрачиваемую на питание котла водой и передаваемую в виде механической энергии питательной воде в процессе действия питательных устройств (при $t_{no} = 0^\circ\text{C}$). Эта величина, как можно видеть на графике фиг. 9, очень мала даже для рабочих давлений до 100 ата; так, для $p = 100$ ата величина $A p v_0 = 2,34$ ккал/кг, что составляет около 0,3% полной теплоты пара.

За исключением очень высоких давлений величиной $A p v_0$ можно, как правило, пренебречь и принимать, что

$$\lambda \approx i \text{ ккал/кг, (10)}$$

беря i из табл. 1, а также из i - s -или i - p -диаграммы.

При расчетах паровых котлов необходимо иметь в виду, что питательная вода имеет температуру $t_{no} = 10 \div 250^\circ\text{C}$, причем температуры ниже $50 \div 100^\circ\text{C}$ в новейших установках встречаются редко. Эта вода вносит в котел количество тепла i_{no}' . В котельном агре-



Фиг. 9. Затрата тепла на подачу питательной воды ($A p v_0 = i_0$).

гате пару нужно сообщить лишь добавочное количество тепла

$$\Delta i = i_{ne} - i'_{w} \quad (11)$$

Значения величины i'_{w} даны в табл. 3.

Из диаграммы фиг. 7 видно, что по мере повышения давления, начиная с 40—50 *атм*, теплосодержание насыщенного пара постепенно падает. В то же время теплосодержание жидкости при температуре кипения непрерывно возрастает и, наконец, при некотором давлении $p_{кр}$, которому соответствует критическая температура насыщения $t_{кр}$, теплосодержание жидкости становится равным теплосодержанию сухого насыщенного пара. При этом полная теплота испарения $r = i_n - i_w$ становится равной нулю, т. е. жидкость, нагретая до температуры $t_{кр}$ при давлении $p_{кр}$, является сухим насыщенным паром. Эта точка носит название критической точки, а соответствующие давление и температура называются критическими (см. фиг. 4).

Для водяного пара в критической точке

$$i_{кр} = 515,5 \text{ ккал/кг.}$$

Свойства водяного пара изучались и уточнялись различными исследователями, и на основании этих исследований составлялись таблицы для пара. Наиболее известны таблицы Коха, Кноблауха, Моля и др. Для согласования различных таблиц водяного пара в 1929, 1930 и 1934 гг. собирались международные конференции, составившие уточненные и согласованные „скелетные таблицы“ с указанием на возможную неточность входящих в них величин.

Теплосодержания воды и перегретого пара приведены в табл. 3, составленной Кохом в соответствии со скелетными таблицами.

Нормальным паром условно называют сухой насыщенный пар, полученный при температуре кипения $t_n = 100^\circ \text{C}$ из воды, имеющей начальную температуру $t_w = 0^\circ \text{C}$ при постоянном давлении $p = 1,033 \text{ кг/см}^2 \text{ абс.}$

Для получения 1 *кг* нормального пара нужно затратить тепла $\Delta i = 639,2 \text{ ккал/кг} \approx 640 \text{ ккал/кг.}$

Паропроизводительность котла обычно характеризуется весовым количеством вырабатываемого в час пара $D \text{ кг/час}$. Ввиду разнообразия давлений и температур пара и температур питательной воды для оценки количества получаемого в котле тепла иногда пересчитывают количество действительно произведенного пара $D \text{ кг/час}$ на соответствующее количество нормального пара $D_n \text{ кг/час}$:

$$D_n = D \frac{\Delta i}{640} = D \frac{i_{ne} - i'_{w}}{640} \quad (12)$$

В США за нормальный пар принимают такой, который получен из воды при 100°C . При этом условии

$$\Delta i_n = 540 \text{ ккал/кг.}$$

5. Свойства газов

Основными параметрами, определяющими состояние газа, являются давление его p , температура $T^\circ \text{K}$ и удельный объем v . Между этими величинами существует приближенная зависимость, основанная на законах Бойля-Мариотта и Гей-Люссака. Эта зависимость, отнесенная к 1 *кг* газа и носящая наименование характеристического уравнения для газов, имеет вид

$$pv = RT. \quad (13)$$

Здесь давление p для однородности функции должно быть выражено в кг/м^2 . Величина R есть так называемая газовая постоянная.

Если вместо 1 *кг* газа характеристическое уравнение отнести к $\mu \text{ кг}$, т. е. к весу 1 моля, то оно примет вид

$$p\bar{V} = \mu RT, \quad (14)$$

где величина $\bar{V} \text{ м}^3$ обозначает объем 1 моля.

Обычно согласно закону Авогадро принимают, что объемы молей всех газов при одних и тех же p и T равны между собой. Однако при более точных вычислениях для реальных газов приходится считаться с некоторыми небольшими отклонениями этих объемов от постоянства. Приближенно объем моля принимают $\bar{V} = 22,4 \text{ м}^3$ при нормальных условиях, т. е. при 0°C и 760 *мм* рт. ст.

На основании только что сказанного можно установить:

$$\mu R = \bar{R} \approx \text{const} \approx 848. \quad (15)$$

Величина $\bar{R}$ носит название универсальной газовой постоянной. Из выражения (15) можно найти R для каждого газа по его молекулярному весу.

Из характеристического уравнения легко получить следующие соотношения:

$$R\gamma = 37,85; \quad (16)$$

$$\mu = 22,4\gamma. \quad (17)$$

По формулам (16) и (17), зная μ или R для данного газа, можно определить его удельный вес γ . В табл. 4 даны характеристики ряда газов.

Таблица 4
Характеристики технических газов

Газ	Формула	Атомность	Молекулярный вес		Удельный вес γ при 0° и 760 <i>мм</i> в кг/м^3	Объем моля при нормальных условиях в м^3	Газовая постоянная R
			приближенный	точный			
Воздух, не содержащий CO_2	O_2	—	(29)	(28,95)	1,293	22,40	29,27
Кислород	O_2	2	32	32,00	1,429	22,39	26,50
Азот	N_2	2	28	28,016	1,251	22,40	30,26
Водород	H_2	2	2	2,016	0,0898	22,43	420,6
Оксид углерода	CO	2	28	28,06	1,250	22,40	30,29
Углекислота	CO_2	3	44	44,00	1,977	22,26	19,27
Сернистый ангидрид	SO_2	3	64	64,07	2,926	21,89	13,24
Водяной пар	H_2O	3	18	18,016	0,805	22,40	46,7
Ацетилен	C_2H_2	4	26	26,02	1,1709	22,22	32,59
Метан	CH_4	5	16	16,03	0,717	22,36	52,90
Этилен	C_2H_4	6	28	28,03	1,265	22,24	30,25
Этан	C_2H_6	8	30	30,05	1,356	22,16	28,21
Пропилен	C_3H_6	9	42	42,05	1,915	21,96	20,4
Пропан	C_3H_8	11	44	44,06	2,019	21,82	19,3

При исследовании работы паровых котлов приходится встречаться, главным образом, со следующими газами: O_2 ; H_2 ; CO ; CH_4 ; CO_2 ; SO_2 ; N_2 ; воздухом и парами H_2O , входящими в состав продуктов горения и горючих газов.

При нагревании и охлаждении газов изменение содержания в них тепла определяется по формуле

$$\Delta Q = Gc'(t'' - t') = Vc(t'' - t'),$$

где c' — весовая теплоемкость газов в $\text{ккал/кг}^\circ\text{C}$; c — объемная теплоемкость газов в $\text{ккал/м}^3^\circ\text{C}$, причем

$$c = c' \cdot \gamma. \quad (18)$$

В паровых котлах чаще всего приходится иметь дело с удельной теплоемкостью при постоянном давлении c_p ; лишь при некоторых расчетах применяется теплоемкость при постоянном объеме c_v (определение коэффициента теплоотдачи).

Молекулярная, а следовательно, и объемная теплоемкости для двухатомных газов (N_2 ; O_2 ; CO ; H_2) примерно одинаковы. Поэтому водород H_2 , у которого $\mu \approx 2$, имеет среди двухатомных газов самую большую весовую теплоемкость. Из трехатомных газов теплоемкость у H_2O больше, чем у CO_2 .

По формуле

$$\mu c_p = \mu c_v + 1,99 \quad (19)$$

можно, зная одну из теплоемкостей c_p или c_v , найти другую.

Весовая теплоемкость определяется по молекулярной делением ее на молекулярный вес μ , а объемная — де-

Таблица 5

Значения средней объемной удельной теплоемкости при постоянном давлении $c_{p, \text{ср}}$ для технических газов по Юсти

Температура $^\circ\text{C}$	Средняя удельная объемная теплоемкость газов при постоянном давлении $c_{p, \text{ср}} \text{ ккал/м}^3^\circ\text{C}$						
	H_2	N_2	O_2	CO	H_2O	CO_2	Воздух
0	0,306	0,311	0,312	0,311	0,356	0,384	0,310
100	0,309	0,311	0,315	0,311	0,358	0,415	0,311
200	0,310	0,313	0,319	0,313	0,363	0,431	0,313
300	0,311	0,314	0,324	0,315	0,367	0,449	0,315
400	0,312	0,317	0,330	0,318	0,372	0,464	0,318
500	0,312	0,319	0,334	0,321	0,378	0,480	0,321
600	0,313	0,322	0,339	0,325	0,384	0,492	0,325
700	0,314	0,325	0,343	0,328	0,390	0,504	0,328
800	0,315	0,328	0,347	0,332	0,397	0,513	0,331
900	0,317	0,331	0,350	0,335	0,404	0,522	0,334
1000	0,318	0,334	0,354	0,338	0,409	0,530	0,337
1100	0,319	0,337	0,356	0,341	0,416	0,541	0,340
1200	0,321	0,340	0,359	0,344	0,422	0,544	0,343
1300	0,323	0,342	0,362	0,346	0,428	0,550	0,345
1400	0,325	0,345	0,364	0,349	0,436	0,556	0,347
1500	0,329	0,349	0,368	0,353	0,439	0,565	0,352
1750	0,333	0,353	0,372	0,356	0,455	0,573	0,355
2000	0,336	0,356	0,376	0,359	0,465	0,580	0,361
2250	0,340	0,360	0,380	0,362	0,474	0,586	0,361
2500	0,347	0,365	0,385	0,368	0,489	0,596	0,366
2750	0,350	0,367	0,387	0,369	0,496	0,600	0,370
3000	0,354	0,369	0,391	0,371	0,501	0,604	0,374

лением на объем моля при 0°C и 760 мм рт. ст.:

$$c \approx \frac{\mu c'}{22,4}.$$

Зависимости теплоемкости от температуры были установлены Лангеном и Шребером, Партингтоном и Шнилингом, Шюле и др. Кроме того, в последнее время произведены очень точные опыты и вычисления по формуле Планка с использованием квантовой теории. Этим путем составлены таблицы Юсти.

По формулам, устанавливающим зависимость теплоемкости от температуры, можно найти как истинную весовую теплоемкость c^u , так и среднюю от 0°C до заданной температуры t или в пределах двух температур t' и t'' .

Если выразить молекулярную теплоемкость в общем виде

$$\mu c^u = a' + b't,$$

то

$$c^u = \frac{a'}{\mu} + \frac{b'}{\mu} t = a + bt.$$

Средняя теплоемкость от 0°C до $t^\circ\text{C}$ будет

$$c_0^t = a + \frac{b}{2} t, \quad (20)$$

а средняя теплоемкость от t' до t''

$$c_{t'}^{t''} = a + \frac{b}{2} (t' + t''). \quad (21)$$

Таблица 6

Значения средней весовой удельной теплоемкости при постоянном давлении $c_{p, \text{ср}}$ для технических газов по Юсти

Температура $^\circ\text{C}$	Средняя весовая удельная теплоемкость газов при постоянном давлении $c_{p, \text{ср}} \text{ ккал/кг}^\circ\text{C}$						
	H_2	N_2	O_2	CO	H_2O	CO_2	Воздух
0	3,406	0,248	0,218	0,248	0,440	0,196	0,240
100	3,443	0,249	0,220	0,249	0,446	0,210	0,240
200	3,445	0,250	0,223	0,250	0,451	0,220	0,242
300	3,446	0,251	0,227	0,252	0,456	0,230	0,244
400	3,446	0,253	0,231	0,254	0,463	0,236	0,246
500	3,470	0,255	0,234	0,257	0,470	0,244	0,249
600	3,480	0,257	0,237	0,260	0,477	0,251	0,251
700	3,490	0,259	0,240	0,262	0,485	0,256	0,253
800	3,450	0,262	0,243	0,265	0,493	0,261	0,256
900	3,510	0,265	0,245	0,268	0,502	0,266	0,259
1000	3,530	0,267	0,248	0,270	0,508	0,270	0,251
1100	3,550	0,269	0,249	0,273	0,517	0,274	0,263
1200	3,570	0,272	0,251	0,275	0,526	0,277	0,265
1300	3,590	0,274	0,253	0,277	0,531	0,287	0,267
1400	3,610	0,276	0,255	0,279	0,540	0,283	0,269
1500	3,630	0,279	0,258	0,282	0,546	0,288	0,272
1750	3,680	0,282	0,259	0,285	0,563	0,292	0,272
2000	3,740	0,285	0,263	0,288	0,578	0,295	0,277
2250	3,790	0,287	0,265	0,290	0,591	0,298	0,281
2500	3,840	0,291	0,268	0,294	0,603	0,303	0,283
2750	3,880	0,293	0,271	0,296	0,614	0,305	0,285
3000	3,930	0,295	0,274	0,297	0,623	0,307	0,286

В случае более сложных зависимостей теплоемкости от температуры для нахождения средней ее величины в интервале между t' и t'' нужно взять разность теплоемкостей при t' и t'' и разделить ее на $t'' - t'$.

Все расчеты у нас до последнего времени производились по данным и формулам, основанным на таблицах Партингтона и Шиллинга¹. По ним же подсчитывались и результаты всех испытаний последних лет, по которым устанавливались различные расчетные эмпирические коэффициенты.

В последнее время намечается переход на новые, более точные данные Юсти. Для этого перехода предварительно проведена большая работа по пересчету коэффициентов, полученных из прежних опытов.

Теплоемкости по Юсти даны в табл. 5 и 6.

Эти теплоемкости получены без учета диссоциации газов. При температурах выше 1500—1600° С влияние диссоциации становится заметным и к данным таблиц Юсти необходимы поправки на диссоциацию в этих пределах температур.

На основании данных Партингтона и Шиллинга Л. К. Рамзин предложил для средней объемной теплоемкости продуктов горения следующие приближенные формулы (22) и (23). Для сравнительно точных вычислений служит формула

$$c_g = 0,309 + 0,0009 RO_2 + 0,0008 \frac{G_{H_2O}}{K^p} \sqrt{RO_2} + \frac{t}{10^6} \left[11 + 0,65 \left(RO_2 + \frac{G_{H_2O}}{K^p} \right) \right]. \quad (22)$$

Эта формула дает величину c_g с точностью до 0,6%. При более грубых вычислениях с точностью до 4% можно пользоваться формулой

$$c_g = 0,323 + 0,000018 t. \quad (23)$$

Смеси газов. Смеси газов подчиняются закону Дальтона, по которому:

1) каждый, входящий в состав смеси, газ занимает весь предоставленный для смеси объем, распределяясь в нем равномерно;

2) давление смеси равняется сумме давлений отдельных газов, которое они имели бы, если бы каждый из них занимал весь объем; давление каждого отдельного газа при этих условиях называется его парциальным давлением.

Каждый отдельный газ, входящий в состав смеси, носит название компонента этой смеси.

Если смесь газов состоит из n компонентов и парциальные их давления соответственно равны $p_1, p_2, p_3, \dots, p_n$, то давление смеси

$$p = p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_i + \dots + p_n.$$

Смесь может быть задана по весовым и по объемным долям компонентов.

Если веса компонентов обозначены соответственно через $G_1, G_2, G_3, \dots, G_i, \dots, G_n$, а вес смеси через G , то соотношения

$$g_i = \frac{G_i}{G} \text{ и т. д.}$$

носят названия весовых долей компонентов.

Если объем компонентов и объем смеси при нормальных условиях, т. е. при $t = 0^\circ \text{C}$ и $p = 760 \text{ мм рт. ст.}$ обозначены соответственно через $V_1, V_2, \dots, V_i, \dots, V_n$ и V , то величины

$$v_i = \frac{V_i}{V} \text{ и т. д.}$$

носят название объемных долей компонентов.

Как весовые, так и объемные доли компонентов смеси могут быть выражены в долях единицы и тогда

$$g_i \leq 1 \text{ и } v_i \leq 1,$$

или в процентах:

$$g_i \leq 100 \text{ и } v_i \leq 100.$$

Для пересчета состава смеси, заданной объемными долями, на весовые и наоборот необходимо знать удельные веса компонентов данной смеси $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_i, \dots, \gamma_n$. Тогда

$$g_i = \frac{v_i \gamma_i}{\sum_{i=1}^n v_i \gamma_i} = v_i \frac{\gamma_i}{\gamma}, \quad (24)$$

если смесь задана объемными долями, и

$$v_i = \frac{\frac{g_i}{\gamma_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\gamma_i}}, \quad (25)$$

если смесь задана весовыми долями.

Удельный вес смеси при нормальных условиях

$$\gamma = v_1 \gamma_1 + v_2 \gamma_2 + \dots + v_i \gamma_i + \dots + v_n \gamma_n = \sum_{i=1}^n v_i \gamma_i, \quad (26)$$

или

$$\gamma = \frac{1}{\frac{g_1}{\gamma_1} + \frac{g_2}{\gamma_2} + \dots} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\gamma_i}}. \quad (27)$$

Удельный объем смеси при тех же нормальных условиях

$$v = \frac{1}{v_1 \gamma_1 + v_2 \gamma_2 + \dots + v_i \gamma_i + \dots + v_n \gamma_n} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n v_i \gamma_i}, \quad (28)$$

или

$$v = \frac{\frac{g_1}{\gamma_1} + \frac{g_2}{\gamma_2} + \dots + \frac{g_i}{\gamma_i} + \dots + \frac{g_n}{\gamma_n}}{\sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\gamma_i}}. \quad (29)$$

Газовая постоянная смеси

$$R = g_1 R_1 + g_2 R_2 + \dots + g_i R_i + \dots + g_n R_n = \sum_{i=1}^n g_i R_i, \quad (30)$$

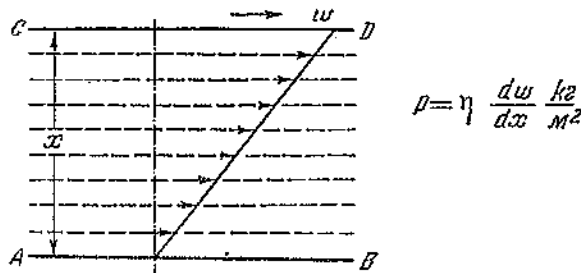
или

$$R = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{v_i}{R_i}}. \quad (31)$$

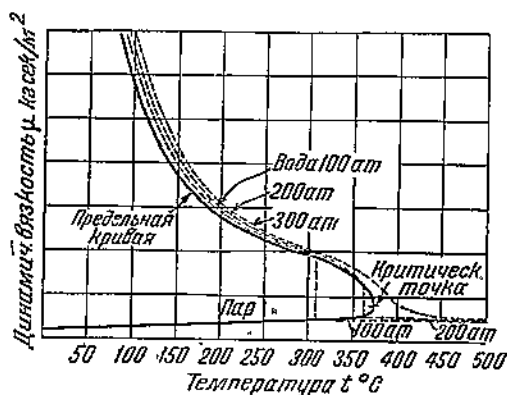
Если смесь задана весовыми долями, то весовая удельная теплоемкость

$$c' = c'_1 g_1 + c'_2 g_2 + c'_i g_i + \dots + c'_n g_n = \sum_{i=1}^n c'_i g_i \text{ ккал/кг } ^\circ \text{C}, \quad (32)$$

¹ См., например, Технические нормы для расчета и проектирования котельных агрегатов, 1937, Тепловой расчет, табл. 6, стр. 12.



Фиг. 12. К определению понятия вязкости.



Фиг. 13. Вязкость водяного пара в зависимости от температуры и давления (изотермы).

Вязкость¹. Если жидкость, пар или газ находится между двумя параллельными плоскими стенками AB и CD (фиг. 12), из которых одна (AB) неподвижна, а другая (CD) движется в своей плоскости со скоростью w , то находящиеся между стенками пар, газ или жидкость вследствие вязкости тоже будут двигаться в том же направлении. Скорость движения отдельных слоев равна w у плоскости CD и постепенно убывает по направлению к плоскости AB , у которой она может быть принята равной нулю. Изменение скорости по расстоянию x между плоскостями выразится производной $\frac{dw}{dx}$. Это изменение скорости вызывается тем, что на поверхности каждого из указанных слоев действует замедляющая сила ρ . Величина этой силы, приходящаяся на единицу поверхности слоя, пропорциональна $\frac{dw}{dx}$:

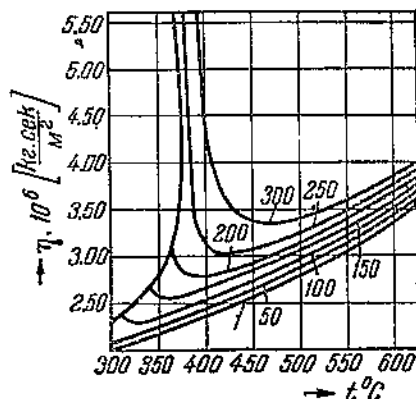
$$\rho = \mu \frac{dw}{dx}, \quad (39)$$

где μ — коэффициент абсолютной, или динамической, вязкости данной жидкости или газа. Из формулы (39) легко видеть, что коэффициент динамической вязкости имеет размерность $kg \cdot sec/m^2$. Существует еще понятие кинематической вязкости ν , которая связана с динамической вязкостью следующим образом:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}, \quad (40)$$

где ρ — плотность газа, размерность которой $kg \cdot sec^2/m^4$. Кинематическая вязкость имеет размерность m^2/sec .

¹ Подробно см. „Известия Всесоюзного теплотехнического института“ № 7, 1940 г. и „Журнал технической физики“ № 1 и 7, 1939 г., статьи Тимрота и Варгафтика.



Фиг. 14. Вязкость водяного пара в зависимости от температуры и давления (изобары).

Динамическая вязкость воды может быть взята из следующей таблицы:

$t^\circ C = 0$	50	100	150	200	250	300	350
$\mu \cdot 10^6 \text{ кг} \cdot \text{сек}/\text{м}^2 =$	182,5	56,0	28,8	18,9	14,1	11,2	9,3

Вязкость жидкой ртути характеризуется следующими величинами:

$t^\circ C = 0$	20	40	100
$\mu \cdot 10^6 \text{ кг} \cdot \text{сек}/\text{м}^2 =$	170	157	148

Дифенил (C_6H_5)₂ при $40^\circ C$ имеет вязкость $\mu \cdot 10^6 = 200 \text{ кг} \cdot \text{сек}/\text{м}^2$, а при температуре кипения $t_k = 255^\circ C$ при атмосферном давлении $\mu \cdot 10^6 = 27,4 \text{ кг} \cdot \text{сек}/\text{м}^2$.

На фиг. 13 изображена диаграмма, дающая принципиальную зависимость динамической вязкости воды и водяного пара от температуры.

Числовые значения вязкости водяного пара в зависимости от температуры и давления нанесены на кривых фиг. 14 и могут быть вычислены по следующей формуле:

$$\mu_{t,p} = \frac{\mu_t}{\left(1 - \frac{b}{v}\right)^2},$$

где $\mu_{t,p}$ — искомая динамическая вязкость пара при данной температуре и давлении;

Таблица 8
Значения a , ρ_0 и γ_0 для технических газов

Наименование газов	Химическая формула	Динамическая вязкость при $0^\circ C$ и 760 мм в $10^{-6} \text{ кг} \cdot \text{сек}/\text{м}^2$	Кинематическая вязкость ν_0 при $0^\circ C$ и 760 мм в $10^{-6} \text{ м}^2/\text{сек}$	Коэффициент Сутерленда a
Водород	H_2	0,8645	94,27	81,7
Оксид углерода	CO	1,688	13,26	104
Углекислота	CO_2	1,407	7,93	266
Метан	CH_4	1,056	14,49	171
Этилен	C_2H_4	0,951	7,46	257
Кислород	O_2	1,964	13,49	131
Азот	N_2	1,706	13,31	112
Сухой воздух	—	1,753	23,30	122
Водяной пар в продуктах горения или во влажном воздухе	H_2O	0,883	10,77	699

μ_t — динамическая вязкость пара при данной температуре и давлении $p = 1 \text{ кг/см}^2 \text{ абс.}$;
 b — постоянная, равная $0,75 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{кг}$;
 $v \text{ м}^3/\text{кг}$ — удельный объем пара при данных температуре и давлении $1 \text{ кг/см}^2 \text{ абс.}$
 Величина μ_t определяется по следующей таблице:

$t \text{ } ^\circ\text{C} =$	100	200	300	400	500	600
$\mu \cdot 10^6 \text{ кг} \cdot \text{сек}/\text{м}^2 =$	1,23	1,62	2,01	2,40	2,84	3,35

Зависимость вязкости газов от температуры достаточно хорошо выражается формулой Сутерлянда

$$\mu_t = \mu_0 \frac{1 + \frac{a}{273}}{1 + \frac{a}{T}} \sqrt{\frac{T}{273}} \quad (43)$$

Эта формула была выведена Сутерляндом на основе кинетической теории газов. Соответствующие значения постоянной a приведены в табл. 8.

Для технических газов в табл. 8 приведены значения коэффициента a и динамической вязкости при 0° ; имея эти значения, можно вычислить по вышеприведенной зависимости (43) динамическую вязкость этих газов для любой температуры.

Для вычисления кинематической вязкости газов требуется, как видно из приведенной ранее формулы (40), знать величину плотности газов для различных температур и давлений. Ее находят следующим образом:

$$\rho = \frac{\gamma_0}{g} \frac{273}{T} \frac{p}{1,0333} \quad (44)$$

Теплопроводность, плотность и приближенное значение вязкости смесей газов находят, пользуясь объемным составом смеси, по следующим формулам:

$$\lambda = b_1 \lambda_1 + b_2 \lambda_2 + \dots + b_i \lambda_i + \dots + b_n \lambda_n = \sum_{i=1}^{i=n} b_i \lambda_i \quad (45)$$

$$\rho = \sum_{i=1}^{i=n} b_i \rho_i \quad (46)$$

$$\mu = \sum_{i=1}^{i=n} b_i \mu_i \quad (47)$$

Эти формулы предполагают пропорциональность каждой из входящих в них величин парциальному давлению соответствующего компонента. При вычислении вязкости указанное предположение может привести к некоторым ошибкам.

Существует тоже приближенный, но более точный метод подсчета вязкости газовых смесей, предложенный Манном. По Манну

$$\frac{1}{\nu} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{b_i}{\nu_i} \quad (48)$$

Здесь предполагается, что кинематическая вязкость смеси ν и кинематические вязкости отдельных газов взяты при одной и той же температуре t и давлении p . При изменении температуры следует, пользуясь формулой Манна, вычислять вязкость смеси ν_0 для нормальных условий, беря при этом и вязкости компонентов ν_{i0} при тех же условиях.

Имея кинематическую вязкость смеси для нормальных условий, можно по формуле (40)

$$\mu_0 = \frac{\gamma_0}{g} \gamma_0 = \frac{\gamma_0}{g} \sum_{i=1}^{i=n} b_i \gamma_i \quad (49)$$

найти ее динамическую вязкость для тех же условий. После этого уже можно пересчитать динамическую вязкость смеси на требуемую температуру t по формуле (43).

ГЛАВА ВТОРАЯ

ТОПЛИВО И ЕГО ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

7. Общие сведения о топливе

Различные виды топлива представляют собой углеродистые и углеводородистые вещества органического, по преимуществу растительного, происхождения. Наиболее распространенными видами топлива являются древесина, торф, горючие сланцы, ископаемые угли, нефть и продукты переработки ее, природные и искусственные газы, отходы различных производств: коксовый газ, газ доменных печей, опилки, одубина, кокс газовых заводов и т. п.

Применение многих ценных видов топлива для технологических целей в металлургии и других производствах и для переработки с получением различных продуктов расширяется. Поэтому число видов энергетического топлива, сжигаемого

в топках паровых котлов, все время сокращается. В связи же с переработкой топлива все большее число получающихся при этом отбросов (газовый кокс, полукокс, коксик, отходы углеобогащения, крекингмазут и т. п.) входит в число энергетических топлив.

При сжигании топлива входящие в его состав элементы соединяются с кислородом воздуха, причем химическая энергия превращается в тепло, идущее на нагрев продуктов горения.

Использование тепла этих продуктов горения в промышленности возможно следующими способами:

а) в отопительных устройствах, промышленных печах и различных аппаратах для производственных процессов, требующих высокой температуры;

б) в цилиндрах двигателей внутреннего сгорания (и рабочем пространстве газовых турбин), где используется давление продуктов горения;

в) в котельных агрегатах, вырабатывающих пар для энергетических установок или для отопительных и нагревательных систем.

Все основные виды топлива могут быть разделены по агрегатному состоянию на твердые, жидкие и газообразные, а по способу получения — на естественные и искусственные. Классификация топлив по этим признакам дана ниже. Разрядкой выделены топлива, используемые в крупных котельных установках.

Теплотворной способностью Q топлива называется выделившееся при полном его сгорании количество тепла, отнесенное к 1 кг топлива и выраженное в килокалориях. Теплотворная способность топлива определяется с помощью калориметрической бомбы и калориметра.

Классификация топлив

Агрегатное состояние	Естественные виды топлива	Искусственные виды топлива
Твердое топливо	Каменные угли, антрациты, бурые угли, торф, горючие сланцы, дрова, камыш, отходы промышленности и сельского хозяйства: опилки, щепа, одубина, лузга, костра	а) Брикеты: древесный, торфяной, каменноугольный, антрацитовый, низяк б) Кокс: торфяной, каменноугольный, нефтяной; древесный уголь, полукокс, кокс газовых заводов в) Пыль: каменноугольная, антрацитовая, торфяная
Жидкое топливо	Нефть	а) Нефтяные продукты: бензин, керосин, пиронафт, мазуты, смолы, бензол, толуол, тетралин, смоляные масла б) Продукты гидрогенизации твердых топлив в) Спирты: этиловый и метиловый; смесь их с бензином; г) Коллоидальное топливо (смесь мазута с угольной пылью)
Газообразное топливо	Природный газ	Газ: доменный (колошниковый) воздушный, смешанный, генераторный, водяной, карбюрированный водяной, двойной водяной, коксовый, ретортный (светильный, горючей) Крекинг-газ, газ подземной газификации

В продуктах горения топлива содержатся водяные пары. Если эти пары сконденсируются в воду, как и происходит в калориметрической бомбе, то их теплота испарения войдет в теплотворную способность топлива; соответствующая величина называется высшей теплотворной способностью Q^h . Исключив из полученной величины теплоту испарения воды топлива, получим низшую теплотворную способность топлива Q^h , чаще всего и применяемую в расчетах, так как вода в дымовых газах обычно остается в виде перегретого пара.

Почти в каждом топливе содержатся различные минеральные примеси, составляющие его золу, и большее или меньшее количество воды, называемое его влагой. Зола и влага в горении не участвуют и ухудшают качество топлива, снижая его теплотворную способность.

Если твердое топливо нагревается без доступа воздуха, то оно выделяет органические газы и пары, называемые летучими. После выхода из топлива летучих остается твердый остаток — кокс. Выход летучих из топлива определяет способность топлива давать при горении большее или меньшее пламя, как и сам вид пламени, что имеет большое значение при сжигании топлива. Поэтому выход летучих является одной из основных характеристик топлива.

При высушивании очень влажного топлива на воздухе через некоторое время потеря топливом влаги прекращается, что обнаруживается по прекращению уменьшения его веса. Высушенное таким образом топливо носит название воздушнотвердого. Если удалить всю влагу топлива путем искусственной сушки, то такое топливо называется абсолютно сухим.

Характеристика топлива дается техническим и элементарным химическим анализом его. При элементарном химическом анализе топлива определяется процентное содержание по весу входящих в него элементов: углерода C, водорода H, кислорода O, азота N и серы S. При техническом анализе определяются количества золы, влаги, выход летучих и кокса, а также теплотворная способность.

Топливо в том виде, как оно используется, носит название рабочего, а вещество, составляющее его, — рабочей массой топлива.

Для того чтобы можно было сравнивать между собой веса различных топлив, отличающихся друг от друга своей теплотворной способностью, введено понятие условного топлива. Условным топливом называется такое топливо, теплотворная способность которого равна 7000 ккал/кг. Пересчет данного рабочего топлива на условное производится умножением его веса на отношение теплотворных способностей этих топлив, т. е. на величину

$$\frac{Q^h}{7000}$$

8. Твердые, жидкие и газообразные энергетические топлива

Твердое топливо. Твердому топливу, особенно минеральному, принадлежит ведущая роль в энергетическом хозяйстве СССР и промышленных капиталистических стран. Минеральным твердым топливом является торф, ископаемые угли и горючие сланцы. Ископаемые угли делятся на три основные группы: бурые угли, каменные угли и антрациты. Все эти виды минерального топлива произошли из растительных веществ и различаются друг от друга по своему химическому возрасту, т. е. по тому, как далеко зашли превращения исходного растительного вещества. По химическому возрасту эти топлива располагаются в следующем порядке: антрациты, каменные угли, бурые угли и торф. Чем старше топливо, тем больше в нем углерода и меньше кислорода, тем ниже гигроскопичность топлива, тем меньше выход летучих. Кроме того оно отличается меньшим отношением суммы кислорода и азота к водороду $\frac{O+N}{H}$.

Каменные угли по выходу летучих делят на тощие и пламенные. Пламенные угли дают выход летучих от 16 до 60 %, тощие — от 8 до 15 %, антрациты — не более 7 %. По составу антрациты отличаются от углей меньшим содержанием водорода, кислорода и большим — углерода. Отличительной особенностью каменных углей и антрацитов является химически нейтральный характер их вещества.

Бурые угли, вещество которых имеет кислый характер, делятся на следующие три группы в порядке увеличивающегося химического возраста: лигниты, землистые и смолистые бурые угли. Лигниты представляют собой светлокоричневую массу землистого вида, содержащую включения, сохранившие структуру исходного растения. Землистые бурые угли — темнокоричневого цвета и не содержат подобных включений. Смолистые бурые угли имеют почти черную блестящую массу и обладают раковистым изломом. К бурым углям относятся и так называемые бог-хеды, состоящие из плотной однородной массы бурого или черно-бурого цвета с раковистым изломом.

Торф, в естественном состоянии представляет либо рассыпчатую землистую массу бурого цвета, либо сильно обводненную пластическую массу от темножелтого до черно-бурого цвета. По происхождению различают верховой, переходный и низинный торф; каждый из них может быть более или менее разложившимся. Зольность в верховом торфе наименьшая, в низинном — наибольшая. Теплотворная способность горючей массы торфа тем выше, чем более разложившимся является торф. По способу добычи различают

торф ручной резки, машинноформовочный, гидроторф и фрезерный торф. У нас наибольшее распространение в настоящее время имеют гидроторф, фрезерный торф и отчасти машинный торф. Фрезерный торф получается в виде крошки, в которой зерна размером до 0,5 мм и от 0,5 до 2,0 мм составляют примерно по 30 % весовых. Около 10 % составляют куски свыше 25 мм.

Следующим видом естественных твердых топлив являются дрова. В СССР много леса, но сжигание древесины в виде дров нерационально, и потому дрова постепенно заменяются другими видами топлива. Эта замена происходит особенно интенсивно в области энергетики, где на дровах сейчас работают лишь немногие мелкие установки.

Вес дров зависит от породы и влажности. Различают дрова твердых пород с большим объемным весом, например, дуб, бук, береза, и легких (мягких) пород — сосна, осина, ольха и ель. Если дрова содержат менее 25 % влаги, они считаются сухими. При 25—35 % влаги они считаются полусухими, при содержании 35—50 % влаги — влажными.

Близкими по своим качествам к дровам являются такие топлива, как щепа, получающаяся путем дробления дров и отбросов деревообделочной промышленности, одубина, опилки и др. Эти отходы имеют довольно значительное распространение в котельных установках. К ним примыкают так называемые суррогаты топлива — промышленные и сельскохозяйственные отходы, используемые некоторыми предприятиями и населением для сжигания. Число их видов весьма велико, и в безлесных местностях они играют значительную роль. К суррогатам топлива относятся: чингалак, кукурузный кочан, солома, подсолнечная лузга, рисовая шелуха, костра и др. Они отличаются низкой теплотворной способностью и большим удельным объемом.

К искусственным твердым топливам относятся кокс, брикеты и угольная пыль. Металлургический кокс, отличающийся прочностью, плотностью и другими специальными свойствами, применяется, главным образом, в доменном процессе. Кокс получается из специальных сортов жирных коксующихся углей в так называемых коксовых печах. Кокс газовых заводов представляет побочный продукт при производстве светильного газа; он обычно сжигается на самом заводе и под котлами. Полукоксом называют твердый остаток от термической обработки углей при низкой температуре, имеющей целью получить жидкие смолистые продукты — дегти; он тоже сжигается под котлами. Кокс, полученный при той или иной термической обработке торфа, носит название торфяного кокса. Древесный уголь, являющийся продуктом сухой перегонки дров, в большом количестве вырабатывается на Урале и служит для выплавки высококачественных перелдальных чугунов в малых доменных печах.

Мелочь различных топлив для удобства транспортирования и повышения экономичности сжигания в топках малой мощности часто превращают в брикеты на специальных прессах. Некоторые из топлив, например опилки, прессуются без примесей, другие же, как, например, бурые угли, тощие каменные угли, требуют прибавления связывающего вещества, которым чаще всего является каменноугольная смола — пек (побочный продукт коксования). Изготавливаемым брикетам придают форму куба, шара, кирпича и т. п.

Превращение твердых топлив, главным образом, углей, в порошок или пыль получило широкое распространение после мировой войны 1914—1918 гг. В настоящее время на большинстве наших средних и крупных электрических станций, построенных в течение первой и второй пятилеток, сжигается угольная пыль. Пыль (или порошок), получаемая из просушенного топлива путем размола, состоит из мельчайших частиц размером до 200 μ . Превращение твердого топлива в пыль дает возможность полной механизации его сжигания и транспорта в пределах котельной установки и позволяет строить топки любой мощности.

Несколько особняком среди энергетических твердых топлив стоят горючие сланцы. В сланцах негорючая часть составляет от 40 до 85%. Характерным для горючих сланцев является содержание в их минеральной массе в большом количестве карбонатов — солей угольной кислоты — CaCO_3 , MgCO_3 , FeCO_3 , в других видах ископаемого твердого топлива присутствующих, обычно, в небольших количествах. Многие сланцы в высушенном состоянии распадаются на тонкие пластинки, загораются от спички и горят копящим пламенем с характерным запахом. После выгорания горючей части сланца его зола часто сохраняет первоначальную форму и размеры кусков сланца, которые, однако, легко разрушаются. Выход летучих из сланцев, считая на горючую массу, доходит до 80%. При горении сланцы не спекаются. Содержание влаги в сланцах колеблется от 8 до 25%; они легко впитывают и отдают всю влагу.

Сланцы применяются также для перегонки, в результате которой получают газ, смола и полукокс. Лишь после Октябрьской революции в СССР началось систематическое изучение запасов и методов использования сланцев, а также техническое применение их. В Эстонской ССР использование сланцев развито очень широко. От горючих сланцев следует отличать углистые сланцы, представляющие собой тот же уголь, но с особо высокой зольностью (40—60%).

Жидкое топливо. Единственным видом природного жидкого топлива является нефть. Добытая из скважины сырая нефть непосредственно используется как топливо очень редко. Сырая нефть представляет собой жидкую смесь органических

соединений. Главную массу нефти составляют углеводороды; кроме того, нефть содержит жидкие кислородные, сернистые и азотистые соединения, растворенный парафин, смолы и асфальтены. Входящие в состав нефтей углеводороды относятся к классам нафтенных, полинафтенных, ароматических и метановых. В нефтях различных месторождений наблюдается преобладание той или иной из этих групп углеводородов.

При перегонке нефти на специальных заводах отгоняются легкие фракции, кипящие до 300°, дающие бензин и керосин. Остаток от перегонки называется мазутом.

Мазуты масляных нефтей идут на получение смазочных и изоляционных масел, а прочие мазуты, или нефтяные остатки, являются главным жидким энергетическим топливом. Интересы социалистического народного хозяйства в целом требуют более широкой и углубленной переработки нефти. В результате более глубокой переработки нефти выход мазута из года в год уменьшается, а сам мазут получается более вязким. Поэтому в качестве энергетического топлива в настоящее время у нас применяется только вязкий мазут. В последние же годы, с развитием крекирования, возникает вопрос об использовании в качестве энергетического жидкого топлива только очень вязкого крекинг-мазута. Дальнейшее развитие переработки нефти в СССР, повидимому, в ближайшее время приведет к тому, что под котлами она почти не будет сжигаться и нефтяные продукты будут применяться только в двигателях внутреннего сгорания.

Большой интерес вызывает в настоящее время коллоидальное топливо, представляющее смесь угольной пыли с мазутом или жидкими продуктами переработки углей.

Газообразное топливо. Естественным газовым топливом является природный, или естественный, газ, встречающийся вблизи нефтяных месторождений. Состав его колеблется в зависимости от характера месторождения.

Искусственными газовыми топливами являются: первичный газ, получающийся при швелевании, генераторный (воздушный, водяной, двойной, смешанный), доменный и коксовый газы.

Генераторный газ получается в газогенераторах при горении топлива в толстом слое, когда поступающего воздуха недостаточно для полного сгорания топлива. Воздушный генераторный газ получается при чисто воздушном дутье, водяной — при помощи вдувания перегретого водяного пара в слой кокса или антрацита. В случае применения угля вместо кокса получается двойной газ, состоящий из водяного газа и продуктов коксования. Тройной газ — это смесь водяного и генераторного газов и продуктов коксования. Полуводяной, или смешанный, газ получается путем введения водяного пара в воздух, подаваем-

мый под слой топлива. Силовой газ получается так же, как и смешанный, но не из кокса, а из малоценных топлив.

Из перечисленных газов в качестве энергетического топлива под котлами сжигают природный газ, а также доменный и иногда коксовый и генераторный газы.

В будущем в СССР должен получить большое значение генераторный газ различных видов, получаемый путем подземной газификации углей. О подземной газификации, выдвинутой в прошлом столетии Рамзаем и Менделеевым, В. И. Ленин в 1919 г. писал, что при таком техническом перевороте громадная масса человеческого труда, употребляемого теперь на добывание и развозку каменного угля, была бы сбережена. Использовать можно было бы даже наиболее бедные и неразрабатываемые ныне залежи каменного угля. В настоящее время процесс подземной газификации в СССР уже вышел из стадии опытного изучения и поставлен в промышленном масштабе.

Строительство первой опытной шахты для подземной газификации началось в феврале 1932 г. в Лисичанске, и уже в июне 1933 г. по указанию товарища Сталина был организован трест „Подземгаз“. С тех пор проведены большие работы на опытных станциях, в Горловке, в Лисичанске, а также на Ленинско-Кузнецкой, Крутовской, Шахтинской и других станциях. При этих работах было проверено несколько способов газификации. Газ получался вполне удовлетворительным по составу и теплотворной способности. В зависимости от того, применялось ли воздушное или паровое дутье, получался либо энергетический, либо технологический газ (табл. 22).

9. Основные месторождения и запасы топлива в СССР

За время существования советской власти проведена огромная работа по исследованию топливных ресурсов СССР. Было выяснено, что эти запасы неизмеримо больше, чем предполагалось до Октябрьской революции. Обнаружение новых запасов и месторождений угля продолжается и в настоящее время.

На карте (фиг. 15 см. вклейку) показаны наиболее крупные месторождения различных видов топлива в СССР. В табл. 9 даны с округлением запасы отдельных топлив по союзным республикам по данным XVII Международного геологического конгресса, состоявшегося в Москве в июле 1937 г. Запасы даны без учета Западной Белоруссии и Украины, Бессарабии, Литовской, Латвийской и Эстонской ССР, а также вновь вошедших в состав СССР областей Карело-Финской ССР.

В табл. 10 приведены геологические запасы ископаемых углей различных бассейнов и месторождений по данным XVII Международного геологического конгресса.

Донецкий бассейн — наиболее старый по времени эксплуатации из всех месторождений каменных углей в СССР. Он занимает площадь примерно в 23,5 тыс. км² и является одной из основных угольных баз СССР. Донецкий бассейн имеет ту характерную особенность, что количество летучих горючих в его углях неизменно падает по направлению с запада на восток и с севера на юг.

Шахты Донбасса находятся в управлении следующих трестов: Лисичануголь, Первомайскуголь, Кировуголь, Сергоуголь, Ворошиловуголь, Свердловуголь, Краснодонуголь, Фрунзеуголь, Донбассантрацит, Боковантрацит, Советскуголь, Буденновуголь, Орджоникидзеуголь, Артемуголь, Дзержинскуголь, Красноармейскуголь, Макеевуголь, Куйбышевуголь, Сталинуголь, Снежная антрацит, Чистяковантрацит, Гукувуголь, Шахтантрацит, Несветай антрацит (выделены районы, в которых преобладают антрациты).

Кузнецкий бассейн является второй, а Карагандинский — третьей угольной базой СССР. В Кузнецком

Таблица 9
Запасы топлив СССР

Союзные республики	Ископа- емые угли	Горючие сланцы	Нефть	Природ- ные горю- чие газы	Торф	Древесное топливо в млн. м ³	Всех запасов в млн. т услов- ного топлива (7 000 ккал/кг)
	Общие геологические запасы в млн. т натурального веса; природные газы в млн. м ³						
РСФСР	1 502 600,0	31 450,0	2 000,0	499 550,0	140 000,0	23 700,0	1 284 050,0
УССР	68 700,0	115,0	—	—	2 600,0	50,0	69 450,0
БССР	—	—	—	—	2 700,0	60,0	1 200,0
Азербайджанская ССР	—	—	2 550,0	285 650,0	—	70,0	4 300,0
Грузинская ССР	300,0	—	175,0	25 050,0	—	200,0	600,0
Армянская ССР	50,0	—	—	—	—	20,0	25,0
Узбекская ССР	4 175,0	—	175,0	14 300,0	—	15,0	3 000,0
Туркменская ССР	3 550,0	—	250,0	50 700,0	—	20,0	2 950,0
Таджикская ССР	2 175,0	—	—	—	—	10,0	1 523,0
Казахская ССР	62 800,0	1 475,0	2 000,0	110 650,0	—	35,0	58 800,0
Киргизская ССР	10 050,0	—	—	—	—	15,0	7 000,0
Не распределено	—	Около 22 000,0	—	—	—	—	—
Итого по СССР	1 654 400,0	55 000	6 400,0	986 000,0	145 300,0	24 200	1 433 000

бассейне разработка угля ведется в следующих промышленных районах: Анжеро-Судженском, Кемеровском, Ленинском, Прокопьевском, Аралычском, Осинском и Киселевском.

Природные запасы топлива в СССР весьма значительны. Разведанные запасы углей в СССР составляют около 24% мировых запасов — 30% по каменным углям и 11% по бурым.

По запасам нефти и торфа СССР стоит на первом месте в мире, обладая по нефти 59%, а по торфу 60% всех мировых запасов. По углям СССР занимает второе место в мире после США. По количеству лесов СССР также занимает первое место, имея 610 млн. га лесной площади, в то время как наиболее богатые лесами США и Канада вместе имеют 542,0 млн. га.

Всего в России в 1913 г. было добыто 29,1 млн. т угля на площади, занятой СССР, а в СССР в 1937 г. в конце второй пятилетки добыто 127,9 млн. т, и наша страна вышла по добыче угля на четвертое место в мире.

К концу третьей пятилетки добыча угля запланирована в количестве 243 млн. т; несмотря на такие темпы роста добычи, все же на душу населения в 1937 г. у нас приходилось 757 кг добытого угля, тогда как в том же году в Англии — 5165 кг, в США — 3429 кг, в Германии 3313, во Франции — 1065 кг на душу населения.

XVIII съездом партии в качестве одной из важнейших задач ближайшего времени поставлено устранение этого отставания. Для этой цели среди других мероприятий должно осуществляться всемерное развитие местных топливных баз, ведущее к ликвидации дальних перевозок топлива.

Добыча угля в наших новых угольных базах Кузбассе и Караганде, а также в местных бассейнах — Подмосковном, Уральских, Восточной Сибири и других — растет значительно быстрее, чем в Донбассе. Так, в 1937 г. она выросла по сравнению с 1913 г. в Донбассе на 303%, в Кузбассе на 2314%, в Подмосковном бассейне на 2500%, в Восточной Сибири на 1020%, в бассейнах Урала на 663%. В связи с этим несмотря на неуклонный рост добычи угля в Донбассе, его доля во всей добыче с 87% в 1913 г. упала до 60% в 1937 г. и будет падать и дальше.

По нефти наряду с старыми районами сейчас у нас сильно развиваются вновь открытые осваиваемые и освоены месторождения. Из них наибольшие значения имеют месторождения, расположенные на про-

странстве от южного Приуралья до Волги, получившие наименование второго Баку, Печорские месторождения, месторождения Восточной и Западной Сибири, Украины в особенности Западной. Развитие добычи нефти в этих районах обеспечит ряд областей своей нефтью и сильно сократит ее перевозки. Здесь также роль Баку и Грозного, дававших в 1919 г. 96,1% всей добывавшейся в стране нефти, снижается, составляя в 1937 г. уже лишь 85%. К концу третьей пятилетки эти старые месторождения должны будут давать всего 65% всей потребляемой в стране нефти.

Одной из важнейших задач третьей пятилетки является создание в СССР в крупных масштабах газовой промышленности. Это должно быть осуществлено путем широкого использования богатейших запасов природных газов, развития газификации всех видов топлива и особенно развития подземной газификации углей, применяемой только в СССР. В третьей пятилетке намечено широкое развитие подземной газификации для нужд промышленности и снабжения газом Москвы, Ленинграда и Киева. Кроме подземной газификации в Донбассе и Подмосковном бассейне намечается сооружение станций на Востоке; должны быть построены опытные станции подземной газификации сланцев, имеющей большое значение для Ленинграда и Поволжья. В третьей пятилетке будет значительно увеличено использование газов коксовых и доменных печей, а также производство генераторного газа.

Общий запас природных газов в СССР исчисляется в 985 млрд. м³. Добыча же составляла в 1937 г. 2 млрд. м³ без западных областей против 70 млрд. м³ добытых в США. В третьей пятилетке намечена задача увеличения добычи природного газа у нас в 3,5 раза, т. е. до 7,0 млрд. м³. Богатейшие запасы природных газов имеются в Западной Украине.

По запасам торфа, составляющим 62 млрд. т условного топлива, и добыче его СССР занимает первое место в мире, превосходя по запасам в 1½ раза все капиталистические страны, вместе взятые. В капиталистических странах торф вообще играет ничтожную роль в топливном балансе и лишь в Германии, finishing после первой империалистической войны своих основных угольных месторождений, в течение некоторого времени торфу уделялось заметное внимание. Из наших запасов торфа на севере Европейской части Союза вместе с Западной и Восточной Сибирью расположено 84% добыча же здесь составляет всего 0,4% всей добычи по Союзу. Добыча торфа у нас в 1937 г. составила 23,8 млн. т в год.

В 1937 г. добыча распределялась следующим образом по областям и республикам с наибольшей добычей и потреблением торфа: Московская, Рязанская и Тульская области 5,8 миллионов тонн, Ивановская 3,7 миллионов тонн, Ленинградская 3,0 миллионов тонн, Белорусская ССР 2,4 миллионов тонн, Горьковская область 1,9 миллионов тонн, Украинская ССР 1,5 миллионов тонн, Калининская область около 1,5 миллиона тонн. Суммарная добыча по этим районам и республикам составляет 80% добычи Союза при количестве запасов в них 11,5% от запасов Союза.

В третьей пятилетке в отношении торфа у нас поставлен ряд задач, из которых особо важными являются ликвидация сезонности торфяной промышленности и обеспечение добычи в течение круглого года, путем внедрения искусственного обезвоживания торфа, а также развития брикетирования и энергетического использования торфа как сырья для получения газа и смолы. В третьей пятилетке должна быть завершена комплексная механизация всех трудоемких процессов, в особенности сушки, уборки и транспортировки торфа. Добыча торфа установлена в конце третьей пятилетки, т. е. в 1942 г. в 49 миллионов тонн в год (без западных областей). Наибольшее увеличение предусмотрено в северных и центральных районах, а также в Белоруссии, Поволжье и на Урале.

Таблица 10

Геологические запасы ископаемых углей различных бассейнов

Бассейны	Геологические запасы в тыс. т натурального веса
Донецкий	89,0 · 10 ⁶
Подмосковский вместе с Селижаровским и Боровичским	12,0 · 10 ⁶
Печорский	36,5 · 10 ⁶
Уральские месторождения	7,7 · 10 ⁶
Карагандинский	53,0 · 10 ⁶
Среднеазиатские республики	20 · 10 ⁶
Кузнецкий	450 · 10 ⁶
Минусинский	21 · 10 ⁶
Тунгусский бассейн	440 · 10 ⁶
Ленский бассейн	202 · 10 ⁶
Остальные месторождения Сибири, не считая дальневосточных	166 · 10 ⁶
Дальневосточные месторождения	30 · 10 ⁶

Большая работа проведена у нас по выявлению запасов горючих сланцев в различных районах страны. Общие геологические запасы СССР в настоящее время определяются в 55 миллиардов тонн. Наибольшими запасами в 4,3 миллиарда тонн обладает Куйбышевская область совместно с АССР Немцев Поволжья. В Чкаловской, Ленинградской областях, в Кировской области совместно с Удмуртской АССР, в Казахской ССР и в Горьковской области вместе с Чувашской АССР запасы сланцев колеблются от 1,2 до 4,0 миллиардов тонн. Крупные запасы сланцев, оцениваемые в 5 миллиардов тонн, имеются в Эстонской ССР. Наиболее значительными используемыми в настоящее время месторождениями являются Эстонские, Гдовские в Ленинградской области, Каширские в Куйбышевской области и Савельевские в Саратовской области. В третьей пятилетке поставлена задача увеличить общую добычу сланцев в восемь раз, доведя ее до 4 миллионов тонн в год в 1942 г. Особенно большое развитие добычи сланцев предусмотрено в районах, не обеспеченных другими видами топлива. Сланцы у нас получают комплексное использование, применение их в качестве топлива сопровождается утилизацией золы в качестве строительного материала.

Большое значение в дальнейшем будет иметь также развитие газификации сланцев и перегонка их.

Роль древесного топлива у нас постепенно падает. В настоящее время в основном на дрова разрабатывается непригодная для изделий древесины и используются как топливо различные отходы лесозаготовки, деревообработки и переработки древесины. Отличительными особенностями древесного топлива является малая теплоплотность, ограничивающая расстояние для его перевозки, трудоемкость разработки и сравнительная легкость рационального сжигания. Эти свойства делают его хорошим местным топливом. Общие запасы топливной древесины в СССР определены в 10 миллиардов тонн условного топлива. В 1937 г. было заготовлено и вывезено 90,2 миллионов м³ дров, не считая того количества дров и древесных отходов, которое было использовано на местах заготовки и в деревообрабатывающей промышленности.

Около 75% запасов топливной древесины СССР приходится на Восточную и Западную Сибирь совместно с Дальним Востоком, между тем как заготовка и вывоз в них составляет всего 16,2% всех заготовок СССР. Центральные, Северозападные и Поволжские районы, имея всего 5,4% запасов древесного топлива, потребляют и вывозят 42%. Заготовки и вывоз одного центрального района составляет 20% при 2% запаса.

В третьей пятилетке намечается по Союзу увеличение заготовок дров на 86% с доведением общих

размеров заготовки и вывоза до 160 миллионов м³. Форсирование добычи и использования других видов топлива должно сократить перевозку дров из Поволжья в центр, из северных и центральных районов на Украину, из Сибири в Среднюю Азию.

Основная масса потребляемых у нас дров идет для домашнего отопления и с развитием газификации крупных городов и теплофикацией это потребление дров должно будет заметно сократиться.

10. Состав топлива и оценка его элементов

При техническом анализе рабочего топлива дают в процентах по весу количество в топливе золы A_p , влаги W_p , летучих L_p , а также низшую теплотворную способность топлива $Q_p^{нп}$ в ккал/кг.

Элементарный химический анализ горючей части рабочего топлива дает содержание в ней углерода C_p , водорода H_p , кислорода O_p , азота N_p и серы S_p . Если найденные элементарным анализом составные части топлива отнести к органической (o), горючей (g) или к рабочей (p) массе его, то получим соответственно:

$$C_o + H_o + O_o + N_o + S_o = 100\%; (50)$$

$$C_g + H_g + O_g + N_g + S_g = 100\%; (51)$$

$$C_p + H_p + O_p + N_p + S_p + A_p + W_p = 100\% (52)$$

При полном отсутствии влаги масса топлива носит название сухой. В этом случае

$$C_c + H_c + O_c + N_c + S_c + A_c = 100\% (53)$$

Для тепловых расчетов и обработки результатов испытаний котельных установок принимается, главным образом, рабочая масса и рабочий состав топлива. Понятиями органической, горючей и сухой массы топлива пользуются при лабораторных анализах, классификации и изучении общих свойств топлив. Горючими элементами топлива в собственном смысле слова являются C_p , H_p

Таблица 11

Заданная масса топлива	Масса топлива, на которую делается пересчет			
	органическая	горючая	сухая	рабочая
Органическая, o	1	$\frac{100 - S_p^z}{100}$	$\frac{100 - (S_p^z + A_p)}{100}$	$\frac{100 - (S_p^z + A_p + W_p)}{100}$
Горючая, g	$\frac{100}{100 - S_p^z}$	1	$\frac{100 - A_p}{100}$	$\frac{100 - (A_p + W_p)}{100}$
Сухая, c	$\frac{100}{100 - (S_p^z + A_p)}$	$\frac{100}{100 - A_p}$	1	$\frac{100 - W_p}{100}$
Рабочая, p	$\frac{100}{100 - (S_p^z + A_p + W_p)}$	$\frac{100}{100 - (A_p + W_p)}$	$\frac{100}{100 - W_p}$	1

и серы S_p^s , состоящая из серы органической S^o и серы колчеданной S^k . Зола A_p и влага W_p объединяются общим наименованием внешнего балласта топлива. Пересчет состава топлива, данного для одной какой-либо его массы, на другую может быть произведен с помощью коэффициентов, сведенных в табл. 11.

Например, при заданной величине C_o

$$C_p = C_o \frac{100 - (S_p^k + A_p + W_p)}{100}.$$

Углерод представляет одну из самых существенных составляющих каждого топлива. Углерод входит в состав топлива не в свободном виде, а в виде сложных соединений, включающих C, O, N и S. Так как содержание углерода в большинстве топлив является доминирующим по сравнению с H и S, то углерод является главным носителем теплотворной способности топлива.

Водород является другой важнейшей горючей частью каждого топлива. Содержание водорода в органической массе твердого топлива уменьшается с увеличением его химического возраста. Теплотворная способность водорода больше чем в четыре раза превосходит теплотворную способность углерода. Обычно принимают, что водород в топливе частично связан с находящимся в этом топливе кислородом. При этом допущении количество тепла, которое может быть получено от горения водорода, несколько меньше, чем если бы водород находился в свободном состоянии. Хотя вероятнее всего, что кислород топлива может быть соединен в нем не только с водородом, но и с углеродом, тем не менее ввиду большого химического сродства H и O считают, что весь кислород топлива соединен в нем только с соответствующим количеством водорода. Таким образом количество связанного водорода выражается величиной $\frac{O}{8}$, а свободного — величиной $H - \frac{O}{8}$.

Содержание углерода и водорода в топливе определяется сжиганием взвешенной пробы топлива в струе кислорода с раздельным поглощением образующихся при этом продуктов горения — CO_2 и H_2O . Сжигание производится в особом приборе. Поглотители CO_2 и H_2O взвешиваются до опыта и после него.

Азот топлива в горении не участвует и переходит в свободном состоянии в продукты горения. Содержание азота в топливах редко превышает 1%, и поэтому его влияние на объем и температуру продуктов горения ничтожно по сравнению с влиянием азота воздуха, идущего на горение.

Содержание кислорода в топливе колеблется в весьма значительных пределах — от нуля до 40%, считая на органическую массу топлива.

Больше всего кислорода в торфе и дровах, в антраците же кислорода содержится всего 1—2%.

Кислород является органическим балластом топлива. Входя в состав органических соединений, он исключает соответствующее количество горючих элементов и тем понижает теплотворную способность топлива. Сверх того, горючие элементы, в соединении с которыми кислород находится в топливе, являются частично окисленными, т. е. потерявшими часть заключающейся в них химической энергии.

Сера попадает в состав топлива тремя путями: из органических веществ, образовавших топливо; путем осаждения солей из водных растворов, приходивших в соприкосновение с пластами топлива, и, наконец, из окружающей топливо и влияющей на его пласт породы. Сера в естественных видах ископаемого твердого топлива встречается в трех разновидностях: органической серы (S^o) — связанной с другими элементами топлива — C, H, N, O в виде сложных органических соединений; колчеданной серы (S^k) — в виде пирита, колчедана (FeS_2) и сульфатной серы S^o — в виде солей серной кислоты (гипс, $FeSO_4$ и др.). Сульфаты представляют высокие окислы серы, и потому находящаяся в них сера гореть не может. Сера, присутствующая в виде органической и колчеданной серы, сгорает, образуя сернистый ангидрид SO_2 . Органическая и колчеданная сера образуют вместе летучую горючую серу S^a . Таким образом общее содержание серы в топливе выражается так:

$$S^{os} = S^o + S^k + S^e = S^a + S^e.$$

Сера является крайне нежелательным элементом котельного топлива, так как продукты ее горения разрушительно действуют на металлические части котельного агрегата, уничтожают растительность в окрестностях установки, потребляющей сернистое топливо, и вредят здоровью людей.

Содержание влаги в твердых топливах колеблется в очень широких пределах, а именно от величин, близких к нулю, и до 60%, считая на рабочую массу топлива.

Когда торф находится в торфяном массиве, а уголь — в пласте месторождения, то содержание влаги в них часто бывает велико, доходя в торфе даже до 90%. Вынутое на поверхность топливо подвергается естественной подсушке. Эта подсушка обычно продолжается до тех пор, пока не наступит равновесие между упругостью пара воды, оставшейся в топливе, и парциальным давлением воды окружающего топливо воздуха. После этого подсушка топлива прекращается и оно считается воздушно-сухим. Если такая подсушка (доведение топлива до воздушно-сухого состояния) производится в лабораторных комнатных условиях, то влага, оставшаяся в топливе, носит название гигроскопической, а потерянная им влага называется внешней.

Сумма внешней и гигроскопической влаги топлива представляет собой его рабочую влажность.

Влага, имеющаяся в топливе при поступлении в лабораторию, носит название лабораторной. При хорошей упаковке пробы эта влага может равняться рабочей, в общем же случае величины их различны.

Та влага, при которой проба поступает в анализ, носит название аналитической — W_a .

Условно принято, что вся влага топлива удаляется при температуре 102—105° С.

В кристаллах некоторых минеральных соединений, в основном силикатов и гипса, также содержится известное количество влаги. Эта влага носит название гидратной или кристаллизационной. Она выделяется лишь в процессе озольнения топлива, происходящем при 800° С, и поэтому не входит в состав рабочей влаги.

Наиболее характерным для данного вида твердого топлива является его гигроскопическая влага.

В большинстве случаев содержание гигроскопической влаги оказывается тем меньше, чем больше химический возраст топлива. Минимальное, доходящее до 1—2%, содержание гигроскопической влаги имеют тощие угли и антрациты; максимальное, доходящее до 10—15%, — торф и дрова.

В газовом топливе содержится влага в виде водяного пара.

Влага играет отрицательную роль в топливе. Она вызывает понижение теплотворной способности топлива уже непосредственно как балласт, уменьшающий количество горючей части на 1 кг топлива. Но кроме этого при сжигании влажного топлива известная часть тепла топлива обычно не может быть технически использована вследствие того, что парциальное давление водяного пара в продуктах горения обычно составляет около 0,1—0,2 атм. Чтобы использовать теплоту испарения, нужно было бы сконденсировать водяные пары, что ввиду низкой величины их парциального давления возможно лишь при температурах продуктов горения ниже 100° С. В действительности же температура дымовых газов, уходящих из котельной установки, обычно не бывает ниже 125—175° С. Ввиду этого теплота испарения водяного пара, получившегося от влаги топлива и горения водорода, теряется бесполезно в атмосферу.

Зольность топлива в практических условиях колеблется в пределах от нуля для газового топлива, долей процента для жидкого, 1—2% для дров и до 50—60% для горючих сланцев. Появление минеральных примесей в топливе происходило различными путями.

Часть золы связана с органической массой топлива и представляет собой минеральные примеси, входившие в состав материнского вещества, из которого произошло топливо. Эти при-

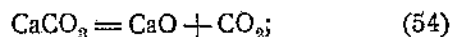
меси называются первичной золой. Она распределяется в массе топлива равномерно и не может быть удалена из него. Посторонние для массы топлива примеси, внесенные в топливо водой и ветром одновременно с напластованием растительного вещества, называются вторичной золой. Ее распределение в топливе менее равномерно. Порода, ограничивающая пласты топлива и частично захватываемая при их разработке, называется третичной золой. Она распределяется в топливе случайно.

Зольность топлива определяется сжиганием его навески в фарфоровом или платиновом тигле и муфельной печи при температуре 800° С. Минеральный остаток в тигле носит название лабораторной золы; вес его принимается за содержание золы в пробе исследуемого топлива. Следует отличать зольность топлива от его минеральной массы, так как образующие золу минеральные примеси остаются неизменными при прокаливании лишь в некоторой своей части. Остальные примеси или распадаются, или улетучиваются, или, наоборот, увеличиваются в весе за счет окисления их в воздухе.

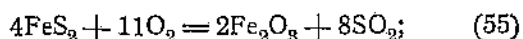
Эти изменения вызываются в основном следующими реакциями:

а) потерей кристаллизационной воды силикатами и гипсом;

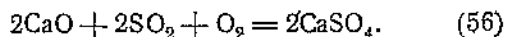
б) разложением карбонатов с выделением CO_2 , например,



в) горением колчедана с образованием SO_2



г) реакцией между SO_2 и CaO , а именно



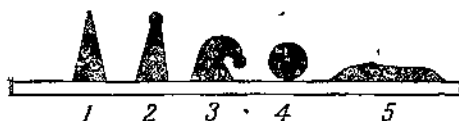
Содержание (считая по CO_2) карбонатов в минеральной массе горючих сланцев доходит до 20%, в углях Шпицбергена до 5,5%, в тварчельских углях до 3,5%, в тощих донецких углях до 1,5%, в кузнецких углях до 1,5%, в челябинских и карагандинских углях до 2%.

При распаде карбонатов в продуктах горения появляется дополнительное содержание углекислоты, называемой карбонатной.

Зола является балластом, ухудшающим качество топлива. Топливо с повышенным содержанием влаги и золы называют низкосортным.

Качество золы топлива имеет исключительно важное значение для условий его сжигания, так как оно влияет на зашлакование поверхностей нагрева котла, экранов, стен топочного устройства и колосниковых решеток.

В состав золы твердых топлив в большинстве случаев входят кремнекислота SiO_2 (в виде



Фиг. 16. Характерные состояния пирамидки, изготовленной из золы.

1—до нагрева; 2—начало деформации; 3—начало размягчения; 4—полное размягчение; 5—жидкоплавкое состояние.

силикатов), глинозем Al_2O_3 , окислы железа FeO и Fe_2O_3 (в виде пиритов, ферросиликатов и т. п.), известь CaO и магнезия MgO (в силикатах, карбонатах и сульфатах), щелочи Na_2O и K_2O (в тех же соединениях и в хлоридах), серная и фосфорная кислоты (в пиритах, гипсе и фосфатах), окислы редких металлов, например, титана TiO_2 .

Температуры плавления этих составляющих золы весьма различны. Так, щелочи плавятся в пределах $800-1000^\circ C$, а кремнекислота, глинозем, известь и магнезия от 1600 до $2800^\circ C$.

При известных соотношениях отдельные компоненты золы в топке могут образовать эвтектические сплавы, точка плавления которых обычно ниже точки плавления каждого из отдельных компонентов.

Имеется ряд попыток составить суждение о плавкости золы по ее составу. Тейне первый предложил пользоваться для этой цели отношением

$$a = \frac{SiO_2 + Al_2O_3}{FeO + Fe_2O_3 + CaO + MgO}.$$

Чем больше величина a , тем выше и температура плавления золы.

Пруст предложил для той же цели пользоваться двумя следующими отношениями количеств кислорода: A —отношение процентного содержания кислорода в SiO_2 к процентному его содержанию в Al_2O_3 ;

B —отношение процентного содержания кислорода в Al_2O_3 к процентному содержанию его в $Fe_2O_3 + CaO + MgO$.

Чем больше отношение $\frac{A}{B}$, тем более тугоплавка зола. Если $\frac{A}{B} = 1$, то температура плавления равна 1300° , при $\frac{A}{B} = 3$ она составляет $1500^\circ C$.

Все эти соотношения дают весьма приближенную оценку.

Экспериментальные данные о плавкости золы получаются путем наблюдения за изменениями, происходящими с пирамидкой специальной формы, изготовленной из золы, при постепенном ее нагревании в электрической печи, имеющей восстановительную атмосферу. При этом отмечают следующие характерные точки (фиг. 16):

а) температуру t_1 —начала деформации, при которой происходит закругление вершины и ребер конуса;

б) температуру t_2 —размягчения, при которой верхняя часть пирамидки, изгибаясь, наклоняется до основания пирамидки;

в) температуру t_3 —жидкоплавкого состояния, при которой зола растекается по подставке.

Для топочной котельной практики наиболее существенной является температура размягчения золы, а для топок с жидким шлакоудалением—также температура плавления и температурный интервал между плавлением и размягчением золы. Значения указанных температур для золы даны в таблицах, характеризующих типичные топлива СССР (табл. 14—20).

Интервал между температурами начала деформации и размягчения носит название интервала размягчения, а между температурами начала размягчения и жидкоплавкого состояния—интервала плавления.

Величина этих интервалов зависит от вязкости шлаков. Однако лучшее представление о вязкости шлаков дают получаемые по методу Бунте-Баума кривые зависимости между высотой изготовленного из золы образца и его температурой.

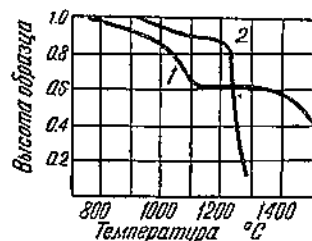
На фиг. 17 показаны подобные кривые для двух образцов золы.

Весьма существенной характеристикой твердого топлива является выход летучих. Эта характеристика топлива имеет большое значение для процесса воспламенения топлива и для горения в топочном пространстве. Вид остающегося после выхода летучих коксового остатка характеризует спекаемость топлива при слоевом процессе его сжигания.

Для определения в лаборатории выхода летучих пробу угля подвергают нагреванию в плотно закрытом платиновом тигле на спиртовой горелке. Потеря в весе за вычетом содержания влаги в навеске дает выход летучих испытуемого топлива. Выход летучих относят к безводной и беззольной, т. е. к горючей, массе топлива.

Оставшийся после выхода летучих кокс включает также и золу топлива. При лабораторном определении выхода летучих кокс получается в виде мелкого порошка, когда уголь не спекается, или в виде спекшегося с разной степенью спекания королька, когда уголь относится к числу спекающихся. Возможно и третье состояние, когда остаток состоит из отдельных зерен, более или менее прочно связанных между собой и дающих так называемый слипшийся королек.

Способность угля спекается определяется присутствием органических соединений—битумов,



Фиг. 17. Кривые размягчения золы по Бунте-Бауму.

1—тугоплавкая зола бурого угля, дающая при $1000-1100^\circ$ усадку из-за разложения полевого шпата и гипса; 2—легкоплавкая зола.

которые, расплавляясь при высоких температурах, растворяют или диспергируют остальные органические составляющие.

11. Теплотворная способность топлива

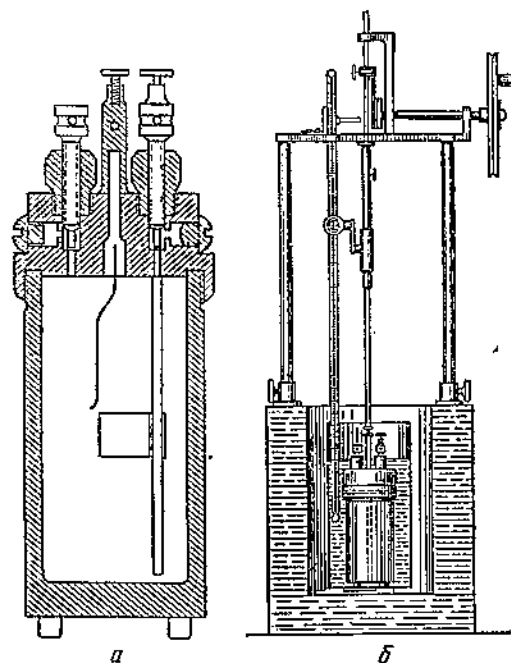
Одной из самых важных теплотехнических характеристик топлива является его теплотворная способность.

Помимо лабораторного способа определения теплотворной способности топлива в калориметрической бомбе ее можно найти также расчетом по данным элементарного анализа с помощью особых эмпирических формул Менделеева и др. Однако такой подсчет может дать лишь приближенные ориентировочные результаты, так как, во-первых, ни одна из эмпирических формул не может правильно учесть все разнообразие химических соединений, в которых находятся элементы в разных топливах, во-вторых, эти формулы не учитывают тепловых эффектов, происходящих при сжигании топлива в его минеральной части и, наконец, что особенно важно, точность определения основных элементов топлива — углерода и водорода значительно уступает точности калориметрического опыта. В настоящее время методика определения теплотворной способности топлива в калориметрической бомбе доведена до высокой степени совершенства как в смысле точности, так и в смысле быстроты определения. Наряду с этим и расчетные формулы для определения теплотворной способности сохраняют свое значение для проверки соответствия данных элементарного анализа теплотворной способности топлива.

Калориметрическая бомба (фиг. 18) представляет собой стальной цилиндрический сосуд высотой около 300 мм и диаметром внутри 80 мм, приспособленный для высоких давлений. Бомба закрывается герметической крышкой. После введения в бомбу навески испытуемого топлива в количестве около 1 г бомба заполняется кислородом под давлением 25—30 ат через специальные штуцеры, помещенные на крышке. Бомбу погружают в водяной калориметр и, после того как вся система придет в установившееся тепловое состояние, воспламеняют топливо при помощи электрического тока. По поднятию температуры воды, замеряемому с точностью до 0,001°, по весу введенного в бомбу топлива вычисляют его теплотворную способность.

При вычислении вводят поправки: 1) на теплоту горения запальной проволоки; 2) на нагрев самой бомбы и частей калориметра, учитывая их по так называемому водяному эквиваленту калориметра; 3) на радиацию тепла калориметром в окружающую среду.

Полученная при этом величина теплотворной способности носит название теплотворной способности по бомбе (Q_b). Эта величина отличается от высшей теплотворной способности (Q_d) на теплоту образования в бомбе азотной кислоты (так как в топке, как известно, азот практически не горит), на теплоту окисления сернистого газа SO_2 в SO_3 и растворения последнего в воде (так как в топке сера сгорает лишь в сернистый газ SO_2 , в бомбе — в SO_3 с образованием H_2SO_4 и H_2O).



Фиг. 18. Калориметр и калориметрическая бомба.

а — собранная калориметрическая бомба; б — собранный калориметр.

Вводя поправку на теплоту образования кислот в бомбе к величине Q_b , получают высшую теплотворную способность Q_d .

Поправка вводится по следующей формуле:

$$Q_d = Q_b - 22,5 S_d - 0,0015 Q_b \quad (57)$$

где 22,5 — теплота окисления SO_2 в H_2SO_4 на 0,01 г серы; 0,0015 Q_b — условная величина поправки на образование азотной кислоты.

Между высшей и нижней теплотворной способностью существует следующая зависимость:

$$Q_p^n = Q_p^s - 6(9H_p + W_p) \text{ ккал/кг.} \quad (58)$$

Для вывода формулы (58) полная теплота испарения воды принята в среднем равной 600 ккал/кг. Количество тепла, необходимое для испарения всей воды, поступившей в продукты горения в виде пара, составляет при этом

$$600 \left(\frac{9H_p}{100} + \frac{W_p}{100} \right) = 6(9H_p + W_p). \quad (59)$$

В лаборатории при определении калориметрической теплотворной способности применяется воздушно-сухая или так называемая лабораторная проба топлива. Ввиду этого

$$Q_p^s = Q_p^d \frac{100 - W_p}{100 - W_d}. \quad (60)$$

Если известна высшая теплотворная способность сухой, горючей и органической массы топлива, то низшая теплотворная способность

получается для них по следующим формулам:

$$Q_c^u = Q_c^s - 54H_c; \quad (61)$$

$$Q_c^u = Q_c^s - 54H_c; \quad (62)$$

$$Q_c^u = Q_c^s - 54H_o. \quad (63)$$

Для пересчета низшей теплотворной способности рабочего топлива на низшую теплотворную способность сухого топлива используется соотношение:

$$Q_p^u = Q_c^u \frac{100 - W_p}{100} - 6W_p, \quad (64)$$

откуда

$$Q_c^u = (Q_p^u + 6W_p) \frac{100}{100 - W_p}, \quad (65)$$

а для пересчета на горючую массу

$$Q_p^u = Q_c^u \frac{100 - W_p - A_p}{100} - 6W_p, \quad (66)$$

Таблица 12

Теплотворная способность горючих газов

№ по пор.	Наименование газов	Химическая формула	Q_p^u ккал/м ³
1	Оксид углерода	CO	3050
2	Водород . . .	H ₂	2570
3	Метан	CH ₄	8465
4	Этан	C ₂ H ₆	15240
5	Пропан	C ₃ H ₈	22130
6	Этилен	C ₂ H ₄	14560
7	Пропилен . . .	C ₃ H ₆	20850

откуда

$$Q_c^u = (Q_p^u + 6W_p) \frac{100}{100 - W_p - A_p}. \quad (67)$$

Для вычисления теплотворной способности топлива по данным элементарного анализа одной из первых была предложена формула Дюлонга:

$$Q_p^u = 80,8 C_p + 291 \left(H_p - \frac{O_p}{8} \right) + 25 S_p - 6,09 W_p \text{ ккал/кг.} \quad (68)$$

Формула Дюлонга дает неточные результаты, так как при выводе ее сделаны следующие допущения: а) топливо рассматривается как механическая смесь отдельных горючих элементов без учета затраты тепла при горении на разложение сложных молекул, несомненно, имеющих в топливе;

б) предполагается, что весь кислород топлива связан исключительно с его водородом.

Достаточно удовлетворительные результаты дает для всех твердых и жидких топлив формула, предложенная Д. И. Менделеевым, с подобранными эмпирическим путем коэффициентами:

$$Q_p^u = 81 C_p + 246 H_p - 26 \left(O_p - S_p^a \right) - 6 W_p \text{ ккал/кг.} \quad (69)$$

Теплотворная способность газовых топлив определяется как подсчетом, так и непосредственным калориметрированием по калориметру Юнкера. В этом калориметре газ предварительно пропускают через газовый счетчик и сжигают в горелке калориметра. Продукты горения отдают свое тепло системе дымогарных труб, охлаждаемых водой.

Таблица 13

Классификация каменных углей по Грюнеру

Наименование классов углей	Элементарный состав органической массы в % к весу			Отношение весовых содержаний $\frac{O_o + N_o}{H_o}$	Выход кокса в % по весу	Характер кокса	Удельный вес угля в кг/дм ³
	C _o	H _o	O _o + N _o				
1. Сухие длиннопламенные	75—80	5,5—4,5	19,5—15	4—3	50—60	Порошковатый или слабо слипшийся	1,25
2. Жирные длиннопламенные или газовые	80—85	5,8—5,0	14,5—10,0	3—2	60—68	Сплавленный, но сильно растрескавшийся	1,28—1,3
3. Жирные или кузнечные (сжигающиеся)	84—89	5—5,5	11,0—5,5	2—1	68—74	Сплавленный средней плотности	1,3
4. Жирные короткопламенные или коксовые	88—91	5,5—4,5	6,5—5,5	1,0	74—84	Сплавленный очень плотный	1,3—1,35
5. Тощие или антрацитовые	90—95	4,5—4,0	5,5—3,0	1,0	82—90	Порошкообразный или слипшийся	1,35—1,4

Таблица 14

Характеристики донецких каменных углей

Содержание составных частей и элементов в %

Наименование	Марка	W _a	W _p	A _d	S _d ^o	S _c ^c	S _a ^o	C _a	H _a	N _a	O _a
		среднее от — до	среднее от — до	среднее от — до	среднее от — до	среднее от — до	среднее от — до	среднее от — до	среднее от — до	среднее от — до	среднее
Длиннопламенный	Д	4,5	12,0	22,5	4,7	0,2	2,3	75,0	5,5	1,6	12,1
Газовый	Г	3,0—7,5	7,5—21,0	6,5—28,0	1,4—5,3	0,1—0,3	1,5—2,8	74,0—79,2	5,1—5,7	1,2—2,0	8,3
		2,8	8,0	16,0	3,7	0,1	1,8	80,5	5,4	1,5	
Паровичный жирный	ПЖ _ж	1,0—4,8	3,0—12,5	2,5—29,0	0,9—5,7	0—0,3	1,4—2,3	76,4—82,9	5,0—5,8	0,9—1,8	5,6
		1,1	3,5	15,5	2,5	0,15	2,8	85,0	5,1	1,5	
для коксования	ПЖ _к	0,4—2,1	2,0—11,0	1,5—32,0	0,8—5,1	0,1—0,5	4,8	82,4—87,0	4,8—5,5	1,1—1,9	5,6
для энергетических целей	ПЖ _{эл}	1,1	5,0	20,0	4,0	0,15	4,8	83,0	5,1	1,5	
для коксования	К _ж	0,4—2,1	2,5—8,0	5,0—43,0	1,5—7,0	0,1—0,5	3,1	82,4—87,0	4,8—5,5	1,1—1,9	
для энергетических целей	К _{эл}	1,0	3,5	17,0	2,7	0,1	3,6	87,0	4,8	1,5	
Паровичный спекающийся	ПС _ж	0,4—2,1	2,5—12,0	5,0—22,0	0,7—5,9	0,1	2,3	86,7—90,7	4,0—5,4	1,2—1,9	2,7
для коксования	ПС _к	1,0	3,0—5,0	15,0—33,0	2,0—5,5	0,1	2,3	88,5	4,8	1,5	
для энергетических целей	ПС _{эл}	0,8	3,0	12,5	2,2	0,1	3,1	89,0	4,5	1,5	
Тошый	Т	0,6—2,0	2,0—7,0	2,5—21,0	6,8—4,1	0,1	2,2	87,1—91,9	3,9—5,1	1,2—1,9	2,1
		0,8	3,0	16,5	2,7	0,1	2,2	90,0	4,2	1,5	
		1,0	4,0	14,0	2,0	0,1	2,2	88,0—92,4	3,8—4,6	1,1—1,9	
		0,4—1,8	2,5—8,0	4,3—33,5	0,8—5,0						

Теплотворная способность в ккал/кг и технические характеристики

Наименование	Марка	Q ₂ ^o		Q ₂ ^o	Q ₂ ^o	Л ₂	Характеристика кокса	Плавкость зоны п. °C				Q _p ^o
		среднее от — до	среднее от — до	сред- нее	сред- нее	среднее от — до в %		t ₁		t ₂		сред- нее от — до
								среднее от — до	среднее от — до	среднее от — до	среднее от — до	
Длиннопламенный	Д	7 720	7 720	7 580	7 290	44,0	Порошкообразный или слипшийся	1 050	1 150	1 210	4 900	
	Г	7 450—7 850	7 450—7 850	7 990	7 700	39,0—46,0		950—1 260	1 040—1 400	1 120—1 400	5 900	
Газовый	ПЖ _ж	7 700—8 300	7 700—8 300	8 380	8 100	35,0—44,0	Спекшийся, сплавленный, иногда вспученный, рыхлый	1 050	1 160	1 220	5 900	
	ПЖ _к	8 450	8 450	8 380	8 100	30,0		940—1 190	1 010—1 290	1 060—1 370	6 580	
Паровичный жирный	ПЖ _{эл}	8 200—8 650	8 200—8 650	8 280	8 000	25,0—35,0	Спекшийся, сплавленный, плотный или умеренно плотный	1 090	1 120	1 210	6 050	
	К _ж	8 400	8 400	8 420	8 160	26,0—36,0		970—1 400	1 060—1 400	1 170—1 400	6 515	
Коксовый	К _{эл}	8 350—8 750	8 350—8 750	8 360	8 110	18,0—26,0	Порошкообразный или слипшийся	1 080	1 120	1 190	6 650	
	ПС _ж	8 450—8 850	8 450—8 850	8 590	8 350	20,0—23,0		1 050—1 180	1 080—1 180	1 150—1 240	6 800	
Паровичный спекающийся	ПС _{эл}	8 300—8 650	8 300—8 650	8 480	8 240	14,0—19,0	Порошкообразный или слипшийся	1 060	1 140	1 200	6 800	
	Т	8 400—8 700	8 400—8 700	8 480	8 260	12,0—18,0		1 020—1 160	1 050—1 240	1 120—1 280	6 800	
Тошый		8 540	8 540	8 480	8 260	8,0—17,0						
		8 300—8 650	8 300—8 650									

Подсчет теплотворной способности газового топлива производится на основании заданного состава сухого газа в процентах по объему. В табл. 12 даны теплотворные способности составных частей газовых топлив. Газовые их характеристики даны в табл. 4.

Низшая теплотворная способность газа может быть подсчитана по формуле

$$Q_p^H = 30,50 \text{ CO} + 84,65 \text{ CH}_4 + 152,4 \text{ C}_2\text{H}_6 + \\ + 221,3 \text{ C}_3\text{H}_8 + 145,6 \text{ C}_2\text{H}_4 + 208,5 \text{ C}_6\text{H}_6 + \\ + 25,7 \text{ H}_2 \text{ ккал/м}^3. \quad (70)$$

В эту формулу входят все составляющие газы в процентах по объему, считая на 1 м³ сухого газа. При наличии в газовом топливе влажности его объемный процентный состав должен быть соответственным образом пересчитан.

12. Классификация и маркировка энергетических топлив СССР

Создание рациональной классификации является одной из самых сложных задач химической технологии топлива. Затруднение здесь заключается в сложности и многообразии взаимозависимости между свойствами топлив и их особенностями, главным образом, их химической природы. Химическая же природа топлива находится в зависимости от вида исходного материала, послужившего для образования топлива, происшедших с ним химико-геологических изменений и предела, достигнутого этими изменениями в настоящее время. Химическая природа топлива определяет также и область наиболее рационального применения его. Ввиду сказанного все многочисленные существующие в настоящее время классификации твердых топлив не исчерпывают

Таблица
Классификация донец

Наименование	Сорт	Размер кусков в мм	Содержание составных частей в %							
			W _a	W _p	A _c	Σ ^с _с	S _с ^с	S ₂ ^с	S ₂ ^с	C ₂
			среднее от — до	среднее от — до	среднее от — до	среднее от — до	среднее от — до	среднее от — до	среднее от — до	среднее от — до
Плитный	АП	> 100		5,0 3,0—7,0	4,5 2,0—9,5	1,8 1,0—5,0	0,1	1,1	0,8 0,5—1,1	93,5 89,4—96,4
Крупный орех	АК	25—100		5,0 3,0—7,0	5,5 2,5—11,0	1,7 1,0—5,0				
Мелкий орех	АМ	13—25		5,0 3,0—7,5	11,5 4,0—27,0	1,7 1,0—5,0				
Семечко	АС	6—13		6,0 3,5—9,0	14,0 4,2—22,0	1,9 1,0—5,0				
Семечко со штыбом	АСШ	0—13	2,0 0,8—4,5	5,5 3,5—8,0	15,0 6,5—30,0	1,7 1,0—5,0				
Штыб	АШ	0—6		6,5 3,5—10,0	18,5 10,5—26,5	1,9 1,0—5,0				
Рядовой без плиты	АРШ	0—100		6,0 3,5—10,0	15,0 4,5—27,0	1,9 1,0—5,0				
Плитный пониженного качества (с прослойкой и черепи)	АП _{пк}	> 100		5,8 5,0—7,0	11,7 7,5—21,0	2,5 1,5—3,0				
Крупный орех пониженного качества	АК _{пк}	25—100		4,9 3,0—7,0	11,7 6,5—27,0	2,0 1,0—3,0				
Мелкий орех пониженного качества	АМ _{пк}	13—25		4,6 3,5—7,0	16,5 14,5—27,0	1,8 1,0—4,2				

всего вопроса в целом и в значительной мере имеют местный и временный характер.

Наиболее широкую известность получила классификация Грюнера. Она основана на элементарном составе органической массы топлива, т. е. на соотношении содержания в ней C_o ,

H_o , O_o , N_o , на отношении $\frac{O_o + N_o}{H_o}$ и на свойствах

кокса. Отношение $\frac{O_o + N_o}{H_o}$, равное 8 для углеводородов, уменьшается по мере перехода от химически более молодых к химически более старым топливам. Так, для торфов оно равно 5—6, для бурых углей—5, для каменных углей—от 4 до 1 и для антрацита—0,75—1.

Выделив из всех ископаемых твердых топлив каменные угли, Грюнер разделил их сначала на четыре, а впоследствии на пять классов, добавив

к элементарному составу каждого класса данные о выходе и характере кокса.

Классификация Грюнера дана в табл. 13.

Основным недостатком классификации Грюнера является ограниченность области, которую она стремится охватить, а именно ископаемые угли, и неполный охват даже этой ограниченной области. Институтом горючих ископаемых Всесоюзной Академии наук была разработана естественная классификация углей со включением в нее и торфов. По этой классификации все виды торфа, бурого угля и каменного угля разделяются на четыре класса: а) чисто сапропелитовые, б) чисто гумусовые, в) сапропелито-гумусовые и г) гумусо-сапропелитовые.

Преимуществом этой классификации является ее логическая стройность и наиболее полное соответствие современным научным знаниям о

та 15
ких антрацитов

Теплотворная способность в ккал/кг и технические характеристики											
H_2	N_2	O_2	Q_c^p	Q_c^o	Q_c^u	L_2	Характеристика кокса	Плавкость золы в °C			Q_p^u
среднее от — до	среднее от — до	среднее от — до	среднее от — до	сред- нее	сред- нее	среднее от — до		t_1	t_2	t_3	среднее
от — до	от — до	от — до	от — до	нее	нее	от — до		среднее от — до	среднее от — до	среднее от — до	среднее
1,8 1,2—3,0	1,0 0,5—1,5	1,8	8 190 8 050—8 400	8 140	8 030	3,5 2,0—7,0	Порош- кообраз- ный	1 080 900—1 200	1 180 1 000—1 370	1 280 1 070—>1 450	7 250
			8 200 8 050—8 400	8 150	8 040						7 190
			8 170 8 000—8 350	8 120	8 010						6 710
			8 140 8 000—8 350	8 090	7 970						6 400
			8 100 7 900—8 250	8 040	7 930						6 340
			8 090 7 900—8 200	8 030	7 930						6 000
			8 140 8 000—8 500	8 080	7 970						6 330
			8 100 8 000—8 450	8 030	7 920						6 550
			8 100 8 000—8 250	8 060	7 950						6 650
			8 100 8 000—8 200	8 050	7 940						6 300

происхождении и химической природе ископаемых углей. Недостатком ее является отсутствие технических признаков, практически характеризующих топлива.

На практике установился способ классифицировать топлива по маркам для каждого месторождения.

Практическая классификация топлив ведется по двум признакам: с одной стороны, она определяет марку угля по выходу летучих и характеру кокса (аналогично классификации Грюнера), с другой стороны, ею определяется сорт топлива по размеру пусков.

В табл. 14—21, составленных А. И. Ка-

релиным (ВТИ), даны характеристики углей и антрацитов основных месторождений СССР, а также других видов топлива.

В приводимых здесь таблицах, представляющих выборку и некоторую переработку полных таблиц того же автора¹, приведены характеристики углей, обычно применяемых для сжигания под паровыми котлами.

Для сопоставления приведены характеристики наиболее известных и ходовых топлив, имеющих

¹ Карелин, Состав и качество топлив СССР, 1940 г. Энергетическое издательство.

Табл.
Характеристики кузнец

Район	Марка	Содержание составных частей в %									
		W_a	W_p	A_o	S_o^{ob}	S_o^a	$S_o^k + S_o^a$	C_2	H_2	N_2	O_2
		среднее от — до	среднее от — до	среднее от — до	среднее от — до	среднее	среднее	среднее от — до	среднее от — до	среднее от — до	среднее
Анжеро-Судженский	ПС	0,6 0,4—0,7	4,0 2,0—8,0	12,0 7,0—16,0	0,7 0,4—1,0	—	0,7	91,0 89,6—92,4	4,3 4,0—4,7	1,9 1,6—2,3	2,1
Ленинский (бывш. Кольчугинский)	Г	1,8 1,5—2,5	6,0 3,0—11,0	11,0 3,0—13,5	0,7 0,4—1,0	—	0,7	83,0 80,4—84,8	5,8 5,5—6,1	2,7 2,2—3,4	7,8
	Д	3,5 3,2—4,0	9,0 —10,5	7,5 —9,0	0,5 0,2—0,8	—	0,5	79,0 75,4—79,7	5,5 5,0—5,9	2,4 1,9—2,8	12,6
Кемеровский	K_{κ}	1,0 0,7—1,4	4,0 —6,0	12,5 —14,5	0,3 —0,6	—	0,3	85,7 83,9—86,3	5,4 5,0—5,6	2,1 1,9—2,5	6,5
	ПС	1,0	7,0 4,0—9,0	13,0 —17,0	0,4 —0,6	—	0,5	88,5	4,5	1,8	4,7
Прокопьевский	К/СС	1,0 0,5—1,2	6,0 3,5—10,0	11,0 5,5—15,0	0,5	—	0,5	89,0 86,5—91,0	4,6 4,1—5,1	2,2 1,6—2,9	3,7
Киселевский	К/ПС		4,5 —6,5	9,5 5,5—12,0	0,5	—	0,5	89,3 86,2—90,8	4,3 4,0—4,7	2,3 2,0—2,6	3,6
	СС		7,0 —9,0	10,0 —14,0	0,5	—	0,5	89,3	4,3	2,3	3,6
Осиновский	ПЖ		7,0 4,5—11,0	11,0 8,0—14,5	0,5	—	0,5	86,5 83,5—89,0	5,5 5,0—6,2	2,7 2,2—3,5	4,8
Куйбышевский (бывш. Араличевский)	Т	1,5 1,1—1,9	5,0 —9,0	18,0 —22	0,7 —1,0	0,1	0,7	89,0 88,4—91,5	4,1 3,8—4,4	2,0 1,6—2,4	4,2

Примечания: 1. Угли Кузбасса в своей минеральной части содержат карбонаты, что необходимо учти карбонатов на сухую массу углей CO_2 колеблется от 0 до 1,3%, составляя в среднем 2. Угли Куйбышевского района при добыче сортируются (грохочутся) на сорта > 25 мм

иное применение: коксование, сжигание в двигателях внутреннего сгорания.

Характеристики топлив, приведенные в этих таблицах, даны тремя величинами. Колебания состава топлива характеризуют истинные пределы содержания составных частей в соответствующем виде топлива. Средние же данные показывают значения, которыми надо пользоваться при расчете котельных агрегатов для работы на данном сорте топлива.

По Донецкому бассейну (табл. 14) имеются следующие типы углей: длиннопламенный Д; газовый Г; паровичный жирный, идущий для коксования — ПЖ_ж и для сжигания под котлами, или

энергетический, — ПЖ_{эк}; коксовый, для коксования — К_к и для сжигания — К_ж; паровичный спекающийся для коксования — ПС_к и для сжигания — ПС_ж, и, наконец, тощий Т. Эти угли мало сортируются и потому для них отсутствует классификация, связанная с величиной кусков.

Донецкие антрациты (табл. 15), как правило, сортируются и поэтому они классифицируются по величине кусков. Для них приняты марки: АП — плита, АК — крупный орех, АМ — мелкий орех, АС — семечко, АСП — семечко со штыбом, АЗП — зубок со штыбом, АРП — рядовой антрацит со штыбом или рядовой без плиты, АП_{пк} —

па 16
ких каменных углей

Теплотворная способность в ккал/кг и технические характеристики

	Q_2^d	Q_2^g	Q_2^h	L_2	Характеристика кокса	Плавкость золы в °С			Q_p^h
						t_1	t_2	t_3	
	среднее от — до	среднее	среднее	среднее от — до в %		среднее от — до	среднее от — до	среднее от — до	среднее
1	8 600 8 500—8 750	8 570	8 340	15,0 13,0—17,0	От слабо спекшегося до спекшегося плотного	1 140 1 050—1 200	1 330 1 200—1 500	1 420 1 250—1 500	7 030
8	8 250 7 900—8 430	8 220	7 910	39,0 37,0—44,0	Спекшийся, спавленный умеренно плотный	1 100 1 040—1 140	1 200 1 070—1 370	1 250 1 110—1 430	6 580
2,6	7 800 7 220—7 840	7 780	7 480	40,0	От слипшегося до спекшегося плотного	1 100 1 030—1 180	1 140 1 060—1 210	1 200 1 120—1 270	6 240
5	8 350 8 280—8 650	8 330	8 040	33,0	От слабо спекшегося до спекшегося, спавленного плотного				6 730
7	8 460	8 440	8 200	18,0	Спекшийся				6 590
7	8 470 8 200—8 550	8 450	8 200	20,0	От слабо спекшегося до спекшегося спавленного плотного				6 800
6	8 500 8 200—8 600	8 480	8 250	17,0 14,0—19,0	То же				7 100
6	8 450	8 430	8 200	18,0	Слабо спекшийся	1 400	> 1 500		6 820
8	8 560 8 000—8 600	8 530	8 230	30,0 27,0—32,0	Спекшийся				6 770
2	8 400 8 250—8 650	8 370	8 170	10,0 9,0—13,0	Порошкообразный или слабо слипшийся	1 230 1 060—1 370	1 400 1 280—1 500	1 500 1 380—1 500	6 320

тывать при использовании данных настоящей таблицы и при анализе кузнечных углей. Содержание углекислоты 0,5%.

и 0—25 мм. В настоящей таблице представлен лишь сорт 0—25 мм.

Таблица
Угли разных

Район месторождения	Наименование месторождения	Марка углей	Содержание составных частей в %							
			W_a	W_p	A_c	S_o^{ab}	S_c^e	S_c^{ab}	S_c^o	C_2
			среднее от — до	среднее от — до	среднее от — до	среднее от — до	среднее от — до	среднее	среднее от — до	среднее от — до
	Подмосковный бас- сейн	Б	8,0 5,5—12,5	33,0 30,0—37,5	27,5 11,0—39,5	4,4 1,7—7,0	0,15 0—0,8	3,2	2,7 1,4—3,5	67,5 62,5—72,2
Северный край	Воркутское	ПЖ	1,3 1,0—2,0	6,5 3,0—16,0	16,0 12,0—20,0	0,8 0,5—1,3	0,02 0—0,2	0,2	0,7	85,5 84,5—86,6
Украинская ССР	Александровское	Б	10,0 6,7—13,0	55,0 40,0—60,0	24,0 12,0—44,0	4,3 2,5—5,2	0,4 0,2—0,6	1,5	3,6 3,2—4,0	66,5 61,2—70,0
	Кировское	Б	10,0 5,5—14,0	45,0 30,0—53,0	45,0 17,0—50,0	2,8 1,6—4,4	0,4 0,1—0,6	0,7	3,7 3,5—4,4	62,0 61,0—65,0
Грузинская ССР	Тквибульское	Г	3,5 2,4—6,6	12,0 6,0—15,0	30,0 12,0—43,0	1,8 0,7—5,0	0,1 0,02—0,6	1,2	1,2 0,9—1,3	77,5 73,0—80,5
	Ткварцельское	Г/ПЖ	1,2 1,0—2,0	7,0 2,0—10,0	30,0 17,0—37,5	1,5 1,0—2,5	0,05	1,0	1,0	81,0 79,5—84,1
Урал	Кизеловское	Г/ПЖ	1,0 0,5—2,0	4,0 1,5—9,0	27,5 16,5—32,0	6,0 3,6—10,0	0,1 0—0,4	5,2	2,9 1,7—4,5	80,0 76,0—82,4
	Челябинское ¹	Б	9,0 4,0—15,0	19,0 12,0—24,0	27,0 12,0—36,0	1,4 0,6—3,0	0,1 0—0,2	1,0	0,8 0,5—1,0	72,0 69,5—73,6
	Богословское	Б	15,0 10,0—18,0	30,0 25,0—35,0	20,0 —25,0	0,5 0,4—0,8	0,1 0,01—0,3	0,5		70,0 68,0—71,5
	Егоршинское	А	1,3 0,9—1,7	6,0 3,5—9,5	24,0 —30,0	0,5 0,3—1,0	0,05 0,02—0,1	0,6		90,0 88,8—92,1
	Полтавское	А	3,0 1,8—5,9	9,0 7,5—11,0	20,0 12,0—44,0	0,2 0,1—0,5	0,01	0,1	0,1	95,0 93,0—96,5
	Брединское	А	3,0 2,5—4,2	7,5 3,0—8,0	20,0 —31,0	0,7 0,5—0,9	0,02 0,01—0,03	0,1	0,7	93,5 92,3—94,2
Казахская ССР	Карагадинское ¹	ПЖ	2,0 1,0—3,0	7,0 5,0—10,0	21,0 10,5—30,5	0,8 0,4—1,4	0,05	1,0		85,5 81,6—87,8
	Карагадинское	Б		27,0 —32,0	16,0 —20,0	0,7				
	Берчогурское		1,8 1,5—2,1	6,0 —10,0	40,0 —50,0	3,3	0,05	4,3	1,1	77,0 75,9—78,5

Теплотворная способность в ккал/кг и технические характеристики												
H ₂	N ₂	O ₂	Q ₂ ^г	Q ₂ ^в	Q ₂ ^н	Л ₂	Характеристика кокса	Плавкость золы в °С			Q _н ^в	
среднее от — до	среднее от — до	среднее	среднее от — до	среднее	среднее	среднее от — до в %		t ₁	t ₂	t ₃		
5,0 4,4—5,6	1,3 0,9—2,0	20,8	6 700 6 250—7 250	6 560	6 290	45,0 40,0—52,0	Порошкообразный	1 350 1 010—1 500	1 450 1 060—1 500	1 500 1 075—1 500	2 830	
5,3 4,9—5,5	2,3 2,0—2,7	6,0	8 450 8 400—8 600	8 420	8 130	29,5 25,0—32,0	Спекшийся, сплавле- нный, от вспученного до плотного	1 000 1 010—1 140	1 200 1 125—1 260	1 280 1 200—1 410	6 340	
6,0 5,0—6,5	0,8 0,6—1,3	21,6	6 750 5 400—7 250	6 630	6 310	57,0 52,0—63,0	Порошкообразный	1 130 1 100—1 180	1 190 1 130—1 230	1 220 1 150—1 290	1 830	
5,2 4,8—5,7	1,0 0,7—1,5	27,4	5 700 5 450—6 250	5 590	5 310	56,0 54,0—57,0	То же	1 240 1 160—1 290	1 460 1 360—1 500	1 500 1 375—1 500	1 330	
5,8 5,0—6,0	1,5 1,1—2,7	12,8	7 750 7 100—8 000	7 690	7 380	40,0 36,0—47,0	От слабо спекшегося до спекшегося плотного	1 450 1 330—1 500	> 1 500 1 480—1 500	> 1 500	4 470	
5,8 5,5—6,2	1,7 1,5—2,1	9,5	8 200 7 800—8 500	8 145	7 830	35,0 33,0—42,0	Спекшийся, спла- вленный	1 150—1 280	1 260—1 500	1 280—1 500	5 060	
5,6 5,2—6,0	1,2 1,0—1,5	5,1	8 260 7 800—8 500	8 070	7 770	40,0 34,0—45,0	Спекшийся, сплавле- нный, плотный	1 120 990—1 500	1 380 1 130—1 500	1 450 1 180—1 500	5 380	
5,1 4,7—5,4	1,7 1,1—2,3	19,4	6 950 6 700—7 300	6 900	6 620	39,0 33,0—44,0	Порошкообразный	1 060 960—1 160	1 160 1 050—1 360	1 230 1 060—1 450	3 800	
4,7 4,2—4,9	1,5 1,2—2,0	23,3	6 500 6 200—6 700	6 480	6 230	43,0 40,0—47,0	То же	1 100 930—1 240	1 200 1 090—1 330	1 225 1 130—1 350	3 310	
3,7 3,3—4,0	0,6	5,1	8 200 7 900—8 400	8 180	7 980	8,0 6,0—13,0	То же	> 1 500			5 670	
0,8 0,5—1,3	0,5	3,5	7 700 7 500—7 800	7 690	7 650	3,5 2,0—5,0	То же	1 170 1 140—1 220	1 420 1 270—1 500	1 450 1 390—1 500	5 520	
1,7 1,6—1,9	0,7	3,3	7 950 7 830—8 030	7 930	7 840	4,0 2,5—5,0	То же	1 190 1 090—1 390	1 400 1 240—1 500	1 450 1 320—1 500	5 760	
5,2 4,7—5,5	1,4 1,0—1,7	6,9	8 360 8 200—8 500	8 330	8 050	25,0 24,0—31,0	От слабо спекшегося до спекшегося плотного	1 130—1 500	1 380—1 500	1 420—1 500	5 880	
			7 200	7 170	6 890	40,0	Порошкообразный					
6,5 6,4—6,5	1,4	9,7	7 900 7 820—8 240	7 850	7 500	47,0 46,5—48,5	Спекшийся	1 410—1 450	> 1 450	> 1 450	4 220	

Район месторождения	Наименование месторождения	Марка угля	Содержание составных частей в %							
			W_a	W_p	A_a	S_o^b	S_c^c	S_z^d	S_z^e	C_z
			среднее от—до	среднее от—до	среднее от—до	среднее от—до	среднее от—до	среднее	среднее от—до	среднее от—до
Киргизская ССР	Кизил-Кня	Б	11,5 8,3—17,0	27,0 14,5—30,0	15,0 7,5—21,5	1,8 0,8—4,0	0,3 0,1—3,0	1,2	0,6 0,5—0,7	76,0 67,2—79,6
	Сулюкта	Б	11,5 9,0—15,0	21,0 12,0—25,5	15,0 5,0—20,0	0,9 0,4—1,5	0,2 0,1—0,7	0,5	0,2 0,1—0,4	77,5 76,3—79,8
	Кок-Янгак		6,5 3,5—10,0	14,0 10,0—18,0	19,0 13,0—23,5	2,0 1,7—3,0	0,1 0—0,5	1,9	0,6 0,4—1,0	77,0 75,2—78,8
Сибирь	Минусинское	Д	3,5 2,8—4,7	12,0 9,4—16,0	12,0 3,5—18,5	0,9 0,5—1,5	0,1 0,05—0,5	0,3	0,5	79,0 75,5—81,5
	Канское	Б	12,0 10,0—16,0	32,0 28,0—37,0	15,0 —20,0	0,7	—	0,4	0,4	73,0 68,0—74,0
	Черемховское	Д	3,7 2,4—8,0	12,0 5,0—16,0	17,0 5,0—25,0	1,3 0,5—2,0	0,1 0,05—0,3	0,6	0,8 0,5—1,3	78,0 75,7—81,7
Забайкалье	Черновское	Б	11,0 7,5—14,5	33,0 24,0—40,0	11,0 5,0—16,0	0,8 0,5—1,0	0,1	0,7		75,5 72,2—77,6
	Букачинское			14,0 —20,0	17,0 6,0—32,0	0,6 0,4—1,3	0,1	0,6		80,0
Дальний Восток	Кивдинское	Б	10,5	33,0 17,0—40,0	19,0 7,0—25,0	0,2 0,1—0,4	—	0,3		71,0 68,8—75,7
	Райчихинское	Б	10,2 9,5—11,8	38,0 34,0—42,5	14,0 8,5—19,0	0,3 0,2—0,4	—	0,3		70,0 66,0—73,5
	Артемовское	Б	9,0 6,0—12,5	26,0 —32,0	19,0 9,0—39,0	0,5 0,3—0,9	0,05 0—0,1	0,6		71,5 68,5—74,9
	Сучанское	Т	—	4,0 —6,0	34,0 —38,0	—	—	—		—
		ПЖ	1,5	6,0 —9,0	29,0 —35,0	0,4	—	0,6		86,0

¹ При использовании данных настоящей таблицы по углям челябинским и карагандинским и при анализе их бонатов (CO_2) на сухую массу в челябинских углях от 0,5 до 2,0% (в среднем 1,0%), в углях Караганды от 0 до 2,0%.
В настоящей таблице зола A_a и все данные на горючую массу приведены без учета углекислоты карбонатов.

Теплотворная способность в ккал/кг и технические характеристики											
H ₂	N ₂	O ₂	Q _d ⁵	Q _d ⁶	Q _d ⁷	L ₂	Характеристика кокса	Плавкость золы в °С			Q _d ⁸
среднее от—до	среднее от—до	среднее	среднее от—до	среднее	среднее	среднее от—до в %		t ₁	t ₂	t ₃	среднее
4,2 3,8—4,5	1,0 0,7—1,4	17,0	7 000 5 680—7 250	6 960	6 730	33,0 27,0—41,0	Порошкообразный	1 030 950—1 220	1 100 1 080—1 250	1 140 1 040—1 290	4 020
4,0 3,8—4,2	0,8 0,6—1,0	17,0	7 030 6 870—7 200	7 000	6 780	29,0 24,0—33,0	То же	1 130 1 030—1 290	1 240 1 120—1 360	1 270 1 180—1 370	4 420
5,0 4,7—5,4	1,0 0,8—1,1	14,5	7 500 7 250—7 640	7 440	7 170	35,0 30,0—39,0	Порошкообразный или слабо слип- шийся	1 000—1 500	1 080—1 500	1 100—1 500	4 910
5,5 5,0—6,0	2,2 1,8—2,5	12,5	7 800 7 600—8 100	7 770	7 470	42,0 38,0—46,5	От слабо спекшегося до спекшегося	1 150 1 100—1 200	1 290 1 100—1 350	1 340 1 280—1 380	5 710
4,9 4,4—5,0	1,3	20,0	6 900 6 170—7 100	6 870	6 600	44,0 41,0—48,0	Порошкообразный				3 640
5,7 5,1—6,5	1,6 1,0—2,3	13,3	7 750 7 200—7 980	7 710	7 400	45,0 41,5—52,0	От слипшегося до спекшегося плот- ного	1 110 1 000—1 500	1 200 1 140—1 500	1 260 1 180—1 500	5 330
5,0 4,5—5,4	1,3 1,2—1,4	17,5	7 200 6 800—7 320	7 170	6 900	40,0 37,0—45,0	Порошкообразный	1 070 1 030—1 110	1 130 1 100—1 170	1 190 1 150—1 280	3 910
5,5	1,1	12,8	7 820 7 500—8 350	7 800	7 500	39,0 35,0—44,0	—	975—1 300	1 080—1 500	1 125—1 500	5 270
4,3 3,8—4,6	1,2	23,2	6 400 6 300—6 800	6 380	6 150	41,0	Порошкообразный	1 040	1 240	1 275	3 140
4,3 3,8—4,6	1,1 1,1—1,5	24,3	6 350 6 300—6 550	6 330	6 100	41,0	То же	1 050 1 030—1 150	1 200 1 130—1 270	1 240 1 180—1 290	3 020
5,5 4,9—6,0	1,5 1,1—1,5	20,9	6 950 6 300—6 740	6 930	6 630	49,0	То же	1 130 1 000—1 200	1 200 1 130—1 270	1 290 1 180—1 330	3 810
							То же				
5,0	1,4	7,0	8 300	8 270	8 000	32,0	Спекшийся, сплавле- нный	1 150	1 200—1 330	1 290—1 380	5 310

необходимо учитывать, что эти угли в своей минеральной части содержат карбонаты. Содержание углекислоты кар-
(в среднем 0,5%).

плита с прослойками, содержащая черепик и потому пониженного качества, АК_{кп} — крупный орех, полученный из того же пласта, что и плита пониженного качества, АМ_{кп} — мелкий орех из таких же пластов.

Угли Кузнецкого бассейна, приведенные в табл. 16, в основном тоже не сортируются. Они делятся по месторождениям и затем, как и донецкие угли, на марки Д, Г, ПЖ, К, К/СС — коксовый слабо спекающийся, ПС, ПС/СС и Т. Угли последней марки, т. е. тощие, сортируются в Куйбышевском районе на два сорта: с величиной кусков 25 мм и больше 25 мм.

Табл. 17 содержит угли ряда прочих месторождений СССР; они делятся на бурые (Б), антрациты (А) и каменные угли с указанными ранее марками. К бурым углям относятся подмосковные угли, угли Александрийского и Кировского месторождений на Украине, челябинские, богословские и многие угли азиатской части СССР.

Сортировка углей, перечисленных в табл. 17, производится только в месторождениях, указанных в табл. 18.

При рассмотрении табл. 14—17 необходимо иметь в виду следующее: в таблицах дана влага рабочего топлива W_p и влага аналитической пробы W_a , т. е. влага пробы, доведенной до воздушно-сухого состояния в лабораторных условиях. Во всех случаях имеется в виду определение влаги методом сушки до постоянного веса при 102—105°.

Зола абсолютно сухой массы топлива A_c , приведенная в таблицах, получается при помощи соответствующего пересчета с аналитической на сухую массу чисел, найденных непосредственно при лабораторном определении.

Этот пересчет делается таким образом без поправок на колчеданную серу, CO_2 , гидратную воду и пр.

Ряд величин отнесен к горючей массе, за которую условно принято

$$100 - W_p - A_p.$$

В табл. 19 даны характеристики горючих сланцев основных разрабатываемых месторождений СССР без Эстонской ССР.

При пользовании этой таблицей необходимо иметь в виду следующее.

В аналитических данных определения углерода и выхода летучих введена поправка на разложение карбонатов. Пересчеты на горючую массу произведены с учетом уголекислоты карбонатов, поправки на окисление железа колчедана и на образование сульфатов (при определении золы).

Q_2 исправлено на тепловой эффект разложения карбонатов, т. е. к полученным экспериментом величинам прибавлена теплота разложения карбоната (+9,7 CO_2).

При использовании данных настоящей таблицы пересчет с горючей на рабочую массу следует производить по формулам:

для

$$S^w, S^o, C, H, N, Q^o, L:$$

$$x_p = x_a \frac{100 - W_p - A_p^{испр} - (CO_2)_p}{100};$$

для теплотворной способности

$$Q_p^w = Q_a^w \frac{100 - W_p - A_p^{испр} - (CO_2)_p}{100 - 6W_p - 9,7(CO_2)_p},$$

где

$$A_p^{испр} = A_a^{испр} \frac{100 - W_p}{100};$$

$$A_c^{испр} = A_c - 2,5(S_A - S_c)_c - 0,375 S_c^w;$$

$$S_c^w = S_c^o \frac{100 - (CO_2)_c - A_c + 2,5(S_A - S_c)_c}{100 - 0,375 S_c^w};$$

S_A — содержание серы в лабораторной золе в виде сульфатов (в процентах к массе угля);

9,7 — тепловой эффект разложения карбонатов (на 0,01 г выделившейся уголекислоты CO_2).

При сокращенных анализах и ориентировочных подсчетах величину $S_A - S_c$ можно принимать для кашпирского и савельевского сланцев равной 1,0, а для гдовского 0,6 (среднее из десятков анализов для каждого из месторождений сланцев).

В этих же случаях при подсчете Q^o следует принимать, что у савельевских и кашпирских сланцев окисляется в серную кислоту при калориметрическом опыте лишь 50% серы, т. е. поправку на кислотообразование следует подсчитывать по формуле:

$$22,5(0,5 S_s) + 5.$$

Для гдовского сланца поправка на кислотообразование подсчитывается по обычной формуле:

$$22,5 \cdot S_s + 5.$$

По приведенным формулам состав и теплотворная способность горючей массы сланцев могут быть пересчитаны на рабочую массу (C_p, H_p, Q_p^w) при любом содержании балласта (W, A, CO_2).

В табл. 20 приведены данные по различным другим твердым топливам: торфу, дровам, отбросам различных производств и суррогатам топлив, сжигаемым иногда под котлами.

Табл. 21 содержит характеристики различных жидких топлив и их основные физические константы: удельный вес, вязкость, температуру вспышки и др.

В табл. 22 и 22а охарактеризованы газообразные топлива, включая естественный газ наших месторождений и подземный газ.

Состав газов в таблице дан в соответствии с обычным видом анализа, встречающимся в протоколах анализов, при котором определяется объемное содержание $CO_2, O_2, CO, H_2, CH_4, C_2H_6$, иногда C_2H_4 и по остатку N_2 . Под символом C_nH_m объединяются так называемые тяжелые углеводороды, в состав которых входят этилен, ацетилен и углеводороды бензолового ряда.

13. Влияние свойств топлива на его использование в котельных установках

Вид топлива и его свойства оказывают очень сильное влияние как на конструкцию топочных устройств котельного агрегата и других элементов котельной установки, так и на ее эксплуатацию.

При твердом топливе усложняются вопросы погрузки и выгрузки в местах добычи, на транс-

порте и у потребителя. При жидком и газообразном топливе эти операции механизированы и топливо перемещается по трубопроводам. Однако железнодорожная и водная перевозка жидкого топлива требует цистерн и наливных судов. Твердое топливо может перевозиться в открытых полувагонах и обычных баржах. Хранение твердого топлива в местах добычи, перегрузки и потребления большей частью возможно на открытых складах, жидкие же топлива нормально требуют закрытых металлических или бетонных резервуаров. Для хранения газа необходимы большие газгольдеры. Таким образом нормальное устройство складов для жидкого и газообразного топлива сложнее и дороже.

Подготовка к горению газообразных топлив проста, так как она состоит в основном в смешении их с необходимым для горения количеством воздуха и иногда в очистке от пыли. Процесс подготовки жидкого топлива к сжиганию несколько

сложнее, так как требуется его распыление и почти всегда возникает необходимость разогрева топлива, особенно же в случае значительной его вязкости.

Подготовка к сжиганию твердого топлива является сложным процессом, включающим при сжигании его в факельных топках дробление, грохочение, удаление металлических кусков, подсушку, размола. Словесное сжигание твердого топлива в этом отношении требует меньшей подготовки.

Вид топлива отражается также на процессе его сжигания и на необходимых для этого устройствах. Газообразные, жидкие и пылевидные топлива сжигают только факельным процессом, который поддается полной механизации, автоматизации и легко регулируется. При словесном сжигании твердых топлив в механических топках также возможны механизация и автоматизация работы. Однако большое количество установок все еще работает на полумеханических и ручных топках, где требуется тяжелый физический труд кочегаров.

Таблица 18

Сорта некоторых углей, приведенных в табл. 17

Часть продукции Подмосковского бассейна и месторождений Тивибульского, Челябинского, Карагандинского, Кизыл-Кийского, Сулюктинского, Кивдинского, Райчихинского, Артемовского сортируется (грохочется) на следующие сорта:

Месторожде- ние	Сорт	Размер кусков в мм	Зольность ¹ A _c		Месторож- дение	Сорт	Размер кусков в мм	Зольность ¹ A _c	
			сред- нее	от — до				сред- нее	от — до
Подмосковный бассейн	БК	>50	23,5	11,0—32,5	Сулюкта	Отборный	>100	5,5	— 7,5
	БО	20—50	26,1	12,5—37,0		Крупный орех	25—100	7,5	—11,0
	БМ	0—20	32,5	17,0—39,5		Мелкий орех	12,5—25	10,5	—13,0
Тивибульское	ГК	>40	25,0	—29,0		Отсев	0—12,5	12,5	—15,5
	ГО	15—40	20,5	—24,0	Мелкий орех с отсевом	0—25	12,0	—14,5	
	ГС	6—15	19,0	—23,0					
	Штыб	0—6	19,5	—25,0					
Челябинское	БК	>25	15,0	—20,5	Кивдинское	К	>37	18,0	—20,0
	БМ	0—25	27,0	—36,0		О	10—37	21,0	—23,0
Карагандин- ское	Доменный	>40	16,0	—19,0		М	0—10	22,0	—25,0
Кизыл-Кия	Отборный Крупный орех Мелкий орех Отсев Мелкий орех с отсевом	>100	9,0	—13,0	Райчихинское	К	>37	8,5	—10,5
		25—100	14,1	—19,0		О	10—37	10,0	—12,0
		12,5—25	14,1	—16,0		М	0—10	14,0	—16,0
		0—12,5	14,5	—17,5	Артемовское	БК	>37	16,4	9,0—21,0
		0—25	18,5	—21,5		БО	10—37	26,0	—28,5
					БОМ	0—37	29,5	13,0—36,0	
					БМ	0—10	36,0	—39,0	

¹ Остальные показатели (W, S, Q и пр.) лишь в незначительной степени зависят от крупности кусков.

Таблица
Горючие

Месторожде- ние	Содержание составных частей в %									
	W_a	W_p	A_c	$(CO_2)_c$	$S_c^{o\delta}$	S_c^o	S^*	S_o^o	C_c	H_c
	среднее от — до	среднее от — до	среднее от — до	среднее от — до	среднее от — до	среднее от — до	среднее	среднее от — до	среднее от — до	среднее от — до
Гдовское . . .	1,2 0,6—1,8	11,5 — 17,0	53,5 39,0—58,0	18,5 10,6—24,7	1,5 1,2—2,0	0,05 0,02—0,07	3,4	1,3 1,2—1,5	73,5 71,9—75,8	9,4 9,0—9,7
Савельевское .	4,5 3,3—6,9	20,0 5,0—25,0	60,5 47,5—65,0	13,0 3,3—20,0	4,2 2,3—5,5	0,3 0,1—0,4	5,7	7,5 5,8—8,8	61,0 58,0—64,7	7,7 7,1—7,9
Кашпирское .	4,0 2,7—5,1	14,0 — 20,0	63,0 47,3—66,0	10,5 5,9—17,5	4,3 2,8—5,5	0,3 0,2—0,6	6,0	7,5 5,8—8,5	61,0 56,4—62,7	7,5 7,2—7,7

Таблица
Торф, дрова, кокс и

Топливо		Содержание составных частей в %							
		W_a	W_p	A_c	$S_c^{o\delta}$	S_c^o	S_c	C_c	
		среднее от — до	среднее от — до	среднее от — до	среднее от — до	среднее от — до	среднее от — до	среднее от — до	
Дрова	Лиственные	7,0 5,0—10,0	30,0 25—50	1,0 0,3—1,6	—	—	—	50,5 49,7—51,1	
	Хвойные	7,0 5,6—9,0	30,0 25—50	1,0 0,4—2,0	—	—	—	51,0 49,7—52,1	
Торф		10,5 7,5—14,5	35,0 — 55,0	9,7 2,4—29,0	0,3 0,1—2,7	0,1 0—1,5	0,3	57,8 53,6—63,7	
Одубина		8,0 5,5—13,5	65,0 47,5—76,5	5,0 0,7—8,0	0,1 0,03—0,3	—	0,1 0,03—0,3	51,7 50,0—53,5	
Гузо-пан (стебли хлоп- чатника)		7,0	15,0 13,4—18,2	4,0 3,2—4,6	0,1	—	0,1	49,0	
Солома		6,0	10,0	5,0 2,6—7,0	0,1	—	0,1	50,0	
Подсолнечная лузга		6,0 4,5—8,0	15,0 9,0—18,0	2,8 1,9—6,0	0,2 0,1—0,3	—	0,2	51,5 50,7—53,0	
Рисовая шелуха		7,0 6,5—8,0	10,0 7,7—11,0	20,5 20,3—20,8	0,1 0,06—0,3	—	0,1	50,3 49,8—50,6	
Кокс	Доминный, литейный	—	5,0	11,0 — 15,0	1,5 0,4—2,5	0,2	1,5	96,0 94,5—97,0	
	Мелочь (0—15 мм) быстроходных печей	—	18,0 — 25,0	18,0 13,0—25,0	1,8 0,5—2,6	0,2	2,0	94,5	
	Мелочь (0—40 мм) тихоходных печей	—	20,0 — 25,0	20,0 15,0—25,0	1,8 1,1—2,6	0,2	2,0	92,0	

Теплотворная способность в ккал/кг и технические характеристики										
N ₂	O ₂	Q _d ^с	Q _d ^н	Л ₂	Характер кокса	Плавкость золы в °С			Q _d ^с	Q _d ^н
среднее от—до	среднее	среднее от—до	среднее	среднее от—до		t ₁	t ₂	t ₃	среднее	сред- нее
0,25 0,2—0,3	12,15	8 500 8 400—8 750	7 990	81,0 78,5—82,5	Порошко- образный	1 220 1 140—1 430	1 300 1 220—>1 450	1 310 1 230—>1 450	2 600	1 870
1,1 1,0—1,3	17,0	6 950 6 600—7 250	6 530	71,0 67,0—76,0		1 150 1 055—1 260	1 170 1 130—1 275	1 200 1 150—1 290	2 100	1 330
1,2 0,9—1,4	16,8	6 950 6 280—7 070	6 550	70,0 65,5—76,0		1 150 1 030—1 180	1 175 1 130—1 200	1 200 1 150—1 210	2 100	1 500

Теплотворная способность в ккал/кг и технические характеристики										
H ₂	N ₂	O	Q _d ^с	Q _d ^н	Л ₂	Характер коксового остатка	Плавкость золы в °С			Q _d ^н
среднее от—до	среднее от—до	среднее	среднее от—до	среднее	среднее в %		t ₁	t ₂	t ₃	среднее
6,1 6,0—6,2	0,6	42,8	4 800 4 700—4 970	4 460	85,0	Порошкообразный или слабо слипшийся, рыхлый	—	—	—	2 910
6,15 6,0—6,3	0,6	42,25	4 900 4 700—5 050	4 560	85,0		—	—	—	2 980
6,0 5,1—6,6	2,5 1,6—3,7	33,4	5 580 4 940—6 450	5 240	70,0 65,0—75,0		1 070 800—1 400	1 150 990—>1 500	1 200 1 010—>1 500	2 860
6,0 5,6—6,3	0,9 0,6—1,0	41,3	4 900 4 630—5 200	4 560	75,0 70,0—78,0		770	1 370	1 400	1 120
6,1	0,6	44,2	4 700	4 360	80,0		720	>1 500	—	3 470
6,2	0,6	43,1	4 800	4 450	—		820	860	950	3 750
5,9 5,8—6,1	0,5	41,9	4 900 4 800—5 100	4 570	80,0		1 070	1 210	1 230	3 680
6,1 6,0—6,2	0,7	42,8	4 800 4 720—4 850	4 460	80,0		—	—	—	3 130
0,5 0,3—1,0	1,1 0,7—1,6	0,9	7 850 7 700—8 000	7 780	1,5	Порошкообраз- ный	—	—	—	6 580
0,8	1,5	1,2	7 850	7 750	3,5		—	—	—	5 110
2,2	1,5	2,3	8 070 7 850—8 280	7 900	9,0		—	—	—	4 940

Т а б л и ц а 21
Жидкое топливо

Нормы по ГОСТ																			Состав в % и теплотворная способность в ккал/кг мазутов по аналитическим данным 1935—1938 гг.					
Виды и марки топлива	Удельный вес d_{4}^{20}	Вязкость по Энглери		Температура вспышки по Бренкену	Температура застывания в °C	Содержание воды в %		Содержание смол в %		Содержание серы в %	Удельный вес d_{4}^{20}	W_p	A_c	S_2	C_2	H_2	$\Sigma + N$	Q_d^s	Q_2^H	Q_p^H				
		при 50°	при 75°			не более	не более	не более	не более															
Бензин	0,685—0,76	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0	0	0,05	85,0 84,5—85,6	14,9 14,2—15,3	0,05	11 250 11 200—11 350	10 445	10 445				
Керосин	не менее 0,826	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0	0	0,2	86,0 85,7—86,3	13,7 13,3—13,8	0,1	11 000 10 900—11 100	10 260	10 260				
Моторное топливо М2, М3, М4 и М5	—	9	—	60°	—5°	2,0	0,08	0,5	—	—	—	1,5	0,04	0,2 0,1—0,5	86,7 85,6—87,2	12,6 12,4—13,0	±0,5	10 700 10 650—10 800	10 020	9 820				
Мазут ¹	7,5	7,5	—	65°	—5	2,0 ⁴	0,2	0,5	—	—	—	2,0	0,1	0,2 0,1—0,5	86,7 85,6—87,2	12,6 12,4—13,0	0,5	10 700 10 650—10 800	10 020	9 820				
	10	10	—	65°	+5	2,0 ⁴	0,2	0,5	0,91—0,95	2,0	0,1	0,4 0,3—0,5	86,5 84,5—87,0	12,5 12,0—12,9	0,6	10 650 10 500—10 770	9 970	9 750						
	20	—	6	90°	+5°	2,0 ⁴	0,2	0,5	0,94—0,97	2,0	0,1	0,5	87,2	11,7	0,6	10 500	9 870	9 650						
	40	—	10	110°	+10°	2,0 ⁴	0,2	0,5	0,95—0,99	2,0	0,1	0,5 0,4—0,7	87,4 87,0—88,0	11,2 10,9—11,5	0,9	10 350 10 300—10 500	9 750	9 530						
	60	—	13,5	120°	+10°	2,0 ⁴	0,2	0,5	0,98—1,005	2,0	0,15	0,7 0,5—1,0	87,6 87,0—88,5	10,7 10,5—11,0	1,0	10 275 10 200—10 350	9 690	9 470						
80	—	16,5	120°	+15°	2,0 ⁴	0,2	0,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—					
Мазут сернистый ²	—	—	—	—	—	—	—	—	0,925—0,975	2,0	0,15	2,3 1,3—3,8	85,0 84,0—87,0	11,8 11,5—12,3	0,9	10 375 10 200—10 500	9 740	9 520						

¹ Мазут марки «флотский» (акцизных смол не более 27,0%; удельный вес 0,888—0,928; вспышка по Мартенс-Пенскому не ниже 90°; температура застывания не выше —3°; механических примесей не более 0,50%; воды не более 1,00%) имеет состав и теплотворную способность, весьма близкую к мазуту марки 7,5.

² Допускаемое содержание серы в мазутах, изготовленных из ишим-баевской и хаудатской нефти до 3,80%, из учкинской — до 6,00%, туап-санского запорода — до 1,00% и в компаундированных мазутах нефтей дру-гих районов с мазутами из вышеуказанных нефтей — до 1,50%.

³ Для моторного топлива марки М5 температура застывания — для баканского и батумского не выше +5°, для грозненского не выше +36°. Для мазутов туапсинского нефтезавода допускается температура застывания до +25°.

⁴ Для мазутов, прошедших через неравновесные речные склады, до-пускается содержание серы в мазуте до 5,00%.

⁵ Содержание серы в моторном топливе, изготовленном из высоко-сернистых нефтей, допускается для М3 — до 1,00%, для М4 и М5 — до 2,50%.

Технические характеристики отдельных топлив — теплотворная способность, балласт в виде золы и влаги, содержание летучих горючих веществ, свойства кокса и содержание серы — накладывают отпечаток на все устройство и на эксплуатацию котельной установки.

Чем выше теплотворная способность топлива, тем меньше его весовой расход для получения необходимого количества пара, тем меньше, следовательно, необходимые размеры складов на местах добычи и потребления. Работа железнодорожного и водного транспорта при этом также умень-

шается, уменьшаются и расходы по перевозке топлива. Чем выше теплотворная способность топлива, тем на большие расстояния можно его перевозить, не вызывая значительного удорожания перевозки. Жидкие и некоторые виды газового топлива отличаются весьма высокой теплотворной

способностью, достигающей $Q_p^* = 10\,000$ ккал/кг.

Это является одной из причин того, что жидкие топлива иногда перевозят на весьма значительные расстояния и что высококалорийные газы передают по газопроводам на сотни километров.

Таблица 22

Характеристики газообразного топлива (Составлено Н. В. Шишаковым)

Вид газа (топливо)	Состав газа в объемных %								
	CO ₂	H ₂ S	C _m H _n	O ₂	CO	H ₂	CH ₄	N ₂	Q _c [*]
I. Доменный газ									
1. Газ древесноугольной домы	12,0	—	—	—	27,0	8,0	1,6	51,4	1 162
2. Газ коксовой домы	10,5	—	—	—	28,0	2,7	0,3	58,5	948
II. Генераторный газ									
а) Генераторы для кускового топлива									
1. Донецкий антрацит АК	5,0	0,15	0,00	0,2	28,5	13,0	0,5	52,6	1 245
2. " " " АС	5,5	0,17	0,00	0,2	27,5	13,5	0,5	52,6	1 230
3. " " " АМ	6,0	0,20	0,00	0,2	27,0	14,0	0,6	52,0	1 235
4. " " " АЗ	6,5	0,10	0,00	0,2	26,0	14,0	0,3	52,9	1 175
5. Коксовая мелочь	5,0	0,20	0,00	0,2	28,5	13,0	0,7	52,4	1 255
6. Донецкий газовый уголь	5,0	0,30	0,30	0,2	26,5	13,5	2,3	51,9	1 390
7. Лисичанский уголь	7,0	1,00	0,20	0,2	25,0	15,0	2,5	49,0	1 455
8. Проктопьевский "	4,0	0,00	0,40	0,2	28,0	12,0	1,3	52,7	1 295
9. Черемховский "	7,0	0,10	0,20	0,2	25,5	15,5	2,6	51,3	1 460
10. Челябинский "	5,0	0,20	0,30	0,2	30,0	13,0	2,0	49,3	1 460
11. Подмосковский "	6,5	1,20	0,40	0,2	25,0	14,0	2,2	50,6	1 425
12. Торф машинно-формованный .	8,0	0,06	0,40	0,2	28,0	15,0	3,0	45,3	1 556
13. Гидроторф	8,5	0,06	0,40	0,2	27,5	15,0	2,5	46,3	1 496
14. Щепы	6,5	0,00	0,40	0,2	29,0	14,0	3,0	46,9	1 560
б) Генераторы для газификации мелкозернистого топлива во взвешенном слое									
1. Фрезерный торф	9,8	0,0	0,75	0,2	2,03	10,9	1,9	56,1	1 161
2. То же, с подогретым дутьем .	8,3	0,0	0,77	0,2	23,7	11,8	1,7	53,5	1 274
3. Мелочь подмосковного угля .	6,9	0,37	0,39	0,2	21,7	7,1	1,1	62,2	1 016
4. То же, с подогретым дутьем .	6,9	0,37	0,43	0,2	22,7	7,9	1,6	9,9	1 115
в) Газ воздушной продувки (при процессе водяного газа)									
1. Из кокса	17,5	0,08	—	0,2	5,0	1,3	—	75,92	190
2. Из антрацита	14,5	0,08	—	0,2	8,8	2,3	0,2	73,92	338
III. Газ коксовых печей									
1. Старые печи Донбасса	2,6	0,3	1,7	1,0	5,0	50	24	15,4	3 743
2. Новые "	2,2	0,6	1,8	0,7	6,0	57	22	9,7	3 817
3. Печи Урала и Кузбасса	2,4	0,2	2,0	1,0	7,5	58	28	5,9	3 980
IV. Газ подземной газификации подмосковный									
	9,5	0,6	—	—	10,0	14,5	1,8	63,6	863

Таблица 22а

Характеристики природных газов (Составлено Н. В. Шиншаковым)

Месторождение газа	Состав газа в объемных %									
	H ₂ S	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂ и выше	N ₂	Воздух	Q _c
I. Фонтанные скважины										
1. Азнефтедобыча										
В среднем по району	следы	11,0	85,0	2,8	1,2			—	—	8 000
в том числе:										
А. Ленинифть	"	11,2	84,3	2,5	0,47	1,05	0,47	—	0	8 100
"	"	7,0	91,71	0,77	0,12	0,17	0,23	—	0	8 100
Б. Сталинифть	"	11,40	83,37	3,0	0,57	0,95	0,71	—	0	8 150
"	"	4,20	90,75	2,97	0,57	0,80	0,77	—	0	8 750
В. Кагановичнефть	"	1,0	88,50	5,36	2,29	1,98	0,87	—	0	9 650
"	"	1,2	94,73	2,52	0,65	0,59	0,31	—	0	8 800
Г. Азизбековнефть	"	2,0	89,9	2,59	0,26	0,26	0,19	—	4,8	8 250
"	"	2,0	94,5	2,50	0,40	0,20	0,40	—	0	8 650
Д. Молотовнефть	"	22,4	72,27	2,04	0,49	0,49	0,41	—	1,9	6 800
"	"	6,4	89,98	1,09	0,25	0,17	0,21	—	1,9	7 950
Е. Орджоникидзефть	"	12,47	81,03	3,40	0,49	0,97	0,56	—	0	7 950
"	"	6,80	89,03	2,28	0,51	0,69	0,69	—	0	8 450
2. Грознефть										
Октябрьский район	"	1,0	49,0	11,0	17,0	15,0	4,0	3,0	0	15 200
Старый Грозненский район	"	не опр.	82,1	10,2	3,6	4,1	не опр.	—	0	10 500
3. Дагнефть (Изербаш)	"	2,0	75,0	6,8	6,0	6,0	0,2	4,0	0	10 500
4. Майнефть										
Газопровод на сажевый завод	"	2,0	72,4	4,7	7,3	6,7	0,6	6,3	0	10 500
Газопровод Широкой балки	"	0,2	93,3	2,0	1,3	2,0	0,5	1,0	0	9 300
5. Прикамнефть	"	0,7	51,0	6,0	8,0	4,0	0,3	30,0	—	8 300
6. Бугурусланнефть	"	0,8	80,2	7,9				11,1	—	8 300
7. Эмбафть	"	1,8	87,1	3,2	1,2	0,3	0,3	6,1	—	8 490
8. Туркменнефть										
Челекен	"	0,5	90,0	3,0	2,0	1,2	0,3	3,0	—	9 290
Небитдаг	есть	2,1	85,7	3,5	4,0	3,0	0,4	1,3	—	9 700
9. Калининнефть										
Газопровод	следы	7,8	79,6	3,4	1,7	2,1	0,6	4,8	—	8 500
II. Чисто газовые месторождения										
1. Крутая (Ухта)	"	0,2	93,0	1,0	0,1	0,1	0,0	5,6	—	8 150
2. Нижнее Заволжье	"	2,0	95,0	—	—	—	—	3,0	—	8 100
3. Мелитополь	"	0,2	97,9	0,1				1,8	—	8 400
4. Северное Поле	"	0,7	97,7	—	—	—	—	1,6	—	8 300
5. Мельников:										
Западное поле	"	0,2	55,0	—	—	—	—	44,8	—	4 700
Восточное поле	"	0,1	88,0	—	—	—	—	11,7	—	7 600
6. Калмыцкие степи	"	5,4	83,0	—	—	—	—	11,6	—	7 100
7. Таманский полуостров	"	2,0	93,0	—	—	—	—	5,0	—	8 000
8. Дашавское (Западная Украина)	"	0,09	98,46					1,19	0,26	8 600

Твердые топлива с $Q_p^* = 5000—7500$ ккал/кг могут являться дальнепривозными. Твердые топлива, у которых $Q_p^* < 5000$ ккал/кг, например, подмосковный уголь, бурые угли, торф, сланцы, дрова, суррогаты, обычно являются топливами местными и дальше 200—300 км их обычно не возят.

Величина теплотворной способности рабочего топлива в значительной мере зависит от содержания в нем балласта. При перевозке низкосортного топлива с низкой Q_p^* приходится возить много балласта, бесполезно загружая транспорт. При сжигании низкосортных топлив наличие балласта увеличивает затраты по золоудалению и ухудшает работу котельного агрегата.

В частности, зола кроме снижения величины Q_p^* , повышает потери с недогоревшим топливом, так как вместе с удаляемыми из топки и газоходов золой и шлаками удаляются также и недогоревшие частицы топлива. Зола и шлак засоряют поверхности нагрева топки и газоходов, ухудшая работу этих поверхностей и всего котельного агрегата. Обычно при проектировании влияние золы топлива учитывается увеличением поверхностей нагрева и уменьшением скорости газов во избежание износа поверхности нагрева.

Зола и шлак вызывают затруднения при сжигании топлива и сильно усложняют труд эксплуатационного персонала. Иногда шлакообразование может даже нарушить работу агрегата и вызвать в нем повреждения. Это бывает при расстройстве горения слоя топлива или сильном зашлаковании поверхностей нагрева. Устройства для удаления шлака и золы удорожают установку. Загрязнение поверхностей нагрева приводит к худшему охлаждению газов, повышению их температуры и увеличению потери тепла с уходящими в трубу газами. При сжигании зольных топлив в дымовую трубу вылетают значительные количества летучей золы, которая загрязняет воздух и оседает потом в окрестностях котельной установки, создавая неблагоприятные гигиенические условия для населения. Чтобы избежать этого, часто увеличивают высоту дымовых труб и устанавливают золоуловители. Все это удорожает установку.

Зольность топлива мало влияет на температуру горения, так как наличие ее уменьшает содержание горючей части топлива и тем самым уменьшает объем продуктов горения на 1 кг топлива.

Влага топлива в противоположность золе увеличивает объем продуктов горения, приходящийся на 1000 ккал полезного тепла. Это обстоятельство является причиной того, что влага топлива снижает температуру горения. Горение ухудшается и поэтому увеличиваются потери от неполноты горения. Увеличенный объем продуктов горения вызывает более медленное их охлаждение и приводит к увеличению потери с уходящими в трубу

газами, если не будет соответствующим образом увеличена площадь конвективных поверхностей нагрева.

Влажное топливо труднее поддается размолу на пыль и требует специальных сушильных устройств. При слоевом сжигании в этом случае применяются особые топочные шахты; кроме того, часть колосниковой решетки превращается в зону подсушки топлива, что приводит к увеличению размеров колосниковой решетки. Повышенная влажность топлива приводит к ржавлению поверхностей нагрева водяного экономайзера и воздухоподогревателя, лежащих в области низких температур газов, и к их засорению ввиду прилипания к ним влажной золы.

Зимой высоковлажные топлива смерзаются, причем из сравнительно небольших кусков и даже мелочи образуются глыбы. Борьба со смерзанием топлива усложняет эксплуатацию.

При повышении влажности топлива примерно до 60% сжигание топлива становится невозможным, так как количество выделенного топливом тепла за вычетом тепла, идущего на испарение влаги, не может нагреть полученные продукты горения до температуры $t_2 \geq 900^\circ \text{C}$, при которой еще возможен устойчивый процесс горения.

Сера топлива лишь частично является горючим элементом и обладает низкой теплотворной способностью. Она стоит на границе между балластным и горючим веществом и может приносить большой вред. Серный колчедан затрудняет размол топлива ввиду значительной твердости. При горении серы образуется сернистый ангидрид, который при наличии влаги может дать серную кислоту, разъедающую поверхности нагрева. Сернистый ангидрид, попадая в помещение котельной, вредно влияет на здоровье обслуживающего персонала, а выходя из дымовой трубы с продуктами горения — уничтожает растительность и ухудшает санитарные условия прилегающей местности.

Есть указания, что сернистые топлива склонны к самовозгоранию, почему их рекомендуют складывать невысокими штабелями на большой площади.

В жидких и газообразных топливах твердый балласт почти отсутствует, находясь лишь в некоторых газах (доменный газ) в виде пыли. Влага и сера тоже обычно содержатся в них в небольших количествах. В низкокалорийных газах Q_p^* понижается за счет наличия газообразного балласта в виде CO_2 и N_2 , который ухудшает условия транспорта, снижает температуру горения и вызывает необходимость увеличения поверхностей нагрева, чтобы избежать повышения температуры уходящих газов.

Для сжигания топлива большое значение имеет его органический состав и связанный с ним выход летучих. Топлива с большим выходом летучих легче воспламеняются и более устойчиво горят,

чем топлива с малым выходом их, например, антрацит или тощий уголь. Температурные условия работы колосниковых решеток, как это будет показано при описании слоевых топок, также зависят от выхода летучих. От выхода летучих зависят также и способы эксплуатации, связанные как с затруднениями воспламенения при малом выходе летучих, так и с опасностью взрывов пыли при топливах с большим их выходом.

Умеренная спекаемость топлива полезна при слоевом его сжигании, уменьшая унос несгоревших частиц из слоя. Сильная же спекаемость увеличивает недожог топлива. Образующийся у неспекающихся топлив порошкообразный и рассыпчатый кокс увеличивает унос несгоревшего угля.

При сжигании твердых топлив в факельных топках характер кокса не играет значительной роли. Значение плавкости золы топлива уже было отмечено. Здесь кроме абсолютного значения температуры начала деформации t_1 , температуры размягчения t_2 , температуры жидкоплавкого состояния t_3 играет большую роль также и величина интервала между этими температурами, колеблющаяся в пределах от 35 до 400° С. Эти интервалы до известной степени характеризуют вязкость шлака. Большие интервалы вызывают затруднения при топках с жидким шлакоудалением. Малые интервалы плавления золы, наоборот, облегчают применение жидкого шлакоудаления, а также борьбу со шлакованием поверхностей нагрева. Низкая температура застывания шлака вызывает необходимость понижать температуру газов при выходе из топки. Для этого приходится увеличивать поверхности топочных экранов.

Величина кусков топлива для правильного сжигания его в слое обычно не должна превосходить 100 мм, так как при больших размерах горение становится неравномерным. У дров и торфа размеры кусков больше, что связано со способом получения этих топлив. Легче всего сжигать в слое топливо, имеющее примерно одинаковый размер кусков, что может быть достигнуто путем сортировки топлива. Угольная мелочь или уголь с мелочью в слое сжигать труднее, так как при этом увеличивается как унос недогоревшего топлива, так и провал его через колосники. При сжигании спекающихся углей эти неудобства, вызванные наличием мелочи, отпадают. Отпадают эти неудобства и при факельном сжигании. Наличие мелочи в угле усложняет транспорт и увеличивает потери на раструску во время перегрузок и перевозки.

Механическая прочность угля имеет большое значение при его размоле. Чем она меньше, тем легче уголь размалывается, но зато всякое перемещение угля вызывает увеличение содержания в нем мелочи и потери на утруску.

Очень важным свойством топлива является наличие или отсутствие у него способности к самовоз-

горанию. К самовозгоранию особенно склонны топлива с большим выходом летучих и содержанием серы, влаги и мелочи. Антрациты и тощие угли не самовозгораются, и потому их можно хранить на складах в штабелях высотой до нескольких метров. Топлива, склонные к самовозгоранию, хранятся обычно в штабелях высотой не более 1,5 м. Применение искусственного уплотнения угля при укладке его позволяет безопасно хранить угли типа подмосковного в штабелях до 6—10 м высотой. Склонность топлив к самовозгоранию удорожает и усложняет устройство складов, увеличивает расходы по хранению топлива и угрожает пожаром установки. Кроме того, качество подобных топлив постепенно снижается при длительном хранении на складе из-за выветривания.

На стоимости перевозки и хранения топлива отражается его удельный вес и особенно теплоплотность, т. е. количество калорий тепла, даваемого единицей объема топлива. Чем меньше удельный вес и теплоплотность топлива, тем больше требуется места и затрат при его перевозке и хранении.

Жидкие топлива теплоплотны. Их использование при повышенной вязкости топлива вызывает необходимость дополнительных расходов на нагревание. Вязкость ряда сортов мазута чрезвычайно усложняет их транспорт.

Газовые топлива более разнообразны по своей теплоценности, чем жидкие. Наиболее теплоценными среди них являются природный и нефтяной газы, наименее теплоценными — доменный и генераторный газы.

На процесс горения значительно влияют температура воспламенения топлива, его теплопроводность, теплоемкость и др., а также термическая стойкость. Первые свойства важны для прогрева свежего топлива перед его зажиганием и для воспламенения, а последнее свойство — для самого процесса горения. Топливо с низкой термической стойкостью растрескивается при нагреве, как, например, егоршинский антрацит и некоторые бурые угли, что сильно усложняет процесс сжигания в связи с размельчением топлива независимо от первоначальной величины кусков.

Все сказанное выше показывает, что при оценке топлива необходимо учитывать весь комплекс его свойств. Высококачественные топлива наиболее удобны для сжигания. Чем хуже топливо, тем больше появляется дополнительных затрат, связанных с его транспортом, хранением и использованием. Тем не менее, сжигание высококачественных топлив в топках котлов нецелесообразно, так как их следует использовать для химической переработки, металлургии, транспорта и т. д. Для котельных установок необходимо применять, главным образом, низкосортные местные топлива и всякие отходы, что дает возможность рациональней и полней использовать природные ресурсы

топлива. Широкое применение местных топлив одновременно повышает экономичность установок ввиду снижения стоимости перевозок топлив и уменьшает загрузку железнодорожного транспорта, освобождая его от дальних перевозок.

Развитие добычи местных топлив способствует равномерному развитию производительных сил по всей стране и укрепляет нашу обороноспособность.

ность, делая промышленные районы не зависящими от доставки дальнепривозного топлива.

Рациональное использование местных низкосортных топлив в котельных установках в настоящее время значительно облегчается тем, что современная техника дает возможность сжигать их с достаточно высоким коэффициентом полезного действия.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

РЕАКЦИИ ГОРЕНИЯ. ПРОДУКТЫ ГОРЕНИЯ

При расчете котельного агрегата, а также при контроле и наладке его работы приходится определять объем воздуха, необходимого для горения, количество продуктов сгорания, их состав, учитывать влияние неполноты сгорания на количество выделенного тепла и т. д. В этой главе дана методика подсчета этих величин и приведены формулы, которыми приходится для этого пользоваться.

14. Горение углерода, его окиси, водорода, серы и метана

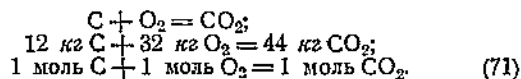
Горение углерода. При горении углерода С можно получить в качестве продуктов сгорания:

а) окись углерода CO — в этом случае процесс горения останется незаконченным, так как окись углерода может быть дополнительно окислена в углекислоту; б) углекислоту CO_2 — в этом случае процесс горения является полным.

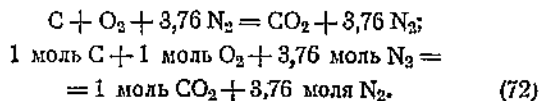
Газовые характеристики различных газов, которыми в дальнейшем приходится пользоваться, приведены в табл. 4.

При полном сгорании углерода реакция окисления идет следующим образом.

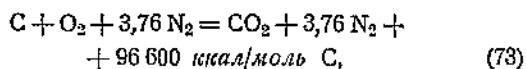
Приняв за единицу измерения 1 кг и соответственно килограмм-молекулу (моль), получим



Формула (71) относится к случаю сгорания углерода в чистом кислороде. При использовании для горения кислорода воздуха необходимо учесть, что воздух представляет смесь, состоящую по объему приблизительно из 21% кислорода O_2 и 79% азота N_2 , т. е. в воздухе содержится на 1 объем кислорода 79:21 = 3,76 объема азота, или на 1 моль O_2 приходится 3,76 моля N_2 . Азот без изменения попадает в продукты горения. Поэтому баланс продуктов горения углерода в воздухе можно условно написать так



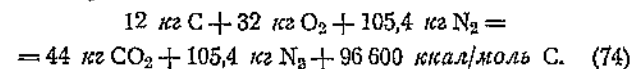
При составлении формул горения обычно, как принято в физической химии, к правой части уравнения приписывается тепловой эффект реакции при ходе ее слева направо, определенный в больших калориях на 1 моль или на 1 кг окисляющегося элемента. Знак плюс или минус отвечает соответственно выделению или поглощению тепла реакцией. Согласно этому можно написать:



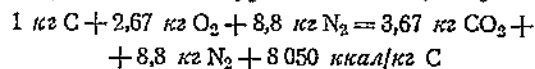
откуда 1 моль $\text{C} + 4,76$ моля воздуха = 4,76 моля продуктов сгорания + 96 600 ккал/моль С.

Эти уравнения дают возможность получить как весовые, так и объемные соотношения между количествами сгоревшего углерода, израсходованного при горении воздуха (или кислорода), и полученных продуктов горения.

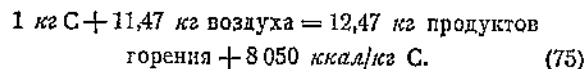
Если подставить в формулу (73) вес моля углерода, а также кислорода, азота и углекислоты из табл. 4, то получим



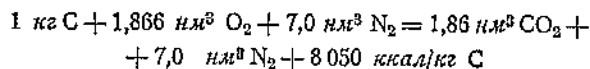
Разделив обе части уравнения на 12, получаем



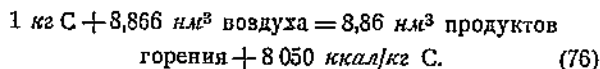
или



Заменяя в формуле (75) соответствующие веса газов O_2 , N_2 и CO_2 их объемами при нормальных условиях, т. е. деля веса газов на их удельные веса (табл. 4), получаем



или



Как видно из уравнения (76), объем продуктов полного горения твердого углерода почти равен первоначальному объему воздуха до горения.

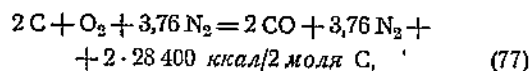
Таким же путем выводятся формулы для неполного горения углерода и горения остальных элементов топлива — водорода и серы, а также горючих газов, входящих в состав газообразного топлива.

При неполном сгорании углерода в окись углерода $2\text{C} + \text{O}_2 = 2\text{CO}$.

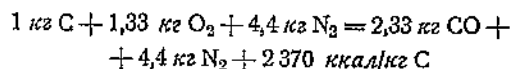
Количество тепла, выделяемое при этом, равно

$$28\,400 \text{ ккал/моль C}.$$

Следовательно,



откуда по предыдущему



или

$$1 \text{ кг С} + 5,73 \text{ кг воздуха} = 6,73 \text{ кг продуктов горения} + \\ + 2370 \text{ ккал/кг С}; \quad 1 \text{ кг С} + 0,933 \text{ нм}^3 \text{ О}_2 + \\ + 3,5 \text{ нм}^3 \text{ N}_2 = 1,866 \text{ нм}^3 \text{ СО} + 3,5 \text{ нм}^3 \text{ N}_2 + \\ + 2370 \text{ ккал/кг С}$$

или

$$1 \text{ кг С} + 4,433 \text{ нм}^3 \text{ воздуха} = \\ = 5,366 \text{ нм}^3 \text{ продуктов горения.} \quad (78)$$

Как видно, при неполном горении углерода объем продуктов горения увеличивается по сравнению с объемом воздуха до горения на $5,366 - 4,433 = 0,933 \text{ нм}^3$, т. е. на величину объема кислорода, участвующего в горении.

Горение окиси углерода. Окись углерода является горючим газом и сгорает согласно уравнению



откуда

$$2 \text{ СО} + \text{О}_2 + 3,76 \text{ N}_2 = 2 \text{ СО}_2 + 3,76 \text{ N}_2 + \\ + 2 \cdot 68200 \text{ ккал/2 моля СО.} \quad (80)$$

Далее, аналогично предыдущему,

$$1 \text{ кг СО} + 0,57 \text{ кг О}_2 + 1,88 \text{ кг N}_2 = 1,57 \text{ кг СО}_2 + \\ + 1,88 \text{ кг N}_2 + 2430 \text{ ккал/кг СО}$$

или

$$1 \text{ кг СО} + 2,45 \text{ кг воздуха} = 3,45 \text{ кг продуктов} \\ \text{горения} + 2430 \text{ ккал/кг СО.}$$

Пересчитывая на объемы газов, получим

$$1 \text{ нм}^3 \text{ СО} + 0,5 \text{ нм}^3 \text{ О}_2 + 1,88 \text{ нм}^3 \text{ N}_2 = 1 \text{ нм}^3 \text{ СО}_2 + \\ + 1,88 \text{ нм}^3 \text{ N}_2 + 3050 \text{ ккал/нм}^3 \text{ СО}$$

или

$$1 \text{ нм}^3 \text{ СО} + 2,38 \text{ нм}^3 \text{ воздуха} = \\ = 2,88 \text{ нм}^3 \text{ продуктов горения.}$$

Из этого уравнения видно, что при горении СО объем продуктов горения уменьшается по сравнению с объемом газов, вступающих в реакцию горения, на величину вступающего в реакцию кислорода, так как

$$(1 + 2,38) - 2,88 = 0,5 \text{ нм}^3.$$

Процесс полного горения углерода можно представлять протекающим по одному из следующих двух основных путей:

1) углерод сгорает полностью и дает сразу конечный продукт окисления — углекислоту;

2) горение углерода распадается на две стадии: а) неполное горение углерода с образованием окиси углерода; б) горение образовавшейся окиси углерода и получение конечного продукта углекислоты.

По закону Гесса для определенного термохимического процесса количество выделяемого или поглощаемого тепла зависит только от начального и конечного состояния системы тел, участвующих в процессе, и не зависит от пути, по которому шло данное превращение. Поэтому вне зависимости от того, по какому из указанных путей протекал процесс горения углерода, количество выделенного тепла останется одним и тем же.

Горение водорода происходит согласно уравнению



Количество выделяемого тепла при сгорании 1 моля водорода равно 68380 ккал . Это количество тепла выделяется, если водяной пар, полученный при сгорании водорода, конденсируется в воду, которая затем охла-

ждается до 0° С . Конденсации водяного пара в газах котлоагрегата, как выше упоминалось, обычно не происходит, поэтому считают, что тепло, полезно выделяющееся при сгорании водорода, равно тому количеству, которое можно использовать, если полученный при сгорании пар охладить до 0° С , не конденсируя. Количество выделенного тепла при этом условии будет равно

$$Q_{\text{H}_2} = (68380 - 595 G_{\text{H}_2\text{O}}) \text{ ккал/моль H}_2, \quad (83)$$

где $G_{\text{H}_2\text{O}}$ кг/моль $\text{H}_2 = 18,016 \text{ кг/моль H}_2\text{О}$ — вес водяного пара, полученного при сгорании 1 моля H_2 , 595 ккал/кг — теплосодержание сухого насыщенного пара при 0° С .

После этого

$$Q_{\text{H}_2} = 68380 - 595 \cdot 18,016 = 57700 \text{ ккал/моль H}_2.$$

Следовательно для теплотворной способности 1 моля водорода получаем два числовых значения — 68380 ккал для Q_p^0 и 57700 ккал для Q_p^u .

В дальнейшем последний член термохимических формул изображается в виде дроби, числитель которой дает количество выделенного тепла по Q_p^0 , а знаменатель — по Q_p^u .

Таким образом

$$2 \text{ H}_2 + \text{О}_2 + 3,76 \text{ N}_2 = 2 \text{ H}_2\text{О} + 3,76 \text{ N}_2 + \\ + \frac{2 \cdot 68380}{2 \cdot 57700} \text{ ккал/моль H}_2, \quad (84)$$

откуда

$$1 \text{ кг H}_2 + 7,95 \text{ кг О}_2 + 26,2 \text{ кг N}_2 = 8,95 \text{ кг H}_2\text{О} + \\ + 26,2 \text{ кг N}_2 + \frac{33920}{28560} \text{ ккал/кг H}_2$$

или

$$1 \text{ кг H}_2 + 34,15 \text{ кг воздуха} = 35,15 \text{ кг продуктов горения} + \frac{33920}{28560} \text{ ккал/кг H}_2.$$

Пересчет на объемы дает (в случае газообразного водорода):

$$1 \text{ нм}^3 \text{ H}_2 + 0,5 \text{ нм}^3 \text{ О}_2 + 1,88 \text{ нм}^3 \text{ N}_2 = 1 \text{ нм}^3 \text{ H}_2\text{О} + \\ + 1,88 \text{ нм}^3 \text{ N}_2 + \frac{3050}{2570} \text{ ккал/нм}^3 \text{ H}_2$$

или

$$1 \text{ нм}^3 \text{ H}_2 + 2,38 \text{ нм}^3 \text{ воздуха} = 2,88 \text{ нм}^3 \text{ продуктов горения} + \frac{3050}{2570} \text{ ккал/нм}^3 \text{ H}_2. \quad (85)$$

Из формулы (85) видно, что при сгорании газообразного водорода объем продуктов горения уменьшается по сравнению с первоначальным объемом газов на величину объема вступившего в реакцию кислорода;

$$(1 + 2,38) - 2,88 = 0,5 \text{ нм}^3.$$

Если водород содержится в твердом топливе и, следовательно, находится в химически связанном состоянии, то объем газов до реакции равен только $2,38 \text{ нм}^3$. В этом случае происходит увеличение объема продуктов горения на величину объема вступившего в реакцию кислорода.

Горение серы подчиняется уравнению



Как выше указывалось (§ 10), в горении принимает участие только органическая и колчеданная

сера. Сульфатная сера в горении не участвует. Количество выделяемого тепла зависит от аллотропической формы серы. Обычно при расчетах котельных агрегатов за количество тепла, выделенного при сжигании серы, принимается тепловыделение, получающееся при сгорании в сернистый газ SO_2 ромбической (октаэдрической) серы, равное 69 390 ккал/моль.

Тогда

$$\text{S} + \text{O}_2 + 3,76 \text{N}_2 = \text{SO}_2 + 3,76 \text{N}_2 + 69\,390 \text{ ккал/моль S}, \quad (87)$$

откуда

$$1 \text{ кг S} + 0,998 \text{ кг O}_2 + 3,28 \text{ кг N}_2 = 1,998 \text{ кг SO}_2 + 3,28 \text{ кг N}_2 + 2\,160 \text{ ккал/кг S}$$

или

$$1 \text{ кг S} + 4,28 \text{ кг воздуха} = 5,28 \text{ кг продуктов горения} + 2\,160 \text{ ккал/кг S}.$$

Пересчитывая на объемы газов, получим:

$$1 \text{ кг S} + 0,698 \text{ нм}^3 \text{ O}_2 + 2,62 \text{ нм}^3 \text{ N}_2 = 0,68 \text{ нм}^3 \text{ SO}_2 + 2,62 \text{ нм}^3 \text{ N}_2 + 2\,160 \text{ ккал/кг S}$$

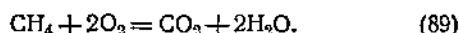
или

$$1 \text{ кг S} + 3,318 \text{ нм}^3 \text{ воздуха} = 3,3 \text{ нм}^3 \text{ продуктов горения} + 2\,160 \text{ ккал/кг S}. \quad (88)$$

Из этих формул видно, что при сгорании твердой S в SO_2 объем продуктов горения почти не меняется по сравнению с объемом газов до реакции горения.

При таком способе подсчета не учитывается возможность образования в продуктах горения некоторого количества серной кислоты H_2SO_4 и несколько иначе протекающий процесс горения колчеданной серы. Однако вследствие небольшого содержания серы в топливе полученная при этом ошибка практически не имеет значения, расчет же упрощается.

Горение метана. Химическая формула горения метана



Количество выделенного тепла при сгорании метана (учитывая сказанное выше о горении водорода)

$$Q_{\text{CH}_4} = \frac{214\,560}{193\,200} \text{ ккал/моль CH}_4,$$

отсюда

$$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 7,52 \text{ N}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 7,52 \text{ N}_2 + \frac{214\,560}{193\,200} \text{ ккал/моль CH}_4. \quad (90)$$

Далее

$$1 \text{ кг CH}_4 + 3,99 \text{ кг O}_2 + 13,17 \text{ кг N}_2 = 2,74 \text{ кг CO}_2 + 2,25 \text{ кг H}_2\text{O} + 13,17 \text{ кг N}_2 + \frac{13\,400}{12\,060} \text{ ккал/кг CH}_4$$

или

$$1 \text{ кг CH}_4 + 17,16 \text{ кг воздуха} = 18,16 \text{ кг продуктов горения} + \frac{13\,400}{12\,060} \text{ ккал/кг CH}_4.$$

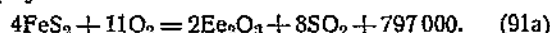
Пересчет на объемы дает

$$1 \text{ нм}^3 \text{ CH}_4 + 2,01 \text{ нм}^3 \text{ O}_2 + 7,53 \text{ нм}^3 \text{ N}_2 = 0,995 \text{ нм}^3 \text{ CO}_2 + 2,01 \text{ нм}^3 \text{ H}_2\text{O} + 7,53 \text{ нм}^3 \text{ N}_2 + \frac{9\,620}{8\,465} \text{ ккал/нм}^3 \text{ CH}_4$$

или

$$1 \text{ нм}^3 \text{ CH}_4 + 9,54 \text{ нм}^3 \text{ воздуха} = 10,53 \text{ нм}^3 \text{ продуктов горения} + \frac{9\,620}{8\,465} \text{ ккал/нм}^3 \text{ CH}_4. \quad (91)$$

При сжигании колчеданной серы реакция протекает по формуле



На 1 кг сгоревшей серы требуется кислорода 1,37 кг вместо 0,998 кг при сжигании октаэдрической серы.

15. Теоретически и практически необходимое количество воздуха. Состав и объем продуктов горения при полном и неполном горении

Исходя из приведенных в § 14 соотношений, можно установить зависимости, необходимые для контроля топочного процесса и для расчета топочных устройств и котельных агрегатов. В первую очередь можно определить количество воздуха, теоретически и практически необходимое для полного сгорания 1 кг топлива.

Теоретически необходимым для горения топлива называется то количество воздуха, которого достаточно для полного сгорания 1 кг топлива при условии, что весь кислород воздуха будет использован для горения и в дымовых газах его содержаться не будет.

Обычно при подаче в топку только теоретически необходимого количества воздуха не удается достигнуть полного сгорания топлива. Даже лучшие топки для обеспечения достаточно полного сгорания топлива обычно требуют воздуха на 15—20% больше теоретически необходимого количества его.

Отношение количества воздуха, действительно поступившего в топку, к теоретически необходимому, называется коэффициентом избытка воздуха. Этот коэффициент обозначается через α . Количество воздуха чаще всего дается на 1 кг топлива в кг или в нм³.

Если обозначить через:

V_{α} нм³/кг топлива — объем воздуха, действительно поступивший в топку на 1 кг сжженного топлива;

V_0 нм³/кг топлива — объем воздуха, теоретически необходимый для сгорания 1 кг топлива, то согласно вышесказанному

$$\alpha = \frac{V_{\alpha}}{V_0}; \quad (92)$$

следовательно,

$$V_{\alpha} = \alpha \cdot V_0 \text{ нм}^3/\text{кг топлива}.$$

Избыток воздуха в топке зависит от сорта сжигаемого топлива, конструкции топки и условий эксплуатации последней (состояния топки, ее нагрузки, работы обслуживающего персонала и т. д.) и может колебаться в довольно широких пределах от 1,15 до 1,5. У работающих топок значение α может быть подсчитано на основании анализа дымовых газов; у вновь проектируемых агрегатов значением α задаются на основании испытаний однотипных установок.

Величина V_0 определяется следующим образом. В 1 кг рабочей массы топлива содержится следующее количество горючих элементов топлива, для сгорания которых необходим кислород воздуха:

углерода	$\frac{C_p}{100}$ кг
водорода	$\frac{H_p}{100}$ "
серы	$\frac{S_p^a}{100}$ "

Величины C_p , H_p и S_p^a даны в процентах по весу. Согласно формулам (75), (84) и (87) необходимо кислорода для полного сгорания:

1 кг углерода	2,67 кг
1 " водорода	7,95 кг
1 " летучей серы	0,998 кг $\approx$ 1 кг.

Следовательно, для полного сгорания указанных выше количеств углерода, водорода и серы потребуется кислорода

$$\frac{2,67 C_p + 7,95 H_p + S_p^a}{100}$$

Если в 1 кг топлива содержится $\frac{O_p}{100}$ кг кислорода, то с воздухом потребуется подвести кислорода меньше на $\frac{O_p}{100}$ кг, т. е.

$$\frac{2,67 C_p + 7,95 H_p + S_p^a - O_p}{100} \text{ кг/кг топлива.}$$

Вес воздуха, содержащего в своем составе указанное количество кислорода, т. е. вес воздуха, теоретически необходимого для горения топлива¹

$$L_0 = \frac{100}{23,2} \cdot \frac{2,67 C_p + 7,95 H_p + S_p^a - O_p}{100} = 0,115 C_p + 0,345 H_p + 0,043 (S_p^a - O_p) \frac{\text{кг воздуха}}{\text{кг топлива}}. \quad (93)$$

Объем, занимаемый указанным количеством воздуха при нормальных условиях, будет равен

$$V_0 = \frac{L_0}{\gamma_0} \text{ м}^3/\text{кг топлива.} \quad (94)$$

Отсюда при $\gamma_0 = 1,293 \text{ кг/м}^3$ имеем

$$V_0 = \frac{0,115 C_p + 0,345 H_p + 0,043 (S_p^a - O_p)}{1,293} \text{ м}^3/\text{кг топлива,} \quad (95)$$

и следовательно, объем воздуха, теоретически необходимого для горения топлива, при 0° С и

¹ В 100 весовых частях воздуха содержится приблизительно 23,2 весовых части кислорода и 76,8 весовых частей азота.

+ 760 мм рт. ст. равен¹

$$V_0 = (0,089 C_p + 0,266 H_p + 0,033 (S_p^a - O_p)) \text{ м}^3/\text{кг топлива.} \quad (96)$$

Довольно часто при всяких приближенных и ориентировочных подсчетах пользуются для определения теоретически необходимого количества воздуха приближенной формулой, дающей возможность подсчитать последнее с точностью до 1%, зная только теплотворную способность и влажность сжигаемого топлива.

Формула базируется на том, что количество тепла, которое выделяет сухое топливо (твердое или жидкое), сгорая полностью, примерно пропорционально количеству кислорода, а следовательно, и воздуха, необходимого для горения.

В соответствии с этим низшая теплотворная способность сухого топлива

$$Q_c^* = \frac{V_0 \cdot 1000}{a_0}$$

Если влажность топлива W_p %, то сухая часть топлива, из которого удалена влага, выделяет тепла

$$Q_p^* + 6W_p \text{ ккал/кг влажного топлива.}$$

Тогда эмпирическая формула для определения количества воздуха, необходимого для горения 1 кг твердого или жидкого топлива, имеет вид

$$V_0 = a_0 \frac{Q_p^* + 6W_p}{1000}. \quad (97)$$

В табл. 23 приводятся числовые значения коэффициента a_0 для типовых групп топлив.

Состав дымовых газов зависит от полноты сгорания топлива.

Таблица 23

Коэффициенты a_0 в формуле (97) для различных топлив

Топлива	a_0
Древесина	1,05
Торф	1,08
Бурые и каменные угли	1,09
Тощие угли, антрациты	1,10
Мазут	1,10

¹ При выводе формул (93) и (96) предполагалось, что вся горючая часть серы состоит из серы органической. Если же содержание в топливе клееданной серы велико и $S_p^{of} > 0,30\%$, то формулы принимают вид:

$$L_0 = 0,115 C_p + 0,345 H_p + 0,059 S_p^a - 0,043 O_p \text{ кг/кг,} \quad (93')$$

$$V_0 = 0,089 C_p + 0,266 H_p + 0,0457 S_p^a - 0,0330 O_p \text{ м}^3/\text{кг.} \quad (96')$$

При полном сгорании дымовые газы содержат:

- 1) продукты полного окисления углерода, водорода и летучей серы топлива: CO_2 , H_2O и SO_2 ;
- 2) водяной пар, полученный при испарении влаги топлива, а также вносимый в топку влажным воздухом и дутьем;
- 3) азот топлива;
- 4) азот неиспользованный при горении топлива кислород воздуха.

Эти продукты горения, объем которых V_g $\text{нл}^3/\text{кг}$ топлива, обычно разделяют на сухие газы $V_{c.g.}$, т. е. CO_2 , SO_2 , N_2 и O_2 , и водяные пары $V_{\text{H}_2\text{O}}$.

При обычном определении состава газов (прибором Орса и др.) в отбираемой для анализа пробе водяные пары подвергаются конденсации и объемный анализ дает относительный состав только сухих газов. Этим и вызвано разделение продуктов горения на сухие газы и водяные пары.

Неполное сгорание характеризуется тем, что в дымовых газах, кроме перечисленных составляющих, содержатся и горючие газы: CO , H_2 , CH_4 , а иногда и другие углеводороды.

При нормальной работе топки происходит почти полное сгорание топлива и в газах содержится только небольшое количество CO . Только при весьма неудовлетворительной конструкции топки или ненадежной ее работе в дымовых газах появляются H_2 , CH_4 и другие углеводороды.

Если обозначим через CO_2 , SO_2 , O_2 , N_2 , CO , H_2 , CH_4 объемное процентное содержание соответствующих компонентов сухих газов, а через V_{CO_2} , V_{SO_2} и т. д. — их объем в $\text{нл}^3/\text{кг}$, то

$$\text{CO}_2 = \frac{V_{\text{CO}_2}}{V_{c.g.}} \cdot 100\%;$$

$$\text{SO}_2 = \frac{V_{\text{SO}_2}}{V_{c.g.}} \cdot 100\%;$$

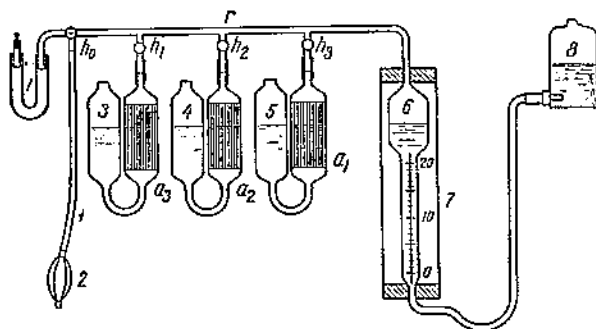
$$\text{O}_2 = \frac{V_{\text{O}_2}}{V_{c.g.}} \cdot 100\% \text{ и т. д.}$$

Так как при газовом анализе CO_2 и SO_2 поглощаются одновременно, суммарное их содержание обычно условно обозначается величиной RO_2 . Складывая соответствующие формулы, получим

$$\text{RO}_2 = \text{CO}_2 + \text{SO}_2 = \frac{V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2}}{V_{c.g.}} \cdot 100\%. \quad (98)$$

Величины RO_2 , O_2 , N_2 , CO , H_2 , CH_4 в процентах характеризуют объемный состав сухих газов.

Объемный анализ газов простейшим способом производится аппаратом Орса-Фишер (фиг. 19), который дает возможность определить $\text{CO}_2 + \text{SO}_2$, O_2 в сухих газах при полном горении и дополнительно CO при неполном горении¹. В случае необходимости определить содержание в газах водорода и метана H_2 и CH_4 приходится поль-



Фиг. 19. Схема газоанализатора Орса-Фишера.

1 — газовый фильтр; 2 — резиновая груша для просасывания газа; 3, 4 и 5 — поглотительные сосуды для поглощения окиси углерода, углекислоты и кислорода; 6 — измерительная бюретка; 7 — водяной цилиндр, служащий для поддержания постоянной температуры газа в измерительной бюретке; 8 — склянка с водой, служащая для регулирования уровня воды в измерительной бюретке; h_1-h_3 — краны для сообщения поглотителей 3-5 с газом; h_0 — трехходовой кран для присоса газа; r — трубка, по которой притекает газ к поглотителям и бюретке.

зоваться аппаратами более сложными, например, Орса-Гана или Орса-Норзе, с дожиганием этих газов в газоанализаторе.

Наибольшее практическое значение для котельных установок имеет случай, когда из продуктов неполного горения имеется лишь CO . Так как из формул, выведенных для условий неполного горения, легко получить формулы и для полного сгорания топлива, принимая, что содержание $\text{CO} = 0$, то в дальнейшем рассмотрен случай неполного горения при наличии только CO в продуктах горения.

Используя обозначения, указанные выше, можно написать

$$V_g = [V_{c.g.} + V_{\text{H}_2\text{O}}] \text{ нл}^3/\text{кг}. \quad (99)$$

Объем сухих газов $V_{c.g.}$ может быть определен следующим образом.

Согласно, принятым обозначениям можем написать

$$\text{RO}_2 = \frac{V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2}}{V_{c.g.}} \cdot 100\%;$$

$$\text{CO} = \frac{V_{\text{CO}}}{V_{c.g.}} \cdot 100\%. \quad (100)$$

Складывая эти формулы и определяя $V_{c.g.}$, получим

$$V_{c.g.} = \frac{V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{CO}}}{\text{RO}_2 + \text{CO}} \cdot 100\%. \quad (101)$$

В формулу (101) входят величины $\text{RO}_2\%$ и $\text{CO}\%$, характеризующие относительный состав сухих продуктов горения.

У работающих установок $\text{RO}_2\%$ и $\text{CO}\%$ определяются по анализу дымовых газов. У вновь проектируемых установок величинами $\text{RO}_2\%$ и $\text{CO}\%$ приходится задаваться на основании опытных данных, получаемых при эксплуатации аналогичных установок¹.

¹ Обычно задаются не RO_2 и CO , а избытком воздуха в дымовых газах и величиной потери от неполного сгорания и подсчитывают $(\text{RO}_2 + \text{CO})\%$.

¹ Содержание N_2 определяется из формулы:

$$\text{N}_2 = 100 - (\text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{O}_2 + \text{CO})\%.$$

Суммарный объем в дымовых газах углекислоты, сернистого газа и окиси углерода ($V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{CO}$) $нм^3/кг$ можно найти на основании следующих подсчетов.

В дымовых газах после сгорания топлива содержится V_{CO_2} углекислоты и V_{CO} окиси углерода. Будем считать, что из $\frac{C_p}{100}$ $кг$ углерода, содержащегося в $1 кг$ топлива, $\frac{C_{CO_2}}{100}$ $кг$ углерода сгорает полностью и дает V_{CO_2} $нм^3/кг$ углекислоты, а оставшаяся часть углерода $\frac{C_p - C_{CO_2}}{100}$ $кг$, сгорая, дает V_{CO} $нм^3/кг$ окиси углерода.

Согласно формуле (76) при полном сгорании $1 кг$ углерода получается $1,86 нм^3$ углекислоты, т. е. для получения $1 нм^3$ углекислоты необходимо $0,54 кг$ углерода. Следовательно, при сгорании $\frac{C_{CO_2}}{100}$ $кг$ углерода получается углекислоты

$$V_{CO_2} = \frac{C_{CO_2}}{100} : 0,54 = \frac{C_{CO_2}}{54} нм^3. \quad (102)$$

Согласно формуле (78) при неполном сгорании $1 кг$ углерода получается $1,87 нм^3$ окиси углерода или на $1 нм^3$ окиси углерода расходуется $0,54 кг$ углерода. Следовательно, при сгорании $\frac{C_p - C_{CO_2}}{100}$ $кг$ углерода получается окиси углерода

$$V_{CO} = \frac{C_p - C_{CO_2}}{54} нм^3. \quad (103)$$

Точно так же можно получить зависимость между V_{SO_2} и содержанием в топливе летучей серы — S_p^a/o .

Согласно формуле (88) при сгорании $1 кг$ летучей серы получается $0,68 нм^3$ сернистого ангидрида, т. е. на получение $1 нм^3 SO_2$ необходимо $1,47 кг$ летучей серы. Поэтому при сгорании $\frac{S_p^a}{100}$ $кг$ летучей серы, содержащейся в $1 кг$ топлива, получается сернистого ангидрида

$$V_{SO_2} = \frac{S_p^a}{100} : 1,47 = \frac{S_p^a}{147} нм^3. \quad (104)$$

Сложив формулы (102), (103) и (104), получим

$$\begin{aligned} V_{CO_2} + V_{CO} + V_{SO_2} &= \frac{C_{CO_2}}{54} + \frac{C_p - C_{CO_2}}{54} + \frac{S_p^a}{147} = \\ &= \frac{C_p + 0,368 S_p^a}{54} нм^3/кг топлива. \end{aligned} \quad (105)$$

Подставляя в формулу (101) сумму $V_{CO_2} + V_{CO} + V_{SO_2}$, получим объем сухих газов

$$V_{с.г.} = \frac{C_p + 0,368 S_p^a}{0,54(RO_2 + CO)} = \frac{K_p}{0,54(RO_2 + CO)} нм^3/кг, \quad (106)$$

где

$$K_p = C_p + 0,368 S_p^a/o. \quad (107)$$

Объем водяного пара, содержащегося в дымовых газах на $1 кг$ топлива, определяется на основании следующих подсчетов. В дымовые газы попадает пар:

- 1) полученный при сгорании водорода — $V_{H_2O}^{H_2}$ $нм^3/кг$;
- 2) выделившийся при испарении влаги, содержащейся в топливе, — $V_{H_2O}^w$;
- 3) приносимый в топку влажным воздухом — $\frac{W_L}{0,805}$ $нм^3/кг$;
- 4) форсуночный, приносимый с паровым дутьем, — $\frac{W_\phi}{0,805}$ $нм^3/кг$.

Суммарный объем водяного пара в газах будет равен

$$V_{H_2O} = V_{H_2O}^{H_2} + V_{H_2O}^w + \frac{W_L}{0,805} + \frac{W_\phi}{0,805} нм^3/кг, \quad (108)$$

где $0,805 кг/нм^3$ — удельный вес водяного пара при нормальных условиях.

Согласно формуле (84) при сгорании $1 кг$ водорода получается $8,95 \approx 9 кг$ водяного пара. Следовательно, объем водяного пара, полученный при сгорании $\frac{H_p}{100}$ $кг$ водорода, содержащегося в $1 кг$ топлива, будет равен

$$V_{H_2O}^{H_2} = \frac{9H_p}{80,5} нм^3/кг топлива. \quad (109)$$

При испарении влаги топлива получим водяного пара

$$V_{H_2O}^w = \frac{W_p}{80,5} нм^3/кг топлива. \quad (110)$$

Влажность воздуха характеризуется его влагосодержанием — d_L $г$ влаги на $1 кг$ сухого воздуха. Следовательно, в $V_a \cdot 1,293 кг$ сухого воздуха, необходимого для сгорания $1 кг$ топлива, будет содержаться водяного пара

$$W_L = 1,293 \cdot \frac{V_a \cdot d_L}{1000} кг/кг топлива;$$

его объем

$$\frac{1,293 V_a \cdot d_L}{1000 \cdot 0,805} = \frac{0,1293 V_a \cdot d_L}{80,5}. \quad (111)$$

Объем форсуночного пара будет

$$\frac{W_\phi}{0,805} нм^3/кг = \frac{100 W_\phi}{80,5} нм^3/кг.$$

Подставляя в формулу (108) величины $V_{H_2O}^{H_2}$, $V_{H_2O}^w$ и объемы W_L , W_ϕ , получим,

$$\begin{aligned} V_{H_2O} &= \frac{9H_p + W_p + 100W_L + 100W_\phi}{80,5} = \\ &= \frac{9H_p + W_p + 0,1293 V_a \cdot d_L + 100W_\phi}{80,5} нм^3/кг топлива. \end{aligned}$$

После подстановки в формулу (99) величин $V_{c,2}$ и V_{H_2O} получим

$$V_g = V_{c,2} + V_{H_2O} = \frac{K_p}{0,54(RO_2 + CO)} + \frac{9H_p + W_p + 0,1293V_a \cdot d_L + 100W_\phi}{80,5} \text{ нм}^3/\text{кг топ-лива.} \quad (113)$$

При содержании в дымовых газах кроме окиси углерода и других продуктов неполного сгорания — метана и водорода — формула (113) примет вид

$$V_g = \frac{K_p}{0,54(RO_2 + CO + CH_4)} + \frac{9 \left[H_p - \frac{K_p(0,09H_p + 0,18CH_4)}{0,54(RO_2 + CO + CH_4)} \right] + W_p + 0,1293V_a \cdot d_L + 100W_\phi}{80,5} \text{ нм}^3/\text{кг топлива.} \quad (114)$$

При незначительных количествах CH_4 и H_2 разницы в объемах V_g , подсчитанных по формулам (113) и (114), небольшая, и в этих случаях для упрощения подсчетов обычно пользуются формулой (113).

Количеством водяного пара, приносимого в дымовые газы влажным воздухом, можно пренебречь только при влажном и низкокалорийном топливе.

При полном сгорании топлива ($CO=0$) формула (113) принимает вид

$$V_g = \frac{K_p}{0,54RO_2} + \frac{9H_p + W_p + 0,1293V_a \cdot d_L + 100W_\phi}{80,5} \text{ нм}^3/\text{кг топлива.} \quad (115)$$

При обычных тепловых расчетах проектируемых котельных агрегатов изменением объема газов из-за химической неполноты горения пренебрегают и пользуются формулой для полного горения (115).

Выше была приведена приближенная формула для подсчета теоретически необходимого количества воздуха (97). Аналогичная формула для подсчета V_g — объема дымовых газов, получен-

Таблица 24

Значения коэффициентов b и c в формуле (116) для определения объема дымовых газов

Топливо	Коэффициенты	
	b	c
Древесина	1,066	0,142
Торф	1,094	0,108
Бурые и пламенные угли	1,112	0,054
Тощие угли и антрациты	1,118	0,02
Мазут	1,12	0,069

ных при полном сгорании 1 кг топлива, имеет следующий вид:

$$V_g = (c \cdot \alpha + b) \frac{Q_p^u + 6W_p}{1000} + 0,0124W_p \text{ нм}^3/\text{кг топлива,} \quad (116)$$

где b и c — коэффициенты, зависящие от вида сжигаемого топлива.

Величины этих коэффициентов (по Корницкому) приводятся в табл. 24.

16. Определение характеристики топлива β и избытка воздуха

При неполном горении, производя анализ газов

аппаратом Орса-Фишера, можно не определять содержания CO в газах только в том случае, если есть уверенность, что в продуктах горения не содержится других горючих газов кроме окиси углерода.

В этом случае, найдя анализом процентное содержание RO_2 и O_2 в сухих газах, содержание CO в них подсчитывают по выведенной ниже формуле (135).

Применяя в дальнейшем те же обозначения, как и в § 15, можно написать

$$V_{c,2} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{CO} + V_{O_2} + V_{N_2} \text{ нм}^3/\text{кг топлива.} \quad (117)$$

Азот, содержащийся в сухих газах, состоит из:

1) азота топлива $\frac{N_p}{100}$ кг/кг; объем этого количества азота равен

$$\frac{N_p}{100 \cdot 1,251} = \frac{N_p}{125,1} \text{ нм}^3/\text{кг топлива;}$$

2) азота воздуха, который целиком попадает в дымовые газы, — $V_{N_2}^L$ нм³/кг.

Следовательно,

$$V_{N_2} = \left[\frac{N_p}{125,1} + V_{N_2}^L \right] \text{ нм}^3/\text{кг.} \quad (118)$$

Учитывая объемное соотношение между N_2 и O_2 в воздухе, т. е. 79:21, можно вместо $V_{N_2}^L$ подставить равную ему величину $\frac{79}{21} V_{O_2}^L$ нм³/кг.

Тогда

$$V_{N_2} = \left(\frac{79}{21} V_{O_2}^L + \frac{N_p}{125,1} \right) \text{ нм}^3/\text{кг.} \quad (119)$$

Кислород воздуха и кислород топлива¹ расходуются в количестве (в нм³/кг топлива):

¹ Кислород, содержащийся в топливе, в газообразном состоянии занимал бы объем $\frac{O_p}{100 \cdot \gamma_{O_2}} = \frac{O_p}{142,9}$ нм³/кг.

- 1) $V_{O_2}^{CO_2}$ — для полного сгорания углерода в CO_2 ;
- 2) $V_{O_2}^{CO}$ — для неполного сгорания углерода в CO ;
- 3) $V_{O_2}^{SO_2}$ — для сгорания летучей серы;
- 4) $V_{O_2}^{H_2O}$ — для сгорания водорода;
- 5) V_{O_2} — остается неиспользованным ввиду наличия избытка воздуха.

Следовательно,

$$V_{O_2}^p + \frac{O_p}{142,9} = (V_{O_2}^{CO_2} + V_{O_2}^{SO_2} + V_{O_2}^{CO} + V_{O_2}^{H_2O} + V_{O_2}) \text{ нм}^3/\text{кг}, \quad (120)$$

откуда

$$V_{O_2}^L = V_{O_2}^{CO_2} + V_{O_2}^{SO_2} + V_{O_2}^{CO} + V_{O_2}^{H_2O} + V_{O_2} - \frac{O_p}{142,9} \text{ нм}^3/\text{кг}. \quad (121)$$

Подставляя $V_{O_2}^L$ из (121) в (119), получим

$$V_{N_2} = \frac{79}{21} \left(V_{O_2}^{CO_2} + V_{O_2}^{SO_2} + V_{O_2}^{CO} + V_{O_2}^{H_2O} + V_{O_2} - \frac{O_p}{142,9} \right) + \frac{N_p}{125,1} \text{ нм}^3/\text{кг}. \quad (122)$$

Подставляя V_{N_2} в формулу (117), получим

$$V_{c.z} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{CO} + V_{O_2} + \frac{N_p}{125,1} + \frac{79}{21} \left[V_{O_2}^{CO_2} + V_{O_2}^{SO_2} + V_{O_2}^{CO} + V_{O_2}^{H_2O} + V_{O_2} - \frac{O_p}{142,9} \right] \text{ нм}^3/\text{кг}. \quad (123)$$

Так как существует определенная зависимость между израсходованными на горение объемами кислорода $V_{O_2}^{CO_2}$, $V_{O_2}^{SO_2}$, $V_{O_2}^{CO}$ и объемами, полученными при сгорании V_{CO_2} , V_{SO_2} , V_{CO} , то, используя эти соотношения, можно исключить указанные объемы O_2 , заменив их соответствующими объемами CO_2 , SO_2 и CO (§ 14).

Для получения 22,26 нм³ углекислоты необходимо 22,39 нм³ кислорода (формула 72).

Следовательно, для получения V_{CO_2} нм³ углекислоты необходимо кислорода

$$V_{O_2}^{CO_2} = \frac{22,39}{22,26} V_{CO_2} = 1,006 V_{CO_2} \text{ нм}^3. \quad (124)$$

Таким же образом

$$V_{O_2}^{SO_2} = \frac{22,39}{21,89} V_{SO_2} = 1,023 V_{SO_2} \text{ нм}^3, \quad (125)$$

$$V_{O_2}^{CO} = \frac{0,5 \cdot 22,39}{22,4} V_{CO} = 0,5 V_{CO} \text{ нм}^3. \quad (126)$$

Для сгорания 1 моля водорода необходимо 0,5 моля кислорода. Объем кислорода, необходимого для сгорания $\frac{H_p}{100}$ л.г. водорода, равен

$$V_{O_2}^{H_2O} = \frac{0,5 \cdot 22,39}{2,016} \cdot \frac{H_p}{100} = 5,55 \frac{H_p}{100}. \quad (127)$$

Подставляя полученные значения $V_{O_2}^{CO_2}$, $V_{O_2}^{SO_2}$, $V_{O_2}^{CO}$ и т.д. в формулу (123), получим после ряда алгебраических преобразований:

$$5,55 \cdot \frac{H_p}{100} - \frac{O_p}{142,9} = 5,55 \frac{H_p - 0,126 O_p}{100}.$$

$$V_{c.z} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{CO} + V_{O_2} + \frac{N_p}{125,1} + \frac{79}{21} \left[1,006 V_{CO_2} + 1,023 V_{SO_2} + 0,5 V_{CO} + \frac{H_p - 0,126 O_p}{100} + V_{O_2} \right] \text{ нм}^3/\text{кг}. \quad (128)$$

После дальнейших преобразований получим

$$21 = 1,005 \left(\frac{V_{CO_2}}{V_{c.z}} \cdot 100 \right) + 1,018 \left(\frac{V_{SO_2}}{V_{c.z}} \cdot 100 \right) + 0,605 \left(\frac{V_{CO}}{V_{c.z}} \cdot 100 \right) + \left(\frac{V_{O_2}}{V_{c.z}} \cdot 100 \right) + 4,385 \frac{H_p - 0,126 O_p}{V_{c.z}} + \frac{0,168}{V_{c.z}} N_p. \quad (129)$$

Сумма двух последних членов после подстановки в нее величины

$$V_{c.z} = \frac{K_p}{0,54 (RO_2 + CO)}$$

представится в следующем виде:

$$4,385 \frac{H_p - 0,126 O_p}{V_{c.z}} + \frac{0,168 N_p}{V_{c.z}} = 2,37 \frac{H_p - 0,126 (O_p - 0,302 N_p)}{K_p} (RO_2 + CO). \quad (130)$$

Подставляя в формулу (129) подсчитанную выше сумму двух последних членов ее и принимая во внимание, что согласно принятым обозначениям

$$\frac{V_{CO_2}}{V_{c.z}} \cdot 100 = CO_2\%$$

и т.д., а также, что

$$1,005 CO_2 + 1,018 SO_2 \approx 1,005 RO_2 = RO_2 + 0,005 RO_2, \quad (131)$$

получаем после некоторых преобразований

$$21 - RO_2 = 0,005 RO_2 + 0,605 CO + O_2 + 2,37 \frac{H_p - 0,126 (O_p - 0,302 N_p)}{K_p} RO_2 + 2,37 \frac{H_p - 0,126 (O_p - 0,302 N_p)}{K_p} CO. \quad (132)$$

Объединяя в правой части члены с RO_2 и CO и введя обозначения

$$\beta = 2,37 \frac{H_p - 0,126 (O_p - 0,302 N_p)}{K_p} + 0,005, \quad (133)$$

получим

$$21 - \beta RO_2 = RO_2 + O_2 + (\beta + 0,6) CO, \quad (134)$$

откуда

$$CO = \frac{(21 - \beta RO_2) - (RO_2 + O_2)}{0,6 + \beta}. \quad (135)$$

По формуле (135) можно подсчитать процентное содержание в дымовых газах окиси углерода, если известны $RO_2\%$, $O_2\%$, β .

Величины $RO_2\%$, $O_2\%$ определяются объемным анализом газов, величина же β подсчитывается по

формуле (133). Из формулы (133) видно, что коэффициент β зависит только от состава сжигаемого топлива и не зависит от состава дымовых газов.

Изменения влажности и зольности топлива вызывают лишь пропорциональное изменение числителя и знаменателя первого члена формулы (133). Следовательно, β зависит только от горючей массы топлива и является его характеристикой.

У твердых и жидких топлив величина коэффициента β почти всегда положительна, у газообразных топлив величина β может быть и отрицательной.

Так как содержание азота в горючей массе твердых и жидких топлив незначительно (максимум 2,7%, а в большинстве случаев не больше 1,5%), то, пренебрегая в формуле (133) небольшой величиной члена $\frac{2,37 \cdot 0,126 \cdot 0,302 N_p}{K_p}$, получим для подсчета β более простую формулу для твердых и жидких топлив

$$\beta = 2,37 \frac{H_p - 0,126 O_p}{K_p} + 0,005. \quad (136)$$

Для случая неполного сгорания топлива, когда в составе дымовых газов кроме окиси углерода содержатся и другие продукты неполного сгорания — водород и метан, можно вывести следующую формулу, аналогичную (134):

$$(21 - \beta RO_2) - (RO_2 + O_2) = (\beta + 0,6) CO - (0,586 - \beta) CH_4 - 0,185 H_2. \quad (137)$$

При полном сгорании топлива $CO = CH_4 = H_2 = O$ и формулы (134) и (137) примут вид

$$(21 - \beta \cdot RO_2) - (RO_2 + O_2) = 0. \quad (138)$$

Из этой формулы очевидно, что при полном сгорании топлива можно при анализе газов ограничиться определением RO_2 , находя O_2 по формуле (138).

Однако из выражения (138) нельзя сделать обратного заключения, что если $21 - \beta \cdot RO_2 = RO_2 + O_2$, то горение полное, так как в формулу (137) члены, содержащие горючие газы, входят с разными знаками и сумма их в отдельных случаях может быть равна нулю.

Из формулы (138) имеем

$$RO_2 = \frac{21 - O_2}{1 + \beta}. \quad (139)$$

При $O_2 = 0$, т. е. при $\alpha = 1$, величина RO_2 достигает максимума:

$$RO_{2\max} = \frac{21}{1 + \beta}. \quad (140)$$

Для твердого и жидкого топлива β почти всегда величина положительная и $RO_{2\max} < 21\%$.

Для тех газообразных топлив, у которых величина β отрицательна, $RO_{2\max} > 21\%$.

Из формулы (140) видно, что $RO_{2\max}$ зависит только от коэффициента β , а следовательно, только от состава горючей массы топлива.

В табл. 25 даны величины β и $RO_{2\max}$ для различных топлив СССР.

Определение избытка воздуха

При том случае неполного сгорания топлива, когда в составе дымовых газов из продуктов неполного сгорания содержится одна только окись углерода, согласно формуле (92) избыток воздуха в дымовых газах

$$\alpha = \frac{V_a}{V_0} = \frac{V_a}{V_a - \Delta V}, \quad (141)$$

где ΔV нм³/кг — объем воздуха, который остался бы лишним, если бы при данном количестве поступившего в топку воздуха горение топлива было бы полным, т. е. за счет избыточного воздуха в дымовых газах была дожжена имеющаяся в них окись углерода.

Обозначив через $V_{N_2}^L$ нм³/кг топлива объем азота, поступившего в топку как составная часть воздуха, получаем

$$V_a = \frac{100}{79} V_{N_2}^L \text{ нм}^3/\text{кг}. \quad (142)$$

Из формулы (118) следует, что

$$V_{N_2}^L = V_{N_2} - \frac{N_p}{125,1} = V_{a,2} \frac{N_2}{100} - \frac{N_p}{125,1}, \quad (143)$$

причем

$$N_2 = 100 - (RO_2 + O_2 + CO) \%. \quad (144)$$

Таблица 25

Значения коэффициента β и величины $RO_{2\max}$ для различных топлив

Топливо	β	$RO_{2\max}$
Дрова	0,04	20,2
Торф	0,078	19,55
Кашпирские сланцы	0,16	18
Подмосковный уголь	0,088	19,3
Уральские угли:		
челябинский	0,09	19,1
кизельовский	0,146	18,3
егоршинский антрацит	0,083	19,4
Тквибульский уголь	0,132	18,6
Ткварчельский уголь	0,138	18,6
Донецкие угли:		
длиннопламенные	0,123	18,7
паровичные	0,129	18,6
спекающиеся	0,115	18,8
тощие	0,108	19
антрациты	0,044	20,1
Кузнецкие угли:		
кемеровские К	0,132	18,6
прокопьевские	0,115	18,9
ленинские	0,143	18,3
араличевский	0,095	19,2
Карагандинский ПЖ	0,124	18,7
Мазут марки 20	0,32	15,9

Подставив найденную величину $V_{N_2}^Z$ в формулу (142), получим

$$V_a = \frac{100}{79} \left(V_{c.z} \frac{N_2}{100} - \frac{N_p}{125,1} \right) = \frac{V_{c.z}}{79} \left(N_2 - \frac{N_p}{1,251 V_{c.z}} \right). \quad (145)$$

Подсчитаем входящую в формулу (141) величину ΔV , т. е. объем воздуха, который остался бы лишним, если дожечь содержащуюся в газах окись углерода.

В дымовых газах содержится:

1) неиспользованного кислорода

$$V_{O_2} = V_{c.z} \frac{O_2}{100} \text{ н.м}^3/\text{кг};$$

2) окиси углерода

$$V_{CO} = V_{c.z} \frac{CO}{100} \text{ н.м}^3/\text{кг}. \quad (146)$$

Так как согласно формуле (81) для сгорания 1 н.м³ окиси углерода необходимо 0,5 н.м³ кислорода, то, следовательно, после догорания окиси углерода в дымовых газах останется лишнего кислорода

$$V'_{O_2} = V_{O_2} - 0,5 V_{CO} = \frac{V_{c.z}}{100} (O_2 - 0,5 CO) \text{ н.м}^3/\text{кг}.$$

Тогда

$$\Delta V = \frac{V_{c.z}}{21} (O_2 - 0,5 CO) \text{ н.м}^3/\text{кг}. \quad (147)$$

Подставив величины V_a из (145) и ΔV из (147) в формулу (141), получим

$$\alpha = \frac{1}{1 - \frac{79}{21} \cdot \frac{O_2 - 0,5 CO}{N_2 - \frac{N_p}{1,251 V_{c.z}}}}. \quad (148)$$

После подстановки в формулу (148) объема сухих газов из формулы (106), получим окончательно

$$\alpha = \frac{1}{1 - \frac{79}{21} \cdot \frac{O_2 - 0,5 CO}{N_2 - 0,431 \frac{N_p}{K_p} (RO_2 + CO)}}. \quad (149)$$

Ввиду незначительного содержания азота в твердых и жидких топливах, можно в формуле (149) пренебречь членом $0,431 \frac{N_p}{K_p} (RO_2 + CO)$.

После этого для твердых и жидких топлив

$$\alpha = \frac{1}{1 - \frac{79}{21} \cdot \frac{O_2 - 0,5 CO}{N_2}}. \quad (150)$$

Если в дымовых газах содержатся также метан и водород, то аналогичным способом получаем

$$\alpha = \frac{1}{1 - \frac{79}{21} \cdot \frac{O_2 - 0,5 (CO + H_2) - 2CH_4}{N_2 - 0,431 \frac{N_p}{K_p} (RO_2 + CO + CH_4)}}. \quad (151)$$

Для твердых и жидких топлив формула (151) принимает вид

$$\alpha = \frac{1}{1 - \frac{79}{21} \cdot \frac{O_2 - 0,5 (CO + H_2) - 2CH_4}{N_2}}. \quad (152)$$

При полном сгорании топлива $CO = CH_4 = H_2 = 0$ и формулы (151) и (152) принимают вид

$$\alpha = \frac{1}{1 - \frac{79}{21} \cdot \frac{O_2}{N_2 - 0,431 \frac{N_p}{K_p} RO_2}}. \quad (153)$$

Для твердых и жидких топлив

$$\alpha = \frac{1}{1 - \frac{79}{21} \cdot \frac{O_2}{N_2}}. \quad (154)$$

При полном сгорании топлива

$$N_2 = 100 - (RO_2 + O_2). \quad (155)$$

Величины O_2 и N_2 можно выразить через RO_2 . Действительно,

$$O_2 = 21 - RO_2 (1 + \beta),$$

откуда

$$N_2 = 100 - (21 - \beta \cdot RO_2) = 79 + \beta \cdot RO_2. \quad (156)$$

После подстановки этих величин в формулу (154) получим

$$\alpha = \frac{1}{1 - \frac{79}{21} \cdot \frac{21 - RO_2 (1 + \beta)}{79 + \beta \cdot RO_2}} = \frac{1}{1 - \frac{660 + 21\beta \cdot RO_2}{(100\beta + 79) RO_2}}. \quad (157)$$

откуда

$$RO_2 = \frac{1660}{(100\beta + 79) \alpha - 21\beta}. \quad (158)$$

При подсчетах α и RO_2 часто пользуются более простой приближенной формулой, легко получаемой из формулы (157).

Разделив числитель и знаменатель на $21 RO_2$, получим

$$\alpha = \frac{\frac{79}{RO_2} + \beta}{79 \frac{1 + \beta}{21} + \beta}. \quad (159)$$

Подставив по формуле (140)

$$\frac{1}{RO_{2\max}} = \frac{1 + \beta}{21},$$

получим

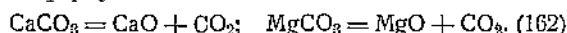
$$\alpha = \frac{\frac{79}{RO_2} + \beta}{\frac{79}{RO_{2\max}} + \beta}. \quad (160)$$

Отбрасывая в числителе и знаменателе незначительную величину β , получаем приближенное выражение для подсчетов α при полном сгорании

$$\alpha \approx \frac{RO_{2\max}}{RO_2}. \quad (161)$$

17. Состав продуктов горения топлив, содержащих карбонаты. Горение газового топлива и смесей топлив

Содержащиеся в золе некоторых топлив карбонаты кальция и магния $CaCO_3$ и $MgCO_3$ под действием высокой температуры частично разлагаются. Разложение идет по формулам:



В связи с этим содержащиеся в топливе карбонаты распадаются в топке на газообразную (CO_2) и твердую части. CO_2 попадает в дымовые газы и увеличивает в них содержание углекислоты.

Следовательно, общую или истинную зольность топлив (в %) можно представить в виде суммы двух слагаемых

$$A_p^u = A_p + CO_2^z \quad (163)$$

В этом случае необходимы поправки, учитывающие появление в продуктах горения дополнительного количества углекислоты.

При полном сгорании топлива будем иметь следующее соотношение между углеродом, кислородом и углекислотой:

$$\begin{aligned} C + O_2 &= CO_2; \\ 12 \text{ кг } C + 32 \text{ кг } O_2 &= 44 \text{ кг } CO_2; \\ 0,273 \text{ кг } C + 0,727 \text{ кг } O_2 &= 1 \text{ кг } CO_2. \end{aligned} \quad (164)$$

Следовательно, в $\frac{CO_2^z}{100}$ кг углекислоты содержится в связанном состоянии:

$$\text{углерода} - 0,273 \cdot \frac{CO_2^z}{100} \text{ кг; кислорода} - 0,727 \cdot \frac{CO_2^z}{100} \text{ кг.}$$

Поэтому можно условно считать, что дополнительное количество углекислоты $\frac{CO_2^z}{100}$ кг выделилось за счет

добавочного содержания в топливе $0,273 \cdot \frac{CO_2^z}{100}$ кг углерода и $0,727 \cdot \frac{CO_2^z}{100}$ кг кислорода. Поэтому при подсчетах V_p , β , $RO_{\text{зmax}}$, CO и т. д. необходимо принимать, что рабочая масса сжигаемого топлива имеет следующий условный элементарный состав

$$\left. \begin{aligned} C_p^y &= C_p + 0,273 CO_2^z \text{ \%}; \\ H_p^y &= H_p \text{ \%}; \\ O_p^y &= O_p + 0,727 CO_2^z \text{ \%}; \\ N_p^y &= N_p \text{ \%}; \\ (S_p^y) &= S_p^z \text{ \%}; \\ A_p^y &= A_p^u - CO_2^z \text{ \%}; \\ W_p^y &= W_p \end{aligned} \right\} \quad (165)$$

Подсчет характеристик процесса горения после этого пересчета ведется по обычным формулам. При подсчете V_0 можно исходить как из действительного, так и условного элементарного состава рабочей массы топлива, а при подсчете Q_p^y — только из действительного элементарного состава рабочей массы топлива.

Из топлива СССР только в золе сланцев содержится значительное количество CO_2^z и лишь для них приходится вводить указанные поправки.

$$\gamma_{c,z} = \frac{1,25 CO^m + 0,09 H_2^m + 0,717 CH_4^m + 1,356 C_2H_6^m + 2,019 C_3H_8^m + 1,26 C_4H_{10}^m + 1,251 N_2^m + 1,429 O_2^m}{100} +$$

$$+ \frac{1,977 CO_2^m + 2,927 SO_2^m}{100}. \quad (171)$$

Горение смесей твердых и жидких топлив. Иногда приходится сжигать в топке одновременно два топлива.

Когда сжигаемые топлива смешивают перед топкой или в самой топке так, что получающаяся смесь имеет однородный и неизменный во времени состав, можно элементарный состав смеси двух топлив подсчитывать по следующему методу.

Примем, что:

1) элементарный состав первого топлива

$$C_p^I; H_p^I; O_p^I; N_p^I; (S_p^a)^I; A_p^I; W_p^I;$$

этого топлива сжигается B^I кг/час;

2) второе топливо имеет элементарный состав

$$C_p^{II}; H_p^{II}; O_p^{II}; N_p^{II}; (S_p^a)^{II}; A_p^{II}; W_p^{II}$$

и его сжигается B^{II} кг/час.

В топке сжигается в час $(B^I + B^{II})$ кг смеси. В 1 кг смеси содержится:

$$\frac{B^I}{B^I + B^{II}} = b^I \text{ кг;} \quad (166)$$

второго топлива

$$\frac{B^{II}}{B^I + B^{II}} = b^{II} \text{ кг.} \quad (167)$$

Условный средний состав смеси подсчитывается по обычным уравнениям смешения.

В соответствии с этим

$$C_p^{cm} = b^I C_p^I + b^{II} C_p^{II} \text{ \%}, \quad (168)$$

Аналогично определяем O_p^{cm} , H_p^{cm} и т. д.

Очевидно, что

$$C_p^{cm} + H_p^{cm} + O_p^{cm} + N_p^{cm} + (S_p^a)^{cm} + A_p^{cm} + W_p^{cm} = 100 \text{ \%}. \quad (169)$$

Теплотворная способность смеси

$$(Q_p^n)^{cm} = b^I (Q_p^n)^I + b^{II} (Q_p^n)^{II} \text{ ккал/кг смеси.} \quad (170)$$

Определив элементарный состав рабочей массы смеси, можно воспользоваться для подсчета V_0 , V_p , β , $RO_{\text{зmax}}$, CO и т. д. выведенными ранее формулами для сжигания твердых и жидких топлив.

Горение газового топлива. Газообразное топливо представляет механическую смесь горючих и негорючих газов, к которым примешано некоторое количество водяного пара. В газах могут находиться во взвешенном состоянии и твердые частицы.

Горючие газы обычно состоят из окиси углерода CO , водорода H_2 и метана CH_4 . В естественных газах и крекинг-газе, кроме того, содержатся следующие углеводороды: этан C_2H_6 , пропан C_3H_8 , этилен C_2H_4 , пропилен C_3H_6 и др.

Негорючие газы обычно состоят из углекислоты CO_2 , азота N_2 , сернистого ангидрида SO_2 и кислорода O_2 ; последнего в большинстве газов содержится очень мало.

Обычно газ содержит кроме того: влаги d_m и твердых частиц золи a_m в г/нм³ сухого газа.

Удельный вес сухого беззольного газа при нормальных условиях подсчитывается по формуле:

Вес 1 нм³ сухих газов вместе с влагой и золой будет равен

$$G = \gamma_{c,z} + \frac{d_m + a_m}{1000} \text{ кг.}$$

$\gamma_{c,z}$ кг сухого газа вместе с $\frac{d_m + a_m}{1000}$ кг влаги и золи

при нормальных условиях займут объем

$$V = 1 + \frac{d_m}{1000 \cdot 0,805} = 1 + \frac{d_m}{805} \text{ нм}^3. \quad (172)$$

Следовательно, удельный вес газообразного рабочего топлива равен

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{\gamma_{c.z} + \frac{d_m + a_m}{1000}}{1 + \frac{d_m}{805}} \text{ кг/нм}^3. \quad (173)$$

Для подсчета V_0 , V_g , β , $RO_{2\max}$, CO и т. д. при сжигании газообразного топлива можно пользоваться формулами, выведенными для твердого и жидкого топлива, при условии, что будет подсчитано процентное содержание по весу в газообразном топливе элементов, входящих в состав его горючей массы, и балласта: углерода, водорода, кислорода, азота, золы и влаги.

Очевидно, что для сухого беззольного газа

$$CO^m + H_2^m + CH_4^m + (C_nH_m)^m + CO_2^m + N_2^m + O_2^m = 100\%. \quad (174)$$

Для подсчета содержания углерода в газообразном топливе в процентах по весу предварительно подсчитывается, какое количество связанного углерода содержится в 1 нм³ сухих газов.

Вес связанного углерода, который содержится в CO , CO_2 и CH_4 , можно подсчитать, исходя из следующих данных:

1 моль CO , CH_4 или CO_2 занимает объем $\sim 22,4$ нм³ и содержит в своем составе углерода 12 кг.

Следовательно, в 1 нм³ CO , CH_4 или CO_2 находится в связанном состоянии $12 : 22,4 = 0,54$ кг углерода.

1 моль углеводорода C_nH_m занимает объем $22,4$ нм³ и содержит $12 \cdot n$ кг связанного углерода.

В 1 нм³ углеводорода содержится $12n : 22,4 = 0,54 \cdot n$ кг углерода. Следовательно, суммарное весовое содержание углерода в 1 нм³ сухих газов будет равно

$$0,54 \frac{CO^m + CH_4^m + CO_2^m + n(C_nH_m)^m}{100}. \quad (175)$$

На каждый 1 нм³ сухого газа приходится газообразного топлива

$$\gamma_{c.z} + \frac{d_m + a_m}{1000} \text{ кг.}$$

Поэтому в 1 кг газообразного топлива содержится связанного углерода

$$\frac{C_p}{100} = \frac{0,54 [CO^m + CH_4^m + CO_2^m + n(C_nH_m)^m]}{100 \left(\gamma_{c.z} + \frac{d_m + a_m}{1000} \right)}. \quad (176)$$

Следовательно, содержание углерода в газообразном топливе в процентах по весу

$$C_p = \frac{0,54 [CO^m + CH_4^m + CO_2^m + n(C_nH_m)^m]}{\gamma_{c.z} + \frac{d_m + a_m}{1000}} \%. \quad (177)$$

Содержание водорода подсчитывается аналогично. Суммарное содержание водорода в 1 нм³ сухих газов равно

$$\frac{0,09 H_2^m + 0,18 CH_4^m + 0,045m(C_nH_m)^m}{100} \text{ кг.}$$

Содержание водорода в газообразном топливе в процентах по весу равно

$$H_p = \frac{0,09 H_2^m + 0,18 CH_4^m + 0,045m(C_nH_m)^m}{\gamma_{c.z} + \frac{d_m + a_m}{1000}} \%. \quad (178)$$

Содержание кислорода в газообразном топливе в процентах по весу равно

$$O_p = \frac{0,715 CO^m + 1,44 CO_2^m + 1,429 O_2^m}{\gamma_{c.z} + \frac{d_m + a_m}{1000}} \%. \quad (179)$$

Содержание азота в газообразном топливе в процентах по весу равно

$$N_p = \frac{1,251 N_2^m}{\gamma_{c.z} + \frac{d_m + a_m}{1000}} \%. \quad (180)$$

Влажность газообразного топлива в процентах по весу равна

$$W_p = \frac{\frac{d_m}{1000}}{\gamma_{c.z} + \frac{d_m + a_m}{1000}} \cdot 100 = \frac{0,1 d_m}{\gamma_{c.z} + \frac{d_m + a_m}{1000}} \%. \quad (181)$$

Зольность газообразного топлива равна

$$A_p = \frac{0,1 a_m}{\gamma_{c.z} + \frac{d_m + a_m}{1000}}. \quad (182)$$

При правильности подсчета элементарного состава газообразного топлива

$$C_p + H_p + O_p + N_p + W_p + A_p = 100\%.$$

Подсчитав элементарный состав газообразного топлива в процентах по весу, можно использовать для подсчета V_0 , V_g , β , $RO_{2\max}$, CO и т. д. те же формулы, что и при сжигании твердых и жидких топлив.

При подсчетах β и α для газообразного топлива нельзя пренебрегать содержанием азота в топливе. Поэтому при подсчете этих величин нужно пользоваться формулами (133) и (149).

Подсчет теплотворной способности газообразного топлива производится следующим образом. Низшая теплотворная способность 1 нм³ сухих газов может быть подсчитана по формуле (70).

Теплотворная способность 1 кг газообразного топлива равна

$$Q_p^u = \frac{(Q_p^u)_{c.z}}{\gamma_{c.z} + \frac{d_m + a_m}{1000}} \text{ ккал/кг.} \quad (183)$$

При сжигании газообразного топлива величины β , α , V_0 , V_g могут быть вычислены при $C_nH_m = 0$ также по следующим формулам:

$$\beta = \frac{0,209 N_2^m + 0,395 CO^m + 1,584 CH_4^m + 0,396 H_2^m - 0,791 O_2^m}{CO_2^m + 0,994 CO^m + 0,995 CH_4^m} - 0,791; \quad (184)$$

$$\gamma_0 = [0,24 (CO^m + H_2^m) + 0,096 CH_4^m - 0,048 \cdot O_2^m] \text{ нм}^3/\text{нм}^3 \text{ сухого газа.} \quad (185)$$

$$V_g = (V_{c.g} + V_{H_2O}) \text{ нм}^3/\text{нм}^3 \text{ сухого газа, (186)}$$

где

$$V_{c.g} = \frac{CO_2^m + CO^m + CH_4^m}{CO_2 + CO} \text{ нм}^3/\text{нм}^3 \text{ сухого газа, (187)}$$

$$V_{H_2O} = \left[0,01 \left(\frac{d_m}{0,805 \cdot 10} + \frac{d_a \cdot a \cdot L}{0,805 \cdot 10} \right) + H_2^m + 2CH_4^m \right] \text{ нм}^3/\text{нм}^3 \text{ сухого газа, (188)}$$

$$\alpha = \frac{1}{1 - \frac{79}{21} \cdot \frac{O_2 - 0,5CO}{100 - N_2 - \frac{N_2^m}{V_{c.g}}}} \quad (189)$$

Эти формулы пригодны для случая неполного сгорания топлива, когда в продуктах сгорания

$$CO \neq 0 \text{ и } CH_4 = H_2 = 0.$$

Отметим, что для определения объема теоретически необходимого количества воздуха и объема продуктов сгорания, полученных при сжигании 1 нм³ газообразного топлива, необходимо величины V_0 и V_g , подсчитанные по формулам (185) и (186), разделить на $\left(1 + \frac{d_m}{80,5}\right)$.

Формулы (185)—(188) не требуют пересчета элементарного состава газообразного топлива, поэтому ими обычно и пользуются при расчетах котлоагрегатов, ра-

ботающих только на газообразном топливе. При одновременном сжигании в топке смеси твердого и газообразного топлива эти формулы не пригодны и для расчета используются формулы, выведенные для твердого и жидкого топлива с соответствующим пересчетом объемного состава газообразного топлива на весовой по указанному выше методу.

Особенности подсчетов в этом случае сводятся к определению элементарного состава смеси. Пусть в топке должно сжигаться:

B кг/час твердого топлива с элементарным составом

$$C_p, H_p, O_p, N_p \text{ и т. д.};$$

V нм³/час газообразного топлива с удельным весом γ кг/нм³ и элементарным составом (по объему) сухого газа CO^m, H^m, CH_4^m и т. д. с влажностью и зольностью d_m и a_m г/нм³ сухого газа.

На 1 кг условной сжигаемой смеси тогда приходится

$$\text{твердого топлива } \frac{B}{B + V \cdot \gamma} = b^I \text{ кг/кг смеси; (190)}$$

$$\text{газообразного топлива } \frac{V \gamma}{B + V \cdot \gamma} = b^{II} \text{ кг/кг смеси. (191)}$$

Подсчитав в процентах по весу в газообразном топливе содержание C, H и т. д. и зная элементарный состав твердого топлива, можно определить элементарный состав смеси по формулам, указанным в разделе о сжигании смеси твердых топлив (168—170).

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ВОДА В КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ

18. Значение воды в теплосиловом хозяйстве.

Естественная вода и ее примеси

Вода в теплосиловом хозяйстве является рабочим телом, теплоносителем и веществом, служащим для охлаждения и конденсации. Питательная вода котлов представляет собой смесь конденсатов турбин, бойлеров, производственных объектов и химически очищенной воды.

На фиг. 20 на примере ТЭЦ промышленного предприятия показаны многообразные применения воды в теплосиловом хозяйстве. Вода может быть причиной следующих нарушений надежной работы агрегатов:

1. В экономайзерах паровых котлов при неправильно подготовленной питательной воде может протекать накипеобразование, а также коррозия металла. Содержащиеся в питательной воде механические примеси могут образовывать скопления ила (шламма) в экономайзерах и по всей питательной системе.

2. При неудовлетворительной подготовке питательной воды или при неправильном режиме котловой воды в паровых котлах может образовываться накипь и шлам или возникать коррозия металла.

3. В пароперегревателях водяной пар может вызывать коррозию металла. Влажный пар, поступающий в пароперегреватели, приводит к отложению солей и перегреву труб.

4. В паропроводах при загрязненном паре также может происходить дальнейшее отложение солей; из-за вспенивания котловой воды и бросков воды через перегреватели возможны гидравлические удары в турбинах.

5. На лопатках турбины при засорении пара солями образуются солевые отложения, нарушающие нормаль-

ную работу машин, уменьшающие их мощность и к. п. д., повышающие осевое давление и т. д.

6. В конденсаторах турбин обычно протекают процессы накипеобразования в трубках со стороны охлаждающей воды. Охлаждающая вода может вызывать обесцинкование латуни. В трубках конденсаторов могут оставаться и развиваться различные организмы, присутствующие в охлаждающей воде. При этом сечение трубок быстро уменьшается, понижается коэффициент теплопередачи, увеличивается сопротивление прохождению воды, падает вакуум и т. д.

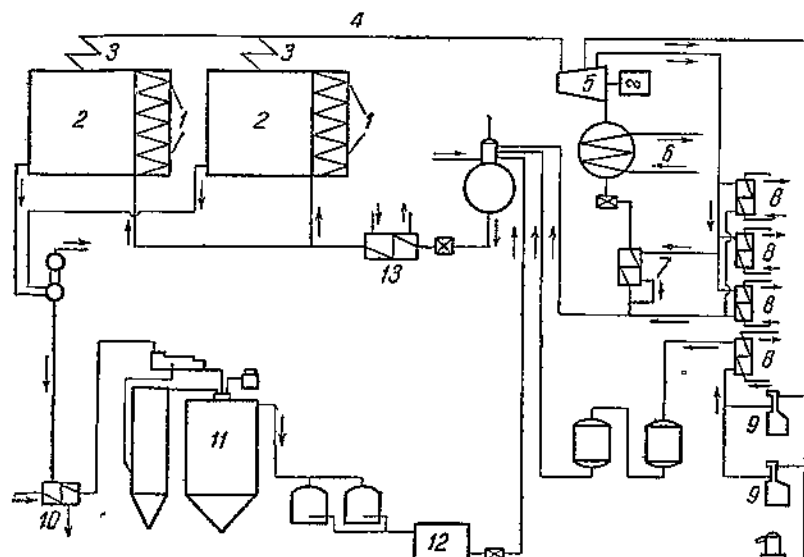
7. В подогревателях конденсата иногда наблюдается коррозия металла, протекающая как со стороны греющего пара, так и со стороны воды.

8. В бойлерах (подогревателях воды для водяного отопления) образуется накипь, если пополнение утечек сетевой воды производится плохо умягченной или вовсе не умягченной водой. Металл бойлеров подвергается также процессу коррозии. В сетях может возникать коррозия, откладываться шлам и продукты коррозии, сужающие пропускное сечение и нарушающие нормальную эксплуатацию теплофикационной сети.

9. В производственных аппаратах и машинах, использующих свежий пар, часто наблюдается отложение солей из пара.

При потреблении отбираемого от турбин пара отложения солей обычно не наблюдается, так как содержащиеся в паре соли остаются на лопатках турбин.

Производственные потребители пара могут быть возвращающими и не возвращающими пар или конденсат его. Первые разделяются на возвращающие чистый пар или конденсат (сушилки, калориферы вентиляционных установок и т. п.) и возвращающие загрязненный пар или конденсат (паровые молоты, прессы, компрессоры, паровые машины).



Фиг. 20. Схема применения воды в теплосиловом хозяйстве.

1 — экономайзер; 2 — котел; 3 — пароперегреватель; 4 — паропровод перегретого пара; 5 — паровая турбина; 6 — конденсатор; 7 — регенеративный подогреватель воды; 8 — потребители пара из второго отбора и из теплообменников, работающих паром первого отбора; 9 — потребители пара первого отбора; 10 — подогреватель воды под давлением из расширителя непрерывной продувки; 11 — известковое молоко; 12 — сборный бак для химически очищенной воды; 13 — подогреватель воды после деаэрации.

10. В подогревателях перед водоочистительной установкой сырая вода может образовывать накипь и вызывать коррозию металла.

11. Водоочистительная аппаратура также нередко страдает от воздействия проходящей через нее воды или ее примесей.

12. Сборные баки подвергаются коррозии, что иногда требует специальных мероприятий для защиты от разрушения.

13. В подогревателях высокого давления коррозия металла наблюдается почти исключительно с паровой стороны. В подогревателях высокого давления и по всем питательным трубопроводам может образовываться шлам.

Нарушения работы и дефекты, которые способна вызывать вода в теплосиловом хозяйстве, сводятся к:

а) накипеобразованию в водяных экономайзерах, кипятильниках и экранных трубках паровых котлов, во всевозможных подогревателях, в бойлерах и конденсаторах турбин;

б) шламобразованию в питательных и теплофикационных магистралях, в котлах, бойлерах, конденсаторах турбин и различных подогревателях, а также насосах;

в) образованию солевых отложений в пароперегревателях, паропроводах, на лопатках турбин и в производственных аппаратах, использующих свежий пар;

г) коррозии металла в котлах, экономайзерах, пароперегревателях, бойлерах, питательных и паровых магистралях, водоподготовительной аппаратуре и конденсаторах.

Ввиду наличия потребителей, не возвращающих или возвращающих грязный пар или конденсат, ввиду необходимости продувок паровых котлов, наконец, вследствие обычных потерь в цикле (2—5%) создаются потери воды в пароводяном балансе, которые покрываются добавкой химически очищенной воды или дистиллата испарителей.

Установка последних необходима в тех случаях, когда исходная вода имеет весьма высокое содержание солей, делающее ее даже после тщательной очистки и умягчения непригодной для питания паровых кот-

лов, а также в тех случаях, когда на станции установлены прямоточные котлы, питательной водой которых могут служить только конденсат и дистиллат.

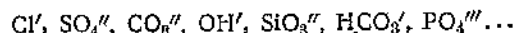
Естественная вода. Исходная (сырая) естественная вода может содержать в качестве примесей истинно растворенные, коллоидно растворенные и механически взвешенные вещества.

Истинно растворенные вещества характеризуются молекулярной, или ионной, степенью раздробления (степенью дисперсии). Коллоидно растворенные характеризуются наличием мицелл, являющихся весьма малыми частичками вещества крупностью от 0,001 до 0,2 μ . Механически взвешенные вещества могут иметь размеры частиц от нескольких превышающих 0,2 μ (истинные суспензии) до крупных частиц, легко заметных невооруженным глазом. Между этими тремя категориями веществ существуют промежуточные ступени. По мере раздробления взвешенных грубо дисперсных частиц осуществляется переход к коллоидальным системам. Некоторые органические вещества, имеющие крупные молекулы, хотя и должны быть отнесены к молекулярно растворенным, но по своим

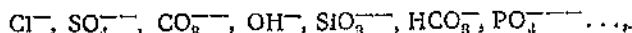
свойствам являются типичными коллоидами.

По мере увеличения степени дисперсии возрастает величина удельной поверхности частиц примесей и повышается значение поверхностных процессов. В то время как поведение грубо дисперсных частиц определяется удельным весом составляющего их вещества, для частиц коллоидных размеров наиболее важны факторы, связанные с состоянием их поверхности. Коллоидные частицы характеризуются наличием электрического заряда, знак и величина которого определяются химической природой частиц и среды, в которой они взвешены. Заряд препятствует соединению коллоидных частиц в более крупные агрегаты.

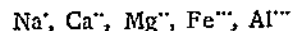
Истинно растворенные вещества могут быть разделены на электролиты и неэлектролиты. Последние в естественных водах представлены растворенными атмосферными газами, т. е. кислородом и азотом, а также различными органическими веществами, молекулы которых не способны распадаться на ионы. Электролиты составляют обычно главную массу всех растворенных в естественных водах веществ. Молекулы электролитов под действием сил, исходящих от молекул воды (растворителя), способны в большей или меньшей степени распадаться на отдельные заряженные частицы-ионы. Ионы бывают двух типов: положительно заряженные и вследствие этого передвигающиеся при электролизе к катоду — катионы и отрицательно заряженные — анионы. Анионы принято обозначать следующим образом:



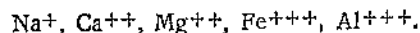
или соответственно



а катионы



или



Количество значков у химического символа показывает валентность иона.

Число анионов, образующихся при диссоциации молекул электролита, не всегда равно числу катионов, но сумма положительных зарядов при этом всегда равна сумме отрицательных, почему раствор электролитов в целом электронейтрален (принцип электронейтральности). Между недиссоциированными молекулами электролитов и их ионами существует динамическое равновесие. Молекулы подвергаются диссоциации на ионы, а ионы образуют вновь молекулы.

Любой положительно заряженный ион может реагировать, образуя молекулу, с любым электроотрицательным ионом (или ионами), и поэтому в растворе, содержащем ряд ионов, присутствуют молекулы, отвечающие всем возможным комбинациям катионов и анионов.

Динамическое равновесие между ионами и молекулами может быть выражено в виде формулы

$$\frac{[A'] [K]}{[AK]} = \text{const.} \quad (192)$$

Здесь $[A']$, $[K]$, $[AK]$ — соответственно концентрации в растворе анионов, катионов и недиссоциированных молекул.

Формула показывает, что при неизменных условиях, главным образом, при постоянной температуре, между ионами и недиссоциированными молекулами электролита сохраняется постоянное отношение. При изменении концентрации хотя бы одного из ионов изменяются и другие входящие в формулу концентрации так, чтобы сохранилось постоянство отношения.

Из формулы (192) вытекает, что при разбавлении раствора (увеличении $[AK]$) степень диссоциации растворенного вещества увеличивается. С возрастанием концентрации наблюдается обратное явление.

Для насыщенных растворов концентрация вещества имеет постоянное значение, определяющееся лишь температурой. Вследствие этого формула (192) для насыщенных растворов принимает более простой вид:

$$[A'] [K] = L_{AK}. \quad (193)$$

Величина L_{AK} носит название произведения растворимости вещества AK . Произведение растворимости меняет свою величину в зависимости от температуры.

Если электролит диссоциирует на n ионов A , m ионов B , p ионов C , q ионов D и т. д., то формулы будут иметь вид

$$\frac{[A]^n \cdot [B]^m \cdot [C]^p \cdot [D]^q \dots}{[A \cdot B \cdot C \cdot D \dots]} = \text{const.}; \quad (194)$$

для насыщенного раствора

$$[A]^n \cdot [B]^m \cdot [C]^p \cdot [D]^q \dots = L_{ABCD}. \quad (195)$$

Обычно техническое применение воды сводится к процессам ее нагревания, испарения или охлаждения и конденсации.

Нагревание осуществляется в экономайзерах котельных, подогревателях паросиловых установок и в тех случаях, когда вода служит охладителем для деталей различных машин или применяется во всевозможных конденсаторах, холодильниках, теплообменниках, фурмах доменных печей, ватер-жакетных печах и т. д., а также когда вода является теплоносителем, например, в системах отопления.

Испарение осуществляется в паровых котлах, испарителях, паропреобразователях и тому подобных аппаратах.

Примеси, содержащиеся в естественных водах, часто нарушают нормальное течение многих процессов или оказывают неблагоприятное влияние на качество продукции, а в некоторых случаях разрушают аппаратуру, в которой осуществляется та или другая операция. Иногда подобные явления происходят даже при весьма малых количествах этих примесей. Так, например, содержание кислорода в $0,05 \text{ мг/л}$ уже отражается на стальных экономайзерах и барабанах паровых котлов; наличие растворенных в воде веществ в количествах, превышающих 5 мг/л , делает воду непригодной для питания прямоточных котлов и т. д. В тех случаях, когда содержание нежелательных примесей в естественной воде переходит допустимые для данного производства пределы, воду подвергают специальной очистке от этих загрязнений.

19. Показатели, применяемые для характеристики воды, и проверка ее анализа

1. Взвешенные вещества сухие представляют собой сумму нелетучих при $105-110^\circ \text{C}$ веществ, находящихся в воде в состоянии грубой дисперсии. Взвешенные вещества состоят из органической (горючей) и минеральной (негорючей) частей. Количество взвешенных веществ выражается в мг/л .

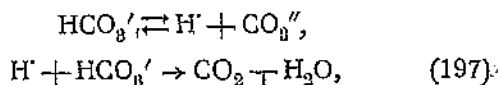
2. Взвешенные вещества прокаленные являются минеральной (негорючей) частью грубо дисперсных примесей воды.

3. Сухой остаток представляет собой общее количество растворенных в воде веществ, остающихся и не улетучивающихся после испарения растворителя (воды) и высушивания остатка при $105-110^\circ \text{C}$. Для определения сухого остатка берется профильтрованная вода, вследствие чего он не включает грубо дисперсных веществ. Растворенные газы, а также легко летучие вещества (например, спирты) не входят в состав сухого остатка. Сухой остаток выражается в мг/л .

4. Минеральный остаток представляет собой сумму всех минеральных веществ, находящихся в профильтрованной воде. В состав минерального остатка не входят растворенные газы. Минеральный остаток (в мг/л) определяется подсчетом и выражается уравнением:

$$\text{Мин. остаток} = \text{Ca}'' + \text{Mg}'' + \text{Na}' + \text{Cl}' + \text{SO}_4'' + \text{SiO}_3'' + \text{CO}_3'' + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3. \quad (196)$$

Количество CO_3'' определяют, исходя из величины бикарбонатной щелочности (см. ниже п. 9). Хотя бикарбонатная щелочность отвечает иону HCO_3' , но поскольку при выпаривании воды этот ион превращается CO_3'' по схеме



то бикарбонатную щелочность пересчитывают на этот последний:

$$\text{CO}_3'' = 10,7 \text{ Н}_{\text{не}} \text{ мг/л.}$$

Когда в воде присутствуют ионы NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^- и другие, их количество также присчитывают к выше написанной (196) сумме. Они, следовательно, входят в величину минерального остатка.

5. Органические вещества принимаются условно как разность между сухим и минеральным остатками:

$$\text{Орг. вещества} = \text{сухой остаток} - (\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++} + \text{Na}^+ + \text{Cl}^- + \text{SO}_4'' + \text{SiO}_3'' + \text{CO}_3'' + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3). \quad (198)$$

Количество „органических“ веществ включает, следовательно, не только действительно органические соединения, находящиеся в воде в растворенном состоянии, но и кристаллизационную и гидратную воду.

6. Окисляемость представляет собой величину, до известной степени характеризующую содержание органических веществ в профильтрованной воде. Окисляемость показывает расход кислорода на окисление органических веществ воды, если это окисление проводится в совершенно определенных условиях¹. Окисляемость выражается в мг кислорода или перманганата (KMnO_4), приходящихся на 1 л воды.

7. Катионами, обычно присутствующими в воде, являются кальций Ca^{++} , магний Mg^{++} , натрий Na^+ и аммоний NH_4^+ . Реже в виде катионов присутствует железо Fe^{++} или Fe^{+++} , алюминий Al^{+++} , марганец Mn^{++} . Водородный ион всегда присутствует за счет диссоциации воды: $\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{OH}^-$ и углекислоты.

Однако в обычных естественных водах концентрация ионов водорода крайне низка, так как в подавляющем большинстве природные воды имеют щелочную реакцию, т. е. избыток гидроксильного иона OH^- . Содержание катионов выражается в мг/л.

8. Анионы. К числу обычно присутствующих в естественных водах анионов следует отнести ионы хлора Cl^- , сульфата SO_4'' , бикарбоната HCO_3' , карбоната CO_3'' , силиката SiO_3'' ; реже встречаются фосфаты PO_4''' , нитраты NO_3^- , нитриты NO_2^- , гидраты OH^- , сульфиты SO_3'' и сульфиды S^{--} . Содержание анионов выражается в мг/л.

9. Жесткостью обозначают величину, характеризующую суммарное содержание в воде ионов кальция и магния, т. е. ионов так называемых щелочно-земельных металлов. Единицей жесткости

¹ Окисляемость воды определяют обработкой определенной ее порции при известных условиях в течение 10 мин. раствором перманганата калия. Это вещество является сильным окислителем.

служит градус. Одним немецким градусом жесткости обладает вода, содержащая в 1 л 10 мг CaO или 7,19 мг MgO .

Раньше различали общую жесткость, отвечающую сумме ионов кальция и магния, пересчитанной на немецкие градусы, и карбонатную жесткость, отвечающую концентрации ионов HCO_3' , также пересчитанной на градусы. Разницу между общей и карбонатной жесткостью называли некарбонатной жесткостью. В настоящем курсе термин „карбонатная жесткость“ не принят, так как он приводит к путанице и усложнениям. Содержание же ионов HCO_3' , выраженное в немецких градусах, называется бикарбонатной щелочностью.

Поскольку жесткость обычно определяется самостоятельно и независимо от определения кальция и магния, можно произвести проверку правильности анализа, пересчитав количество Ca^{++} и Mg^{++} на градусы жесткости и сравнив полученную величину с непосредственно определенной общей жесткостью. Для пересчета миллиграммов Ca^{++} и Mg^{++} в немецкие градусы жесткости служит формула

$$\text{H} = 0,140 \cdot \text{Ca}^{++} + 0,231 \text{ Mg}^{++}$$

В хорошо выполненном анализе жесткость, вычисленная по кальцию и магнию, не должна отличаться от непосредственно определенной больше чем на 1—2%.

Пользуясь законом электронейтральности, можно также проверить правильность анализа воды. Для этого необходимо определить количество положительных и отрицательных зарядов в растворе. Зная валентность каждого иона, нетрудно определить, какое его весовое количество соответствует единице заряда.

Например, атомный вес кальция 40,07, а валентность или значность иона Ca^{++} равна двум. Следовательно, один ион кальция, т. е. 40,07 весовых единиц его,

Таблица 26

Валентность, атомный и эквивалентный веса для ионов, присутствующих в воде

Ионы	Символ	Валентность иона	Атомный вес	Эквивалентный вес
Кальция	Ca^{++}	2	40,07	20,03
Магния	Mg^{++}	2	24,32	12,16
Натрия	Na^+	1	22,997	22,997
Аммония	NH_4^+	1	18,039	18,039
Водорода	H^+	1	1,0078	1,0078
Алюминия	Al^{+++}	3	26,97	8,99
Железа закисного	Fe^{++}	2	55,84	27,92
Железа окисного	Fe^{+++}	3	55,84	18,61
Марганца	Mn^{++}	2	54,93	27,47
Хлора	Cl^-	1	35,457	35,457
Сульфата	SO_4''	2	96,06	48,03
Бикарбоната	HCO_3'	1	61,0078	61,0078
Карбоната	CO_3''	2	60,000	30,000
Силиката	SiO_3''	2	76,06	38,03
Фосфата	PO_4'''	3	95,02	31,67
Нитрата	NO_3^-	1	62,008	62,008
Нитрита	NO_2^-	1	46,008	46,008
Гидрата (гидроксил)	OH^-	1	17,0078	17,0078
Сульфита	SO_3''	2	80,06	40,03
Сульфида	S^{--}	2	32,06	16,03

несет два заряда. Значит, одному заряду соответствует $40,07:2 = 20,035$ весовых единиц кальция. Эта величина называется эквивалентом и сопровождается указанием принятой единицы веса. В табл. 26 приведены значения эквивалентов для ионов, часто присутствующих в воде.

Пользуясь эквивалентным весом, можно легко проверить правильность анализа. Для этого делят числовые значения в миллиграммах, найденные для каждого иона, на эквивалентные веса ионов, получая количество миллиграммэквивалентов каждого иона.

Суммируя между собой количества миллиграммэквивалентов отдельно для катионов и для анионов, сопоставляют полученные суммы. Если анализ выполнен правильно и охватывает все главнейшие из присутствующих в воде ионов, то сопоставляемые величины должны быть равны между собой.

Следует, однако, заметить, что часто проверка по миллиграммэквивалентам не может быть произведена, так как в лабораториях редко выполняют прямое определение натрия, а чаще вычисляют его значение по разности концентраций анионов и катионов.

Если к воде добавить избыток серной кислоты, выпарить жидкость досуха и прокалить, то почти все анионы будут заменены группой SO_4^{2-} . Лишь кремниевая кислота останется частью в виде иона, частью же в виде свободной SiO_2 . Сопоставляя величину определенного таким образом сульфатного остатка с его же величиной, полученной путем вычисления, можно судить о правильности анализа.

Окисляемость находится в известном соотношении с количеством органических веществ воды. Для ряда вод величина этого соотношения может быть определена экспериментально, после чего она применима для проверки правильности анализа. Этот метод проверки дает лишь приближенное суждение о точности данных анализа.

Кроме этих общих способов проверки в каждом отдельном случае могут быть применены различные конкретные методы, обусловленные особенностями исследуемой воды.

20. Процесс накипеобразования и отложения солей в пароперегревателях, паропроводах и на лопатках турбин

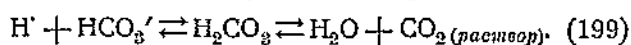
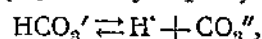
Накипью называют твердые, не смываемые струей воды отложения, состоящие из малорастворимых веществ, образовавшихся на поверхностях нагрева в результате процессов испарения или нагрева воды.

Из катионов в состав накипей входят кальций и магний, соединения которых составляют основу накипи, а также железо, алюминий, реже натрий, марганец и др. Анионами-накипеобразователями являются ионы SO_4^{2-} , SiO_3^{2-} и CO_3^{2-} , вследствие чего накипи классифицируются на сульфатные или гипсовые, силикатные и карбонатные. Из других анионов в состав накипей входят ионы SO_3^{2-} , S^{2-} и OH^- . В накипях почти всегда присутствуют органические вещества, окислы железа, свободная кремниевая кислота, гидратная и кристаллизационная вода.

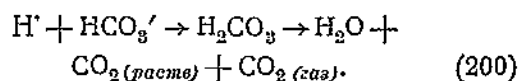
Механизм образования накипи при нагревании воды иной, чем при парообразовании.

Процесс образования накипи при нагревании воды заключается в разложении иона HCO_3' , присутствующего в естественных водах. Ионы HCO_3' в воде находятся в равновесии, с одной стороны,

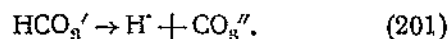
с ионами CO_3^{2-} и ионами H^+ , а с другой стороны, с недиссоциированными молекулами растворенной углекислоты (двуокиси углерода):



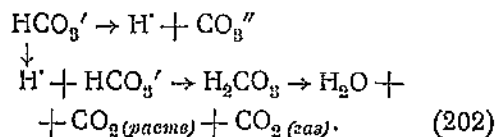
Растворенная же CO_2 находится в равновесии с двуокисью углерода CO_2 , содержащейся в газовом пространстве, окружающем жидкость. Равновесие это подчиняется закону Генри. С понижением парциального давления CO_2 над жидкостью и с повышением температуры, концентрация растворенной в воде двуокиси углерода должна также понижаться. Таким образом при нагревании воды должно происходить нарушение равновесия, вследствие чего должна понизиться концентрация ионов водорода в растворе:



Это понижение концентрации ионов водорода нарушит равновесие между CO_3^{2-} и H^+ :



В итоге будет происходить увеличение концентрации карбонатных ионов:



Карбонатные ионы не могут находиться совместно с ионами кальция в сколько-нибудь значительной концентрации, так как карбонат кальция мало растворим в воде.

Концентрация ионов Ca^{2+} и CO_3^{2-} , в которой они могут одновременно и длительно сосуществовать в водном растворе, определяется выражением

$$[\text{Ca}^{2+}] \cdot [\text{CO}_3^{2-}] = L_{\text{CaCO}_3}. \quad (203)$$

Так как величина произведения растворимости для карбоната кальция L_{CaCO_3} весьма мала, то при значительной концентрации ионов кальция концентрация карбонатных ионов должна быть низка.

Как следует из вышесказанного, если термическое разложение иона HCO_3' происходит в воде, имеющей значительную концентрацию ионов кальция, то в месте протекания процесса, изображенного уравнением (202), должен образовываться осадок карбоната кальция. Поскольку процесс образования иона CO_3^{2-} протекает только в месте нагрева жидкости, образовавшийся карбонат кальция выделяется преимущественно в форме накипи.

Процесс отложения накипи при парообразовании заключается в повышении концентрации ионов, присутствующих в котловой воде, причем произведение концентраций соответствующих ионов

постепенно достигает величины произведения растворимости:

$$\left. \begin{aligned} [\text{Ca}^{++}] \cdot [\text{SO}_4^{--}] &= L_{\text{CaSO}_4}; \\ [\text{Ca}^{++}] \cdot [\text{SiO}_3^{--}] &= L_{\text{CaSiO}_3}; \\ [\text{Mg}^{++}] \cdot [\text{SiO}_3^{--}] &= L_{\text{MgSiO}_3}; \\ [\text{Ca}^{++}] \cdot [\text{CO}_3^{--}] &= L_{\text{CaCO}_3} \end{aligned} \right\} \quad (204)$$

При этом соответствующие соединения, т. е. сульфат кальция, силикат кальция, силикат магния, карбонат кальция и др., начинают кристаллизоваться из раствора, выделяясь в виде твердой фазы. В условиях работы барабанных котлов соединения натрия не способны выделяться в твердом виде, что обуславливается их большой растворимостью. Для солей натрия в барабанных котлах практически никогда не достигается предел их растворимости. Однако не всякое соединение, выделяющееся в виде твердой фазы, непременно даст накипь. Некоторые из них обладают этой способностью (гипс, силикаты кальция и магния), другие же кристаллизуются в виде не связанных друг с другом частиц, образующих взвесь в котловой воде или скапливающихся в наиболее спокойных точках аппарата, образуя шлам (карбонат кальция, фосфаты кальция и магния).

Итак, причинами образования накипи могут являться: а) процессы разложения ионов HCO_3^- при одновременном присутствии ионов Ca^{++} и Mg^{++} или б) процессы постепенного возрастания концентраций различных присутствующих в воде ионов за счет паробразования. При этом достижение произведения растворимости для гипса, а также силикатов кальция или магния, вызывает накипобразование.

Предотвращение образования накипи. Предотвращения накипобразования вследствие термического разложения ионов HCO_3^- можно достигнуть или удалением этого иона или удалением ионов Ca^{++} и Mg^{++} , т. е. умягчением воды. Замена катионов Ca^{++} и Mg^{++} на катион натрия, совершающаяся при умягчении, обеспечивает в умягченной воде присутствие только натриевых солей, не способных в силу большой растворимости к образованию накипи.

Как показывают подсчеты и опыт эксплуатации, предотвращение накипобразования от возрастания концентрации ионов может быть достигнуто только созданием таких условий, при которых вместо накипи образуется шлам. На этом основано фосфатирование, являющееся в настоящее время самым эффективным способом предотвращения накипобразования в паровых котлах.

В питательную воду паровых котлов вводят фосфат натрия в таком количестве, чтобы после связывания ионов кальция и магния, находящихся в питательной воде, в фосфаты кальция и магния оставался известный избыток свободных ионов PO_4^{--} . Этот избыток настолько понижает концен-

трацию остающихся в растворе ионов кальция и магния, что даже при весьма высоких концентрациях соответствующих анионов, например, SO_4^{--} или SiO_3^{--} , не достигается величина произведения растворимости для соответствующих накипеобразующих соединений. Концентрация остающихся в растворе ионов кальция и магния определяется из соотношений:

$$\begin{aligned} [\text{Ca}^{++}]^3 \cdot [\text{PO}_4^{--}]^2 &= L_{\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2}, \\ [\text{Mg}^{++}]^3 \cdot [\text{PO}_4^{--}]^2 &= L_{\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2}, \end{aligned}$$

откуда

$$\left. \begin{aligned} [\text{Ca}^{++}] &= \sqrt[3]{\frac{L_{\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2}}{[\text{PO}_4^{--}]^2}}, \\ [\text{Mg}^{++}] &= \sqrt[3]{\frac{L_{\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2}}{[\text{PO}_4^{--}]^2}} \end{aligned} \right\} \quad (205)$$

При достаточно значительной величине $[\text{PO}_4^{--}]$ концентрации ионов кальция и магния будут ниже, чем требуется для достижения произведения растворимости накипеобразующих соединений:

$$\left. \begin{aligned} [\text{Ca}^{++}] &< \frac{L_{\text{CaSO}_4}}{[\text{SO}_4^{--}]}, \\ [\text{Ca}^{++}] &< \frac{L_{\text{CaSiO}_3}}{[\text{SiO}_3^{--}]} \end{aligned} \right\} \quad (206)$$

Для этого, очевидно, необходимо, чтобы

$$\left. \begin{aligned} \sqrt[3]{\frac{L_{\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2}}{[\text{PO}_4^{--}]^2}} &< \frac{L_{\text{CaSO}_4}}{[\text{SO}_4^{--}]}, \\ \sqrt[3]{\frac{L_{\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2}}{[\text{PO}_4^{--}]^2}} &< \frac{L_{\text{CaSiO}_3}}{[\text{SiO}_3^{--}]} \end{aligned} \right\} \quad (207)$$

Определяя из этих неравенств значение $[\text{PO}_4^{--}]$, можно получить

$$\left. \begin{aligned} [\text{PO}_4^{--}] &> \sqrt[3]{[\text{SO}_4^{--}]^3 \frac{L_{\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2}}{L_{\text{CaSO}_4}^3}}, \\ [\text{PO}_4^{--}] &> \sqrt[3]{[\text{SiO}_3^{--}]^3 \frac{L_{\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2}}{L_{\text{CaSiO}_3}^3}} \end{aligned} \right\} \quad (208)$$

Смысл фосфатирования заключается, таким образом, в переводе накипеобразователей в форму шлама. Количество шлама определяется концентрацией катионов кальция и магния в питательной воде. Так как накопление шлама нежелательно, да и расход фосфата натрия, являющегося ценным реактивом, необходимо свести к минимуму, то к фосфатированию прибегают, когда жесткость воды не превышает 0,5°. Поэтому требуется предварительное понижение концентрации катионов кальция и магния, что достигается умягчением воды.

Процесс отложения солей. При образовании пара может происходить его загрязнение брызгами (капельками) испаряющейся воды. Такой процесс обуславливается следующими причинами:

а) испаряющаяся котловая вода может образовывать пену, хлопья которой будут захватываться и уноситься паровым потоком;

б) процесс парообразования может быть не равномерным, а толчкообразным с резкими вскипаниями воды;

в) процесс кипения сопровождается образованием мельчайших капелек влаги в паровом пространстве; количество этого тумана может усиливаться при повышении нагрузки генератора пара.

Из всех отмеченных причин лишь первая полностью обуславливается качеством питательной и котловой воды.

Толчкообразный процесс парообразования чаще всего является следствием неравномерной нагрузки котла. Так, при работе котельной на паровые молоты, на варочные котлы в целлюлозных фабриках и на другие подобные потребители, характеризующиеся резкими изменениями в парозаборе, в котлах наблюдается «бросание» воды. В момент резкого увеличения расхода пара давление в котле падает, что вызывает мгновенное вскипание воды, причем паровые пузыри образуются во всей толще котловой воды, сильно увеличивая ее объем и вызывая, таким образом, вынос воды вместе с паром.

Образование мельчайших капелек котловой воды, своеобразного «тумана» в паровом пространстве, зависит, главным образом, от конструктивных особенностей котлоагрегата и от его нагрузки. С повышением давления эта «естественная влажность» пара при прочих неизменных условиях должна возрастать.

Таким образом количество влаги, уносимой с паром, определяется в основном конструктивными и эксплуатационными причинами и лишь в малой степени зависит от качества питательной воды. Количество же уносимых с паром солей определяется их концентрацией в котловой воде и влажностью пара $1-x$.

Концентрацию солей в паре C_n мг/л иногда выражают через концентрацию солей в котловой воде C_k мг/л при помощи равенства

$$C_n = C_k(1-x), \quad (209)$$

откуда

$$C_k = \frac{C_n}{1-x}. \quad (210)$$

Соотношение (210) дает предельную норму концентрации солей в котловой воде C_k , определяемую по допустимой степени загрязнения пара C_n и его влажности $1-x$, получаемой в результате влияния всех конструктивных и эксплуатационных условий. В эксплуатации, однако, такая связь между влажностью и солесодержанием пара не всегда наблюдается, так как метод определения влажности и солесодержания пара неточны.

На чистоту пара, следовательно, влияют конструктивные особенности котла, условия его

эксплуатации и качество питательной и котловой воды.

Брызги котловой воды, увлеченные паровым потоком в пароперегреватель, испаряются, а растворенные в воде вещества выделяются в твердом виде. В зависимости от химической природы вещества оно будет в большей или меньшей степени задерживаться в пароперегревателе, паропроводах и на лопатках турбин. Вещества, попадающие в пар, можно разделить на следующие группы:

а) газообразные: кислород, углекислота, аммиак, присутствующие в свободном растворенном или связанном виде в питательной воде; водород, развивающийся в результате процессов коррозии металла; сероводород и сернистый газ, выделяющийся в известных условиях при восстановительных процессах как в паровом котле, так и в пароперегревателе;

б) твердые плавящиеся: едкий натр, а при высоких давлениях и сода;

в) твердые неплавящиеся (при температуре перегрева пара): хлористый, сернокислый и фосфорнокислый натр, а также различные соединения кальция и магния.

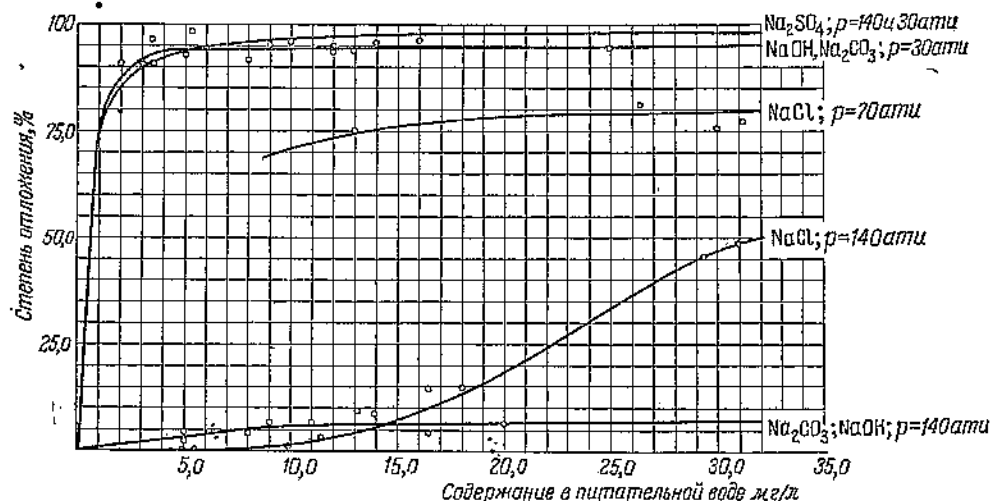
В пароперегревателе, очевидно, не могут задерживаться газообразные и плавящиеся вещества. Поэтому, например, едкий натр и сода при высоких перегревах не откладываются в пароперегревателях, а проходят в турбины.

Некоторые соли обладают способностью частично задерживаться в пароперегревателе; относительная величина их отложения определяется начальной степенью загрязнения пара перед пароперегревателем, скоростью парового потока, вязкостью пара, конструктивными особенностями пароперегревателя и т. п.

Поведение различных веществ в пароперегревателе иллюстрируется диаграммами Ф. Г. Прохорова (фиг. 21), в которых дана степень отложения вещества в перегревателе в зависимости от его содержания в насыщенном паре.

Наибольшей склонностью к отложению в пароперегревателе обладает сернокислый натрий Na_2SO_4 .

Процесс отложения веществ на лопатках турбин еще не вполне изучен, однако многочисленные наблюдения показывают, что обычно образование отложений наблюдается на лопатках тех дисков, где пар приближается к насыщению. Отложения в пароперегревателях отличаются по составу от тех, которые образуются на лопатках турбин. В то время как в первых преобладают сульфаты, а при низком давлении и перегреве также едкий натр и сода (фиг. 21), на лопатках турбин откладываются, главным образом, хлориды, а при повышенном давлении и перегреве — едкий натр. Картина, естественно, нарушается в том случае, когда перед турбиной пар подвергается регулированию перегрева путем впрыскивания в него питательной воды, при этом вещества, растворенные в воде, беспрепятственно достигают турбины, на лопатках которой и отлагаются. При низком содержании солей в паре большая часть солей не отлагается ни в перегревателе, ни в турбине, а остается в конденсате пара.

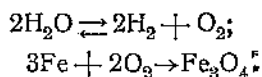


Фиг. 21. Степень отложения различных солей в пароперегревателе.

21. Процесс коррозии металла

В настоящем параграфе рассматриваются процессы коррозии металла, протекающие под действием воды и растворенных в ней веществ, а также водяного пара. Коррозионные процессы со стороны топочных газов, например, коррозия экономайзеров, воздухоподогревателей и тому подобного оборудования, рассматриваются далее.

Процессы коррозии металла, протекающие в различных частях теплосиловой установки под действием водяного пара, воды и содержащихся в ней веществ, можно разделить на два типа. Коррозионные процессы первого типа заключаются в непосредственном соединении металла с коррозионным агентом. Этим последним может являться перегретый водяной пар, диссоциирующий на водород и кислород, или свободный кислород. Реакции изображаются уравнениями:



Другой тип коррозии сопровождается протеканием электрохимических процессов, в основе которых лежит свойство металла отдавать в окружающий раствор свои ионы.

Коррозия чисто химического типа является причиной разрушения перегретым паром трубок пароперегревателей, вызывает действие этого же перегретого пара на диски и лопатки турбин и т. д.

Если продукты коррозии создают на поверхности металла плотный слой, затрудняющий диффузию коррозионного агента к металлу, то скорость коррозионных процессов, значительная вначале, быстро падает по мере возрастания толщины слоя продуктов коррозии. Если же образующиеся в результате процесса коррозии вещества не защищают металл от доступа коррозионного агента, то скорость разрушения будет оставаться значительной.

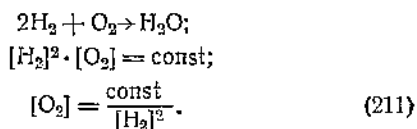
Свойства продуктов коррозии определяются свойствами корродирующего металла и коррозионного агента.

Для системы железо — кислород, или, что по существу тоже, для системы железо — перегретый водяной пар продуктом коррозии является закись-окись железа Fe_3O_4 . Это вещество, неплавкое и нелетучее в условиях работы пароперегревателей, в большинстве случаев покрывает внутреннюю поверхность тру-

бок достаточно плотным слоем, хорошо предохраняющим металл от дальнейшего развития коррозии. Однако наблюдаются случаи, когда окалина неплотно пристает к внутренней поверхности металла трубок, отслаивается или отскакивает довольно крупными чешуйками. При этом коррозия протекает с большой скоростью и пароперегреватель быстро выходит из строя.

Для рассматриваемого процесса коррозии имеют значение температурные условия работы металла, а также, что, повидимому, важнее, амплитуда колебания температуры металла.

На основании закона действия масс следует полагать, что процесс коррозии металла перегретым паром мог бы быть сильно заторможен введением водорода, так как при этом концентрация активного кислорода должна резко понизиться:



Однако такой способ борьбы с коррозионной пароперегревателей не проверялся на практике.

Электрохимическая коррозия вызывается тем, что металлы обладают свойством посылать свои ионы в окружающий их раствор электролитов.

Строение металлов по современным воззрениям представляется таким образом:

Атомы металла, потерявшие свои валентные электроны и называемые ион-атомами, составляют кристаллическую решетку. Электроны, покинувшие атомы при образовании ион-атомов, образуют своего рода атмосферу, окутывающую или, вернее, пронизывающую кристаллическую решетку. Таким образом изолированно взятый кристалл металла является электронейтральным.

Однако при погружении, например, в воду, металл начинает посылать в нее свои ионы. Этот процесс, видимо, объясняется взаимодействием ион-атомов металла и молекул воды. В результате металл при погружении в воду приобретает отрицательный заряд, а жидкость обогатится ионами металла. Последние под дей-

ствием сил электростатического притяжения будут удержаны возле поверхности металла, образуя около нее двойной электрический слой Гельмгольца.

Стремление ион-атомов металла переходить в ионную форму встречает обратное стремление ионов переходить из раствора на металл в форму ион-атомов. Интенсивность последнего процесса определяется концентрацией ионов металла в окружающей его среде, а также внешними условиями, главным образом, температурой. В зависимости от этого может преобладать процесс перехода ион-атомов металла в ионную форму, причем металл будет заряжаться отрицательно, а прилегающий слой раствора положительно, или обратный процесс перехода ионов металла из раствора в форму ион-атомов, причем металл будет заряжаться положительно, а раствор отрицательно.

Выбрав определенные условия, а также эталон для сравнения величины потенциала металл-раствор, можно распределить все металлы в электрохимический ряд напряжений. При этом концентрации ионов металла в растворе принимается нормальной, температура равной 18° С, а эталоном служит так называемый водородный элемент.

В указанных нормальных условиях некоторые металлы приобретают отрицательный заряд, т. е. стремятся увеличить количество своих ионов в растворе; такие металлы называются электроотрицательными или „неблагородными“. К ним относятся, в частности, и железо.

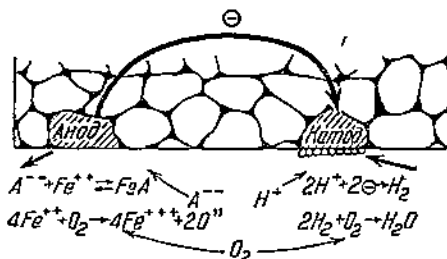
Другие металлы, названные электроположительными или „благородными“, получают при этих условиях положительный заряд, т. е. не только не обнаруживают стремления переходить в раствор, а напротив, ионы этих металлов из раствора переходят на металл.

Чем электроотрицательнее металл, тем больше подвержен он коррозионным процессам.

Однако величина потенциала металл-раствор еще не определяет интенсивности коррозионных процессов в каждом отдельном случае. Протекание коррозии сопровождается процессами поляризации, которые могут затормозить или даже вовсе прекратить разрушение металла. Вследствие этого особое значение получают различные вещества, способные быть деполяризаторами электрохимических процессов, лежащих в основе коррозии.

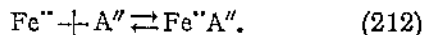
На фиг. 22 схематически изображены анодные и катодные участки металла. Металл состоит из отдельных кристаллов, имеющих различный электрохимический характер. Вследствие этого между отдельными кристаллами, как это и изображено на схеме, возникает разность потенциалов, причем тот участок, который приобретает отрицательный заряд за счет перехода его ион-атомов в раствор, получает название анодного участка или анода. Катодным участком или катодом называют тот, который приобретает положительный заряд.

Возникшая разность потенциалов вызывает появление электрического тока между катодным и анодным участками металла, при этом поток электронов течет по металлу от анода к катоду. Анод, лишаясь электронов, будет энергичнее посылать свои ион-атомы в раствор. В последнем анионы будут направляться к аноду, поскольку возле него образуется большое количество катионов металла, а катионы будут направляться к катоду, поскольку на нем скапливаются электроны.

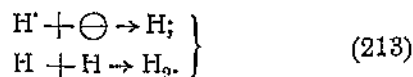


Фиг. 22. Схема процесса коррозии железа в воде.

Процессы возле анода будут заключаться в реакциях между ионами металла и анионами A'' , находящимися в растворе

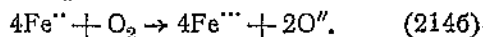
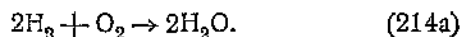


Процессы на катоде будут заключаться в переходе катионов в атомы. В обычной воде такими катионами могут быть только ионы водорода:



Следовательно, на катоде будет происходить процесс образования свободного водорода. Слой водорода будет затруднять дальнейшее протекание коррозии, являясь поляризатором описанного электрохимического элемента. Поляризующее влияние будут оказывать также и ионы железа, концентрирующиеся возле анода, поскольку они будут уменьшать его электроотрицательные свойства.

Здесь выступает деполяризующее действие кислорода, без которого протекание коррозии резко замедлилось бы. Кислород вступает во взаимодействие со свободным водородом, устраняя его с катодной поверхности. Он же переводит закисное двухвалентное железо в трехвалентное, дающее весьма мало растворимый гидрат:



Таким образом кислород, будучи деполяризатором, является интенсивным коррозионным агентом.

Однако этим не ограничивается роль растворенного в воде кислорода в процессах коррозии. Как показал Эванс, кислород способен вызывать появление сильных концентрационных элементов в том случае, если его концентрация около различных участков металла неодинакова. Тот участок металла, который соприкасается с раствором кислорода меньшей концентрации, становится анодом, т. е. начинает разрушаться.

По мере разрушения продукты коррозии, откладывающиеся возле места ее протекания, создают еще большую разность концентраций кислорода, приводящую к еще более интенсивному разеданию металла. Этот механизм кислородной коррозии объясняет локальность ее проявления.

Наряду с кислородом существенным фактором коррозии является концентрация водородных ионов. Как было указано выше, водородные ионы принимают на себя электроны, скапливающиеся на катоде. Очевидно, что чем выше концентрация водородных ионов, тем интенсивнее должен быть процесс снятия электронов, а следовательно, и процесс коррозии.

Так как присутствие свободной углекислоты резко повышает концентрацию ионов водорода, то CO_2 следует рассматривать также как фактор коррозии.

Предотвращение коррозии. В целях понижения концентрации водородных ионов поддерживают в воде известную щелочность, т. е. избыток гидроксильных ионов. Влияние последних на концентрацию водородных ионов очевидно из следующих выражений:

$$\left. \begin{aligned} \text{H}^+ + \text{OH}^- &\rightleftharpoons \text{H}_2\text{O}; \\ [\text{H}^+] \cdot [\text{OH}^-] &= K_w; \\ [\text{H}^+] &= \frac{K_w}{[\text{OH}^-]}. \end{aligned} \right\} \quad (215)$$

Величина K_w , неправильно называемая константой диссоциации воды, в сущности вполне аналогична величине L для данной пары ионов.

Как видно, концентрация водородных ионов находится в обратной зависимости с концентрацией гидроксильных ионов.

Для выражения концентрации водородных и гидроксильных ионов пользуются обычно величинами pH и pOH . Значение этих величин понятно из следующих формул:

$$\left. \begin{aligned} \text{pH} &= -\lg [\text{H}^+]; \\ \text{pOH} &= -\lg [\text{OH}^-]; \\ [\text{H}^+] \cdot [\text{OH}^-] &= K_w; \\ \text{pH} + \text{pOH} &= \text{p}K_w; \\ [\text{H}^+] &= 10^{-\text{pH}}; \\ [\text{OH}^-] &= 10^{-\text{pOH}}. \end{aligned} \right\} \quad (216)$$

Увеличение концентрации водородных ионов сопровождается уменьшением величины pH и наоборот.

При температуре $18-20^\circ\text{C}$ значение $K_w = 10^{-14}$, следовательно, $\text{p}K_w = 14$. Нейтральный раствор в этих условиях характеризуется значением $\text{pH} = \text{pOH} = 7$. Растворы, для которых $\text{pH} > 7$, являются щелочными, а для которых $\text{pH} < 7$ — кислыми.

Согласно Спеллеру для предохранения железа от коррозии необходимо кроме удаления кислорода из воды поддерживать в ней pH не ниже 9—10.

Кроме кислорода, растворенного в воде, и концентрации водородных ионов существует еще ряд других факторов, оказывающих существенное влияние на протекание коррозионных процессов. К наиболее важным из них следует отнести напряженность и знак тепло-

вого потока, а также величину амплитуды колебаний интенсивности теплового потока.

Влияние этих причин до настоящего времени совершенно не изучено. Можно лишь на основании некоторых практических примеров утверждать, что, например, переменное тепловое поле является весьма мощным коррозионным фактором, способным вызвать быстрое разрушение металла и при отсутствии других коррозионных агентов.

22. Требования к водоподготовке и водный режим паровых котлов

Рациональная водоподготовка и водный режим должны обеспечивать надежную, безаварийную и наиболее экономичную работу всей котельной установки.

Аварии, вызываемые неправильной подготовкой воды, заключаются в прогаре кипяtilных и экранных труб вследствие накипеобразования, в разрушении металла коррозионными агентами, присутствующими в воде или паре, или, наконец, в засорении пароперегревателей, паропроводов и лопаток турбин солевыми отложениями (последнее, однако, может еще происходить из-за дефектов конструкции котла или неправильного режима его тепловой работы).

Проблема борьбы с накипеобразованием для барабанных котлов разрешается предварительным глубоким умягчением питательной воды и фосфатированием котловой воды¹, а для прямоточных котлов — питанием их водой с общим солесодержанием не выше 3—5 мг/л.

Для предотвращения коррозии металла необходимо удалить из воды такие коррозионные агенты, как растворенный кислород и углекислоту, а также создать в котловой воде известную щелочность. Последнее не осуществимо в прямоточных котлах вследствие отсутствия в них котловой воды. Поэтому проблему борьбы с коррозией металла для безбарабанных котлов нельзя еще считать полностью разрешенной.

Для получения чистого насыщенного пара в питательной и котловой воде не должно быть вспенивающих агентов. Качество котловой воды (солевой состав, щелочность и т. д.) должно поддерживаться на определенном уровне, установленном в зависимости от конструкции котла, режима его эксплуатации, давления пара и других факторов.

Проблема получения чистого насыщенного пара имеет большое значение, но в этом вопросе нет еще полной ясности, так как еще недостаточно исследованы основные причины загрязнения пара.

Насыщенный пар загрязняется веществами, присутствующими в котловой воде; причины этого загрязнения могут быть двоякими. При парообра-

¹ В мелких и транспортных установках применяется также внутрикотловая обработка воды, т. е. добавка в котел антинакипинов, превращающих накипь в шламы.

зовании в котле должны возникать брызги, которые в случае неудовлетворительной конструкции сепарирующих и паросушительных устройств могут захватываться и уноситься паровым потоком.

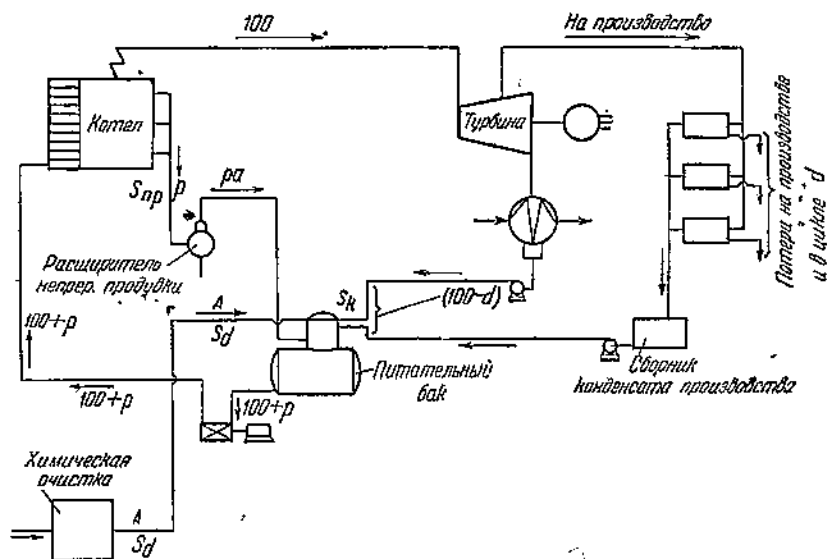
Следовательно, чем выше влажность пара, получаемого от данного котла, тем меньшую концентрацию растворенных веществ следует поддерживать в его котловой воде. Например, котлы второй очереди ГЭС им. Кагановича дают столь сильный унос, что в котловой воде приходится поддерживать общую концентрацию растворенных веществ не выше 150—200 мг/л, некоторые же котлы СевдонГРЭС работают, давая удовлетворительный пар при содержании котловой воды, доходящем до 5000 мг/л.

В питательной воде могут содержаться специфические вещества, вызывающие вспенивание воды в котле. Такими вспенивателями являются некоторые органические вещества, коллоиды, мыла, масла и т. п. Косвенно вспенивающее влияние оказывает и щелочность котловой воды, поскольку она стабилизирует коллоиды и омыляет органические вещества, создавая тем самым в котловой воде активные пенообразователи.

Для получения чистого насыщенного пара питательная вода должна быть максимально освобождена от вспенивателей, а в котловой воде общая концентрация солей и, в частности, щелочи должна поддерживаться не выше определенного уровня, называемого нормой котловой воды. Поддержание норм котловой воды достигается при помощи продувок парового котла, т. е. удаления из котла некоторой части котловой воды с растворенными в ней солями в более высокой концентрации, чем в питательной воде. При этом в котловой воде создается состояние солевого равновесия: количество солей, вносимых питательной водой, равно количеству солей, выносимых продувкой и паром.

Размер продувки зависит от качества питательной воды и от норм котловой воды. Поскольку чрезмерное увеличение размера продувки сопряжено с тепловыми потерями и с ухудшением пароводяного баланса, приходится в случае особо жестких норм котловой воды идти на наиболее тщательную очистку питательной воды, а иногда и на питание котлов дистиллятом. Таким образом выбор схемы водоподготовки в известной степени определяется размером продувки.

При повышенном содержании солей в питательной воде продувка котла обычно ведется непрерывно.



Фиг. 23. Схема непрерывной продувки.

Вследствие важного значения величины непрерывной продувки ниже дается вывод формулы, по которой она может быть рассчитана. Примем следующие обозначения (фиг. 23):

- p — размер непрерывной продувки в процентах от производительности котельной;
- d — потери конденсата и пара (на производстве, в цикле, на парение во фланцах, в дренажах и т. п.) в процентах от паропроизводительности котельной;
- a — количество пара, возвращаемого в системы питания от расширителя (сепаратора) непрерывной продувки в долях от p ;
- S_{np} — качество котловой (точнее продувочной) воды (норма) по какому-нибудь показателю (общий солевой состав, щелочность);
- S_d — качество химически очищенной воды;
- S_n — качество насыщенного пара котлов;
- S_k — качество конденсата турбин и производства;
- S_p — качество пара из расширителя продувки.

Приняв за 100 паропроизводительность котла, количество питательной воды определим равным $100 + p$. Количество возвращаемого конденсата составит $100 - d$. Количество пара в процентах, возвращаемого от расширителя непрерывной продувки, будет равно $p \cdot a$. Все это легко видеть из схемы (фиг. 23). Материальный баланс питательного бака

$$(100 - d) + a \cdot p + A = 100 + p; \\ A = p + d - ap = p(1 - a) + d. \quad (217)$$

С питательной водой приходят примешанные к ней вещества:

$$A \cdot S_d + (100 - d) S_k + ap \cdot S_p$$

С паром и продувочной водой уходит

$$100 \cdot S_n + p \cdot S_{np}$$

Приравняв эти величины, получаем баланс вещества для котлов, из которого определяется величина p :

$$p = \frac{d \cdot S_d + (100 - d) \cdot S_k - 100 S_n}{S_{np} - [(1 - a) \cdot S_d + a \cdot S_p]}. \quad (218)$$

Полученное выражение можно упростить. Действительно, величины $(100 - d) \cdot S_k$ и $100 S_n$ чрезвычайно близки друг к другу, а величина $a \cdot S_p$ обычно

незначительна по сравнению с $S_{np} - (1 - a) S_d$. Тогда размер продувки выразится формулой

$$p = \frac{d \cdot S_d}{S_{np} - (1 - a) S_d} \quad (219)$$

Для определения величины a может служить уравнение теплового баланса сепаратора непрерывной продувки:

$$i_k = a i_c + (1 - a) q_c$$

откуда

$$a = \frac{i_k - q_c}{i_c - q_c}$$

Здесь i_k — теплосодержание котловой воды;

q_c — теплосодержание покидающей сепаратор воды;

i_c — теплосодержание покидающего сепаратор пара.

В табл. 27 даны величины a в зависимости от давления в паровом котле и давления в сепараторе.

Размер продувки определяется величиной потерь пара и конденсата, нормами котловой воды и качеством очищенной воды. Из этого вытекает, что если ограничить по соображениям экономичности размер продувки определенным пределом $[(3 \div 5) \text{‰}]$ и во всяком случае $< 10 \text{‰}]$, то способ очистки воды, а следовательно, и выбор схемы водообработки, определяется нормами качества котловой воды, величиной потерь пара и конденсата и качеством исходной сырой воды. За норму котловой воды для данного котла принимается то качество воды, которое позволяет получать от котла насыщенный пар с общим содержанием веществ не выше $3 - 5 \text{ мг/кг}$. Нормы котловой воды определяются в основном режимом эксплуатации, конструкцией котла и давлением пара. Влияние всех этих факторов на унос, а следовательно, и на нормы котловой воды, до сих пор детально не изучено, поэтому принятые в настоящее время и положенные в основу расчетов нормы котловой воды являются временными.

За последние годы уровень эксплуатации значительно повысился, но конструкции котлоагрегатов с точки зрения возможности получения чистого насыщенного пара еще недостаточно удовлетворительны.

Новый метод организации солевых концентраций в котловой воде (см. том II) позволяет значительно повысить плотный остаток в продувке котла.

Когда конструкции котлов лучше обеспечивают получение чистого насыщенного пара, в воде возможно поддерживать несравненно более высокие концентрации растворенных веществ.

Принятые в настоящее время нормы для барабанных котлов, не снабженных устройствами для организации солевых концентраций в котловой воде, даны в табл. 28.

Таблица 27

Относительное количество пара, возвращаемого в систему питания от расширителя непрерывной продувки, в процентах $(100 - a)$

Давление в котле в <i>атм</i>	Давление в сепараторе продувки в <i>атм</i>						
	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	5,0	7,0
10	18,6	15,6	13,8	12,0	9,7	6,4	3,8
16	22,2	19,3	17,6	15,9	13,6	10,3	7,9
33	28,9	26,0	24,5	22,8	20,7	17,5	15,2
60	35,1	32,5	31,0	29,4	27,3	24,4	22,3
120	41,2	41,4	40,1	38,6	36,7	34,0	32,1

Исходные положения для выбора схемы водоподготовки. Рациональная схема водоподготовки должна наиболее экономичным способом обеспечивать отсутствие накипобразования и коррозии металла и давать возможность получения чистого насыщенного пара при допустимых величинах непрерывной продувки.

Отсутствие накипобразования обеспечивается глубоким умягчением воды и поддержанием в котловой воде известного избытка фосфатов (иона PO_4^{4-}).

Отсутствие коррозии обеспечивается полным удалением кислорода из питательной воды и наличием определенной щелочности котловой воды.

Чистота насыщенного пара достигается поддержанием надлежащих норм котловой воды в отношении ее щелочности и общего количества растворенных веществ, а также полным устранением из питательной воды вслепывающих агентов.

Путем различных комбинаций катионирования, фосфатирования, деаэрации, щелочения, известкования, нейтрализации, коагуляции, обезмасливания, фильтрования и непрерывной продувки получают различные схемы подготовки. Катионирование, фосфатирование, деаэрация, непрерывная продувка являются в указанном ниже смысле неизменными элементами всякой схемы водоподготовки. Другие элементы вводятся в схему водоподготовки в зависимости от качества исходной воды, величины потерь пара и конденсата и норм котловой воды.

Если, например, исходная вода имеет бикарбонатную щелочность $10 - 12^\circ$ и должна служить для питания паровых котлов 60 атм , причем потери пара и конденсата достигают 40‰ , то очевидно, в данном случае не может быть применено Na-катионирование.

Действительно, величина продувки, подсчитанная по щелочности, составит

$$p = \frac{40 \cdot 12}{20 - (1 - 0,25) 12} = 43,6 \text{‰}$$

Разумеется, работать с такой огромной продувкой невозможно, вследствие чего необходимо применить H-катионирование или известкование или, наконец, нейтрализацию.

При известковании, дающем уменьшение щелочности до 3° , размер продувки снизился бы до $6,8 \text{‰}$, как показывает подсчет:

$$p = \frac{40 \cdot 3}{20 - (1 - 0,25) 3} = 6,8 \text{‰}$$

Такая величина продувки уже может быть принята. Добавка при этом будет равна $43,0 \text{‰}$ от количества питательной воды, поскольку 40‰ потерь пара и конденсата плюс $6,8 (1 - 0,25)$ добавки, компенсирующей продувку, составляют 43‰ от количества питательной воды, равного $100 + 6,8 (1 - 0,25) = 105,1$.

Таблица 28
Нормы котловой воды

Показатели	Давление в <i>атм</i>				
	10	17	33	60	100
Сухой остаток (общее количество растворенных в котловой воде веществ) <i>мг/л</i> . . .	10 000	6 000	1 500—3 000	1 000—1 500	500—1 000
Щелочность котловой воды ° нем. . .	200	100	15—35	15—20	5—10

Если бы величина потерь пара и конденсата была не 40, а 50%, то можно было бы остановиться на Na-катионировании, так как в этом случае продувка

$$P = \frac{5 \cdot 12}{20 - (1 - 0,25) 12} = 5,5\%$$

Величина добавки при этом будет равна 8,75% от количества питательной воды.

Водоподготовительная установка для котлов давлением более 30 атм должна обеспечивать:

а) содержание накипеобразователей (Ca^{++} и Mg^{++}) не выше 0,1° нем.;

б) такое общее содержание солей, которое при принятых нормах котловой воды не привело бы к размеру непрерывной продувки котлов более 5—7%.

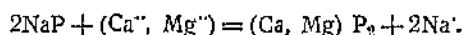
Устройство для термической и химической деаэрации должно обеспечивать полное удаление кислорода.

В следующем параграфе даны общие указания, при каких условиях должен быть применен тот или иной метод водообработки.

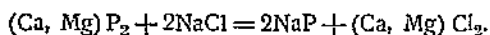
23. Схемы водоподготовки

Стадии водоподготовки. Всякая схема подготовки питательной воды распадается на несколько отдельных операций или стадий, которые рассматриваются ниже.

Катионирование, собственно Na-катионирование, состоит в фильтровании воды через слой специального не растворимого в воде материала, засыпанного в фильтр. Материал этот, носящий общее название катионита, способен вступать в обменные реакции с ионами кальция и магния согласно следующей схеме:



При этом взаимодействии ионы кальция и магния задерживаются катионитом, превращаясь из катионита натрия в катионит кальция и магния, а ионы натрия переходят в раствор. При испарении умягченной воды в котле соли натрия не выпадают в виде накипи и шлама, а остаются в растворе и отводятся в продувку. По мере обогащения ионами кальция и магния катионит теряет свою способность к умягчению воды. Однако эта способность может быть ему легко возвращена путем так называемой регенерации, осуществляемой простым промыванием катионита раствором поваренной соли (NaCl):



Для котлов низкого давления и примитивной конструкции может оказаться более целесообразной работа с антинакипинами. Такое же решение вопроса может быть предложено для нестационарных котлов, для временных котельных при строительстве и т. п.

Катионирование не всегда может быть применено также для вод, имеющих высокую концентрацию ионов натрия, поскольку последние понижают эффективность умягчения.

Если в сырой воде присутствуют соединения железа, алюминия и марганца в количествах, превышающих 5 мг/л в пересчете на Fe_2O_3 и MnO_2 , а также имеются взвешенные вещества, то перед катионированием необходимо их удалить. Не рекомендуется катионировать также и воду, имеющую низкий pH.

Фосфатирование обязательно применяется в подготовке воды для котлов, работающих с давлением пара выше 22 атм. В котлах низкого давления достаточную защиту от накипеобразования может оказывать сода, которая при более высоком давлении подвергается столь далеко идущему процессу гидролиза, что, например, при 40—50 атм практически исчезает полностью из котловой воды.

Фосфатирование¹ не должно применяться, если жесткость питательной воды превышает 0,5° нем., в особенности, когда котлы чувствительны к вспениванию и уносу, так как при этом в котловой воде образуется слишком много шлама. В этом случае должны быть приняты меры по снижению жесткости питательной воды, после чего фосфатирование может быть введено.

Деаэрация питательной воды является непременной стадией всякой водоподготовки для паросилового хозяйства. Удаление кислорода лучше всего достигается комбинацией термической и химической деаэрации; это мероприятие устраняет полностью опасность кислородной коррозии. Так как металл подвергается кислородной коррозии даже при температуре 100—120° С (теплофикационные магистрали, котлы водяного отопления и т. п.), то деаэрация может оказаться излишней лишь в самых редких случаях.

Не для всяких условий деаэрация оказывается экономически обоснованной; окончательное решение этого вопроса может быть дано при учете всех конкретных особенностей установки.

Продувка — непрерывная или периодическая — является безусловно обязательным элементом всякой котельной установки². Продувка позволяет поддерживать качество котловой воды на желаемом уровне и бороться с загрязнением насыщенного пара. Если котельная установка оборудована генераторами пара, лишенными продувки, например, прямоточными котлами без сепараторов, то методом приготовления питательной воды может явиться дистилляция или обессоливание, разработанное водной лабораторией Всесоюзного теплотехнического института.

Выбор метода продувки — периодической или непрерывной — производится в зависимости от количества выпускаемой воды. Если это количество велико, целесообразно применить непрерывную продувку, дающую возможность утилизировать тепло продувочной воды.

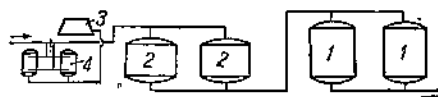
Обычно наряду с непрерывной продувкой применяют также и периодическую. Непрерывная продувка дает возможность поддерживать концентрацию растворенных в котловой воде веществ на определенном уровне, для чего вода в эту продувку забирается из точек котла, в которых можно ожидать максимальной концентрации растворенных веществ. Периодическая продувка применяется для удаления частиц шлама, и вода в эту продувку забирается из тех мест котла, в которых можно ожидать скопления шлама. Иногда можно обходиться одной лишь периодической продувкой. Например, если абсолютное количество выдаваемой воды невелико, то может оказаться невыгодным сооружать устройство для регенерации тепла продувочной воды.

Щелочение применяется в случае питания барабанных котлов чистым дистиллятом и конденсатом. Щелочением создают такую величину pH котловой воды, которая достаточна для предохранения металла от коррозии. Для прямоточных котлов без сепаратора щелочение неприменимо, вследствие чего вопрос борьбы с коррозией металла в этих котлах не может считаться решенным.

Коагуляция воды, имеющая целью удаление из нее коллоидальных веществ, применяется в случае их значительного содержания в сырой воде. Удаление коллоидальных веществ вынуждается двумя обстоятельствами: во-первых, попадание их в котлы может вызвать вспенивание, во-вторых, присутствие их в исходной воде может отрицательно отзываться на протекании процессов умягчения и известкования.

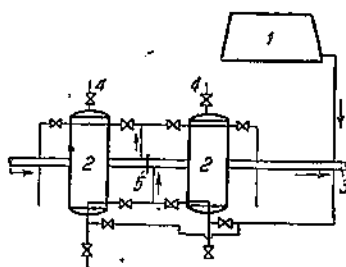
¹ Подробно см. "Инструкцию по обработке котловой воды фосфатом натрия" ХВ-10, Главэнерго, 1937.

² Кроме безбарабанных котлов и прямоточных котлов без сепараторов, для которых продувка невозможна.



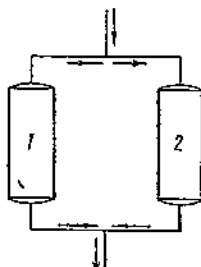
Фиг. 25. Схема Na-катионирования с предварительной коагуляцией.

1—катионитовые фильтры; 2—гравитные фильтры; 3—бачок с коагулянт; 4—шайбовый дозер.



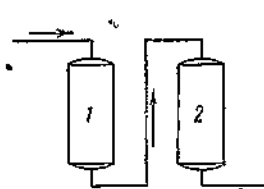
Фиг. 25а. Схема устройства шайбового дозера.

1—бачок для растворения реактива; 2—вытеснители, работающие параллельно; 3—магистраль воды; 4—воздушники; 5—шайба.



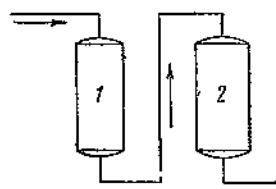
Фиг. 26. Схема параллельного H- и Na-катионирования.

1—H-катионит; 2—Na-катионит.



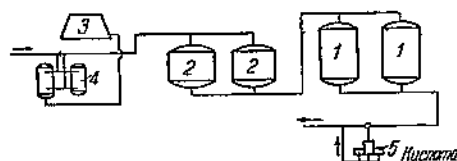
Фиг. 26а. Схема последовательного H- и Na-катионирования.

1—H-катионит; 2—Na-катионит.



Фиг. 27. Схема H-катионирования и обессоливания.

1—H-катионит; 2—аммонит.



Фиг. 28. Схема Na-катионирования с предварительной коагуляцией и последующей нейтрализацией.

1—4— см. фиг 25; 5—мембранный дозер.

недостаточной даже для нейтрализации кислотности вводимого коагулянта.

Схема катионирования с предварительной коагуляцией изображена на фиг. 25. Вода поступает на гравитные (механические) фильтры 2, проходя через устройство для коагуляции 3 и 4. Освободившись от механических и значительной части коллоидных примесей на гравитных фильтрах, вода тем же напором проходит катионитовые фильтры 1. Если вода предназначена для паровых котлов, то обычно она проходит еще деаэрацию и к ней добавляется фосфат натрия. Введение последнего осуществляется при помощи такого же дозера, как и для добавления коагулянта. Устройство этого дозера, называемого шайбовым, показано на фиг. 25а.

H-катионирование применяется для вод, свободных от взвешенных и коллоидных примесей, но имеющих высокую бикарбонатную щелочность, мешающую использовать Na-катионирование. При наличии коллоидных примесей должно быть введено предварительное коагулирование. Сущность H-катионирования заключается в фильтровании воды через материал, подобный обычному Na-катиониту, но содержащий в качестве обменного катиона водород, а не натрий. Поглощение ионов кальция и магния при H-катионировании сопровождается переходом в очищаемую воду ионов водорода (ионов H). Регенерация H-катионита после его истощения осуществляется кислотой.

После H-катионирования вода содержит свободные кислоты (серную, соляную, кремниевую, угольную и т. д.). Сильные кислоты (серная, соляная) должны быть нейтрализованы, что достигается одним из следующих способов:

а) Вода, поступающая на установку, разделяется на два параллельных потока, один из которых подвергается Na-катионированию, а другой H-катионированию. При смешении обоих потоков умягченных вод происходит нейтрализация кислотности H-катионированной воды за счет щелочности Na-катионированной. Схема изображена на фиг. 26.

б) Вода после H-катионирования подвергается последовательно Na-катионированию, причем ее кислотность нейтрализуется Na-катионитом, поглощающим ионы H сильных кислот. Схема изображена на фиг. 26а.

в) Вода фильтруется через материал, являющийся

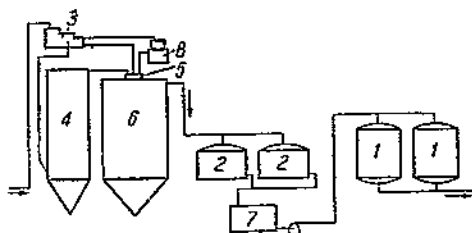
смесью H- и Na-катионитов. Смесь эта получается в надлежащих пропорциях при помощи регенерации катионита вначале поваренной солью, а затем частичной регенерацией кислотой. Схема установок ничем не отличается от обычного катионирования.

Кремнекислота, как слабая, и угольная кислота, как летучая, нейтрализации не подлежат. После H-катионирования и последующей нейтрализации кислотности вода лишается ионов Ca^{++} , Mg^{++} , CO_3^{--} , HCO_3^{--} и частично SiO_3^{--} . Остаются только ионы Cl^- , SO_4^{--} , NO_3^- и соответствующее им количество ионов Na^+ . Углекислота удаляется деаэрацией.

H-катионирование с предварительной коагуляцией применяется для вод, загрязненных коллоидными и взвешенными примесями и имеющих высокую бикарбонатную щелочность, препятствующую использованию схемы Na-катионирования с предварительной коагуляцией.

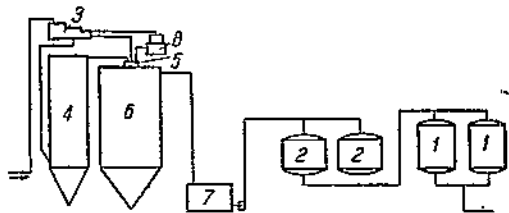
H-катионирование, как показывает калькуляция стоимости очищенной воды, гораздо выгоднее известкования, а нередко и нейтрализации, вследствие чего последние способы очистки выгодно заменять H-катионированием.

Обессоливание применяется в тех случаях, когда для питания котлов требуется вода, близкая по составу к дистилату. Обессоливание состоит из H-катионирования и поглощения из воды кислот. Последний процесс осуществляется путем пропуска воды через специальные материалы, способные задерживать кислоты. Механизм поглощения кислот таков, что при этом возможна обратная регенерация материала, осуществляемая при помощи бикарбоната натрия или соды. После пропускания через H-катионит и поглотитель кислот (сорбент) вода лишается почти всех растворенных в ней веществ. Схема подобной обработки приведена на фиг. 27. Na-катионирование с предварительной коагуляцией и последующей нейтрализацией (фиг. 28) применяется для вод, загрязненных взвешенными и коллоидными веществами и обладающих высокой бикарбонатной щелочностью. Таким образом эта схема водообработки применима к большинству вод. Поскольку, как было указано выше, нейтрализация повышает солевой состав воды, данная схема не может быть применена в тех случаях, когда нежелательно хотя бы и незначительное повышение солевого состава воды.



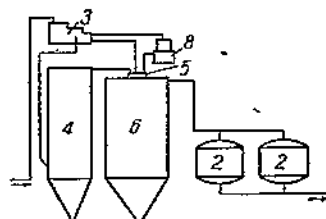
Фиг. 29. Схема Na-катионирования с предварительным известкованием.

1—катионитовые и 2—гравиевые фильтры; 3—водораспределительное устройство известкования; 4—сатуратор; 5—смесительное устройство; 6—отстойник; 7—бак; 8—устройство для дозирования коагулянта (в случае предварительной коагуляции) или соды (в случае содо-известкового умягчения).



Фиг. 29а. Другой вариант схемы катионирования с предварительным известкованием.

Обозначения см. фиг. 29.

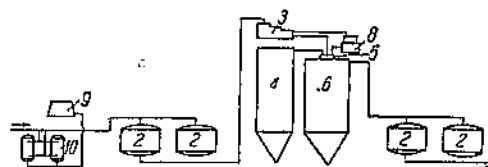


Фиг. 30. Схема содо-известкового умягчения воды.

Обозначения см. фиг. 29.

На-катионирование с последующей нейтрализацией применяется для вод, свободных от механических и коллоидных примесей, но обладающих высокой бикарбонатной щелочностью. Таковы в большинстве грунтовые, артезианские воды. Схема водообработки подобна предыдущей (фиг. 28) при отсутствии первой ее части, до гравиевых фильтров включительно.

На-катионирование с предварительным известкованием применяется для вод, относительно свободных от коллоидных примесей, но обладающих настолько высокой бикарбонатной щелочностью, что использование этой воды в случае ее Na-катионирования было бы невозможно или неэкономично. На-катионирование с предварительным известкованием по достигаемому снижению щелочности приблизительно равноценно Na-катионированию с последующей нейтрализацией. Однако в последнем случае повышается общее количество растворенных в воде веществ, вследствие чего Na-катионирование с предварительным известкованием, заметно снижающее солевой состав обрабатываемой воды, предпочтительно в тех случаях, когда общее количество растворенных веществ имеет решающее значение для дальнейшего использования воды.



Фиг. 31. Содо-известковое умягчение с предшествующей коагуляцией.

2—6—см. фиг. 29; 9—бачок с коагулянтном; 10—шабловый дозер.

Вода поступает на водораспределительное устройство известкования 3 (фиг. 29), где разделяется на ряд струй, служащих для дозирования реактивов. В данном случае единственным реактивом является известь, раствор которой готовится в сатураторе 4.

Известковый раствор, вытесняемый водой из сатуратора, и обрабатываемая вода смешиваются в смесительном устройстве 5 и поступают в отстойник 6. Здесь протекают процессы образования, укрупнения и оседания образующихся при известковании веществ (карбоната кальция, основного карбоната и гидрата магния и т. п.).

Далее вода поступает на гравийные фильтры 2 и собирается в бак 7, откуда насосом подается на катионитовые фильтры 1 и направляется к потребителю.

Обработка воды по рассматриваемой схеме иногда осуществляется и при другом расположении аппаратуры (фиг. 29а). Вода после отстойника собирается в бак 7, после которого насосом подается на гравийные и далее на катионитовые фильтры.

На-катионирование с предварительной коагуляцией и известкованием применяется для вод, загрязненных механическими и коллоидными примесями, а также обладающих повышенной бикарбонатной щелочностью, делающей использование этих вод, очищенных по схеме коагуляция—катионирование, невозможным или неэкономичным. Рассматриваемая схема по сравнению со схемой Na-катионирование с предварительной коагуляцией и последующей нейтрализацией увеличивает общее количество растворенных в воде веществ.

Аппаратура для очистки воды по этой схеме тождественна предыдущей (фиг. 29а) с тем лишь различием, что в данном случае используется устройство для дозирования коагулянта 8, изображенное на упомянутой схеме.

Содо-известковое умягчение применяется в случаях, оговоренных выше, для вод, незначительно загрязненных коллоидными веществами. Как видно из фиг. 30, аппаратура тождественна с показанной на фиг. 29а, только вместо коагулянта вводится при помощи такого же дозера 8 раствор соды.

Содо-известковое умягчение с предшествующей коагуляцией применяется в случаях, оговоренных выше (стр. 83, 84) для вод, имеющих значительные загрязнения коллоидного характера. Аппаратура для этого случая представлена на фиг. 31.

Частичное содо-известковое умягчение с последующим катионированием применяется в тех случаях, когда требуется глубокое умягчение воды, а исходная вода обладает весьма высокой жесткостью. Тогда для понижения расхода воды на собственные нужды катионитовой установки и для повышения рабочей емкости поглощения катионитовых фильтров применяют неполное умягчение воды до катионита известью и содой. Аппаратура для выполнения очистки воды по этой схеме ничем не отличается от изображенной на фиг. 29.

При выборе схемы водоподготовки необходимо исходить из качества сырой воды, обращая серьезней-

шее внимание на периодические сезонные изменения ее состава (паводковый период, дожди, зимний максимум жесткости и т. д.). Кроме качества исходной воды выбор схемы определяется требованиями, предъявляемыми потребителями к качеству очищенной воды.

В частности, в теплосиловом хозяйстве необходимо учитывать нормы качества котловой воды и размер добавки, т. е. величину потерь пара и конденсата.

ГЛАВА ПЯТАЯ

ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС КОТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

24. Составные части теплового баланса

Полезно использованное тепло

Расход тепла для получения определенного количества пара зависит от количества тепла, которое необходимо передать рабочему телу, и от потерь, сопровождающих работу котельной установки. Распределение тепла, выделившегося при сжигании топлива, на полезную затрату для получения пара и на отдельные потери, носит название теплового баланса котельной установки.

Степень использования тепла топлива для получения пара характеризуется коэффициентом полезного действия котла, т. е. отношением количества тепла, переданного воде и пару в котельном агрегате, к количеству тепла, содержащемуся в израсходованном при этом топливе.

Повышение к. п. д. требует сокращения потерь тепла. Для этого необходимо знать величину отдельных потерь и причины, вызывающие эти потери и обуславливающие тот или иной размер их. В связи с этим при исследовании работы котлоагрегата обычно определяют его к. п. д., находят величину отдельных потерь тепла и составляют баланс котельного агрегата.

При расходе топлива B кг/час и теплотворной его способности Q_p^u количество выделившегося в час тепла в агрегате составит BQ_p^u ккал/час.

Полезно использованным в котельном агрегате обычно является тепло, необходимое для превращения подаваемой в агрегат воды в пар.

Это полезное тепло обозначается BQ_1 .

При установившейся равномерной работе котельного агрегата процесс выделения химически связанной энергии топлива — горение — и процесс передачи этого тепла воде и пару — теплопередача — сопровождаются рядом следующих потерь:

а) потерей физического тепла BQ_2 газообразных продуктов горения, покидающих установку;

б) потерей от химической неполноты горения топлива BQ_3 , связанной с наличием в уходящих из установки продуктах горения несгоревших горючих газов (CO , H_2 и др.);

в) потерей от механической неполноты горения топлива и потерей физического тепла твердых остатков от горения топлива BQ_4 , связанной с присутствием в продук-

тах горения твердых несгоревших частиц топлива, горячей золы и шлака;

г) потерей тепла в окружающую среду вследствие охлаждения наружных поверхностей котельного агрегата BQ_5 .

В случае неравномерной или неустановившейся работы агрегата при увеличении нагрузки некоторая часть тепла топлива затрачивается на прогрев массы всего котлоагрегата до температуры, соответствующей новому состоянию равновесия; при уменьшении же нагрузки, наоборот, тепло, аккумулированное в массе котлоагрегата, выделяется и переходит к газам, воде и пару. Это тепло $\pm BQ_6$ можно назвать потерей тепла на неустановившееся состояние.

Уравнение теплового баланса за час в общем случае имеет следующий вид:

$$BQ_p^u = BQ_1 + BQ_2 + BQ_3 + BQ_4 + BQ_5 \pm BQ_6. \quad (220)$$

Если разделить обе части этого уравнения на B , т. е. привести баланс к 1 кг израсходованного топлива, то получится

$$Q_p^u = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 \pm Q_6. \quad (221)$$

При

$$\frac{Q_1 \cdot 100}{Q_p^u} = q_1, \quad \frac{Q_2 \cdot 100}{Q_p^u} = q_2 \text{ и т. д.}$$

уравнение теплового баланса примет следующий вид:

$$100 = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 \pm q_6. \quad (222)$$

Для установившегося состояния работы котла Q_6 и $q_6 = 0$ и уравнения баланса получают вид

$$Q_p^u = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5; \quad (223)$$

$$100 = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5. \quad (224)$$

Ввиду трудности определения на практике величины Q_6 балансовые испытания проводятся всегда при установившемся состоянии работы котла, когда $Q_6 = 0$.

Составные части теплового баланса. Если принять за начало отсчета теплосодержания нагретых тел температуру $0^\circ C$, то можно установить следующее.

В котельный агрегат на 1 кг топлива поступает:

а) химическое тепло топлива¹, равное его теплотворной способности, Q_p^h ;

б) физическое тепло топлива $c_B \cdot t_B$;

в) тепло воздуха, идущего на горение, и тепло присоса его в газоходы $V_a \cdot c_L \cdot t_L$;

г) тепло питательной воды при поступлении ее в котельную установку $\frac{D + d_{np}}{B} i_w'$.

Из котельного агрегата уходит:

а) тепло $\frac{D}{B}$ кг пара в количестве $\frac{D}{B} i_{no}$ ккал/кг;

б) тепло $\frac{d_{np}}{B}$ кг продувочной воды, которая удаляется из котла при температуре кипения и уносит $\frac{d_{np}}{B} i_k$ ккал/кг;

в) физическое тепло уходящих газов в количестве $(V \cdot c \cdot t)_y$ ккал/кг;

г) потеря от химической неполноты горения Q_3 ;

д) потеря от механической неполноты горения и потеря физического тепла твердых остатков от горения топлива Q_4 ;

е) потеря тепла агрегатом в окружающую среду Q_6 ;

ж) потеря на неустойчившееся состояние $\pm Q_6$.

Составление теплового баланса имеет целью выяснить степень использования теплотворной способности топлива; полезное тепло и потери относят именно к этой величине, так как физическое тепло топлива и воздуха берется из окружающей среды и не имеет стоимости.

В тепло Q_1 , затрачиваемое на превращение подаваемой в котел воды в пар, условно включают и тепло, затраченное на нагрев продувочной воды как полезно затраченное тепло.

На 1 кг топлива питательная вода вносит тепла

$$\frac{D + d_{np}}{B} i_w'.$$

Из котла получается $\frac{D}{B}$ кг рабочего пара, содержащего $\frac{D}{B} i_{no}$ ккал/кг, и $\frac{d_{np}}{B}$ кг продувочной воды, содержащей $\frac{d_{np}}{B} i_k$ ккал/кг. Тепло, приобретенное водой и паром в агрегате, составляет

$$Q_1 = \frac{D}{B} i_{no} + \frac{d_{np}}{B} i_k - \frac{D + d_{np}}{B} i_w'$$

или

$$Q_1 = \frac{D}{B} [(i_{no} - i_w') + \frac{d_{np}}{D} (i_k - i_w')]. \quad (225)$$

¹ При обычном способе определения Q_p^h ее величина приводится к 20° С при постоянном объеме продуктов горения. Неточностью, получающейся вследствие этого, обычно пренебрегают.

В котлах высокого давления часто имеется вторичный газовый пароперегреватель, где перегревается в количестве $D_{от}$ кг/час пар из турбины, который имеет более низкое давление. В этом случае к величине Q_1 необходимо добавить член

$$\frac{D_{от}}{B} (i_{no}'' - i_{no}')_{от}. \quad (226)$$

Иногда из котла отбирается и насыщенный и перегретый пар с различным теплосодержанием. В этом случае аналогично предыдущему получается:

$$Q_1 = \frac{D_u}{B} (i_u - i_w') + \frac{D_{no}}{B} (i_{no} - i_w') + \frac{d_{np}}{B} (i_k - i_w'), \quad (227)$$

где D_u кг/час — количество насыщенного, а D_{no} кг/час — перегретого пара, отдаваемого из агрегата.

Если отходящие из котла газы используются для подогрева воды в количестве D_w , идущей затем для других целей, то Q_1 увеличивается на

$$+ \frac{D_w}{B} (i_w'' - i_w') \text{ ккал/кг}. \quad (228)$$

Когда в котельной установке подогревается воздух, используемый в дальнейшем для посторонних целей, например, для сушки, отопления и т. д., то к величине Q_1 добавляю

$$\frac{V_L}{B} \cdot c_L (t_L'' - t_L'), \quad (229)$$

где V_L — объем воздуха, отдаваемого на сторону, в $\text{м}^3/\text{час}$. Тепло, идущее на нагрев в воздухоподогревателе воздуха, потребляемого котлоагрегатом для горения топлива, является теплом, циркулирующим внутри агрегата, и поэтому оно не учитывается как полезно отданное наружу тепло.

Когда продувка котла незначительна и ведется периодически, то она не учитывается:

$$Q_1 = \frac{D}{B} (i_{no} - i_w'). \quad (230)$$

При испытании котлов, чтобы не усложнять опыта замером количества продувочной воды, продувку на время опыта часто закрывают. Подсчет Q_1 в этом случае производится по формуле (230).

25. Потеря тепла от механической и химической неполноты горения и с физическим теплом твердых остатков горения топлива

От потери Q_4 зависит определение некоторых других потерь теплового баланса. Поэтому на ней приходится останавливаться раньше, чем на других потерях. Потеря Q_4 связана с тем, что в шлаках и золе, уносимых в газоходы котла, имеются несгоревшие частицы топлива.

Кроме того, шлак, удаляемый из топки, имеет высокую температуру и иногда удаляется даже в расплавленном виде. Обычно потерей тепла, уносимого горячим шлаком, пренебрегают ввиду его незначительности. Но в установках, сжи-

гающих топливо с высокой зольностью или при жидком шлакоудалении, этой величиной пренебрегать нельзя.

Пусть Q_4^{sc} представляет собой потерю тепла из-за присутствия в золе и шлаке несгоревших частиц топлива, а Q_4^p физическое тепло удаляемых из агрегата шлаков и золы. Тогда

$$Q_4 = Q_4^{sc} + Q_4^p. \quad (231)$$

Если от 1 кг сгоревшего топлива получается g_{oc} кг шлаков и золы, имеющих теплотворную способность Q_{oc} , то

$$Q_4^{sc} = g_{oc} \cdot Q_{oc}. \quad (232)$$

Величина g_{oc} при испытаниях определяется взвешиванием очаговых остатков, шлака и золы и делением их веса на количество сожженного топлива; Q_{oc} определяется калориметрированием по средневзвешенной пробе золы и шлака.

При предварительных расчетах иногда определяют содержание горючих в шлаке, золе и уносе Γ_{oc} % и задаются на основании опытных данных теплотворной способностью горючей части этих остатков Q_{oc}^z . Тогда

$$Q_4^{sc} = g_{oc} \frac{\Gamma_{oc}}{100} \cdot Q_{oc}^z. \quad (233)$$

По данным ВТИ Q_{oc}^z обычно имеет различное значение в пределах между теплотворной способностью чистого углерода (8100 ккал/кг) и теплотворной способностью горючей части топлива Q_2^{sc} . Поэтому при испытаниях следует производить определение теплотворной способности золы и шлаков.

При предварительных расчетах чаще всего принимают $Q_{oc}^z = 8100$ ккал/кг. ВТИ предлагает принимать $Q_{oc}^z = Q_2^{sc}$ топлива. Оба эти допущения неточны примерно в равной степени.

При испытаниях котлов очень часто учитывают отдельно вес шлака $g_{шл}$, вес провала под решетку g_{np} и вес летучей золы g_{yn} , уносимой в газоходы, приходящиеся на 1 кг сгоревшего топлива, и отдельно определяют теплотворную способность их. Тогда

$$\begin{aligned} Q_4^{sc} &= Q_4^{шл} + Q_4^{np} + Q_4^{yn} = \\ &= g_{шл} \cdot Q_{шл} + g_{np} \cdot Q_{np} + g_{yn} \cdot Q_{yn} = \\ &= g_{шл} \frac{\Gamma_{шл}}{100} Q_2^{шл} + g_{np} \frac{\Gamma_{np}}{100} Q_2^{np} + g_{yn} \frac{\Gamma_{yn}}{100} Q_2^{yn}. \end{aligned} \quad (234)$$

Потеря Q_4^{np} , имеющая место при слоевом сжигании топлива, зависит: а) от сорта сжигаемого

топлива, спекаемости его и от количества мелочи в нем; б) от типа топки, конструкции колосниковой решетки и ее деталей; в) от условий эксплуатации.

При хороших условиях величина q_4^{np} обычно не превосходит 0,5—1%.

Потеря тепла со шлаками в слоевых топках $q_4^{шл}$ зависит от свойств сжигаемого топлива, конструкции колосниковой решетки, среднего теплового напряжения решетки, условий эксплуатации.

На потерю $q_4^{шл}$ оказывают влияние следующие свойства сжигаемого топлива:

а) состав его горючей массы, выход летучих и качество кокса;

б) количество и плавкость золы.

Исследования ВТИ показали, что при сжигании топлив на цепных решетках между выходом летучих веществ на горючую массу топлива и теплотворной способностью шлаков существует зависимость, характеризующая табл. 29, из которой видно, что с уменьшением L_2 растет $Q_{шл}^z$.

Величины $q_4^{шл}$ для разных топлив при слоевом сжигании даны во втором разделе.

У механических топок потеря $q_4^{шл}$ находится в прямой зависимости от теплового напряжения зеркала горения, под которым понимают среднее количество тепла, выделяемое за час на 1 м² зеркала горения, т. е. величину $\frac{Q_p \cdot B}{R}$ ккал/м² час.

Потеря q_4^{yn} в слоевых топках вследствие уноса из топки в газоходы и дымовую трубу несгоревших частиц топлива вызывается тем, что воздух и дымовые газы, проходя между кусками топлива, захватывают и выносят в топочное пространство мелкие частицы топлива и золы. Некоторые частицы попадают несгоревшими в газоходы котла,

Таблица 29

Зависимость между теплотворной способностью шлаков и выходом летучих на горючую массу

(при сжигании топлива на цепной решетке)

Выход летучих на горючую массу L_2 в %	Теплотворная способность ¹ сухой массы шлака $Q_{шл}^z$ в ккал/кг
5,5	2 520
40,3	490
44,3	200

¹ При $\frac{Q}{R} = 750 + 850$ (10⁶ ккал/м² час), подробнее $\frac{Q}{R}$ см. раздел второй.

где часть из них выпадает, а остальные вместе с газами выбрасываются через дымовую трубу.

Количество несгоревшего топлива, уносимого из слоевой топки, зависит от: а) свойств сжигаемого топлива, выхода летучих, свойств кокса; б) конструкции топки, конфигурации и размеров топочного пространства; в) нагрузки котельного агрегата (определяющей напряжение решетки) и от объема топочного пространства.

Механическая неполнота сгорания в пылеугольных топках вызывается почти исключительно уносом; потеря с провалом отсутствует, а потеря со шлаком носит условный характер. Под потерей со шлаком в пылеугольных топках понимают потерю с несгоревшими частицами топлива, выпадающими из факела в шлаковую воронку или в жидкий шлак. Обычно эта потеря незначительна. Величина q_4^{un} в факельных топках зависит от: а) сорта сжигаемого топлива — выхода летучих, свойств кокса, тонкости помола; б) объема топочного пространства; в) конструкции топки; г) аэродинамических и температурных условий в ней.

При испытаниях котлов удается уловить и взвесить лишь шлак, провал и унос, оседающий в газоходах агрегата и золоулавливающих устройствах (золовых воронках), $g_{un}^{z.o}$. Унос золы в дымовую трубу g_{un}^{mp} не может быть полностью уловлен, поэтому потерю с уносом в дымовую трубу приходится определять косвенным путем:

$$Q_4^{un} = g_{un}^{z.o} \cdot Q_{un}^{z.o} + g_{un}^{mp} \cdot Q_{un}^{mp}. \quad (235)$$

В этом уравнении не известны g_{un}^{mp} и Q_{un}^{mp} .

По одному из способов g_{un}^{mp} находят, отсасывая при помощи трубки Альера или другим аналогичным прибором среднюю пробу газа из дымовой трубы и определяя содержание в ней твердых частиц. Зная полный объем газов, уходящих в трубу, можно вычислить g_{un}^{mp} ; Q_{un}^{mp} определяется калориметрированием.

По второму способу g_{un}^{mp} определяется по золовому балансу. Среднее часовое количество золы, поступившее в котельный агрегат с топливом, будет равно среднему суммарному часовому количеству золы в провале $\frac{g_{np} \cdot A_{np} \cdot B}{100}$, шлаках $\frac{g_{шл} \cdot A_{шл} \cdot B}{100}$ и уносе $\frac{g_{un} \cdot A_{un} \cdot B}{100}$. На основании указанного золowego баланса имеем

$$B \frac{A_p}{100} = B \frac{g_{np} \cdot A_{np} + g_{шл} \cdot A_{шл} + g_{un}^{z.o} \cdot A_{un}^{z.o} + g_{un}^{mp} \cdot A_{un}^{mp}}{100} \quad \text{кг/час.} \quad (236)$$

Здесь $B \frac{A_p}{100}$ кг/час — количество золы, поступившее в котельный агрегат с топливом;

$$\frac{g_{np} \cdot B \cdot A_{np}}{100}; \quad \frac{g_{шл} \cdot B \cdot A_{шл}}{100} \quad \text{и} \quad \frac{g_{un}^{z.o} \cdot B \cdot A_{un}^{z.o}}{100} \quad \text{кг/час —}$$

количество золы, выпавшей в котельном агрегате с провалом, шлаками и уносом, попавшим в золовые воронки;

$$\frac{g_{un}^{mp} \cdot A_{un}^{mp} \cdot B}{100} \quad \text{кг/час — количество золы, унесенное}$$

из агрегата в дымовую трубу.

Все члены, входящие в формулу (236), за исключением последнего члена второй ее части, известны.

Определяя путем анализа средней пробы $A_{un}^{mp}/100$ — содержание золы в уносе, выбрасываемом в дымовую трубу, можно по формуле (236) подсчитать g_{un}^{mp} — вес этой золы на 1 кг топлива. Точность этого метода зависит от того, насколько тщательно была отобрана средняя проба топлива, провала, шлаков и уноса для определения их зольности. При неправильном отборе пробы золовой баланс может привести к значительной ошибке при подсчете g_{un}^{mp} , а следовательно, и $q_4^{un}/100$.

Физическое тепло шлаков, провала и уноса в общем случае составляет

$$Q_4^{\phi} = Q_{шл}^{\phi} + Q_{np}^{\phi} + Q_{un}^{\phi}. \quad (237)$$

Физическое тепло топлива $c_B \cdot t_B$ здесь не учитывается ввиду его незначительности при твердом топливе.

При удалении золы или шлака в твердом виде, если пренебречь теплом, вносимым в топку топливом

$$Q_4^{\phi} = g_{шл} \cdot c_{шл} \cdot t_{шл} + g_{np} \cdot c_{np} \cdot t_{np} + g_{un} \cdot c_{un} \cdot t_{un}. \quad (238)$$

Если шлак из топки при факельном сжигании удаляется в жидком виде, то:

$$Q_4^{\phi} = g_{шл} (c_{шл} \cdot t_{шл} + r_{шл}) + g_{np} \cdot c_{np} \cdot t_{np} + g_{un} \cdot c_{un} \cdot t_{un}, \quad (239)$$

где $r_{шл}$ — теплота плавления шлака. Потери с провалом в этом случае нет.

При небольшой зольности топлива и сухом шлакоудалении потерей Q_4^{ϕ} можно пренебречь.

Если в уходящих дымовых газах имеются продукты неполного горения, то имеет место потеря тепла, которое могло бы выделяться при полном их сгорании.

В связи с механической неполнотой горения уменьшается количество горючих элементов топлива, идущих на образование дымовых газов.

Если принять, что горючая часть очаговых остатков состоит целиком из углерода, то количество несгоревшего углерода ΔC будет определяться из уравнений

$$Q_4^u = \frac{\Delta C}{100} \cdot 8100 \quad \text{и} \quad \frac{Q_4^u}{Q_p^u} = q_4^u \cdot 100,$$

откуда

$$\Delta C = q_4^u \frac{Q_p^u}{8100}.$$

Тогда

$$K'_p = C_p - \Delta C + 0,368 S_p^A. \quad (240)$$

Если принять по ВТИ, что горючая часть шлака и золы имеет такой же состав, как и топливо, то

$$K'_p = K_p \frac{100 - q_4^w}{100}. \quad (241)$$

Потеря от химической неполноты горения может быть подсчитана по формуле

$$Q_3 = V_{CO} \cdot Q_{CO} + V_{H_2} \cdot Q_{H_2} + V_{CH_4} \cdot Q_{CH_4}, \quad (242)$$

где

$V_{CO}, V_{H_2}, V_{CH_4}$ $лм^3/кг$ топлива — объем CO, H_2, CH_4 на 1 $кг$ топлива;
 $Q_{CO}, Q_{H_2}, Q_{CH_4}$ $ккал/лм^3$ — объемная низшая теплотворная способность CO, H_2, CH_4 .

По формуле (106) можно определить объем негоревших газов на 1 $кг$ топлива

$$\begin{aligned} V_{CO} &= V_{a.z} \frac{CO}{100} = \\ &= \frac{K'_p}{0,54(RO_2 + CO + CH_4)} \frac{CO}{100} \text{ лм}^3/кг \text{ топлива;} \\ V_{H_2} &= V_{a.z} \frac{H_2}{100} = \\ &= \frac{K'_p}{0,54(RO_2 + CO + CH_4)} \frac{H_2}{100}; \quad (243) \\ V_{CH_4} &= V_{a.z} \frac{CH_4}{100} = \\ &= \frac{K'_p}{0,54(RO_2 + CO + CH_4)} \frac{CH_4}{100}. \end{aligned}$$

Теплотворные способности CO, H_2 и CH_4 приведены в табл. 12.

Подстановка этих значений в формулу (242) и элементарные преобразования дают

$$Q_3 = \frac{K'_p (56,6 \cdot CO + 48 \cdot H_2 + 156 \cdot CH_4)}{(RO_2 + CO + CH_4)} \text{ ккал/кг топлива.} \quad (244)$$

При $H_2 = CH_4 = 0$ и $CO \neq 0$ формула (244) принимает вид

$$Q_3 = 56,6 K'_p \cdot \frac{CO}{(RO_2 + CO)_0} \text{ ккал/кг.} \quad (245)$$

Потеря от химической неполноты горения зависит от следующих причин:

- а) недостаточного количества воздуха в топке;
- б) плохого перемешивания воздуха и горючих газов, так что в отдельных участках топки имеется избыток, а в других недостаток воздуха;
- в) чрезмерно низкой температуры в топке и недостаточной устойчивости горения;

г) недостаточного времени пребывания газов в топке из-за слишком малого объема топки или же неполного заполнения топки факелом;

д) при слоевом сжигании и большой толщине слоя в нем происходит частичное разложение образовавшихся продуктов полного горения с образованием CO и т. п., которые при наличии отмеченных ранее условий не успевают догорать в топочном пространстве.

В правильно сконструированных и хорошо эксплуатируемых установках химическая неполнота горения не должна превышать 0,5%.

26. Потеря тепла с уходящими газами и в окружающую среду

Потеря тепла Q_2 с уходящими газами возникает вследствие того, что тепло газов, покидающих котельную установку, больше физического тепла тех вступающих в котельную установку веществ (воздух, топливо и др.), которые пошли на образование продуктов горения.

При этом

$$Q_2 = (V_g \cdot c_g)_y \cdot t_y - V_a \cdot c_a \cdot t'_a. \quad (246)$$

В случае, подогрева топлива в правой части уравнения добавляется член $-c_B \cdot t_B$.

Обычно температура топлива незначительна, и этой величиной можно пренебречь.

При определении объемов газов и воздуха необходимо учесть влияние механической неполноты горения.

В СССР за основу сведения теплового баланса обычно принята низшая теплотворная способность топлива. В некоторых странах, например, в США, баланс, как правило, сводится по высшей теплотворной способности.

Если баланс сводить по высшей теплотворной способности топлива, то в потерю с уходящими газами необходимо включить тепло испарения влаги топлива. В этом случае:

$$Q_2 = (V_g \cdot c_g)_y \cdot t_y + \frac{W_p + 9H_p}{100} 600 - V_a \cdot c_a \cdot t'_a. \quad (247)$$

Если в установку подается дополнительно пар для дутья или для распыливания жидкого топлива в количестве W_p $кг/кг$, в правую часть уравнения (246) добавляется член

$$+ 0,47 \cdot W_p (t_y - t'_p), \quad (248)$$

где 0,47 — весовая теплоемкость водяного пара. Величина $(t_y - t'_p)$ может быть и отрицательной.

Если же в топку подается вода в количестве W_w $кг/кг$, например, для борьбы со шлакованием, то в правую часть уравнения (246) добавляется член

$$+ W_w [600 + 0,47 t_y - t'_w], \quad (249)$$

где W_w — количество подаваемой в топку воды в кг/кг топлива;

t_w' — ее температура перед поступлением в агрегат.

Из уравнений (246) видно, что потеря тепла с уходящими газами зависит от температуры уходящих газов и от их количества, приходящегося на 1 кг топлива. Объем (в $м^3$) газов зависит в первую очередь от избытка воздуха, поступающего в топку, и от присоса воздуха через неплотности газоходов. Чем больше избыток воздуха и присос, тем больше потеря с уходящими газами.

Под нормально возможным избытком воздуха в топке понимают такой избыток, при котором величины Q_3 и Q_4 не выходят за пределы допустимых для них норм. Из этого следует, что избыток воздуха в топке должен быть таким, чтобы суммарная потеря тепла $Q_2 + Q_3 + Q_4$ была минимальной.

В табл. 30 даны средние присосы воздуха через неплотности обмуровки отдельных элементов котельной установки.

Кроме избытка воздуха величина q_2 зависит от температуры дымовых газов при выходе из воздухоподогревателя t_g'' °С. С повышением t_g'' будет расти и величина q_2 .

Температура уходящих из котлоагрегата газов зависит от величины поверхностей нагрева и условий отдачи им тепла газами. В работающем котлоагрегате с определенным размером и расположением поверхностей нагрева температура уходящих газов определяется нагрузкой, степенью наружного загрязнения поверхностей нагрева и

избытком воздуха в газах. С увеличением их растет и q_2 . При проектировании новых крупных котлоагрегатов температура уходящих газов при нормальной нагрузке принимается не больше 150—180° С. В мелких установках, часто не имеющих экономайзеров, температура уходящих газов бывает значительно выше, доходя в отдельных случаях до 400° С.

Потеря тепла в окружающую среду вызывается тем, что обмуровка котлоагрегата и его наружные металлические части имеют более высокую температуру, чем воздух в котельной. В связи с этим происходит отдача тепла котлоагрегатом воздуху котельной за счет естественной конвекции и радиации. Величина потери в окружающую среду q_5 % зависит от: а) качества обмуровки — толщины и теплопроводности материалов, из которых она выполнена; б) компактности котлоагрегата — размера наружных поверхностей обмуровки, приходящихся на единицу ее производительности. С повышением паропроизводительности котлоагрегата повышается его компактность и понижается q_5 .

Это можно видеть из нижеследующих данных:

Паропроизводительность D т/час . .	16	16—30	40—60	90	120	160
Потери в окружающую среду q_5 % .	3,5	2,5	1,5	1,2	1,0	0,6

С изменением нагрузки котлоагрегата потеря q_5 ккал/кг уменьшается примерно обратно пропорционально количеству сжигаемого топлива.

В прежнее время Q_5 определялась при испытаниях как остаточный член теплового баланса.

В этом случае

$$q_5 = 100 - (q_1 + q_2 + q_3 + q_4 \pm q_6).$$

Ошибки в определении q_1 , q_2 и т. д., а также влияние неустановившегося состояния искажают при этом величину q_5 . Особенно неблагоприятно влияет недоучет действительных значений $q_4^{y/m}$.

27. Потеря тепла на неустановившееся состояние. Коэффициент полезного действия котельного агрегата

Потеря на неустановившийся режим работы агрегата может иметь положительный или отрицательный знак. Она обусловлена тем, что в котельном агрегате каждому режиму его работы соответствует определенное количество тепла аккумулированного:

1) в воде, заполняющей водяной экономайзер и водяное пространство котла;

2) в металле, из которого выполнены отдельные элементы котлоагрегата;

3) в обмуровке агрегата.

Таблица 30

Величина присоса в различных элементах котельной установки

Элемент котельной установки	Присос воздуха при хорошем уплотнении газоходов	
Первый газоход	$\Delta\alpha'$	0,0 ÷ 0,05
Газоход перегревателя . .	$\Delta\alpha_n$	0,05
Задние газоходы котла . .	$\Delta\alpha''$	0,05
Водяной экономайзер змеевиковый	$\Delta\alpha_g$	0,05
Чугунный водяной экономайзер	$\Delta\alpha_g$	0,1
Железный пластинчатый или чугунный воздухоподогреватель	$\Delta\alpha_g$	0,10 ÷ 0,15 *
Трубчатый воздухоподогреватель	$\Delta\alpha_g$	0,05
Электрофильтр	$\Delta\alpha_{\phi}$	0,10
Механический золоуловитель циклонного типа . .	$\Delta\alpha_z$	0,05

* В старых конструкциях воздухоподогревателей, с колпачками вместо сварки, $\Delta\alpha_g = 0,2 - 0,3$.

При слоевых топках имеется еще дополнительный запас невыделенного и физического тепла в слое топлива, лежащем на колосниковой решетке топки.

Отдельные слагающие общего запаса тепла, аккумулированного в котлоагрегате, могут изменяться при его работе. Так, при изменении уровня воды в барабане котла будет меняться запас воды в котле, а следовательно, и количество аккумулированного в ней тепла. Изменение нагрузки котлоагрегата связано с изменением температурных условий в нем и поэтому всегда вызывает изменение запаса аккумулированного тепла в воде¹, металле, обмуровке и т. д. При разных нагрузках и при колебаниях давления пара изменяется температура металла котла и его обмуровки.

При колебаниях нагрузки работающего котла установившееся состояние наступает быстро. Во время балансовых испытаний достаточно в течение 1 часа перед началом опыта и 1 часа в конце опыта работать при одинаковых режимах, учитывая, что промежуточные небольшие колебания режима дают то положительные, то отрицательные значения q_6 , в сумме близкие к нулю, но так как на первоначальный разогрев всего котла требуется длительное время и значительная затрата тепла, то начинать испытание необходимо не раньше как через 12—24 час. после его остановки и пуска в действие.

Ошибка теплового баланса в опыте, проведенном без этой предосторожности, может быть весьма значительная. Она равна $Q_5 + Q_6$ и может достигать в этом случае 20% и выше.

При испытании котельного агрегата его к. п. д. определяется непосредственно из опыта. При проектировании нового агрегата приходится оценивать отдельные потери и определять q_1 из формулы (224).

Определив потери тепла в котельном агрегате, можно составить выражение для его к. п. д.:

$$\eta_{\text{кр}} = \frac{Q_1}{Q_p^{\text{н}}} = q_1 \frac{1}{100}. \quad (250)$$

Таким образом у нас обычно принимается

$$\eta_{\text{кр}} = \frac{Q_1}{Q_p^{\text{н}}}. \quad (251)$$

Подставляя значение Q_1 из формулы (225), получаем

$$\eta_{\text{кр}} = \frac{1}{Q_p^{\text{н}}} \frac{D}{B} \left[(i_{\text{нв}} - i'_{\text{в}}) + \frac{d_{\text{нр}}}{D} (i_{\text{н}} - i'_{\text{в}}) \right] \quad (252)$$

¹ С изменением нагрузки котла изменяется удельный вес пароводяной смеси, заполняющей трубы экрана и котла. В связи с этим при одном и том же уровне воды в барабане изменится вес воды, заполняющей водяное пространство котла, а следовательно, и запас тепла, аккумулированного в воде.

и в случае отсутствия продувки

$$\eta_{\text{кр}} = \frac{1}{Q_p^{\text{н}}} \frac{D}{B} (i_{\text{нв}} - i'_{\text{в}}). \quad (253)$$

Подставляя значения Q_1 , связанные с формулами (226) — (229), получаем величину к. п. д. и для более сложных случаев.

Коэффициент полезного действия котельного агрегата можно выразить и через относительные потери тепла в процентах (224), а именно:

$$\eta_{\text{кр}} = \frac{q_1}{100} = \frac{100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5)}{100}. \quad (254)$$

Коэффициент полезного действия топки характеризует процесс выделения тепла с учетом доли тепла, теряемого топкой в окружающую среду:

$$\eta_{\text{т}} = \frac{100 - (q_3 + q_4 + q_5^{\text{м}})}{100}. \quad (255)$$

Величина

$$\frac{D}{B} = \frac{\eta_{\text{кр}} Q_p^{\text{н}}}{(i_{\text{нв}} - i'_{\text{в}})} = I_{\text{в}} \quad (256)$$

называется видимой испарительностью топлива и показывает, сколько килограммов пара можно получить или получается в установке на 1 кг топлива.

Из выражения для к. п. д. можно определить величину B , которая в простейшем случае выразится

$$B = \frac{D (i_{\text{нв}} - i'_{\text{в}})}{Q_p^{\text{н}} \eta_{\text{кр}}}. \quad (257)$$

Из этого выражения видно, что при постоянном расходе пара весовой расход топлива тем меньше, чем выше $Q_p^{\text{н}}$ и $\eta_{\text{кр}}$ и чем меньше $(i_{\text{нв}} - i'_{\text{в}})$.

Ввиду того что испарительность топлива I зависит от величины $(i_{\text{нв}} - i'_{\text{в}})$, для сравнения различных котлов иногда пересчитывают эту испарительность по нормальному пару, пользуясь для этого формулой (12). Испарительность по нормальному пару

$$I_{\text{н}} = I_{\text{в}} \frac{i_{\text{нв}} - i'_{\text{в}}}{640}. \quad (258)$$

Эта величина прямо пропорциональна к. п. д. $\eta_{\text{кр}}$ и дает, следовательно, характеристику, аналогичную $\eta_{\text{кр}}$.

Не весь пар, вырабатываемый котлоагрегатом, поступает к потребителю. Часть пара расходуется в самой котельной на так называемые собственные нужды ее, обдувку, подогрев воды и т. д.; помимо того пар, поступающий в машины, частично расходуется на выработку электроэнергии, необходимой котельной для привода вентиляторов, дымососов, питательных насосов, мельниц для размолва топлива и т. д. Следовательно, эта

часть пара также должна быть отнесена к расходу на собственные нужды котельной. Чем больше тепла и энергии расходуется котельной на ее собственные нужды, тем меньше будет доля тепла топлива, отдаваемого потребителю.

В связи с этим вводится понятие о к. п. д. брутто и нетто.

Обозначим через

$Q^{бр}$ ккал/кг топлива — все тепло, используемое в котлоагрегате, включая и то тепло, которое расходуется на собственные нужды котельной установки;

$Q^{нет}$ ккал/кг топлива — тепло, используемое в котлоагрегате для производства горячей воды и пара, действительно отдаваемого потребителю;

$Q^{сл}$ ккал/час — расход тепла на собственные нужды котельной.

Очевидно, что

$$B \cdot Q^{нет} = B (Q^{бр} - Q^{сл}) \text{ ккал/час.} \quad (259)$$

Разделив эту формулу на $BQ_p^{н}$, получим долю использованного тепла или к. п. д. котлоагре-

гата брутто и нетто:

$$\eta_{нет} = \eta_{бр} - \frac{Q^{сл}}{BQ_p^{н}} = \eta_{бр} - \Delta\eta_{сл} \quad (260)$$

Коэффициент полезного действия котлоагрегата брутто определяется по выведенной выше формуле (253).

Величина $\Delta\eta_{сл} = \frac{Q^{сл}}{B \cdot Q_p^{н}}$, представляющая собой долю расхода тепла на служебные нужды котельной, может быть выражена следующим образом:

$$\Delta\eta_{сл} = \frac{D_{сл}(\lambda_{сл} - t'_{в})}{B \cdot Q_p^{н}} + \frac{b \cdot \sum N}{B}, \quad (261)$$

где $\lambda_{сл}$ — полная теплота пара, идущего на служебные нужды;

$\sum N$ кватч — суммарный часовой расход энергии моторами собственных нужд котельной;

b кг/кватч — удельный расход топлива на электростанции на 1 кватч (брутто);

B кг/час — часовой расход топлива в котельной.

ГЛАВА ШЕСТАЯ

ТЕПЛООБМЕН В КОТЕЛЬНОМ АГРЕГАТЕ. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА СОПРИКОСНОВЕНИЕМ

28. Процесс теплообмена в котельном агрегате

Тепло топлива, выделившееся в топке при горении, используется в котельном агрегате путем передачи тепла продуктов горения рабочим телам — воде, пару, воздуху и т. д. — через металлические стенки поверхностей нагрева. Передача тепла может происходить путем излучения (радиации) на поверхности нагрева нагретых тел, путем соприкосновения их с этими поверхностями и совместным действием того и другого вида теплопередачи.

Способ теплопередачи при постоянном потоке тепла через стенку носит название рекуперативного. Другой способ теплопередачи, называемый регенеративным, состоит в периодическом нагреве промежуточного тела, которое затем в свою очередь нагревает рабочее тело. В котельных агрегатах этот способ применяется редко.

Теплопередача соприкосновением происходит за счет разности температур продуктов горения и рабочего тела. Температура продуктов горения по мере отдачи тепла падает, температура же рабочего тела растет, за исключением тех частей

котлоагрегата, где происходит испарение жидкости, температура которой остается постоянной, в то время как паросодержание возрастает.

Если через Q' обозначить часовое количество тепла, отдаваемого продуктами горения в какой-либо части агрегата, то

$$Q' = B [(V'_g c'_g \cdot t'_g - V''_g c''_g t''_g) + \Delta\alpha \cdot V_0 \cdot c_L \cdot t_L]. \quad (262)$$

Объемы продуктов горения V'_g , V''_g при расчетах теплопередачи берут при нормальных условиях, т. е. при 0°C и 760 мм рт. ст.

Изменение объема продуктов горения от V'_g до V''_g происходит за счет присоса воздуха; тепло, вносимое в газоход этим присосом, должно быть прибавлено к теплу, заключенному в продуктах горения; часто теплом присоса пренебрегают.

При неполном сгорании топлива в топке может иметь место догорание в газоходах. В этом случае к правой части уравнения (262) необходимо прибавить количество тепла, выделяющегося при догорании. Устанавливается эта величина анализом газов до и после газохода. При проектировании новых агрегатов принимают, что догорание в газоходах отсутствует.

Количество тепла Q' , отдаваемое в течение часа продуктами горения в какой-либо части котлоагрегата, расходуется на нагрев рабочего тела и на покрытие потерь этой части котлоагрегата в окружающую среду. Таким образом в случае отдачи тепла рабочему телу

$$Q' = D \cdot \Delta i + Q_b, \quad (263)$$

где Δi ккал/кг — приращение теплосодержания рабочего тела; Q_b ккал/час — часовая потеря тепла отдельным элементом котлоагрегата.

Два выражения для Q (262) и (263) дают следующее основное уравнение, представляющее тепловой баланс и применяющееся при расчетах теплообмена:

$$B[(V'_g \cdot c'_g \cdot t'_g - V''_g \cdot c''_g \cdot t''_g) + \Delta \alpha \cdot V_0 \cdot c_L \cdot t_L] = D \cdot \Delta i + Q_b. \quad (264)$$

Пусть $Q \approx Q' - Q_b$ обозначает количество тепла, переданное через поверхность нагрева¹.

При теплообмене должна быть обеспечена передача Q ккал/час тепла от продуктов горения к рабочему телу через соответствующие поверхности нагрева, для чего необходима достаточная величина этих поверхностей. Закономерности при передаче тепла соприкосновением и радиацией различны.

Для подсчета теплопередачи соприкосновением применяется следующее уравнение:

$$Q_i = k_i H_i \Delta t_i \text{ ккал/час}, \quad (265)$$

где H_i м² — поверхность нагрева рассматриваемого элемента котельного агрегата;

Δt_i °C — средняя разность температур продуктов горения и рабочего тела в пределах поверхности нагрева элемента;

k_i ккал/м² час °C — коэффициент теплопередачи, т. е. количество тепла, передаваемого единицей поверхности нагрева в час при разности температур продуктов горения и рабочего тела, равной 1° C.

Индекс i указывает, что входящие в уравнение величины относятся к некоторому элементу котельного агрегата.

Тепло, передаваемое излучением, определяется по уравнению

$$Q_i^n = H_i^n \cdot \varphi \cdot C \left[\left(\frac{T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{cm}}{100} \right)^4 \right], \quad (266)$$

¹ $Q = Q' - Q_b$, когда наружные поверхности охлаждения котельного агрегата образованы обмуровкой газопроводов; $Q = Q'$, когда потеря тепла наружу происходит от поверхностей, заполненных изнутри нагреваемым телом.

где кроме прежних обозначений

T °K — средняя температура тела излучающего тепло;

T_{cm} °K — средняя температура поверхности нагрева, воспринимающей это тепло;

C ккал/м² час °K⁴ — взаимный коэффициент излучения между лучеиспускающим телом и поверхностью нагрева;

φ — коэффициент облученности, указывающий, какая доля тепла, посылаемого в пространство излучающим телом, воспринимается поверхностью нагрева H_i^n ;

H_i^n м² — лучевоспринимающая или радиационная поверхность нагрева соответствующего элемента котельного агрегата.

На основании изложенного часовое количество тепла, передаваемое в котлоагрегате в час рабочему телу, может быть выражено так:

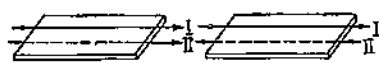
$$Q = \sum Q_i^k + \sum Q_i^n = \sum H_i^k \Delta t_i \cdot k_i + \sum H_i^n \cdot \varphi \cdot C \left[\left(\frac{T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{cm}}{100} \right)^4 \right]. \quad (267)$$

Подставляя в это выражение одну из приведенных выше [уравнения (262) и (263)] зависимостей Q от изменения теплосодержания продуктов горения или рабочего тела, можно получить следующие два вида второго основного уравнения, применяемого при расчете теплообмена:

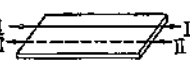
$$B(V'_g \cdot c'_g \cdot t'_g - V''_g \cdot c''_g \cdot t''_g + \Delta \alpha V_0 c_L t_L - Q_b) = \sum H_i^k \cdot \Delta t_i \cdot k_i + \sum H_i^n \cdot \varphi \cdot C \left[\left(\frac{T_a}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{cm}}{100} \right)^4 \right]; \quad (268)$$

$$D \cdot \Delta i = \sum H_i^k \cdot \Delta t_i \cdot k_i + \sum H_i^n \cdot \varphi \cdot C \left[\left(\frac{T_a}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{cm}}{100} \right)^4 \right]. \quad (269)$$

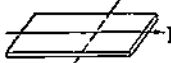
Два основных уравнения теплообмена — теплового баланса и теплопередачи позволяют решать ряд задач расчетного и конструктивного порядка. По ним, зная какие-либо три из температур t'_g , t''_g и t'_g и t''_g , можно найти четвертую, а также можно вычислить поверхность нагрева, необходимую для передачи Q ккал/час тепла. Если производится проверочный расчет для существующего котлоагрегата, величина поверхности нагрева которого известна, достаточно, чтобы были заданы две какие-либо из упомянутых выше температур.



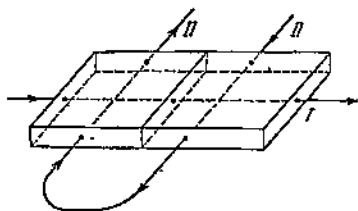
Фиг. 32. Схема прямого тока.



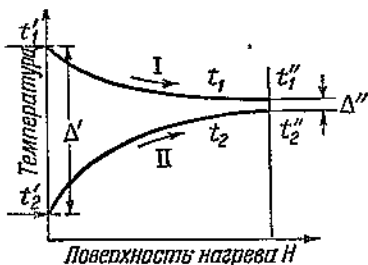
Фиг. 33. Схема противотока.



Фиг. 34. Схема поперечного тока.



Фиг. 35. Схема комбинированного тока.



Фиг. 36. Диаграмма изменения температур греющего и нагреваемого тел при прямом токе и переменных температурах.

Величины B и D обычно бывают заданы. Зная вид сжигаемого топлива и величину коэффициента избытка воздуха, можно определить V' и V'' . Теплоемкости c' и c'' находят по та-

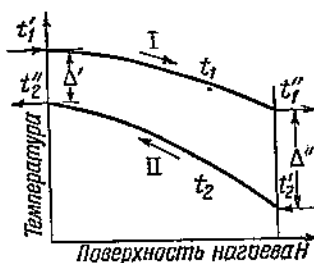
блице Юсти (табл. 5, 6). Величинами $\Delta\alpha_i$ и Q_5^i для каждого элемента задаются по опытным данным (табл. 30). В зависимости от скорости газов и других условий определяется величина k . Коэффициент ϕ находят из конструктивных соотношений.

При расчетах теплопередачи бывает полезно найти для рассматриваемого элемента котельного агрегата величину, дающую скорость изменения температуры продуктов горения в зависимости от изменения температуры рабочего тела, т. е. $\frac{dt_g}{dt}$. Основное уравнение (264) для случая бесконечно малого изменения температуры может быть написано в следующем виде:

$$B \cdot V_g \cdot c_g \cdot dt_g = D \cdot c \cdot dt; \quad \frac{dt_g}{dt} = \frac{Dc}{BV_g c_g} \cdot (270)$$

Последнее выражение получается на основании того, что из-за малости dt_g путь, проходимый продуктами горения от температуры $t_g + dt_g$ до температуры t_g , тоже очень мал, и следовательно, можно принять $V' = V''$ и $c' \approx c''$. Кроме того, величины $\Delta\alpha$ и ΣQ_5^i на этом пути настолько малы, что ими можно пренебречь.

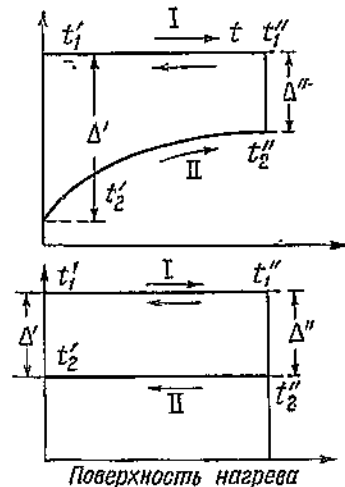
Равенство (270) может относиться лишь к таким элементам котельного агрегата, в которых не



Фиг. 37. Диаграмма изменения температур греющего и нагреваемого тела при противотоке и переменных температурах.



Фиг. 38. Диаграмма изменения температур греющего и нагреваемого тел при постоянстве одной или обеих температур.



происходит испарения, и следовательно, температура рабочего тела меняется.

29. Средняя разность температур греющего и нагреваемого тел при теплопередаче соприкосновением

Теплопередача зависит от взаимного направления разделяемых поверхностью нагрева потоков греющего и нагреваемого тел. При теплопередаче соприкосновением обычно встречаются следующие основные направления этих потоков:

а) прямой ток, когда греющее и нагреваемое тела движутся вдоль поверхности нагрева в одном направлении (фиг. 32);

б) противоток, когда греющее и нагреваемое тела движутся параллельно в противоположных направлениях (фиг. 33);

в) поперечный ток, когда греющее и нагреваемое тела движутся во взаимно перпендикулярных направлениях (фиг. 34);

г) комбинированный поперечный ток, когда поперечное направление участвующих в теплообмене тел меняется один или несколько раз (фиг. 35). При многократном (более двух раз) изменении направления этот случай иногда приближенно приравнивают к прямому или противотoku.

Наиболее сложным является определение средней разности температур греющего и нагреваемого тел в случае точного решения задачи для поперечного и комбинированного токов.

Обычно принимают, что процесс теплообмена находится в установившемся состоянии, т. е. что весовые количества теплоносителя и рабочего тела, омывающие в единицу времени поверхность нагрева, и температура их в каждой точке пути потока не меняются в течение всего того периода времени, на который распространяется расчет.

В направлении потока температура обоих тел может либо постепенно изменяться (фиг. 36 и 37), либо же оставаться постоянной у одного из них или даже у обоих. В случае постоянства температуры хотя бы одного из тел, обменивающихся теплом, направление движения этих тел теряет значение при определении величины средней температурной разности (фиг. 38).

Вообще говоря, коэффициент теплопередачи в разных местах поверхности различен, но для упрощения принимают, что на том отрезке поверхности нагрева, к которому относится расчет, соблюдается условие $k = \text{const}$.

Величина k вычисляется для средних условий.

Количество тепла, проходящего в час через поверхность нагрева,

$$Q = k \cdot H \cdot \Delta t_{cp} \text{ ккал/час.} \quad (271)$$

Ниже приведено определение средней температурной разности для заданной поверхности нагрева.

В случае параллельного тока или противотока количество передаваемого тепла на элементе поверхности нагрева dH_x равно

$$dQ = k \cdot dH_x (t_1^x - t_2^x), \quad (272)$$

где $(t_1^x - t_2^x)$ — разность температур греющего и нагреваемого тел.

Изменение теплосодержания греющего тела, например, продуктов горения, будет

$$dQ = -BV_g \cdot c_g \cdot dt_1^x; \quad (273)$$

изменение теплосодержания нагреваемого тела, например, воды, пара и т. д.,

$$dQ = D \cdot c \cdot dt_2^x. \quad (274)$$

Отсюда, обозначая через t^x переменное значение температуры, находим:

$$d(t_1^x - t_2^x) = dt_1^x - dt_2^x = -dQ \left(\frac{1}{BV_g c_g} - \frac{1}{D \cdot c} \right);$$

$$dQ = \frac{-d(t_1^x - t_2^x)}{\frac{1}{BV_g c_g} - \frac{1}{D \cdot c}} = -k \cdot dH_x (t_1^x - t_2^x)$$

или

$$\frac{d(t_1^x - t_2^x)}{t_1^x - t_2^x} = -k \left(\frac{1}{BV_g c_g} - \frac{1}{D \cdot c} \right) dH_x.$$

Принимая величины k , V_g , c_g , c не зависящими существенно от величин t_1^x и t_2^x и H_x , получим

$$\ln(t_1^x - t_2^x) = -k \left(\frac{1}{BV_g c_g} - \frac{1}{D \cdot c} \right) H_x + C.$$

Если температурная разность в начале и в конце поверхности нагрева равна соответственно при прямо-

токе (фиг. 36)

$$(t_1' - t_2') \text{ и } (t_1'' - t_2''), \text{ то } \ln(t_1' - t_2') - \ln(t_1'' - t_2'') =$$

$$= k \left(\frac{1}{B \cdot V_g c_g} - \frac{1}{D \cdot c} \right) \cdot H; \\ \ln \frac{t_1' - t_2'}{t_1'' - t_2''} = k \left(\frac{1}{BV_g c_g} - \frac{1}{D \cdot c} \right) \cdot H, \quad (275)$$

где H есть величина рассматриваемой поверхности нагрева, на протяжении которой температура меняется от t_1' до t_1'' и от t_2' до t_2'' . Имея в виду, что

$$Q = + \frac{t_1' - t_2'}{\frac{1}{BV_g c_g} - \frac{1}{D \cdot c}} - \frac{t_1'' - t_2''}{\frac{1}{BV_g c_g} - \frac{1}{D \cdot c}},$$

получаем

$$\frac{1}{BV_g c_g} - \frac{1}{D \cdot c} = + \frac{1}{Q} - \frac{1}{Q}.$$

Подставляя это значение в уравнение (275), получаем

$$Q = k \cdot H \frac{(t_1' - t_2') - (t_1'' - t_2'')}{\ln \frac{t_1' - t_2'}{t_1'' - t_2''}}. \quad (277)$$

Сравнивая уравнения (271) и (277), получаем

$$\Delta t_{cp} = \frac{(t_1' - t_2') - (t_1'' - t_2'')}{\ln \frac{t_1' - t_2'}{t_1'' - t_2''}} = \frac{\Delta' - \Delta''}{\ln \frac{\Delta'}{\Delta''}}. \quad (278)$$

При прямотоке (фиг. 36) $\Delta' = \Delta_{\max}$, а $\Delta'' = \Delta_{\min}$, следовательно,

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta_{\max} - \Delta_{\min}}{\ln \frac{\Delta_{\max}}{\Delta_{\min}}}. \quad (278)$$

Если Δ'' мало отличается от Δ' ($\frac{\Delta_{\min}}{\Delta_{\max}} > 0,9$), то приближенно можно принять, что

$$\Delta t_{cp} \approx \frac{\Delta' + \Delta''}{2}. \quad (279)$$

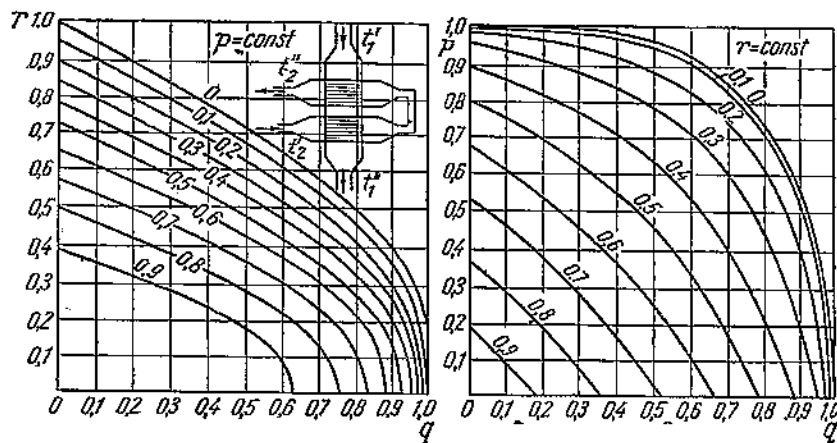
Значение средней температурной разности по уравнениям (277) и (278) называется средней логарифмической разностью температур, а по уравнению (279) — средней арифметической разностью температур.

Формулы (278) и (279) действительны для противотока и параллельного тока как при переменных, так и при постоянных температурах греющего и нагреваемого тел.

Для простого и комбинированного перекрестных токов при переменных температурах обоих тел необходимо проводить интегрирование по двум направлениям поверхности нагрева, вследствие чего решение получается значительно более сложным.

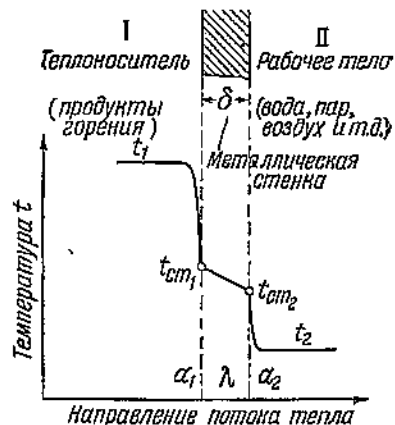
Формулу (278) можно преобразовать следующим образом:

$$\Delta t_{cp} = \Delta_{\max} \frac{1 - \frac{\Delta_{\min}}{\Delta_{\max}}}{\ln \frac{1}{\frac{\Delta_{\min}}{\Delta_{\max}}}} = \Delta_{\max} \cdot f \left(\frac{\Delta_{\min}}{\Delta_{\max}} \right). \quad (280)$$

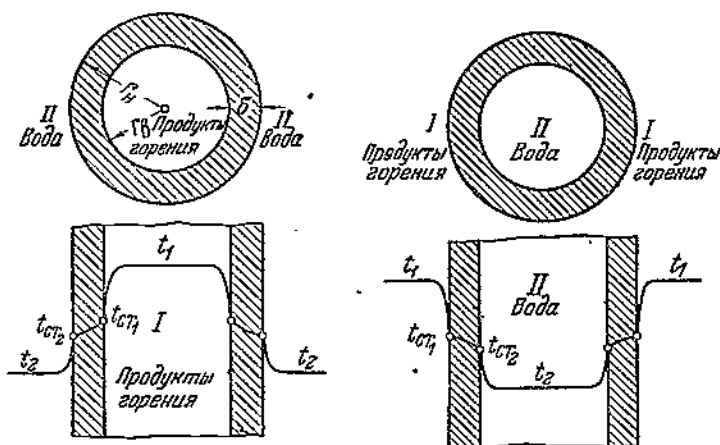


Фиг. 39. Диаграмма $r = f(q)$ при $p = \text{const}$ по Смитту.

Фиг. 40. Диаграмма $p = f(q)$ при $r = \text{const}$ по Смитту.



Фиг. 41. Теплопередача через плоскую стенку.



Фиг. 42. Теплопередача через стенку цилиндрической трубы, обогреваемой изнутри (жаровые и дымогарные трубы, трубы воздухоподогревателя).

Фиг. 43. Теплопередача через стенку цилиндрической трубы, обогреваемой снаружи (кислительные трубы, экраны, змеевики пароперегревателя, водяного экономайзера и т. п.).

Величина $f\left(\frac{\Delta t_{\min}}{\Delta t_{\max}}\right)$ не зависит от абсолютной величины температур и может быть определена по табл. 31.

Таблица 31

Значения функции $f\left(\frac{\Delta t_{\min}}{\Delta t_{\max}}\right)$ в уравнении (280)

$\frac{\Delta t_{\min}}{\Delta t_{\max}}$	$f\left(\frac{\Delta t_{\min}}{\Delta t_{\max}}\right)$	$\frac{\Delta t_{\min}}{\Delta t_{\max}}$	$f\left(\frac{\Delta t_{\min}}{\Delta t_{\max}}\right)$	$\frac{\Delta t_{\min}}{\Delta t_{\max}}$	$f\left(\frac{\Delta t_{\min}}{\Delta t_{\max}}\right)$	$\frac{\Delta t_{\min}}{\Delta t_{\max}}$	$f\left(\frac{\Delta t_{\min}}{\Delta t_{\max}}\right)$
0,05	0,317	0,30	0,581	0,55	0,753	0,80	0,896
0,10	0,391	0,35	0,619	0,60	0,783	0,85	0,923
0,15	0,448	0,40	0,655	0,65	0,812	0,90	0,949
0,20	0,497	0,45	0,689	0,70	0,841	0,95	0,975
0,25	0,541	0,50	0,721	0,75	0,869	1,00	1,00

Для определения средней разности температур при простом и комбинированном поперечном токе применяются формулы и диаграммы Смита.

Для определения Δt_{cp} Смитом, введены вспомогательные величины:

$$p = \frac{t_1' - t_2''}{t_1' - t_2}, \quad q = \frac{t_2'' - t_2}{t_1' - t_2}, \quad r = \frac{\Delta t_{cp}}{t_1' - t_2}. \quad (281)$$

Одна из упомянутых диаграмм Смита для комбинированного противотока с поперечным током содержит семейство кривых p при координатной системе r и q (фиг. 39). Другая же диаграмма содержит семейство кривых r при координатной системе p и q (фиг. 40).

Для нахождения Δt_{cp} достаточно одной диаграммы, но на каждой из них имеется такая область, в которой нельзя сделать точного отсчета, и тогда необходимо воспользоваться другой диаграммой, так как области неточных отсчетов на обеих диаграммах не совпадают.

Для противотока с поперечным током по Смитту

$$r = \frac{q}{2 \ln \frac{1}{1 - \frac{q}{p} \ln \sqrt{\frac{1-q}{1-p} \frac{q}{p}}}}. \quad (282)$$

30. Коэффициент теплопередачи и коэффициент теплоотдачи

Одной из главных величин, входящих в основное уравнение теплопередачи соприкосновением (271), является коэффициент теплопередачи k . Эта величина является функцией нескольких коэффициентов: коэффициента теплоотдачи от газов к стенке, коэффициента теплопроводности отдельных слоев стенки (а также их толщины) и коэффициента теплоотдачи от стенки к нагреваемому телу.

Следует различать три случая теплопередачи соприкосновением в зависимости от геометрической формы поверхности нагрева:

а) поверхность нагрева представляет собой плоскую стенку или кривую поверхность большого по сравнению с толщиной радиуса кривизны, так что практически ее можно принимать за плоскую (фиг. 41);

б) поверхность нагрева имеет вид цилиндрической трубы небольшого диаметра, причем передача тепла идет изнутри наружу (фиг. 42);

в) поверхность нагрева имеет вид цилиндрической трубы небольшого диаметра, но передача тепла совершается снаружи внутрь (фиг. 43).

При внешнем обогреве трубчатой поверхности нагрева коэффициент теплопередачи принимает различные значения в зависимости от направления потока греющего тела.

Различают продольное, иначе называемое осевым, поперечное омывание труб и омывание их под некоторым углом к их оси (фиг. 58).

Плоская поверхность нагрева. На фиг. 41 представлен случай, когда теплопередача соприкосновением осуществляется через плоскую металлическую стенку, которая разделяет греющее тело от нагреваемого. В случае парового котла греющим телом являются нагретые продукты горения, а нагреваемым — вода, водяной пар и воздух, а иногда газообразное топливо. Стенка представляет собой поверхность нагрева размером H м². Если толщина металлической стенки равна δ м, температура греющего тела t_1 , температура стенки со стороны греющего тела t_{cm1} , температура нагреваемого тела и стенки с его стороны соответственно t_2 и t_{cm2} , то согласно теории теплопередачи количество тепла, переданного через поверхность нагрева в час, можно выразить следующим образом:

$$Q = \alpha_1 \cdot H (t_1 - t_{cm1}) = \frac{H}{\delta} (t_{cm1} - t_{cm2}) = \\ = \alpha_2 \cdot H (t_{cm2} - t_2) = k \cdot H (t_1 - t_2). \quad (283)$$

Здесь кроме указанных обозначений:

α_1 ккал/м² час °С — коэффициент теплоотдачи от греющего тела к металлической стенке.

α_2 ккал/м² час °С — то же от поверхности нагрева к нагреваемому телу;

λ ккал/м час °С — коэффициент теплопроводности материала поверхности нагрева.

Из формулы (283) легко получается следующее соотношение между коэффициентами k , α_1 , α_2 , λ :

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta}{\lambda} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \left(\frac{\lambda}{\delta}\right). \quad (284)$$

Если бы разделительная стенка состояла из нескольких слоев различного материала, приме-

ром чего в паровых котлах является металлическая стенка поверхности нагрева (один слой) и загрязняющие ее во время работы накипь, а также зола, сажа и шлак (второй и третий слой), то формула (284) приняла бы такой вид:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{\delta_n}{\lambda_n} + \frac{\delta_{on}}{\lambda_{on}} = \\ = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{1}{\frac{\lambda}{\delta}} + \frac{1}{\frac{\lambda_n}{\delta_n}} + \frac{1}{\frac{\lambda_{on}}{\delta_{on}}}. \quad (285)$$

Здесь δ , δ_n , δ_{on} — толщина в м соответственно металлической стенки, наружного и внутреннего загрязняющих ее слоев;

λ , λ_n , λ_{on} — теплопроводность тех же слоев.

В общем случае при наличии n слоев формула (285) принимает следующий вид:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{\frac{\lambda_i}{\delta_i}}. \quad (286)$$

На фиг. 41 изображена диаграмма постепенного падения температур по ходу теплового потока в случае чистой плоской стенки.

Цилиндрическая поверхность нагрева. На фиг. 42 и 43 нанесены диаграммы падения температур по направлению теплового потока для случаев, когда греющие газы протекают внутри и снаружи трубы.

Для обоих этих случаев количество тепла, передаваемого через металлическую стенку, можно подсчитать по приведенной ниже формуле, вывод которой дается в теории теплопередачи:

$$Q_n = \frac{\lambda}{\ln \left(\frac{r_n}{r_a} \right)} \cdot 2\pi (t_{cm1} - t_{cm2}) \text{ ккал/м час.} \quad (287)$$

Здесь Q_n ккал/м час — количество тепла, передаваемого в час через поверхность трубы, соответствующую 1 пог. м ее длины;

r_n и r_a м — наружный и внутренний радиусы трубы.

Как видно из диаграмм фиг. 42 и 43, падение температуры в пределах металлической стенки в случае трубы происходит не по прямой, а по кривой. Поэтому выражение для определения коэффициента k принимает более сложный вид. Значения этого коэффициента зависят от того, относят ли его к внутренней или наружной поверхности трубы. Зависимость между коэффициентом теплопередачи и коэффициентами теплоотдачи получает при этом следующий вид:

$$\frac{1}{k_n \cdot r_n} = \frac{1}{k_a \cdot r_a} = \frac{1}{\alpha_1 \cdot r_n} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\ln \left(\frac{r_n}{r_a} \right)}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot r_a}, \quad (288)$$

Таблица 32
Теплопроводность различных материалов

Материал	Значения коэффициента теплопроводности λ в ккал/м час °С при температуре			
	100°	300°	600°	700°
Углеродистая сталь с содержанием угле- рода:				
0,1%	47	43	32	—
0,2%	45	40	32	—
0,3%	36	32	25	—
0,6%	36	35	29	—
1,0%	38	35	32	—
1,5%	32	41	29	—
Слаболегированные мо- либденовые и хромо- молибденовые стали .	34	29	22	—
Сталь ЭЯ1-Т	13,4	16,7	20,3	21,3
„ ЭИ-107	15,8	18,7	21,2	21,9
„ ЭИ-69	13,3	15,6	18,2	18,9
	Объем- ный вес кг/м³	Пределы темпера- туры °С	Тепло- провод- ность	
Разные материалы				
1. Асбест	580	0—40	0,13—0,142	
2. Асбестовый картон .	1920	20	0,64	
3. Асбест листовой . .	890	50	0,143	
4. Диатомит порошко- образный	290	40—430	0,058—0,101	
5. Кирпич глинозем- ный	2720	500—1100	1,79 —3,0	
6. Кирпич из огнеупор- ной глины	1840	500—1100	0,90 —0,94	
7. Кладка строительного кирпича	—	20	0,6	
8. Кирпич диатомито- вый	440—680	200—870	0,012—0,283	
9. Кирпич шамотовый .	—	500—1400	0,86 —1,52	
10. Кирпич магнезито- вый	2530	240—1200	1,6 —3,3	
11. Медь	—	0—600	300—340	
12. Накипь	—	—	0,07 —3,0	
13. Сажа и зола	—	—	0,06 —0,1	
14. Сланец	—	90	1,28	
15. Уголь:				
а) газовый	—	0—100	3,0	
б) древесный	190—240	80	0,064—0,076	
в) кокс пылевидный .	—	0—100	0,16	
16. Шлаковая шерсть .	192	30	0,33	

где k_n $\text{ккал/м}^2 \text{ час } ^\circ\text{C}$ — коэффициент теплопередачи, отнесенный к наружной поверхности трубы; k_s — то же к внутренней ее поверхности.

Пользуясь формулой (288) применительно к котельным установкам, можно ввиду значительной величины коэффициента λ для металла от-

бросить член $\sum_{i=1}^{i=n} \frac{\ln\left(\frac{r_{i+1}}{r_i}\right)}{\lambda_i}$ при условии чистоты

металлических стенок. В этом случае решающее влияние на величину k оказывает величина α_1 ввиду ее малости, также и по сравнению с α_2 .

В табл. 32 приведены значения коэффициента теплопроводности λ для некоторых металлов, накипи и других отложений, загрязняющих поверхности нагрева.

Экспериментальное и теоретическое изучение теплопередачи облегчается теорией подобия¹.

Теория подобия. Если два или несколько явлений или систем обладают постоянным отношением характеризующих их величин, то они называются подобными. Подобие явлений и систем может существовать лишь тогда, когда помимо их геометрического подобия некоторые величины, носящие название инвариантов или критериев подобия, имеют в них одинаковое численное значение. Так, например, для механического подобия систем необходимо, чтобы для сходственных точек этих систем существовало установившееся Ньютоном соотношение

$$\frac{f_1 \cdot l_1}{m \cdot w_1^2} = \frac{f_2 \cdot l_2}{m \cdot w_2^2} = \dots = \frac{f_i \cdot l_i}{m_i \cdot w_i^2} = \dots = \frac{f_n \cdot l_n}{m_n \cdot w_n^2} = Ne = \text{const.} \quad (290)$$

Это выражение, носящее название критерия Ньютона, означает, что если в геометрически подобных системах, состоящих из движущихся тел, отношение механической работы к кинетической энергии во всех сходственных точках этих систем остается постоянным, то такие системы подобны.

Применение критерия подобия Ньютона к потокам жидкости и газа дает как частный случай необходимость постоянства критерия Эйлера:

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho w^2} = \text{const.} \quad (291)$$

Критерий Ньютона, примененный к силе тяжести, действующей на поток жидкости, приводит к критерию Фруда:

$$Fr = \frac{w^2}{gl}. \quad (292)$$

Для подъемной силы, действующей в потоках нагретых газов, этот критерий принимает вид критерия Архимеда:

$$Ar = \frac{w^2}{g \left(\frac{\rho_0 - \rho}{\rho} \right) \cdot l}, \quad (293)$$

где ρ_0 — плотность остывших газов;

¹ М. В. Кирпичев и М. А. Михеев, Моделирование тепловых установок, 1936.

ρ — плотность горячих газов.
К потокам жидкости применяется еще критерий Рейнольдса, связанный с силой трения,

$$Re = \frac{w \cdot l}{\nu}, \quad (294)$$

который очень важен для изучения законов движения и теплопередачи.

При тепловом подобии в области теплообмена обычно принимают, что этот теплообмен стационарен, т. е. что температурное поле газа и поверхностей нагрева не меняется с течением времени. Для теплового подобия необходимо, чтобы температурные поля и теплообмен были подобны. Два аппарата с подобными теплообменами прежде всего должны быть геометрически подобными; далее, необходимо гидравлическое подобие потоков жидкостей и газов, протекающих через аппараты.

Но кроме критериев, обуславливающих механическое подобие, здесь должны соблюдаться еще критерии, характеризующие теплообмен внутри жидкости или газа и между ними и поверхностью нагрева. Подобие теплообмена внутри участвующего в этом процессе рабочего тела определяется критерием Пекле:

$$Pe = \frac{w \cdot l}{a}. \quad (295)$$

Здесь

$$a = \frac{\lambda}{c\rho} \quad (296)$$

называется температуропроводностью.

Подобие же процесса теплообмена между стенкой и рабочим телом связано с критерием Нуссельта

$$Nu = \frac{a \cdot l}{\lambda}. \quad (297)$$

Из двух критериев Re и Pe можно составить критерий Прандтля:

$$Pr = \frac{\nu}{a} = Pe : Re. \quad (298)$$

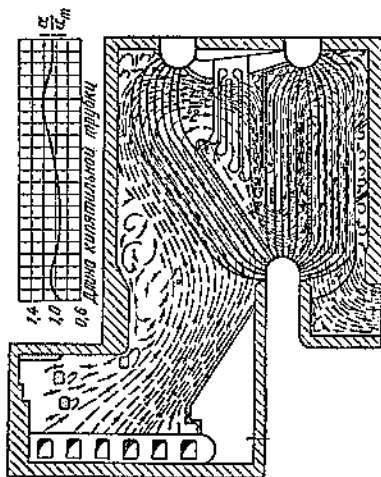
Этим критерием часто заменяют критерий Пекле.

Таким образом в случае подобия теплообмена конвекцией имеется пять инвариантов: критерии Re , Fr , Eu , Pr и Nu .

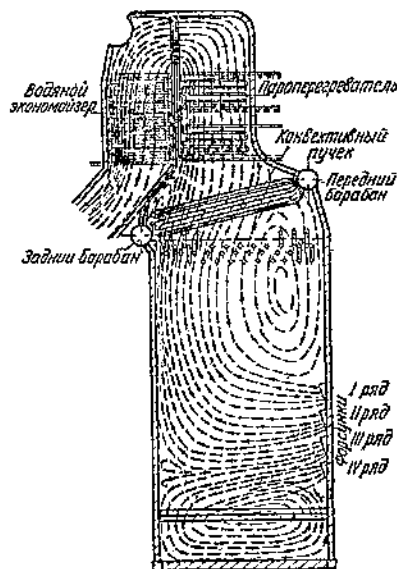
При построении модели теплопередачи соприкосновением какого-либо теплового аппарата инвариантность этих критериев налагает ряд ограничений. Эти ограничения и определяют условия построения модели. Так как температура не входит в пять указанных критериев, то, следовательно, численное отношение между температурой модели и образца может быть выбрано произвольно.

Основная теорема теории подобия гласит: подобные явления имеют одинаковые критерии. Пользуясь законами теории подобия, можно изучение рабочих аппаратов и устройств в целом выполнить на уменьшенной модели, подвергнув последнюю при удобных температурах рабочего вещества всестороннему изучению в лабораторной обстановке.

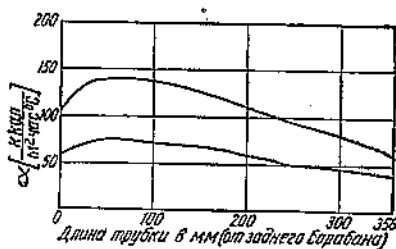
При соблюдении известных условий можно в уменьшенной по размерам копии какого-либо теплового устройства, в котором движется другая жидкость (чаще всего вода вместо газа и воздуха), получить полное или приближенное подобие картины движения жидко-



Фиг. 44. Картина движения газов в котле и кривая изменения коэффициента теплоотдачи по длине труб в первом пучке.



Фиг. 45. Картина движения газов в котле ЦКТИ на 240—300 т/час.



Фиг. 46. Изменение коэффициента теплоотдачи по длине второго пучка труб в котле по фиг. 45.

сти или газа по каналам. Точно так же, исследуя по этому методу теплоотдачу отдельного участка одной или нескольких труб котла при соблюдении правил теплового подобия, можно получить коэффициенты теплопередачи, которые распространить непосредственно на котел.

Это обстоятельство делает метод моделирования чрезвычайно ценным для промышленности. На фиг. 44, 45 и 46 даны примеры результатов, полученных путем применения теории подобия и моделирования к изучению теплопередачи в ларовых котлах.

На фиг. 44 показана картина движения газов и изменения коэффициента теплопередачи по длине трубы в первом газоходе трехбарабанного котла, установленного на одной из наших ГЭС. Ясно видна картина омывания, а значит, и теплопередачи во всех элементах котельного агрегата.

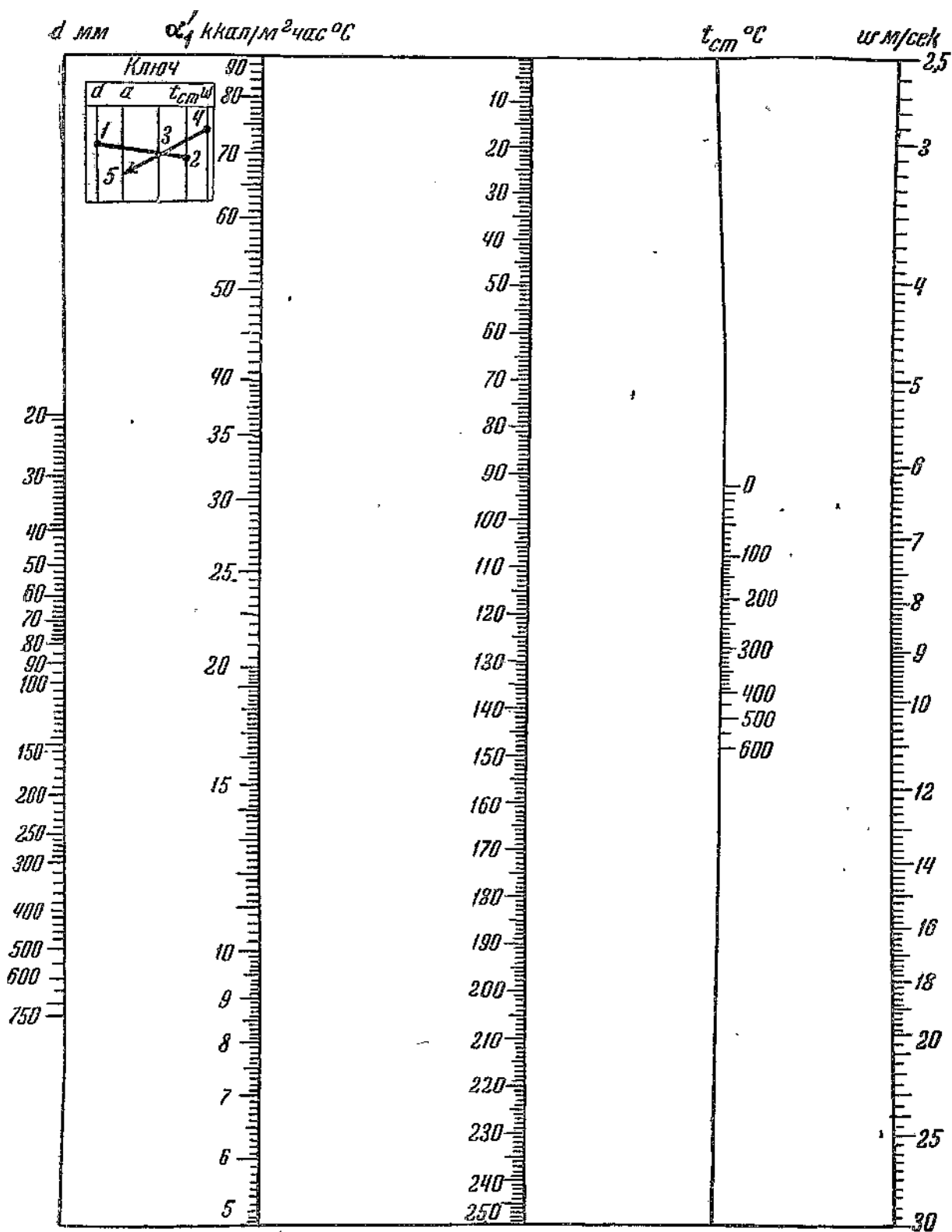
На фиг. 45 и 46 показаны направление потоков газов и изменение коэффициента теплопередачи вдоль трубки, полученные по методу моделирования на котле 240—300 т/час, который был запроектирован ЦКТИ в 1936 г.

31. Коэффициент теплоотдачи соприкосновением от дымовых газов к металлической стенке

Продольное омывание. Величины α зависят прежде всего от рода и свойств греющих и нагреваемых веществ, а также от скорости и направления потоков.

Влияние рода теплоносителя, скорости потока и размера канала на величину α определяется безразмерным критерием — числом Рейнольдса:

$$Re = \frac{w \cdot d}{\nu},$$



Фиг. 47. Номограмма для определения коэффициента теплоотдачи α_1 ккал/м² час °С при продольном омывании поверхности нагрева в зависимости от эквивалентного диаметра поперечного сечения потока газов d , мм, температуры стенки $t_{ст}$ °С и скорости потока w м/сек. Для нахождения действительного значения α_1 необходимо помножить α_1' на коэффициент K_m по фиг. 48.

где w м/сек — скорость потока жидкости или газа;

d м — характерный линейный размер поперечного сечения канала, по которому течет газ;

ν м²/сек — кинематическая вязкость движущегося вещества.

Если $Re < 2100$, то внутри канала устанавливается ламинарное движение, т. е. струи газа или пара текут параллельно, не смешиваясь между собой. При $Re > 3100$ движение будет турбулентным. В этом случае кроме продольного перемещения газа или жидкости имеется и поперечное их движение. В пределах $2100 < Re < 3100$ движение имеет переходный характер между ламинарным и турбулентным. При общем турбулентном движении потока газов, как обычно и происходит в котельных агрегатах, все же сохраняется ламинарное движение в тонкой пленке газа у стенки. Эта пленка носит название пограничного слоя.

При турбулентном движении перенос тепла в пределах потока газов или жидкости совершается быстрее. Этот вид движения более благоприятен для теплопередачи.

Когда греющий газ течет внутри трубки, коэффициент теплоотдачи α_1 от газа к стенке может быть найден по следующей формуле Крауссоляда:

$$Nu = 0,024 Re^{0,8} Pr^m. \quad (299)$$

Для газов, где происходит охлаждение текучей среды (газов), показатель степени $m = 0,3$.

Значение критерия Pr для газов и воздуха может быть принято постоянным и равным 0,71, после чего из формулы (299) получается

$$\alpha_1' = 0,022 w^{0,8} d^{-0,2} \lambda_{cp} \nu^{-0,8}. \quad (300)$$

После отнесения всех констант газа вместо температуры потока газов к средней температуре стенки трубы и введения поправочного температурного коэффициента получается

$$\alpha_1 = 0,022 w^{0,8} d^{-0,2} (\lambda_{cp} \nu^{-0,8})_{ст} \left(\frac{T_{ст}}{T_{ном}} \right)^{0,417}. \quad (301)$$

По формуле (300), но с отнесением констант газа к температуре стенки, построена номограмма фиг. 47, в которой дается зависимость $\alpha_1' = f(w, d, t_{ст})$. На фиг. 48 даны значения поправочного коэффициента для пересчета α_1' .

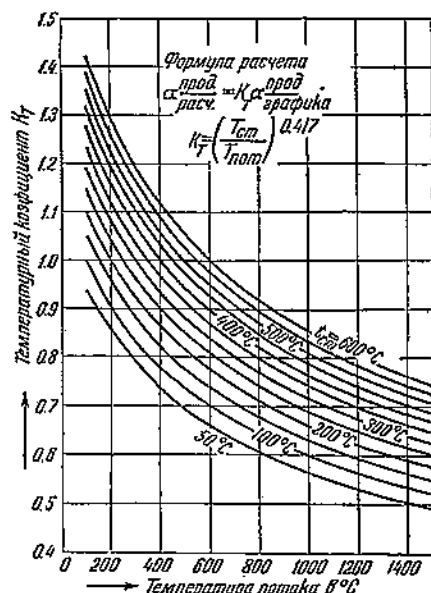
Температура потока определяется по формуле

$$T_{ном} = T_{ст} + \Delta t_{ст}, \quad (302)$$

где $T_{ст}$ °К — температура обогреваемого тела.

Объем газов для определения скорости берут при $T_{ном}$ в °К.

В пластинчатых воздухоподогревателях, где воздух и газ протекают по каналам с очень узким и длинным сечением, формула Крауссоляда в области,



Фиг. 48. Диаграмма для нахождения поправочного коэффициента K_m при продольном омывании газами поверхности нагрева.

где $Re \leq 18000$, дает преувеличенные значения α и требует поправки. Эта поправка вводится при помощи предложенного ЦКТИ графика (см. фиг. 55), дающего зависимость критерия Nu от Re для области, перекрывающей отмеченный выше предел значений Re .

Кривая 1 на фиг. 55 относится к воздухоподогревателю типа Ротатор, а кривая 2 — к воздухоподогревателю типа Ж без воздушных перепускных колпаков. Последней кривой можно пользоваться для расчета теплообмена только в воздушных каналах.

В случае продольного омывания каналов некруглого сечения, как это имеет место в пластинчатых воздухоподогревателях, применяются те же формулы, что и для круглого сечения, но при этом диаметр трубы d в формулах заменяется эквивалентным диаметром, который определяется из выражений

$$d_e = \frac{4F}{U}, \quad (303)$$

где F м² — площадь сечения, по которому протекает газ;

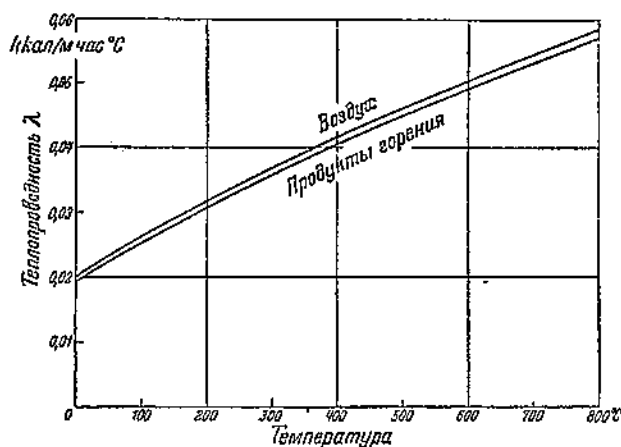
U м — периметр омываемых газами труб.

При пластинчатом воздухоподогревателе эквивалентный диаметр равен

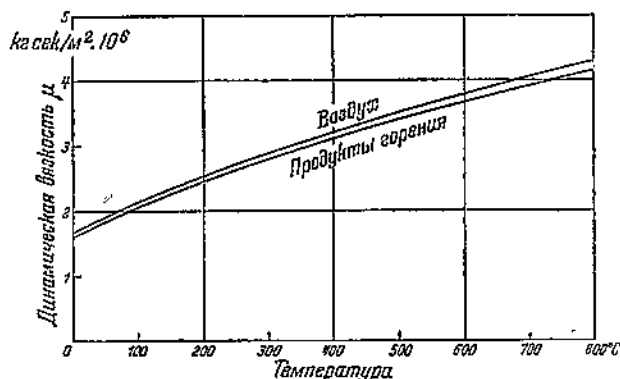
$$d_e = \frac{4ab}{2(a+b)} \approx 2b \quad (304)$$

ввиду малости периметра ширины кармана b по сравнению с его длиной a .

Поперечное омывание. В котельных агрегатах приходится часто иметь дело с омыванием газами пучков труб, когда газ протекает вне труб пер-



Фиг. 49. Зависимость теплопроводности от температуры для воздуха и продуктов горения среднего состава.



Фиг. 50. Зависимость динамической вязкости от температуры для воздуха и продуктов горения среднего состава.

пендикулярно к оси пучка. Существует два основных способа расположения труб в пучках: шахматное (фиг. 51) и коридорное (фиг. 52). Характерными для пучка являются внешний диаметр труб и шаг между их осями: s_1 перпендикулярно к направлению движения газов и s_2 — по направлению их движения. Обычно пучок характеризуется способом расположения труб и двумя отношениями

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{d} \text{ и } \sigma_2 = \frac{s_2}{d}, \quad (305)$$

где d — наружный диаметр труб.

Величина этих отношений на практике колеблется чаще всего в пределах 1,25—2,0, но иногда достигает меньших значений в пучках с густо расположенными трубами и больших в разреженных или фестонированных пучках. Для выяснения величин и закономерностей, которым подчиняются коэффициенты теплоотдачи в таких пучках труб, в разное время было выполнено значительное количество исследований. Для коэффициента теплоотдачи все исследования в этой области дают следующую общую зависимость

$$Nu = C(Re)^n, \quad (306)$$

где Nu — безразмерный критерий:

$$Nu = \frac{\alpha_1 \cdot d}{\lambda},$$

откуда

$$\alpha_1 = C \frac{\lambda}{d} \left(\frac{w d \rho}{\mu} \right)^n. \quad (307)$$

Здесь d м — наружный диаметр трубы;

$w = w_{\max}$ м/сек — скорость в самом узком сечении пучка труб;

ρ кг сек³/м³ — плотность газа;

μ кг сек/м² — динамическая вязкость газа;

λ ккал/м час °С — теплопроводность газов.

В случае воздухоподогревателя или газоподогревателя приходится находить λ и μ для продуктов горения, воздуха и газообразного топлива. При предварительных ориентировочных подсчетах эти значения для воздуха и продуктов горения среднего состава можно находить по диаграммам фиг. 49 и 50. Обе эти величины не зависят от давления, а лишь от температуры.

Значения коэффициентов C и n определялись как у нас, так и за границей экспериментальным путем.

В СССР в 1936 г. выполнено два больших исследования, при которых определялся коэффициент теплоотдачи пучка труб при поперечном их омывании. Одно исследование проведено в ЦКТИ Антufьевым и Казаченко, другое — в ВТИ Кузнецовым и Локиным. До опубликования результатов этих работ у нас пользовались данными Райера.

Исследования ЦКТИ производились над трубами двух диаметров: 0,038 и 0,060 м, и охватили нормальные пучки в пределах $\sigma_1 = \frac{s_1}{d} = 1,25 \div 4,5$; $\sigma_2 = \frac{s_2}{d} = 1,08 \div 3,75$ при шахматном и $\sigma_1 = \frac{s_1}{d} = 1,25 \div 2,0$;

$\sigma_2 = \frac{s_2}{d} = 1,25 \div 3,75$ при коридорном расположении труб. Пучки содержали последовательно один, два, три, пять, семь, восемь и девять рядов труб. Авторы этой работы вычисляют входящие в формулы для определения коэффициента теплоотдачи α_1 величины λ , ρ , μ при средней температуре металлической стенки, а не пограничного слоя; скорость же газов w_g вычисляют, принимая объем газов соответственно средней их температуре и относя этот объем к самому узкому сечению между трубами.

При числе рядов в пучке больше семи с достаточной для практики точностью можно пользоваться следующими приближенными формулами:

$$\alpha_1 = 0,18 \left(\frac{s_1}{d} \right)^{0,25} \cdot \frac{\lambda}{\alpha} \left(\frac{w \cdot d \cdot \rho}{\mu} \right)^{0,61} \quad (308)$$

при шахматном и

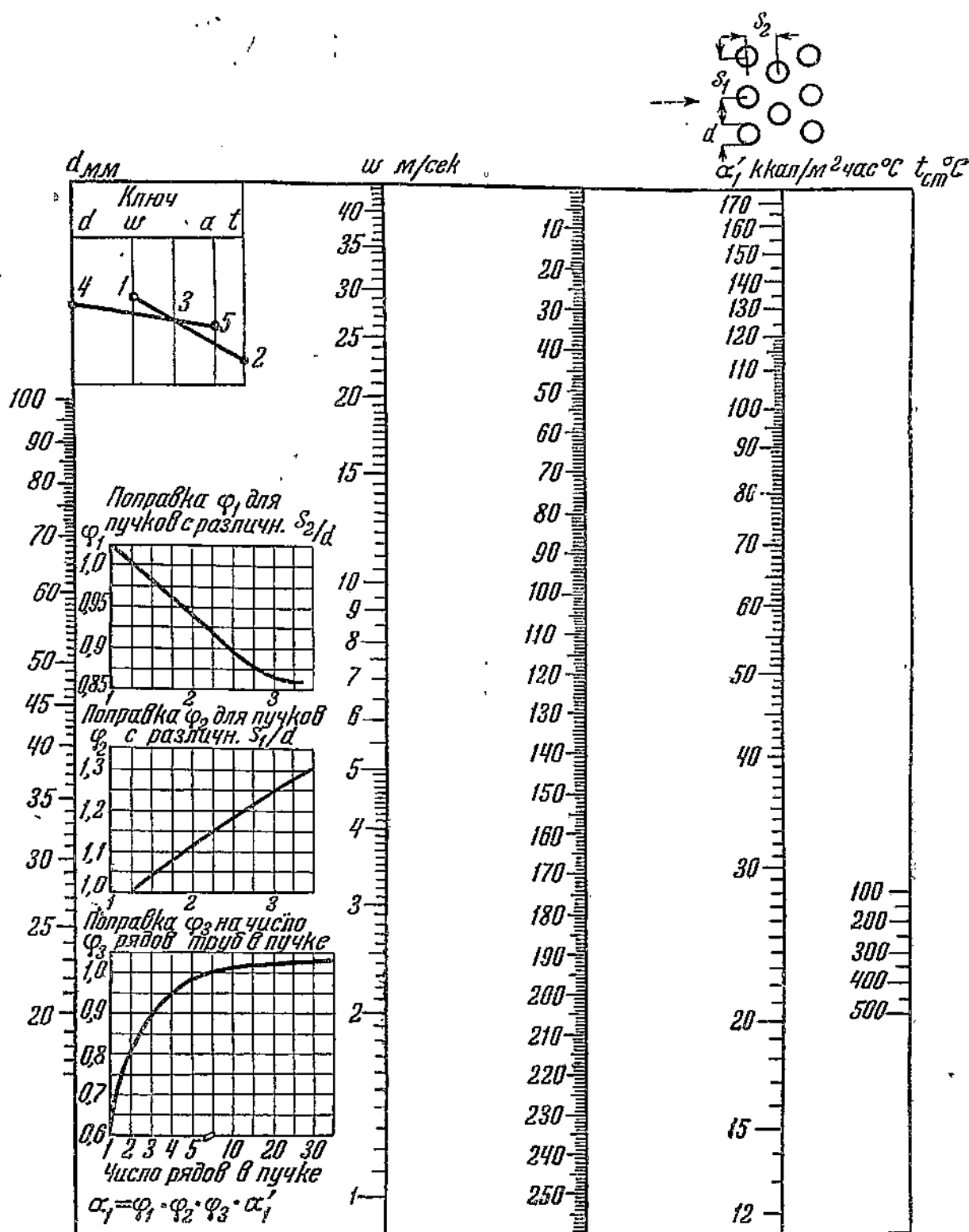
$$\alpha_1 = C \frac{\lambda}{d} \left(\frac{w \cdot d \cdot \rho}{\mu} \right)^n \quad (309)$$

при коридорном расположении труб в пучке,

Формула (308) применима при следующих условиях:

$$8\,000 < Re < 70\,000;$$

$$1,25 < \frac{s_1}{d} < 4,5; \quad 1,25 < \frac{s_2}{d} < 3.$$



Фиг. 51. Номограмма для определения коэффициента теплоотдачи соприкосновением α_1' $\text{kcal/m}^2 \text{ час } ^\circ\text{C}$ при поперечном омывании шахматного пучка труб в зависимости от скорости потока w м/сек , температуры стенки $t_{ст}$ $^\circ\text{C}$ и диаметра трубы d мм .

Найденные по номограмме значения α_1' необходимо пересчитать с учетом поправок ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 .

Формулой (309) можно пользоваться при условиях:

$$10\,000 < Re < 100\,000;$$

$$1,25 < \frac{s_2}{d} < 3,75,$$

причем в ней

$$C = 0,246 - 0,083 \frac{s_1}{d};$$

$$n = 0,61 \left(\frac{s_1}{d} \right)^{0,2} \quad (310)$$

Для пучков с числом рядов меньше семи и при несоблюдении указанных условий необходимо пользоваться общей формулой (306) и данными табл. 33.

В случае, если пучок состоит лишь из одного ряда, коэффициент теплоотдачи α_1 можно находить по следующей формуле:

$$\alpha_1 = 0,16 \frac{\lambda}{d} \left(\frac{s_1 - 1}{\frac{s_1}{d}} \right)^{0,185} \times \left(\frac{w \cdot d \cdot \rho}{\mu} \right)^{0,6} \quad (311)$$

На основании этих данных и ряда расчетов построены номограммы для определения величины α_1 для шахматного (фиг. 51) и коридорного (фиг. 52) пучков.

При шахматном пучке найденная по номограмме фиг. 51 величина α_1' умножается на три поправочных коэффициента, зависящих от числа рядов труб, а также отношений $\frac{s_1}{d}$

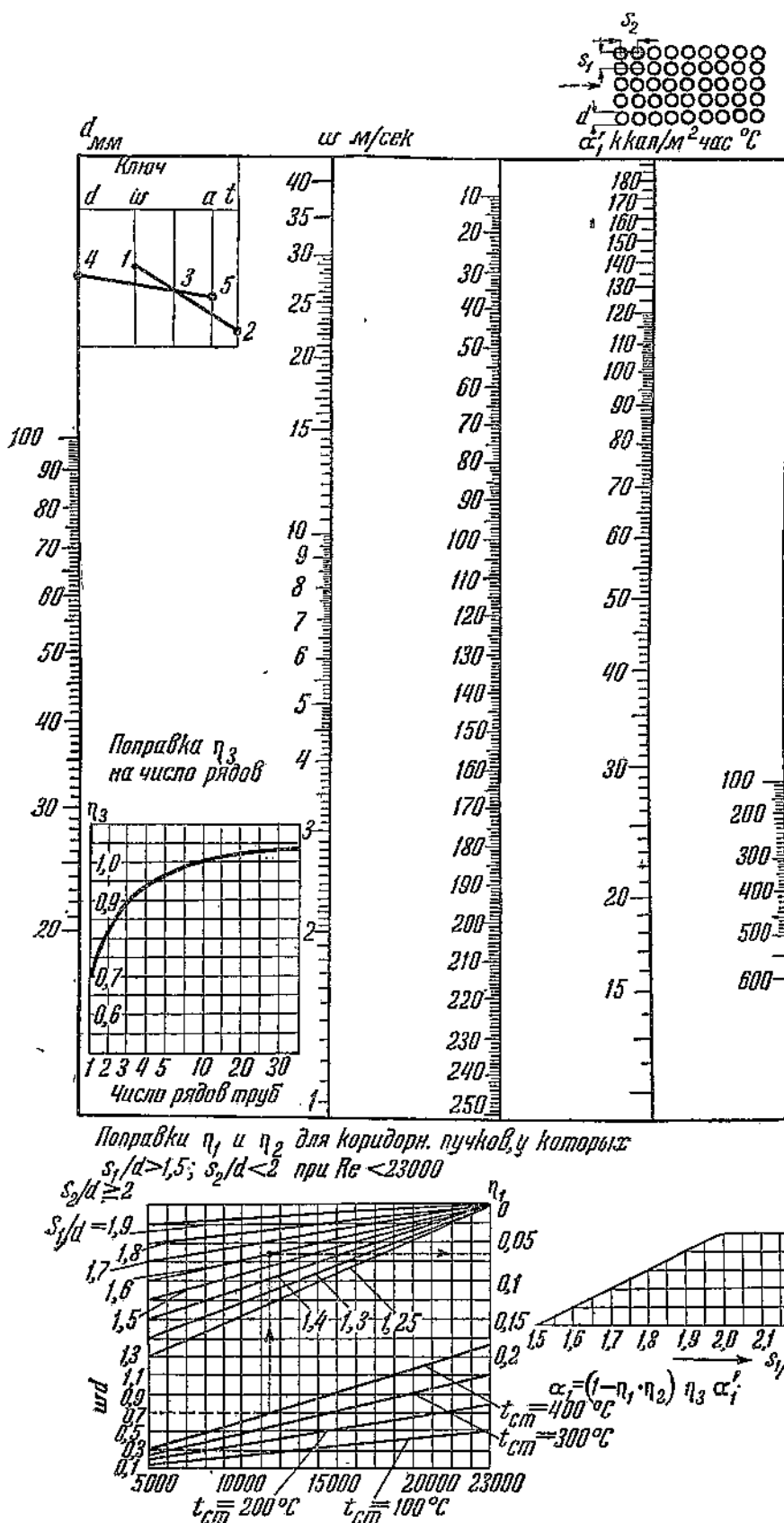
и $\frac{s_2}{d}$. Поправки находят из графиков, помещенных на фиг. 51.

При коридорном пучке величина α_1' , найденная по номограмме, должна быть исправлена по формуле

$$\alpha_1 = (1 - \eta_1 \eta_2) \eta_3 \alpha_1' \quad (312)$$

фиг. 52. Номограмма для определения коэффициента теплоотдачи соприкосновением α_1 ккал/м² час °С при поперечном омывании коридорного пучка труб в зависимости от скорости потока w м/сек, температуры стенки t_{cm} °С и диаметра трубы d мм.

Найденные по номограмме значения α_1' необходимо пересчитать с учетом поправок η_1 , η_2 , η_3 в оговоренных на номограмме случаях.



Поправка, связанная с η_1 и η_2 , вводится лишь в том случае, когда $Re < 23\,000$, а $\frac{s_1}{d} < 2$ и $\frac{s_2}{d} > 1,5$.

Поправка η_3 связана с числом рядов. Величины η_1 , η_2 и η_3 даны отдельно от номограммы на фиг. 52.

В случае комбинированного пучка следует вести расчет отдельно для шахматной и коридорной его частей. При несимметричном пучке и наличии разрывов можно найти средние взвешенные значения $\frac{s_1}{d}$ и $\frac{s_2}{d}$ и тогда уже по этим величинам расчет

вести как для нормального пучка.

В работе Кузнецова и Локишина также исследовалось изменение коэффициента C и показателя n , входящих в формулу (306), по отдельным рядам.

Полученные расчетные формулы в достаточной степени обобщают данные наших и зарубежных исследований.

По данным этих авторов показатель n не зависит от $\frac{s_1}{d}$ и $\frac{s_2}{d}$, и при шахматном расположении труб для

всех рядов, начиная с пятого, $n = 0,60$. Для первых же четырех рядов он может быть в среднем принят равным 0,62. При коридорном расположении труб для первого ряда получилось $n = 0,60$, а для всех остальных $n = 0,65$. Коэффициент C меняется не только по

рядам, но и при изменении $\frac{s_1}{d}$ и $\frac{s_2}{d}$.

На основании этой работы ВТИ предлагает для различных случаев пользоваться величинами n и C , приведенными в табл. 34 и 35.

Среднее значение n и C для всего пучка при равенстве поверхностей нагрева отдельных рядов труб находят как среднее арифметическое из значений этих

Таблица 33

Коэффициенты C и n к формуле $Nu = C(Re)^n$ по Антуфьеву и Козаченко

Характеристики пучка		Коэффициенты	Число рядов в пучке			
$\sigma_1 = \frac{s_1}{d}$	$\sigma_2 = \frac{s_2}{d}$		2	3	5	7 и более

Шахматное расположение труб

1,25	1,08	C	0,287	0,276	0,283	0,283
		n	0,58	0,58	0,58	0,58
1,25	2,5	C	0,173	0,173	0,180	0,185
		n	0,61	0,61	0,61	0,61
1,5	1,25	C	0,164	0,200	0,219	0,227
		n	0,60	0,60	0,60	0,60
2,0	1,25	C	0,097	0,125	0,141	0,147
		n	0,65	0,65	0,65	0,65
2,0	2,0	C	0,163	0,187	0,210	0,218
		n	0,61	0,61	0,61	0,61

Коридорное расположение труб

1,25	1,25	C	0,120	0,135	0,144	0,149
		n	0,635	0,635	0,635	0,635
1,25	2,5	C	0,077	0,084	0,094	0,094
		n	0,685	0,685	0,685	0,685
1,5	1,25	C	0,080	0,096	0,109	0,119
		n	0,660	0,660	0,660	0,660
2,0	1,25	C	—	0,046	0,050	0,050
		n	—	0,74	0,74	0,74
2,0	2,0	C	0,060	0,067	0,069	0,072
		n	0,71	0,71	0,71	0,71

величин для отдельных рядов. Если же поверхности нагрева у отдельных рядов не равны между собой, то средние значения n и C находят по формулам

$$n_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} n_i H_i}{\sum_{i=1}^{i=n} H_i}; \quad C_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} C_i H_i}{\sum_{i=1}^{i=n} H_i}. \quad (313)-(314)$$

Для более быстрого определения величины α_1 ВТИ построена номограмма фиг. 53.

Из примера, приведенного на фиг. 53, ясно виден весь путь получения α_1 по данным w , d , C , n .

При расчетах по методу ВТИ теплопроводность газов λ ккал/м час[°]С и динамическую вязкость их μ кг·сек/м² берут при температуре

$$t = \frac{t_{cm} + t_g}{2}, \quad (315)$$

где t_{cm} °С — температура металлической стенки;

t_g °С — средняя температура газов в пределах рассматриваемого пучка.

Основное отличие данных Антуфьева и Козаченко, с одной стороны, и Кузнецова и Локишина, с другой, заключается в способе отнесения величин λ и μ к температуре стенки или пограничного слоя.

Подогреватели и экономайзеры. Коэффициент теплоотдачи для трубчатого воздухоподогревателя с газовой и с воздушной стороны определяется по графикам фиг. 47, 48, 51 и 52.

Для расчета коэффициента теплоотдачи пластинчатого воздухоподогревателя с воздушной и с газовой стороны служат номограммы фиг. 54, 55, 56 и 48.

По номограмме фиг. 54 находят значение критерия Re , зная d м, w м/сек и t_{cm} °С. После этого график фиг. 55 дает величину критерия Nu . Затем по номограмме фиг. 56 определяется значение α' , которое еще нужно помножить на поправочный коэффициент, взятый из фиг. 48, чтобы получить α_1 .

При расчете ребристого чугунного воздухоподогревателя по графикам фиг. 54 и 55 находят значение Re и Nu , а по фиг. 56 коэффициент теплоотдачи α' с газовой и воздушной стороны. Температуру стенки в этом случае принимают по формуле

$$t_{cm} = \frac{\varphi t_g + t_g}{1 + \varphi}, \quad (316)$$

где

$$\varphi = \frac{H_g}{H_a} \cdot \frac{w_g}{w_a} = 1,71 \frac{w_g}{w_a}. \quad (317)$$

При ребристом чугунном воздухоподогревателе ЦКТИ эквивалентный диаметр для газовой стороны составляет 34,0 мм и для воздушной 35,3 мм.

Для ребристого чугунного экономайзера ЦКБ при скорости газов, изменяющейся в пределах 5—10 м/сек, коэффициент теплопередачи находят по графику фиг. 57.

Таблица 34

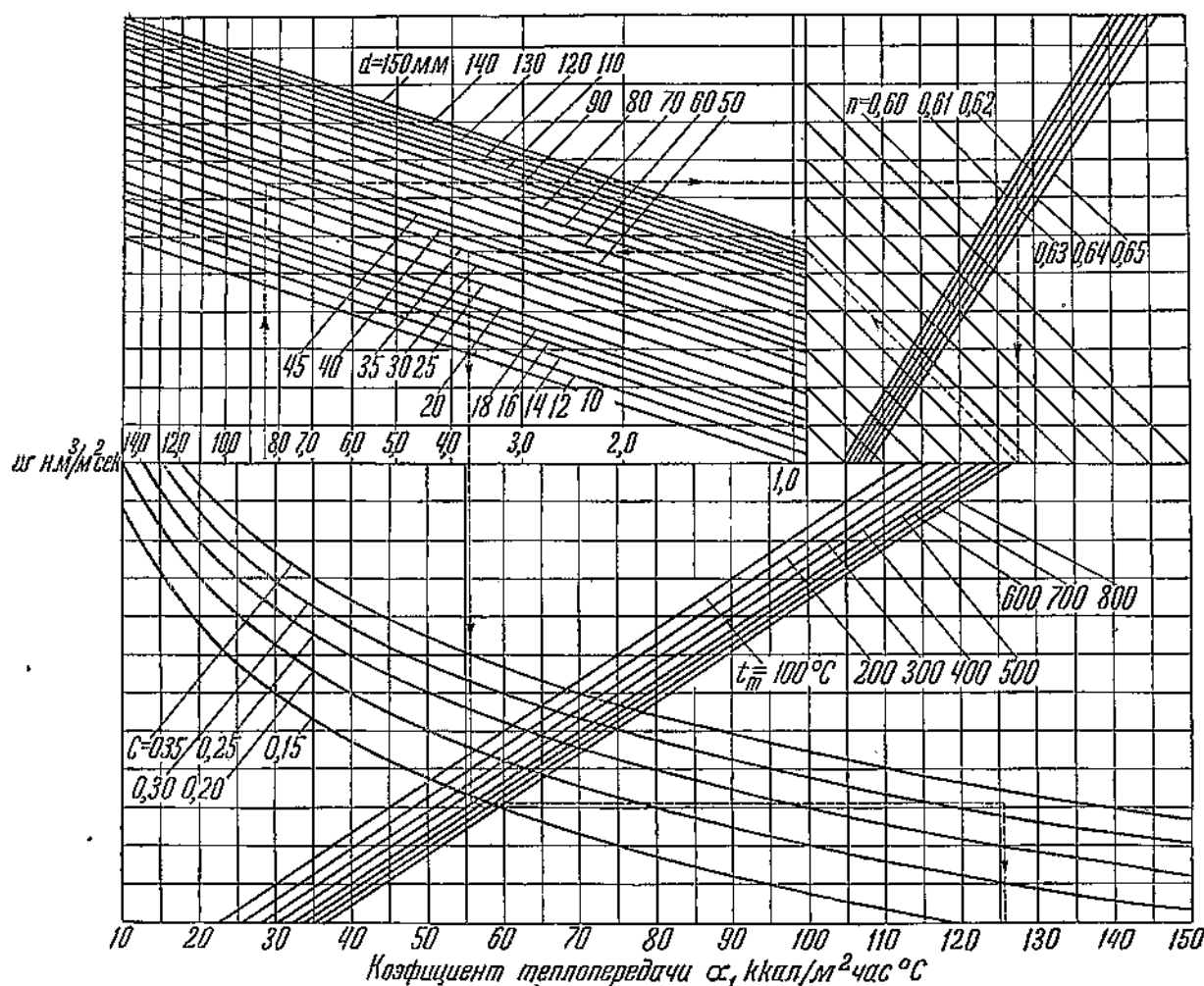
Значения C и n в формуле (307) для шахматного расположения труб по данным Кузнецова и Локшина

Значения $\frac{s_2}{d}$	Для каких рядов	Значения n	Значения $\frac{s_1}{d}$ от — до					
			1,1—1,3	1,3—1,6	1,6—1,9	1,9—2,5	2,5—3,0	3,0—5,0
			Значения C					
от 1,1 до 1,3	Среднее для четырех пер- вых рядов	0,62	0,220	0,205	0,218	0,230	0,240	—
	Для каждого из остальных рядов	0,60	0,315	0,300	0,320	0,340	0,350	—
от 1,3 до 1,6	Среднее для четырех пер- вых рядов	0,62	0,205	0,207	0,215	0,225	0,230	—
	Для каждого из остальных рядов	0,60	0,292	0,295	0,300	0,315	0,335	—
от 1,6 до 2,0	Среднее для четырех пер- вых рядов	0,62	0,202	0,206	0,212	0,218	0,224	—
	Для каждого из остальных рядов	0,60	0,275	0,285	0,295	0,305	0,315	—
от 2,0 до 3,0	Среднее для четырех пер- вых рядов	0,62	0,200	0,205	0,208	0,213	0,218	—
	Для каждого из остальных рядов	0,60	0,260	0,270	0,280	0,290	0,300	—
от 3,0 до 4,0	Среднее для четырех пер- вых рядов	0,62	0,200	0,204	0,206	0,208	0,214	—
	Для каждого из остальных рядов	0,60	0,250	0,265	0,275	0,285	0,305	—
от 4,0 до 5,0	Среднее для четырех пер- вых рядов	—	—	—	—	—	—	0,214
	Для каждого из остальных рядов	—	—	—	—	—	—	0,290

Таблица 35

Значения C и n в формуле (307) для коридорного расположения труб по данным Кузнецова и Локшина

Значения $\frac{s_2}{d}$	Для каких рядов	Значения n	Значения от — до				
			1,2—1,5	1,5—2,0	2,0—2,5	2,5—3,0	3,0—4,0
			Значения C				
от 1,2 до 1,5	Для первого ряда	0,60	0,182	0,188	0,195	0,200	0,206
	„ каждого из остальных рядов	0,65	0,178	0,172	0,169	0,164	0,161
от 1,5 до 2,0	„ первого ряда	0,60	0,177	0,182	0,188	0,190	0,192
	„ каждого из остальных рядов	0,65	0,173	0,170	0,168	0,165	0,162
от 2,0 до 2,5	„ первого ряда	0,60	0,175	0,176	0,179	0,183	0,190
	„ каждого из остальных рядов	0,65	0,169	0,168	0,167	0,166	0,164
от 2,5 до 3,0	„ первого ряда	0,60	0,178	0,183	0,187	0,198	0,200
	„ каждого из остальных рядов	0,65	0,165	0,167	0,170	0,168	0,167
от 3,0 до 4,0	„ первого ряда	0,60	0,180	0,192	0,207	0,217	0,225
	„ каждого из остальных рядов	0,65	0,161	0,165	0,171	0,170	0,169



Фиг. 53. Номограмма ВТИ для определения коэффициента теплоотдачи соприкосновением α_1 в зависимости от скорости газов w , температуры пограничного слоя t , диаметра труб d , коэффициента C и показателя n (последние две — по табл. 34 и 35).

Пример: при $w=8,5$; $d=35$; $t=500^\circ$; $C=0,323$; $n=0,61$ находится $\alpha_1=125,6$.

Омывание плоской стенки. При протекании греющих газов вдоль плоской стенки для расчета теплопередачи соприкосновением можно пользоваться следующей формулой:

$$Nu = 0,0416 (Re)^{0,78} \quad (318)$$

или

$$\alpha = 0,0416 \frac{\lambda}{L} \left(\frac{wL}{\nu} \right)^{0,78}, \quad (319)$$

где L м — длина стенки.

Эта формула получена по экспериментальным данным Юргеса с плитой, длина которой L составляла 0,5 м при низких температурах. Ввиду этого применение ее к длинным стенкам и к высоким температурам возможно лишь с известным приближением.

Омывание труб под углом. Когда газы омывают трубы под некоторым углом β (фиг. 58), можно пользоваться табл. 36 и 37, полученными в результате соответствующих опытов ВТИ и дающими зависимость α от β и Re , причем

$$\alpha = \frac{\alpha_\beta}{\alpha_{90}}. \quad (320)$$

При определении α_{90} скорость газов вычисляют не по действительному сечению газопотока, а по его проекции на плоскость, перпендикулярную к направлению потока газов.

Приведенные в табл. 36 и 37 значения коэффициента изменения теплоотдачи α указывают, что коэффициент теплоотдачи α достигает максимума при угле атаки, отличающемся от 90° , а именно при $\beta \approx 80^\circ$ для шахматного и $\beta \approx 75^\circ$ для коридорного расположения труб. Однако эти максимальные значения коэффициента α превышают его величины при чисто поперечном омывании не более чем на 6%.

Вообще же в пределах изменения угла атаки от 70° до 90° для шахматного и от 60° до 90° для коридорного пучков теплоотдача соприкосновением меняется примерно в пределах $\pm 5\%$. Повидимому, при изменении β от 0° до 15° α меняется тоже незначительно.

Часто встречается такое расположение пучков труб, при котором часть пучка омывается газами вдоль труб, а другая часть — поперек труб. В этом случае прежде всего необходимо найти отдельно α_1 для каждой из этих частей пучка и

затем определить среднюю величину $(\alpha_1)_{cp}$ для всего пучка.

При этом

$$(\alpha_1)_{cp} = \frac{(\alpha_1)_I \cdot H_I + (\alpha_1)_{II} H_{II}}{H_I + H_{II}} \text{ ккал/м}^2 \text{ час}^\circ\text{C}, \quad (321)$$

где $(\alpha_1)_I$ ккал/м² час °C — коэффициент теплоотдачи в той части пучка, которая омывается газами вдоль труб;

$(\alpha_1)_{II}$ ккал/м² час °C — то же для части пучка, которая омывается газами перпендикулярно к трубам;

H_I м² — поверхность нагрева части пучка с продольным омыванием;

H_{II} м² — поверхность нагрева части пучка с поперечным омыванием.

Таблица 36

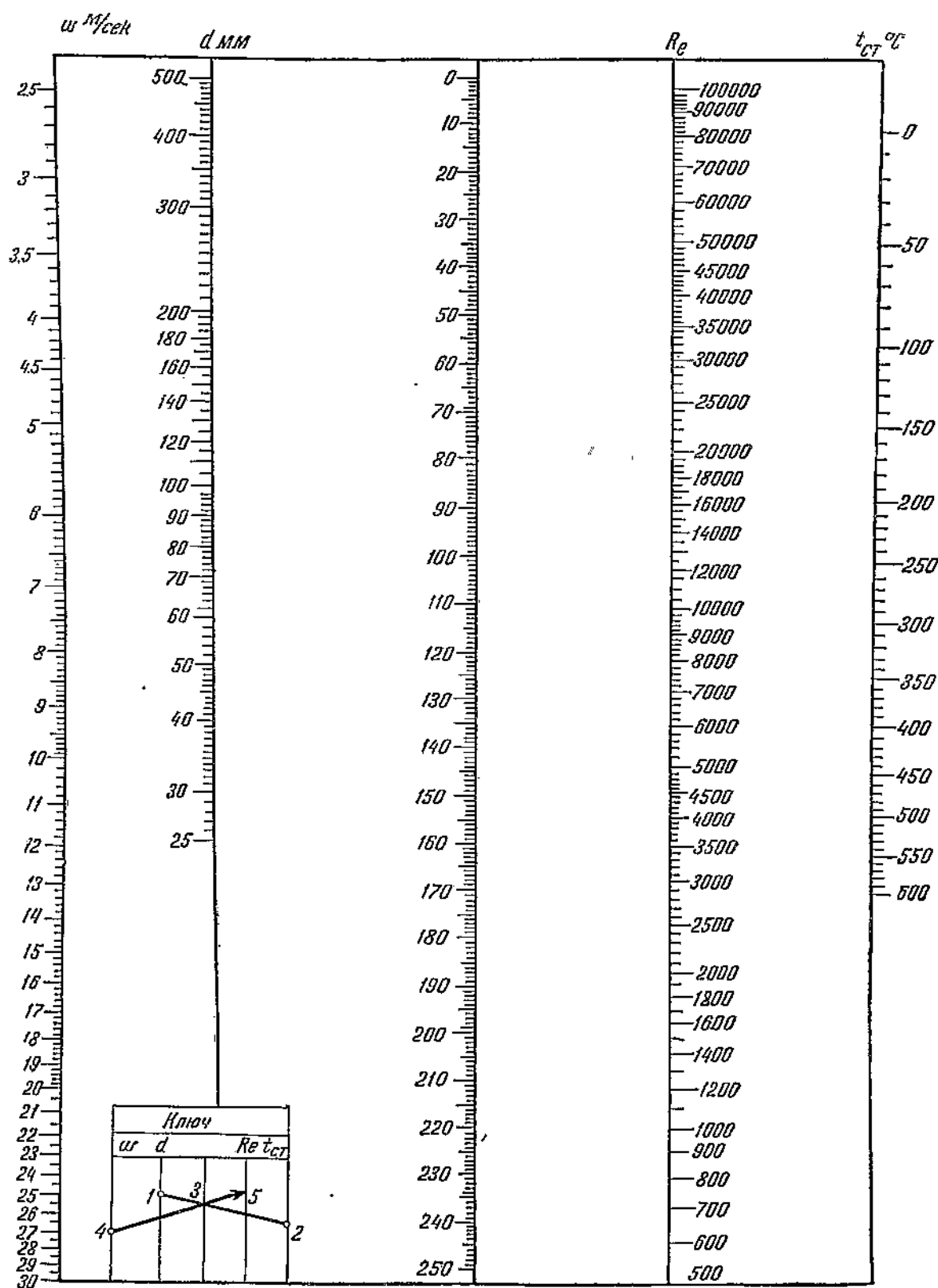
Значения коэффициентов изменения теплоотдачи ϕ при шахматном расположении в пучке труб, омываемых газами под углом

Угол атаки β°	Четырехрядные пучки при $Re =$			Остальные ряды труб при $Re =$		
	7 000—15 000	15 000—30 000	30 000—50 000	7 000—15 000	15 000—30 000	30 000—50 000
90	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
85	1,037	1,020	1,012	1,010	1,008	1,004
80	1,045	1,032	1,018	1,015	1,008	1,000
75	1,025	1,006	0,985	1,000	0,991	0,982
70	0,917	0,975	0,950	0,980	0,970	0,960
65	0,965	0,912	0,917	0,954	0,942	0,935
60	0,926	0,906	0,880	0,926	0,915	0,908
55	0,896	0,877	0,850	0,888	0,876	0,867
50	0,860	0,842	0,815	0,847	0,836	0,827
45	0,824	0,806	0,780	0,805	0,797	0,780
40	0,775	0,758	0,737	0,756	0,745	0,735
35	0,725	0,707	0,690	0,706	0,695	0,682
30	0,667	0,650	0,632	0,647	0,635	0,620
25	0,593	0,575	0,559	0,574	0,565	0,553
20	0,515	0,500	0,485	0,495	0,487	0,476
15	0,455	0,440	0,430	0,418	0,412	0,407
10	(0,416)	—	—	(0,392)	—	—
5	(0,410)	—	—	(0,380)	—	—
0	(0,434)	—	—	(0,375)	—	—

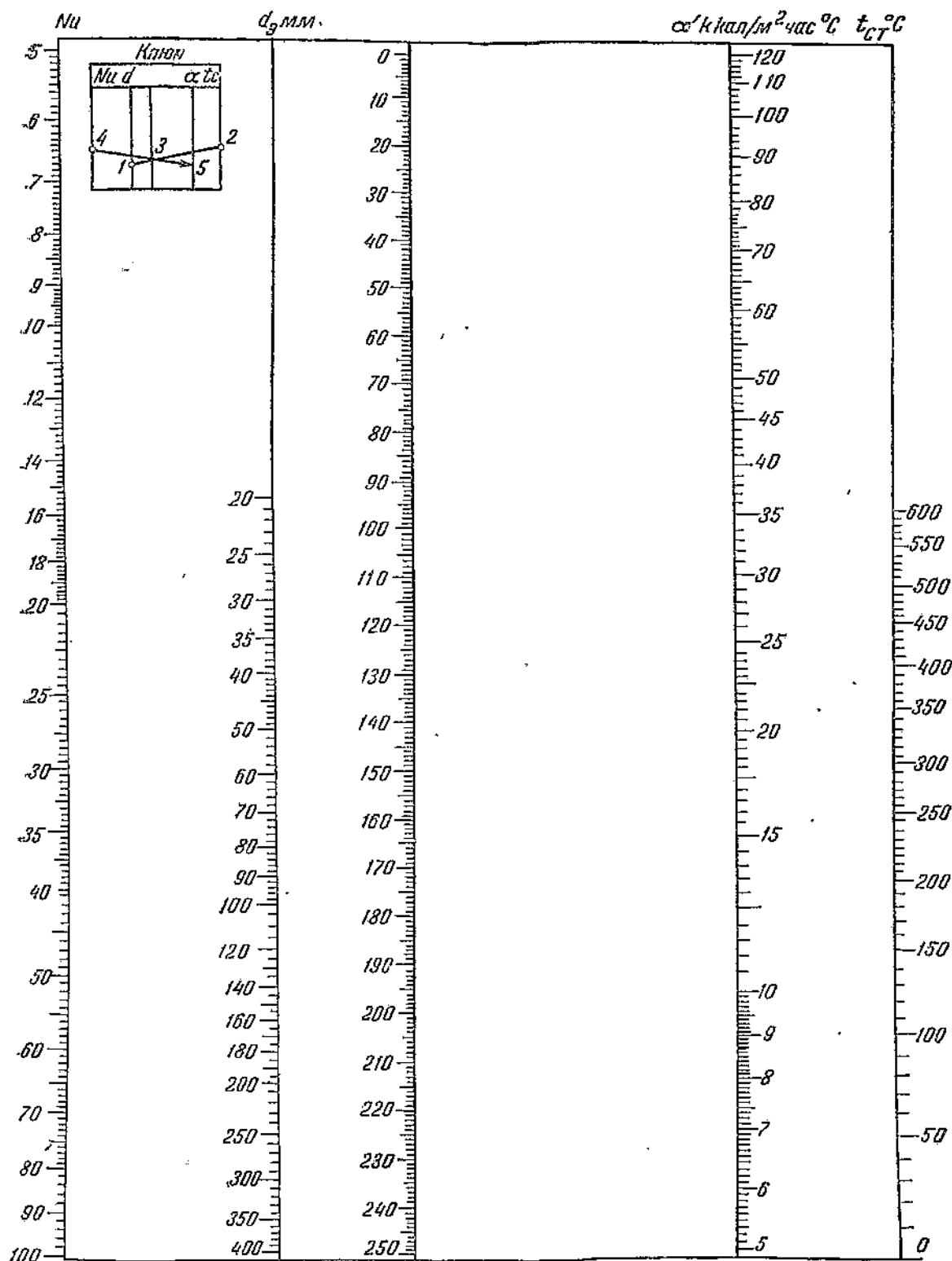
Таблица 37

Значения коэффициентов изменения теплоотдачи ϕ при коридорном расположении в пучке труб, омываемых газами под углом

Угол атаки β°	Первый ряд труб при $Re =$			Остальные ряды труб при $Re =$		
	7 000—15 000	15 000—30 000	30 000—50 000	7 000—15 000	15 000—30 000	30 000—50 000
90	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
85	1,006	1,004	1,002	1,012	1,008	1,004
80	1,025	1,015	1,004	1,038	1,027	1,012
75	1,040	1,025	1,008	1,055	1,044	1,023
70	1,029	1,007	0,983	1,054	1,035	1,012
65	1,012	0,985	0,960	1,037	1,018	0,988
60	0,995	0,962	0,934	1,004	0,980	0,957
55	0,972	0,942	0,910	0,968	0,940	0,912
50	0,950	0,920	0,885	0,925	0,896	0,865
45	0,926	0,892	0,855	0,875	0,844	0,812
40	0,897	0,865	0,829	0,830	0,800	0,765
35	0,866	0,830	0,797	0,780	0,750	0,712
30	0,825	0,793	0,760	0,731	0,695	0,655
25	0,770	0,735	0,705	0,652	0,616	0,580
20	0,680	0,650	0,618	0,545	0,518	0,497
15	0,55	0,535	0,518	0,462	0,450	0,437
10	—	—	—	(0,46)	—	—
5	—	—	—	(0,46)	—	—
0	—	—	—	(0,46)	—	—

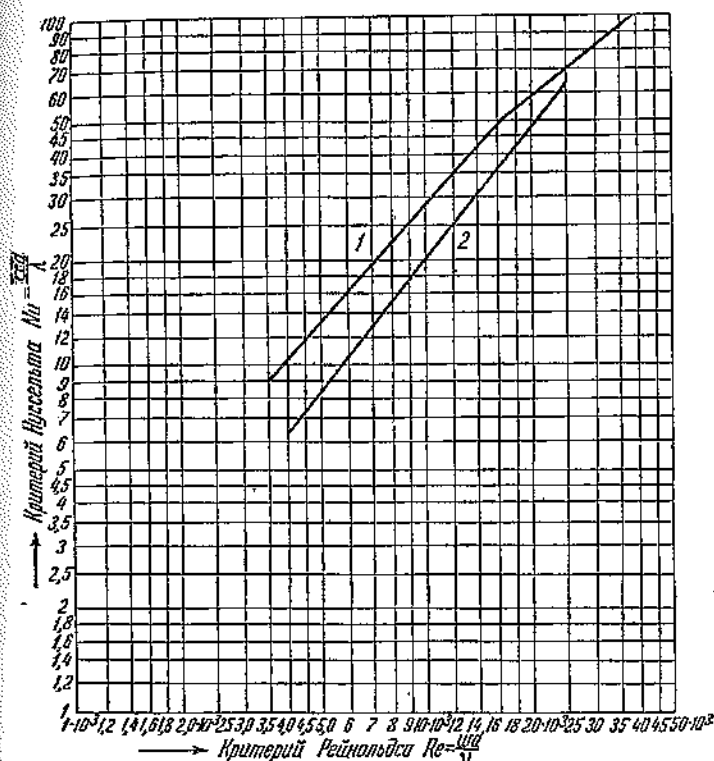


Фиг. 54. Номограмма для определения критерия Re для воздуха атмосферного давления или продуктов горения в зависимости от скорости потока w м/сек , температуры стенки $t_{ст}$ $^{\circ}\text{C}$ и диаметра труб d мм .



Фиг. 56. Номограмма для определения коэффициента теплоотдачи соприкосновением α $\text{kcal/m}^2 \text{ час } ^\circ\text{C}$ при омывании поверхности нагрева воздухом атмосферного давления или продуктами горения в зависимости от критерия Nu , эквивалентного диаметра d_g мм и температуры стенки t_{ct} $^\circ\text{C}$.

Для нахождения действительного значения α необходимо помножить найденное по номограмме значение α' на коэффициент K_T по фиг. 48.



Фиг. 55. Номограмма для определения критерия Nu в каналах пластинчатых воздухоподогревателей в зависимости от их типа и величины критерия Re .

1—воздухоподогреватели типа Ротатор; 2—воздухоподогреватели без воздушных перепускных кофлапов типа Ж (только для расчета теплообмена в воздушных каналах).

При определении скорости газов для каждой из частей пучка сечение вычисляется с упрощениями согласно схемам фиг. 59. На этих схемах показан путь газов в пучках труб, соединяющих барабаны котла.

Сечение газохода во всех случаях вычисляется по среднему размеру l и ширине b перпендикулярно к плоскости чертежа. Из полученной площади сечения газохода $b \cdot l$ м² необходимо вычесть площадь, занятую трубами.

Таким образом сечение для прохода газов при продольном омывании

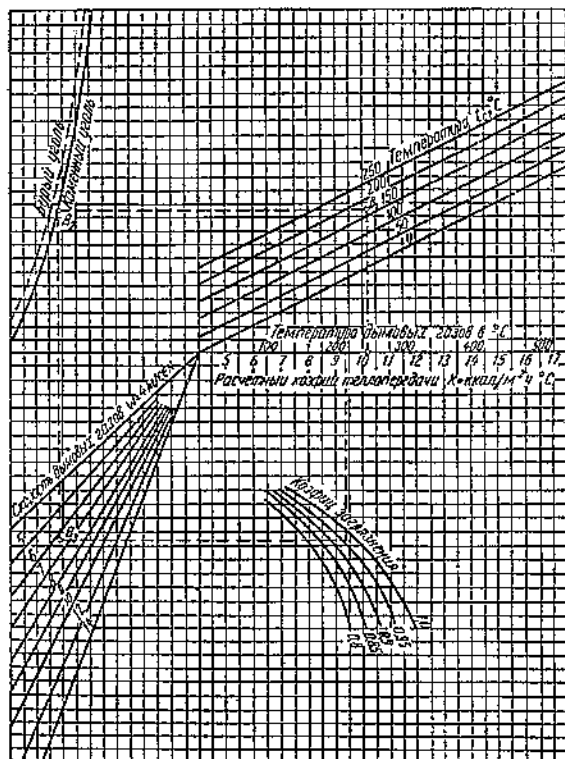
$$f_1 = b \cdot l - \frac{\pi d^2}{4} n; \quad (322)$$

при поперечном же омывании самое узкое сечение равно

$$f_2 = b \cdot l - \pi \cdot d \cdot l \cdot n_1. \quad (323)$$

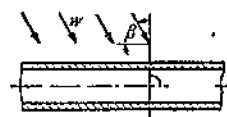
Здесь n — полное число труб пучка; n_1 — число труб в одном ряду.

Схемы фиг. 59 дают лишь условную и приближенную разбивку поверхностей нагрева и



Фиг. 57. Номограмма для определения коэффициента теплопередачи k ккал/м² час °С для чугунного водяного экономайзера системы ЦКБ в зависимости от температуры газов, температуры стенки, типа топлива, скорости газов и коэффициента загрязнения.

такие же условные приближенные сечения для прохода газов. Но точные вычисления здесь не оправдываются, так как они чрезвычайно усложняют расчет, приближенный же результат мало отличается от точного.

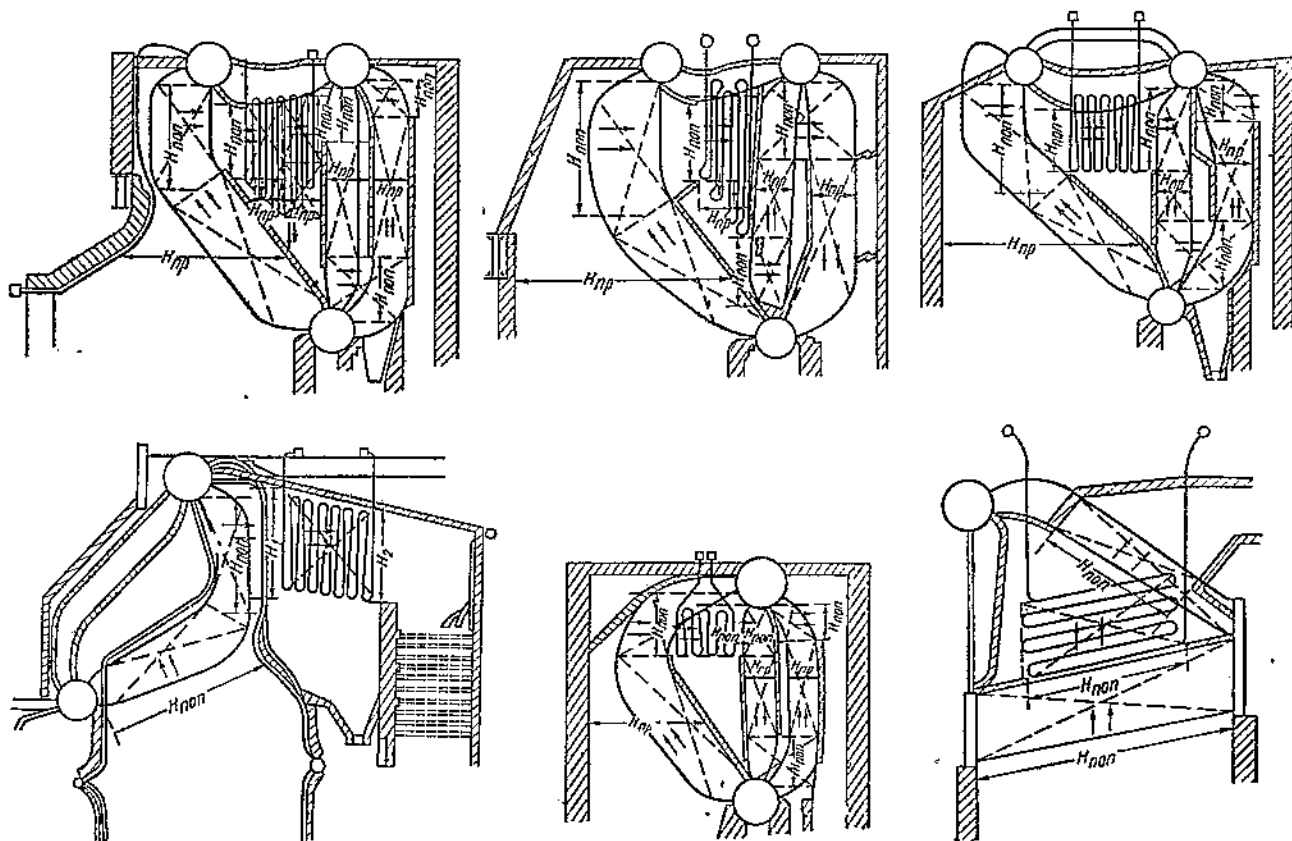


Фиг. 58. Внешнее омывание труб потоком, наклонным к их осн.

32. Коэффициент теплоотдачи от поверхности нагрева к нагреваемому телу. Зависимость теплоотдачи от газовых сопротивлений

Если тепловоспринимающим телом является воздух, то подсчет коэффициента теплоотдачи α_2 может производиться по формулам предыдущего параграфа для соответствующих случаев. В случае перегретого пара, движущегося внутри трубки, можно применять формулу Крауссоляда, приняв здесь для случая нагрева текущего вещества показатель m у критерия Pr равным 0,37. Критерий Pr в случае теплопередачи к перегретому пару не может быть принят постоянным, так как он зависит от давления и температуры пара. При этом

$$\alpha_2 = 0,024 \cdot d^{-0,2} \lambda^{0,63} \cdot \nu^{-0,43} \tau^{0,37} c_p^{0,37} \cdot w^{0,8}. \quad (324)$$



Фиг. 59. Условия разбивки поверхности нагрева котлов разных типов при продольном и поперечном омывании газами. $H_{пр} = l_{пр} b$; $H_{поп} = l_{поп} b$.

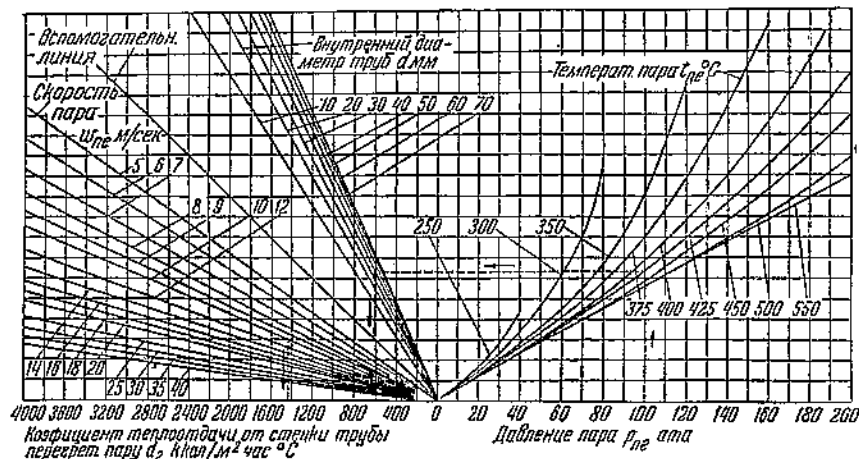
По формуле (324) построена номограмма фиг. 60, в которой все физические константы отнесены для упрощения к температуре пара.

Значения α_2 , полученные по номограмме фиг. 60, относятся к прямым участкам труб. В тех частях змеевиков пароперегревателя, где трубы загнуты, α_2 получится больше. Величину его можно найти из выражения

$$\alpha_2' = \alpha_2 \left(1 + 1,77 \frac{d}{R} \right). \quad (324a)$$

Этой величиной α_2 следует пользоваться только в случае спиральных змеевиков у пароперегревателя. При определении температуры стенки обыкновенных змеевиков для большей надежности необходимо пользоваться значением $\alpha_2 < \alpha_2'$, не учитывая указанную выше поправку. Теп-Бом дает основанную на опытах формулу для перегретого пара:

$$\alpha_2 = 21,5 \lambda^{0,25} \cdot c_p^{0,75} \frac{D_1^{0,75}}{d^{1,75}} = A \frac{D_1^{0,75}}{d^{1,75}} \text{ ккал/м}^2 \text{ час } ^\circ\text{C}, \quad (325)$$



Фиг. 60. Номограмма для определения коэффициента теплоотдачи α_2 ккал/м² час °С от стенки к перегретому пару в зависимости от $p_{не}$ атм, $t_{не}$ °С, d мм и $w_{не}$ м/сек.

где кроме обычных величин введено D_1 кг/сек — количество расходуемого через трубку пара. Постоянная A представлена в зависимости от давления и температуры пара на фиг. 61. Эта формула проще, но менее точна.

Для определения коэффициента теплоотдачи α_2 к воде, движущейся в трубке от металлической стенки трубы, часто применяется несколько неточная формула Шиллера и Бурбаха, видоизмененная Шаком,

$$\alpha_2 = 3260 \frac{w^{0,75} \cdot \lambda^{0,25}}{d^{0,25}} \text{ ккал/м}^2 \text{ час } ^\circ\text{C}, \quad (326)$$

где w м/сек — скорость воды;
 d мм — диаметр трубы;
 λ ккал/м² час °С — теплопроводность воды.

Можно также пользоваться приближенным уравнением Шака, пригодным для труб диаметром до 100 мм:

$$\alpha_2 = 2900 \cdot \omega_{w,0.85}^{0.85} [1 + 0,14 t] \text{ ккал/м}^2 \text{ час } ^\circ\text{C}, \quad (327)$$

где t — температура воды.

Теплоотдача от металлической стенки к кипящей воде в последнее время подробно исследовалась Клеве, Бошняковичем, Якобом и Шмидтом и др.

На фиг. 62 на основании опытов разных исследователей дается зависимость коэффициента теплоотдачи α_2 и разности температур Δt от теплового напряжения поверхности нагрева Q ккал/м² час для кипящих труб. На диаграмме под Δt подразумевается разность температур стенки поверхности нагрева $t_{ст}$ и воды t_w вне пограничного со стенкой слоя:

$$\Delta t = t_{ст} - t_w. \quad (328)$$

Стенка предполагается гладкой.

Температура паровых пузырей по данным Якоба примерно на 0,5°С ниже температуры воды.

Коэффициент теплоотдачи от насыщенного пара к стенке может быть определен по следующим эмпирическим формулам, предложенным Шаком:

а) для вертикальной трубы и стенки

$$\alpha_2 = \frac{5800 + 23(t_n - t_w)}{\sqrt[4]{L(t_n - t_w)}} \text{ ккал/м}^2 \text{ час } ^\circ\text{C}; \quad (329a)$$

б) для горизонтальной трубы

$$\alpha_2 = \frac{4460 + 17,7(t_n - t_w)}{\sqrt[4]{d(t_n - t_w)}} \text{ ккал/м}^2 \text{ час } ^\circ\text{C}. \quad (329б)$$

В этих формулах означают

t_n и t_w °С — температура пара и воды;

d м — диаметр трубы;

L м — длина трубы или высота стенки.

При охлаждении обмуровки и паропроводов охлаждающей средой является окружающий воздух. Возникающая вследствие теплообмена разность температур в отдельных слоях воздуха вызывает в нем конвективные токи, обуславливающие теплообмен. Теплообмен, имеющий место при этих условиях, носит название теплопередачи в условиях свободной конвекции.

Для расчета теплообмена при свободной конвекции можно пользоваться следующими формулами:

1. В случае вертикальной трубы и стенки при ламинарном течении воздуха

$$Nu = 0,48 Gr^{0,25}, \quad (330)$$

где Gr — критерий Грасгофа;

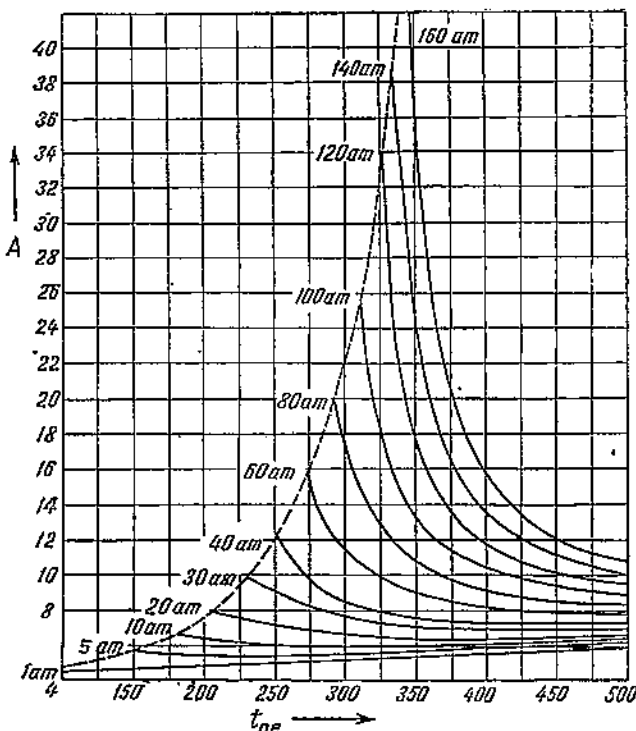
$$Gr = \frac{g \Delta t_{cp} h^3}{T_{cp} \nu_{cp}^2}.$$

Здесь h м — высота стенки;

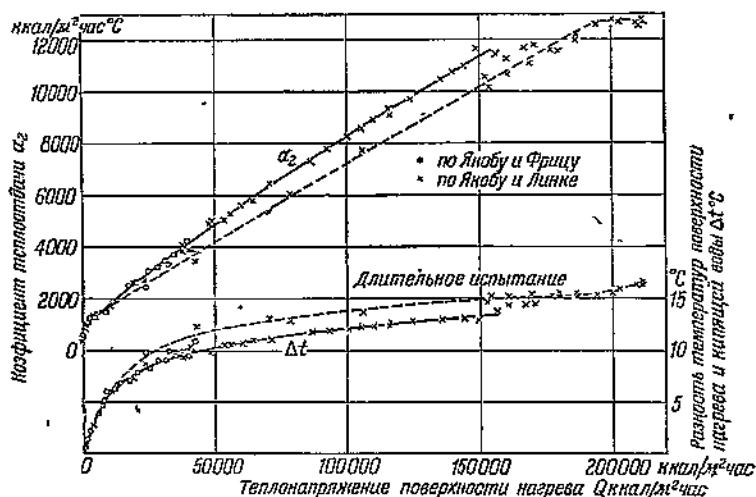
Δt_{cp} — средняя разность температур между воздухом и стенкой;

$T_{cp} = t_{cp} + 273^\circ\text{K}$ — средняя температура воздуха;

ν_{cp} — средняя величина кинематической вязкости воздуха.



Фиг. 61. Значения величины A в формуле Тен-Боша для определения коэффициента теплоотдачи α_2 к перегретому пару.



Фиг. 62. Значения α_2 и Δt для гладкой поверхности и кипящей при атмосферном давлении воды в зависимости от теплового напряжения поверхности нагрева Q ккал/м² час.

При этом область ламинарного движения определяется условием

$$Gr \leq 10.$$

2. Для вертикальной трубы и стенки в переходной области течения

$$Nu = 51,5 + 7,26 \cdot 10^5 \cdot Gr^{0,03}. \quad (331)$$

Области переходного движения соответствует условие

$$10^3 \leq Gr \leq 1,69 \cdot 10^6.$$

3. Для вертикальной трубы и стенки в турбулентной области течения

$$Nu = 0,148 Gr^{1/2} - 127,6. \quad (332)$$

Турбулентное течение имеет место, когда

$$1,69 \cdot 10^{10} \leq Gr.$$

4. Для горизонтальной плиты

$$Nu = 0,56 (Gr \cdot Pr)^{0,25}. \quad (333)$$

Те же уравнения при замене критериев их выражениями получают последовательно следующий вид:

$$1) \alpha = 0,48 \frac{\lambda}{h} \cdot \left(\frac{g \cdot \Delta t_{cp} h^3}{T_{cp} \nu_{cp}} \right)^{0,25}; \quad (333a)$$

$$2) \alpha = \frac{\lambda}{h} \left[51 + 7,26 \cdot 10^5 \left(\frac{g \cdot \Delta t_{cp} h^3}{T_{cp} \nu_{cp}} \right)^{0,03} \right]; \quad (331a)$$

$$3) \alpha = \frac{\lambda}{h} \left[0,148 \left(\frac{g \cdot \Delta t_{cp} h^3}{T_{cp} \nu_{cp}} \right)^{1/3} - 127,6 \right]; \quad (332a)$$

$$4) \alpha = 0,56 \frac{\lambda}{h} \left(\frac{g \cdot \Delta t_{cp} h^3}{T_{cp} \nu_{cp}} \right)^{0,25} \cdot \left(\frac{c\eta}{\lambda} \right)^{0,25}. \quad (333a)$$

В формуле (333a) под h подразумевается длина стенки.

Улучшение теплопередачи соприкосновением в котельных агрегатах. Так как α_2 для поверхности нагрева котла велико сравнительно с α_1 , а члены $\frac{1}{\alpha_2}$ и $\frac{\delta}{\lambda}$ малы по отношению к $\frac{1}{\alpha_1}$, то, как легко можно видеть из формул (285) и (288), в этом случае для чистой стенки

$$k \approx \alpha_1. \quad (334)$$

Отсюда следует, что различные мероприятия, направленные к улучшению теплопередачи от стенки к пароводяной смеси, заключающиеся обычно в повышении скорости смеси, не оказывают практически заметного влияния на коэффициент k . Повышение величины k для чистой стенки связано исключительно с увеличением α_1 путем повышения скорости газов. Увеличение α_2 , однако, чрезвычайно важно для снижения температуры стенки. Загрязнение со стороны обогреваемого тела уменьшает температуру стенки, а со стороны обогреваемого увеличивает ее. Это можно видеть из следующих соотношений:

$$t_{cm} = t_g - R'_t \cdot q = t_g - \frac{Q}{H} \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_n}{\lambda_n} \right); \quad (335)$$

$$t_{cm} = t_w + R''_t \cdot q = t_w + \frac{Q}{H} \left(\frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} \right), \quad (336)$$

где t_{cm} °C — температура металлической стенки со стороны газов;

R'_t и R''_t ккал/м час °C — тепловое сопротивление со стороны греющего и нагреваемого тела соответственно;

q ккал/м² час — тепловой поток;
 δ_n и δ_c м — толщина слоя соответственно накипи и сажи.

Особо чувствительно с точки зрения повышения температуры стенки внутреннее ее загрязнение.

Все приведенные выше уравнения, по которым определяется α_1 , показывают сильную зависимость его от скорости газов. Легче всего повысить теплоотдачу соприкосновением путем увеличения скорости газов, но это влечет за собой также и сильное увеличение газовых сопротивлений.

Потеря напора вследствие движения газов по дымоходам

$$\Delta p = \rho w^2 \cdot E_n. \quad (337)$$

В то же время коэффициент теплоотдачи от газов к поверхности нагрева может быть представлен в виде

$$\alpha = C w^k, \quad (338)$$

где $k < 1$.

Если даже принять, что α меняется пропорционально w , то и тогда при изменении скорости вдвое, втрое и т. д. газовое сопротивление меняется в четыре, девять и т. д. раз.

Увеличение коэффициента теплоотдачи уменьшает поверхности нагрева и снижает расход потребного для них металла. Увеличение же газовых сопротивлений усложняет тяговые устройства, повышает требования к плотности обмуровки, а также вызывает увеличение расхода энергии на приведение в действие дымососов и вентиляторов, применяющихся при дутьевых устройствах. Путем соответствующих технико-экономических подсчетов можно определить наимыгоднейшее соотношение теплоотдачи и газовых сопротивлений. Этими подсчетами устанавливаются оптимальные значения для коэффициента теплоотдачи, величины газовых сопротивлений и размера всех связанных с ними элементов котельной установки. Предел повышения коэффициента теплоотдачи зависит и от величины установок. Так, в мелких установках часто отсутствуют дутьевые приспособления и дымососы, а дымовые трубы делаются высотой не больше 50—60 м. Даваемое ими разрежение не превышает 20—30 мм вод. ст. Соответствующие этому разрежению газовые сопротивления ограничивают скорость газов в дымоходах, которая не превышает при этих условиях 5—6 м/сек. Такая скорость, как ясно из предыдущего, определяет и невысокие коэффициенты теплопередачи, измеряющиеся часто величиной

$$20—30 \text{ ккал/м}^2 \text{ час } ^\circ\text{C}.$$

В современных больших котельных установках, где применяются усовершенствованные способы сжигания, мощные дымососы и вентиляторы, а также усовершенствованные конструкции обмуровки, разрежение доходит до 150—500 мм вод. ст. В соответствии с этим газовые сопротивления могут быть допущены большими, и при этом сильно увеличивается интенсивность теплопередачи.

Вследствие наличия в продуктах горения твердого топлива уноса золы, недогоревшего топлива и пыли большие скорости могут усилить износ труб. Это в некоторых случаях ставит предел увеличению скоростей, а следовательно, и повышению интенсивности теплопередачи соприкосновением.

ГЛАВА СЕДЬМАЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧА ИЗЛУЧЕНИЕМ

33. Роль излучения в топках паровых котлов Излучение твердых тел

В котельных установках теплопередача излучением играет очень большую роль: во многих агрегатах больше 50% тепла передается путем излучения. В топках источниками излучения являются слой топлива, факел, несветящиеся газы и огнеупорные стенки. Излучение слоем топлива, факелом и несветящимся газом называется прямым или непосредственным; излучение же нагретыми до высокой температуры огнеупорными стенками обмуровки топочной камеры носит название непрямого или косвенного.

В пределах конвективных поверхностей нагрева наряду с теплопередачей соприкосновением происходит также излучение несветящихся газов и уносимых с газом твердых частиц. Расчёты, связанные с теплопередачей излучением, базируются на законах Планка, Стефана-Больцмана, Кирхгофа и Ламберта. Процессы, связанные с излучением в топочных камерах, недостаточно изучены, и поэтому при расчете топок обычно вычисляют лишь полное количество отданного в ней излучением тепла. Для этого чаще всего пользуются эмпирическими формулами и опытными данными. Подсчет излучения газов в конвективных элементах котельного агрегата производится методом, изложенным в § 35.

Зависимость между теплом Q^p , переданным путем излучения одного тела на другое лучеиспускающей поверхностью H^p , и температурами двух тел, выражается соотношением (266):

$$Q^p = H^p \varphi C \left[\left(\frac{T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{ст}}}{100} \right)^4 \right].$$

Ниже рассмотрены теоретические основы и законы, позволяющие подсчитывать отдельные входящие в это уравнение величины.

Различные тела обладают неодинаковой способностью к теплоизлучению.

Различают абсолютно черные или черные, абсолютно белые или белые, абсолютно серые или серые тела. Хотя излучают только тела, но так как вся отдаваемая телом или воспринимаемая им лучистая энергия проходит через его поверхность, то часто поверхности также называют черными, белыми или серыми в связи со свойствами данного тела.

Черным называют такое тело, которое поглощает все падающие на его поверхность лучи, совершенно не отражая и не пропуская их.

Белым называется такое тело, которое отражает и равномерно (диффузно) рассеивает все падающие на него лучи.

Серым называется такое тело, у которого количества падающей на него и поглощенной им лучистой энергии находятся между собой в постоянном отношении независимо от спектрального состава и направления падающих лучей.

Способность тела или поверхности давать ту или иную величину собственного излучения, т. е. излучения без учета отраженных лучей, характеризуется коэффициентом излучения C ккал/м² час °К⁴. Для черного тела этот коэффициент совершенно не зависит от температуры и имеет величину

$$C_0 = 4,96 \text{ ккал/м}^2 \text{ час } ^\circ\text{К}^4.$$

Для белого тела

$$C = 0.$$

Коэффициент собственного излучения C серого тела удовлетворяет неравенству

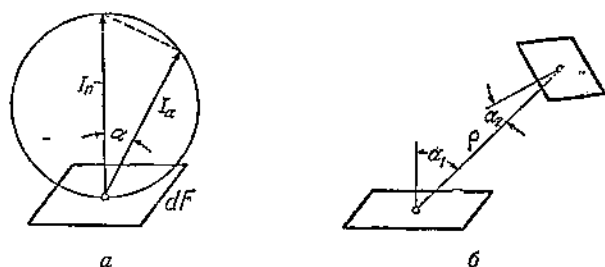
$$C_0 > C > 0.$$

Непоглощенные телом лучи и не отраженные им проходят сквозь него. В связи с этим тела называют абсолютно прозрачными, если они совсем не поглощают и не отражают лучистой энергии, и частично прозрачными, если они пропускают через себя лишь часть падающей на них энергии.

Если все лучи отражаются от поверхности тела так, что угол отражения луча равен углу его падения, то поверхность носит название зеркальной. Поверхности, отражающие лучи диффузно, носят название матовых. Поверхности черных, белых и серых тел приписывают свойства матовой поверхности.

Тела и поверхности, у которых отношение падающей и поглощенной энергии не сохраняется постоянным при изменении спектрального состава или направления лучей, обладают селективным (избирательным) излучением. Примерами таких поверхностей являются чистые (без пленки окисла) металлические поверхности.

Среди реальных тел не существует таких, которые бы в чистом виде обладали свойствами черного, белого, серого или прозрачного тела. Эти понятия идеализируют свойства реальных тел. Однако ряд реальных тел близок по своим свойствам к черному, белому, серому или прозрачному телу. На этом основании слой горящего на колосниковой решетке топлива, частицы кокса и золы в факеле, обмуровка, металлические стенки поверхности нагрева с достаточной для практических расчетов точностью можно принимать за серые тела, а не очень тонкий слой сажи за черное тело. Двухатомные газы близки по своим свойствам к прозрачному телу. Влияние температуры из-



Фиг. 63. Излучение между двумя произвольно расположенными в пространстве телами (к закону Ламберта).

лучающего тела и лучевоспринимающей поверхности на количество передаваемой им поверхностям нагрева H^P лучистой энергии Q^P [уравнение (266)] устанавливается на основании закона Стефана-Больцмана, по которому

$$E_0 = C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 = 4,96 \left(\frac{T}{100} \right)^4, \quad (339)$$

где величина E_0 ккал/м² час представляет все количество лучистой энергии, отдаваемой в 1 час 1 м² поверхности черного тела, нагретого до температуры $T^\circ\text{K}$. Величина E_0 включает лучистую энергию, взятую по всем длинам волн и всем направлениям в пределах полусферы произвольного радиуса.

Для серых тел и поверхностей также применим закон Стефана-Больцмана. При этом для большинства твердых серых тел и поверхностей, встречающихся в топках и газоходах паровых котлов, обычно принимают

$$C = 4,0 - 4,5 \text{ ккал/м}^2 \text{ час}^\circ\text{K}^4.$$

Для собственного излучения серого и черного тел, находящихся при одной и той же температуре T , всегда

$$E < E_0.$$

Закон Ламберта позволяет учитывать распределение лучистой энергии по различным направлениям. Сущность входящего в уравнение (266) коэффициента облученности φ и его величину обычно определяют, исходя из закона Ламберта. Это же получается и при помощи поточной алгебры (§ 34), но более простыми методами. Ниже приводится математическая формулировка этого закона и даются общие выражения для коэффициента облученности φ .

Пусть dF м² обозначает элементарную площадку (фиг. 63, а), выделенную на поверхности тела, и $d\omega$ — элементарный телесный угол, вершина которого лежит в какой-либо точке площадки dF , а ось l соответствующего ему конуса образует угол α с нормалью к площадке. Внутри этого конуса заключен пучок расходящихся лучей. Если рассмотрим конусы, ограниченные телесным углом $d\omega$ и имеющие вершинами все точки элементарной площадки dF , причем их оси направлены под тем же углом α к нормали, то количество лучистой энергии, исходящей от площадки dF в единицу времени внутри всех этих конусов, называется элементарным лучистым потоком $Q_{dF, d\omega}$. Он имеет тот же порядок величины, как и площадка dF , т. е. является величиной бесконечно малой. Если этот элементарный лучистый поток отнести к единице телесного угла — стерадиану¹, то получится угловая плотность I_α лучистой энергии в данном направлении, называемая часто также

силой радиации. Ясно, что

$$Q_{dF, d\omega} = I_\alpha d\omega \text{ ккал/час}. \quad (340)$$

Угловая плотность лучистой энергии, отнесенная к единице площади проекции площадки dF на плоскость, перпендикулярную к данному направлению, характеризуемому углом α , носит название удельной интенсивности радиации в том же направлении или яркости B ккал/м² час стерадиан. При этом (фиг. 63, а)

$$I_\alpha d\omega = B dF_n d\omega = B dF \cos \alpha d\omega = Q_{dF, d\omega} \quad (341)$$

и

$$I_\alpha = B dF_n = B dF_n \cos \alpha. \quad (342)$$

Эти соотношения (341) и (342) при условии $B = \text{const}$ математически выражают закон Ламберта, который формулируется так: количество лучистой энергии, посылаемой в час элементарной площадкой тела dF внутри телесного угла $d\omega$, пропорционально dF , $d\omega$ и косинусу угла между направлением излучения и нормалью к dF . Все количество лучистой энергии, отдаваемой площадкой dF в час по всем направлениям в пределах полусферы, носит название плотности полусферической радиации и определяется следующим образом:

$$EdF = B dF \int_{(2\pi)} \cos \alpha d\omega = \pi B dF,$$

откуда

$$B = \frac{E}{\pi} \quad (343)$$

и

$$Q_{dF, d\omega} = \frac{E}{\pi} dF \cos \alpha d\omega. \quad (344)$$

По закону Ламберта удельная интенсивность радиации элементарной площадки dF одинакова вдоль всех прямых, выходящих из площадки, и, следовательно, не зависит от угла α .

Если излучением обмениваются два тела 1 и 2 (фиг. 63, б), то элементарная площадка dF_1 первого тела передает элементарной площадке dF_2 другого тела в час следующее количество лучистой энергии:

$$Q_{dF_1 \rightarrow dF_2} = B_1 \frac{\cos \alpha_1 \cdot \cos \alpha_2}{r^2} dF_1 dF_2 \quad (345)$$

Здесь $B_1 = \frac{E_1}{\pi}$ ккал/м² час стерадиан — удельная интенсивность излучения площадки dF_1 ;

r — расстояние между центрами площадок dF_1 и dF_2 ;

α_1 и α_2 — углы между нормальными к площадкам и прямой r , соединяющей их центры.

Количество энергии, излучаемой на всю поверхность F_2 второго тела площадкой dF_1 , выразится следующим образом:

$$\begin{aligned} Q_{dF_1 \rightarrow F_2} &= \int_{F_2} B_1 \frac{\cos \alpha_1 \cdot \cos \alpha_2}{r^2} dF_1 \cdot dF_2 = \\ &= \frac{E_1}{\pi} dF_1 \int_{F_2} \frac{\cos \alpha_1 \cos \alpha_2}{r^2} dF_2. \end{aligned} \quad (346)$$

Из последнего соотношения можно найти коэффициент облученности $\varphi_{dF_1 \rightarrow F_2}$ поверхности F_2 площадкой dF_1 :

$$\begin{aligned} \varphi_{dF_1 \rightarrow F_2} &= \frac{Q_{dF_1 \rightarrow F_2}}{E_1 dF_1} = \frac{1}{\pi} \int \frac{\cos \alpha_1 \cdot \cos \alpha_2}{r^2} dF_2 = \\ &= \frac{1}{\pi} \int \cos \alpha_1 \cdot d\omega_1. \end{aligned} \quad (347)$$

¹ Стерадиан есть центральный телесный угол, соответствующий площади r^2 шаровой поверхности радиуса r .

В литературе можно встретить название коэффициента облученности фактором формы, угловым коэффициентом и угловым отношением.

Величина облученности тела 2 всей поверхностью тела 1, т. е.

$$\varphi_{F_1 \rightarrow F_2} = \frac{1}{F_1} \int \varphi(dF_1) \rightarrow F_2 dF_1 \quad (348)$$

может быть названа средним по поверхности коэффициентом облученности. В соответствии со свойствами черного тела его удельная интенсивность излучения B_0 постоянна для всех его частей, а по закону Ламберта она постоянна и по всем направлениям:

$$B_0 = \text{const} \neq f(\alpha), \quad (349)$$

а угловая плотность элементарной площадки его поверхности в каком-либо направлении пропорциональна косинусу угла между этими направлениями и нормалью к поверхности излучающей площадки (фиг. 63, а):

$$I_\alpha = I_n \cos \alpha = B_0 dF \cos \alpha = B_0 dF_n. \quad (350)$$

Закон Ламберта справедлив также для белых и серых тел, но излучение тщательно полированных металлических поверхностей отклоняется от него.

Выражения коэффициента облученности во многих случаях легко получить при помощи поточной теории (см. § 34). Для случаев, встречающихся на практике или помогающих уяснить это понятие, они приведены далее в табл. 39.

При расчетах, связанных с лучистым теплообменом, вводится понятие степени черноты серого тела. Это понятие связано с законом Кирхгофа, который заключается в следующем. Если на единицу поверхности какого-либо тела в час падает $E_{\text{пад}}$ ккал/м² час лучистого тепла, а из этого количества телом поглощается $E_{\text{погл}}$ ккал/м² час, то поглощательной способностью тела называют отношение

$$A = \frac{E_{\text{погл}}}{E_{\text{пад}}}.$$

Отношение же

$$\varepsilon = \frac{E}{E_0}$$

носит название степени черноты, где E и E_0 должны быть взяты при одной и той же температуре.

По закону Кирхгофа, справедливому для серых тел, поглощательная способность тела равна его степени черноты:

$$A = \varepsilon = \frac{E_{\text{погл}}}{E_{\text{пад}}} = \frac{E}{E_0}. \quad (351)$$

Для тех случаев, когда

$$B = \text{const} = \frac{E}{\pi},$$

ввиду того что

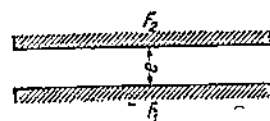
$$B_0 = \frac{E_0}{\pi},$$

величина

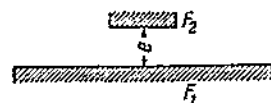
$$\varepsilon = \frac{B}{B_0}.$$

Для реальных тел величина B все же зависит от направления и, в частности, для полированных блестящих металлов значение ее B_n по нормали к излучающей площадке меньше среднего значения $B_{\text{ср}} = \frac{E}{\pi}$ примерно на 15—20%.

Для неметаллических же тел практически $B_n = B_{\text{ср}} = \frac{E}{\pi}$, будучи лишь на ничтожную величину меньше $\frac{E}{\pi}$.



Фиг. 64. Лучистый теплообмен между двумя неограниченными параллельными плоскостями. Величина e относительно мала.



Фиг. 65. Лучистый теплообмен между большой и малой параллельными плоскостями.

В табл. 38 даны величины степени черноты некоторых твердых и жидких тел, имеющих значение для котельных агрегатов. При этом в таблице даны величины ε_n , относящиеся к B_n , но ввиду сказанного выше с достаточной точностью можно принять

$$\varepsilon_{\text{ср}} = \varepsilon = \varepsilon_n.$$

В случае лучистого теплообмена между поверхностями твердых тел, разделенных непоглощающей средой, приходится находить взаимный или приведенный коэффициент излучения C_{1-2} и взаимную степень черноты ε_{1-2} . Ниже в качестве примеров рассмотрены выражения для C_{1-2} и ε_{1-2} в случае двух серых тел.

Пусть два тела 1 и 2 имеют примерно одинаковые плоские поверхности (фиг. 64), так что $F_1 \approx F_2 \approx F$.

При этом обе плоскости параллельны и достаточно велики по сравнению с расстоянием между ними e . Тогда взаимный коэффициент излучения C_{1-2} , который с достаточной для практики точностью можно принять зависящим только от индивидуальных коэффициентов излучения C_1 и C_2 , будет иметь следующий вид:

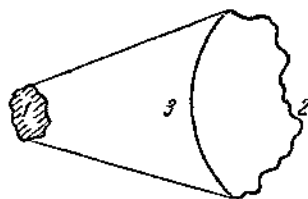
$$\frac{1}{C_{1-2}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_0}. \quad (352)$$

При подстановке $C_{1-2} = \varepsilon_{1-2} C_0$; $C_1 = \varepsilon_1 C_0$; $C_2 = \varepsilon_2 C_0$ получается

$$\frac{1}{\varepsilon_{1-2}} = \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1. \quad (353)$$

Таблица 38
Степень черноты некоторых тел

Тела	Температура °C	Степень черноты ε_n
Асбест	40—370	0,93—0,95
Железо полированное	425—1 020	0,144—0,377
" окисленное	100	0,736
" листовое гладкое	900—1 040	0,55—0,60
Кирпич красный, диасовый, шамотный	20—1 100	0,93—0,75
Краски и лаки (кроме алюминиевых)	20—145	0,80—0,98
Огнеупоры:		
а) слабые излучатели	600—1 000	0,65—0,75
б) хорошие излучатели	600—1 000	0,80—0,90
Расплавленный металл	1 300—1 800	0,29—0,28
Сажа ламповая 0,075 мм и толще	40—370	0,945
Уголь очищенный (0,9% золы)	125—625	0,81—0,79
Чугун свежесобоченный	20	0,435
" окисленный при 600°C	200—600	0,64—0,78
" шероховатый, сильно окисленный	40—250	0,95



Фиг. 66. Поток от тела 1 на 2 (Q_{1-2}) и от 1 на 3 (Q_{1-3}) равны по совместности.

Если две плоские поверхности F_1 и F_2 сильно отличаются по размеру (фиг. 65), то при вычислении количества энергии, излучаемой поверхностью F_2 на F_1 , можно пользоваться уравнением (266), подставляя в него вместо H^p величину F_2 , а вместо C величину C_{2-1} .

Для двух концентрических шаров или цилиндров, у которых объемлющая поверхность F_2 , а объемлемая F_1 ,

$$\frac{1}{C_{1-2}} = \frac{1}{C_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_0} \right) \quad (354)$$

$$\frac{1}{C_{1-2}} = \frac{1}{C_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{C_2} - 1 \right). \quad (355)$$

Во многих технических руководствах дается для коэффициента взаимного излучения приближенное выражение $C_{1-2} = \frac{C_1 C_2}{C_0}$. Это выражение не учитывает многократных отражений и является наименьшим пределом всех возможных значений коэффициента взаимного излучения. Ввиду этого нельзя рекомендовать применение его для расчетов.

34. Расчет лучистого теплообмена по Поляку¹

В последнее время Г. Л. Поляк (Энергетический институт Академии наук) предложил новый метод расчета лучистого теплообмена, основанный на разработанной им поточной алгебре. Этот метод имеет большие преимущества по сравнению с вычислениями по другим методам, часто связанными с многократным интегрированием, и т. п. Вследствие его чрезвычайной простоты этот метод должен получить широкое распространение. Особенно просто, при помощи чисто алгебраических выкладок, определяются величины коэффициентов облученности (угловых коэффициентов), требующих при других методах сложных и утомительных вычислений.

Ниже изложен метод определения коэффициента облученности для некоторых типичных случаев.

Пусть абсолютно черное тело 1, имеющее температуру выше 0°K, окружено также абсолютно черной оболочкой 2. Тело 1 при всех этих условиях будет выпускать на оболочку количество лучистой энергии

$$Q_1 = F_1 \cdot E_{0-1} = F_1 \cdot C_0 \left(\frac{T_1}{100} \right)^4, \quad (A)$$

где Q_1 ккал/час — излучение тела 1 по всем направлениям;

F_1 м² — поверхность тела;

E_{0-1} — черное излучение первого тела.

Если рядом с телом 1, имеющим температуру T_1 , поместить тело 2 с температурой T_2 , то тело 1 будет посылать телу 2 лучистый поток Q_{1-2} .

Коэффициент облученности

$$\varphi = \frac{Q_{1-2}}{Q_1}. \quad (B)$$

Величина

$$H_{1-2} = \frac{Q_{1-2}}{E_{0-1}} \quad (B)$$

называется обычно эффективной поверхностью тела 1 по отношению тела 2, а по Поляку — линейным потоком или взаимной поверхностью (она связана обязательно с парой тел).

Из приведенных формул получается зависимость

$$H_{1-2} = F_1 \cdot \varphi_{1-2}.$$

Распределение лучистой энергии в пространстве подчиняется следующим основным принципам:

I. Равными являются такие исходящие от одного и того же тела потоки, которые можно совместить так, что все лучи одного потока совпадут по положению, вне зависимости от длины, с соответствующими лучами другого (фиг. 66).

$$Q_{1-2} = \varphi_{1-2} F_1 \cdot C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 = Q_{1-3} = \varphi_{1-3} F_2 \cdot C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4,$$

откуда

$$\varphi_{1-2} = \varphi_{1-3} \text{ и } H_{1-2} = H_{1-3}.$$

II. Лучистый поток от тела 1 на тело 2 арифметически складывается из лучистых потоков между отдельными частями тел 1 и 2.

Если тело 1 состоит из частей 1_1 и 1_2 , а тело 2 из 2_1 и 2_2 , то

$$Q_{1-2} = Q_{1_1-2_1} + Q_{1_1-2_2} + Q_{1_2-2_1} + Q_{1_2-2_2}.$$

На основании (B) получается

$$H_{1-2} = H_{1_1-2_1} + H_{1_1-2_2} + H_{1_2-2_1} + H_{1_2-2_2}.$$

III. Если на пути всех лучей от тела 1 на тело 2 помещается тело, не пропускающее через себя лучистой энергии, то

$$Q_{1-2} = 0.$$

Используя (B) и (B), получаем

$$H_{1-2} = 0; \quad \varphi_{1-2} = 0.$$

Для тела, не имеющего вогнутостей или плоского тела, получается

$$Q_{1-1} = 0; \quad H_{1-1} = 0; \quad \varphi_{1-1} = 0.$$

IV. Пусть тело постоянной температуры со всех сторон окружено m телами. Если при этом в число m входит и тело 1 при наличии в нем вогнутостей, то количество лучистой энергии, отдаваемой телом 1 в окружающее пространство,

$$\sum_{i=1}^{i=m} Q_{1-i} = F_1 \cdot E_1.$$

Пользуясь формулой (B), получаем

$$\sum_{i=1}^{i=m} H_{1-i} = F_1 \text{ и } \sum_{i=1}^{i=m} \varphi_{1-i} = 1.$$

Если n тел образуют геометрически замкнутую систему, то, пользуясь этим принципом, можно составить систему уравнений, а именно

$$\sum_{i=1}^{i=n} H_{k-i} = F_k \text{ для } k = 1, 2, 3, \dots, n \quad (Г)$$

или

$$\sum_{i=1}^{i=n} \varphi_{k-i} = 1 \text{ для } k = 1, 2, 3, \dots, n.$$

¹ Т. Л. Поляк, Теория лучистого теплообмена, ЭНИН АН СССР, 1938. Из этой работы взята также табл. 39.

V. Если температуры двух черных тел равны, то лучистый поток, испускаемый телом 1 на тело 2, равен лучистому потоку от тела 2 на тело 1, независимо от формы и положения среди других тел:

$$Q_{1-2} = Q_{2-1}.$$

Имея в виду, что при равенстве температур существует равенство

$$E_{0-1} = E_{0-2},$$

получаем

$$H_{1-2} = H_{2-1}; F_1 \cdot \varphi_{1-2} = F_2 \cdot \varphi_{2-1}. \quad (Д)$$

Все пять перечисленных принципов названы так:

I. Совмещаемость или равенство двух потоков.

II. Распределительность потоков.

III. Затеняемость потоков.

IV. Замыкаемость потоков.

V. Взаимность потоков.

Поточная алгебра дает простое решение многих задач теплообмена радиацией.

Ниже показано, как решается этим методом один из имеющих большое практическое значение случаев — теплопередачи излучением от неограниченной сплошной стенки однородному пучку труб (фиг. 67).

Линейный поток от одной трубы на неограниченную стенку по принципу I равен потоку той же трубы на стенку, касающуюся труб. Лучи от одной трубы могут в этом случае падать на часть такой стенки

$$A_1 A_3 = 2A_1 A_2.$$

Рассматривая три поверхности $\overline{A_1 A_2} = F_1$; $\overline{A_2 M_2} = F_2$,

$$\overline{A_1 M_1} + \overline{M_1 M_2} = F_3,$$

на основании равенства (Г) можно написать три уравнения:

$$\left. \begin{aligned} H_{1-1} + H_{1-2} + H_{1-3} &= F_1; \\ H_{2-1} + H_{2-2} + H_{2-3} &= F_2; \\ H_{3-1} + H_{3-2} + H_{3-3} &= F_3. \end{aligned} \right\} \quad (356)$$

Благодаря отсутствию вогнутостей поверхностей F_1 , F_2 , F_3 для них потоки самих на себя равны нулю, т. е.

$$H_{1-1} = 0, H_{2-2} = 0, H_{3-3} = 0. \quad (Е)$$

По принципу взаимности и уравнению (Д)

$$H_{1-2} = H_{2-1}, H_{2-3} = H_{3-2}, H_{1-3} = H_{3-1}. \quad (Ж)$$

Принимая во внимание (Е) и (Ж) и складывая все три уравнения (356), получаем

$$\begin{aligned} 2H_{1-2} + 2H_{1-3} + 2H_{2-3} &= F_1 + F_2 + F_3; \\ H_{1-2} + H_{1-3} + H_{2-3} &= \frac{1}{2} (F_1 + F_2 + F_3). \end{aligned}$$

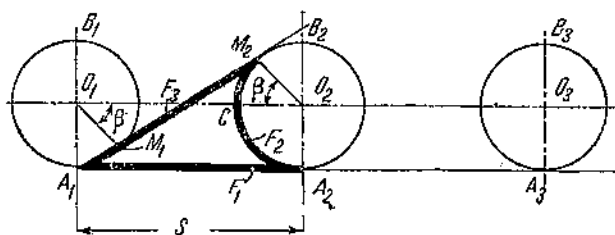
Если вычесть из этого выражения поочередно все уравнения (356), то

$$\left. \begin{aligned} H_{1-2} &= \frac{1}{2} (F_1 + F_2 - F_3); \\ H_{2-3} &= \frac{1}{2} (F_2 + F_3 - F_1); \\ H_{1-3} &= \frac{1}{2} (F_1 + F_3 - F_2); \end{aligned} \right\} \quad (357)$$

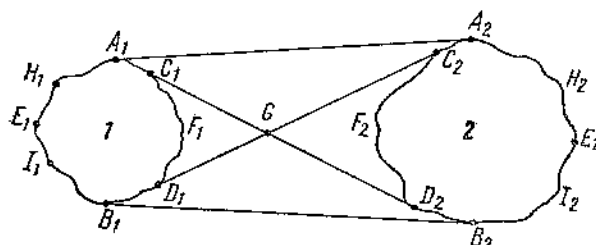
откуда поток трубы на стенку

$$2H_{2-1} = 2H_{1-2} = F_1 + F_2 - F_3 = H_{m-e} = H_{e-m}. \quad (358)$$

16 Вак. 4472. Котельные установки, т. I.



Фиг. 67. Лучистый теплообмен между однородным пучком труб и стенкой.



Фиг. 68. К правилу натянутой нити.

Облученность от трубы на стенку

$$\varphi_{m-e} = \varphi_{1-2} = \frac{H_{1-2}}{F_m} = \frac{F_1 + F_2 - F_3}{F_m}. \quad (359)$$

Облученность со стенки на трубу

$$\varphi_{e-m} = \varphi_{2-1} = \frac{F_1 + F_2 - F_3}{F_1}. \quad (360)$$

Полученные выражения для H_{1-2} , φ_{1-2} и φ_{2-1} могут быть очень просто построены графически.

Формулы (358) до (360) удовлетворяют указанному ниже правилу натянутой нити, при помощи которого они и легко запоминаются и быстро могут быть написаны.

Пусть во взаимном теплообмене излучением принимают участие два тела 1 и 2, поверхности которых состоят из выпуклых и вогнутых частей (фиг. 68). Можно представить себе упругую нить, натянутую на оба эти тела так, чтобы она огибала их внутренние и внешние контуры как в одном и том же, так и в прямо противоположном направлениях. Длины этих нитей соответственно будут:

- а) $A_1 C_1 F_1 D_1 B_1, D_1, C_2, A_3, C_2, F_2, D_2 B_2 D_2 C_1 A_1$;
- б) $A_1 C_1 F_1 D_1 B_1 B_2 D_2 F_2 C_2 A_2 A_1$;
- в) $A_2 H_1 E_1 I_1 B_1 D_1 C_2 A_2 H_2 E_2 I_2 B_2 D_2 C_1 A_1$;
- г) $A_1 H_1 E_1 I_1 B_1 B_2 I_2 E_2 H_2 A_2 A_1$.

Нити а и б огибают внутренние, а нити в и г — внешние контуры, причем б и г в прямо противоположном направлении.

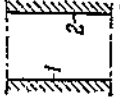
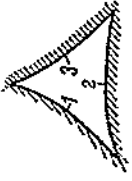
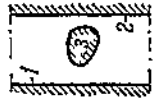
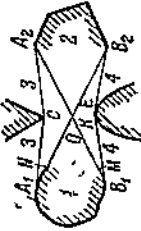
По правилу натянутой нити линейный поток рассматриваемых двух тел 1 и 2 равен полусумме внутренних минус полусумма внешних нитей, т. е.

$$H_{1-2} = H_{2-1} = \frac{A_1 C_1 D_2 B_2 + B_1 D_1 C_2 A_2}{2} - \frac{A_1 A_2 + B_1 B_2}{2}.$$

За общие начальные и конечные точки этих нитей можно принимать любые точки как на внешнем, так и на внутреннем контуре рассматриваемых тел.

Применяя это правило к рассматриваемому случаю, легко можно получить математические выражения для линейного потока и облученности при теплообмене

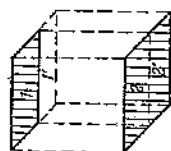
Формулы для вычисления коэффициентов облученности и взаимных (эффективных) поверхностей (линейных потоков) в типичных случаях передачи тепла излучением

Род поверхностей	Схема	Коэффициент облученности	Взаимная (эффективная) поверхность (линейный поток) H
1 Две параллельные стенки, размеры которых велики по сравнению с расстоянием между ними		$\varphi_{1-2} = \frac{F_2}{F_1} = 1$	—
2 Пара поверхностей, образующих замкнутую систему		$\varphi_{1-2} = \frac{F_2}{F_1} \quad \varphi_{2-1} = 1$	$H_{1-2} = F_1 \cdot \varphi_{1-2} = F_2$
3 Три тела, образующие замкнутую систему		$\varphi_{1-2} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{F_2}{F_1} - \frac{F_3}{F_1} \right)$	$H_{1-2} = \frac{1}{2} (F_1 + F_2 - F_3)$
4 Две неограниченные стенки и выпуклое тело		$\varphi_{1-2} = \varphi_{2-1} = 1$ $\varphi_{2-3} = \varphi_{1-3} = 0$ $\varphi_{3-1} = \varphi_{3-2} = \frac{1}{2}$	$H_{2-3} = H_{1-3} = \frac{1}{2} F_3$
5 Произвольные плоские контуры		$\varphi_{1-2} = \frac{D}{F_1}$	$H_{1-2} = D$
6 Два произвольных или линейных тел, частично затеняемых окружающими телами		$\varphi_{1-2} = \frac{1}{2} \left(\frac{\text{дл. } A_1 N B_2 + \text{дл. } A_2 M B_1}{\text{дл. контура 1}} - \frac{\text{дл. } A_1 C A_2 - \text{дл. } B_1 K E B_2}{\text{дл. контура 1}} \right)$	$H_{1-2} = \frac{1}{2} (\text{дл. } A_1 N B_2 + \text{дл. } A_2 M B_1 - \text{дл. } A_1 C A_2 - \text{дл. } B_1 K E B_2)$
7 Два тела, частично затеняемых третьим телом (плоскопараллельная система)		$\varphi_{1-2} = \frac{1}{2} \left(\frac{\text{дл. } B_1 C + \text{дл. } C B_2 + \text{дл. } A_1 K + \text{дл. } A_2 E}{\text{дл. контура 1}} - \frac{\text{дл. } A_2 E - \text{дл. } B_1 B_2 - \text{дл. } A_1 A_2 - \text{дл. } E K}{\text{дл. контура 1}} \right)$	$H_{1-2} = \frac{1}{2} (\text{дл. } B_1 C + \text{дл. } C B_2 + \text{дл. } A_1 K + \text{дл. } A_2 E - \text{дл. } B_1 B_2 - \text{дл. } A_1 A_2 - \text{дл. } E K)$

123

Род поверхностей	Схема	Коэффициент облученности	Взаимная (эффективная) поверхность (линейный поток) H
13 Две поверхности, расположенные на сфере, ограниченные произвольными контурами		$\varphi_{S_1-S_2} = \frac{S_2}{S_0}$	$H_{S_1-S_2} = \frac{S_1 S_2}{S_0}$
14 а) Бесконечно малая сфера (S_0) и тело (F) произвольной формы и размеров; б) конечная сфера (S_0) и тело (F) в бесконечности		$\varphi_0 = \frac{\omega}{4\pi}$	$H_{S_0-F} = \frac{\omega}{4\pi} \cdot S_0 = \Delta S_0$ $S_0 = 4\pi r_0^2$ — поверхность сферы ΔS_0 — площадь поверхности, вырезаемой на сфере лучами внутри ω
14а Сфера (S_2) и произвольный контур (ΔS_1) на концентрической сфере S_1		$\varphi_{(S_2)-\Delta S_1} = \frac{\Delta S_1}{S_1} = \frac{\omega}{4\pi}$; $\varphi_{(\Delta S_1)-S_2} = \frac{S_2}{S_1}$	$H_{S_2-\Delta S_1} = \frac{\Delta S_1 S_2}{S_1} = \Delta S_2$
15 Два одинаковых прямоугольника, расположенных в параллельных плоскостях друг против друга		$\varphi = \frac{2}{\pi} \left\{ \sqrt{1 + \left(\frac{h}{a}\right)^2} \arctg \frac{\left(\frac{b}{a}\right)}{\sqrt{1 + \left(\frac{h}{a}\right)^2}} + \sqrt{1 + \left(\frac{h}{b}\right)^2} \arctg \frac{\frac{a}{b}}{\sqrt{1 + \left(\frac{h}{b}\right)^2}} - \frac{h}{a} \arctg \frac{b}{h} - \frac{h}{b} \arctg \frac{a}{h} + \frac{1}{2} \frac{h}{a} \frac{h}{b} \ln \frac{\left[1 + \frac{h^2}{a^2}\right] \left[1 + \frac{h^2}{b^2}\right]}{\left[1 + \frac{h^2}{a^2}\right] \left[1 + \frac{h^2}{b^2}\right] - 1} \right\}$	$H = \varphi ab = \frac{4}{\pi} [a^2 \{f(\gamma_1) - f(\gamma)\} + b^2 \{f(\beta_1) - f(\beta)\}];$ $\gamma = \arctg \frac{a}{h};$ $\gamma_1 = \arctg \frac{a}{\sqrt{b^2 + h^2}};$ $\beta = \arctg \frac{b}{h};$ $\beta_1 = \arctg \frac{b}{\sqrt{a^2 + h^2}};$ $f(x) = \frac{1}{2} \left(x \operatorname{ctg} x - \frac{1}{2} \ln \sin x + \frac{1}{2} \operatorname{ctg}^2 x \cdot \ln \cos x \right)$
15а Пара одинаковых квадратов, расположенных в параллельных плоскостях друг против друга		$\varphi = \frac{2}{\pi} \left[\frac{2}{a} \sqrt{a^2 + h^2} \arctg \frac{a}{\sqrt{a^2 + h^2}} - 2 \arctg \frac{a}{h} + \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a}\right)^2 \ln \frac{(a^2 + h^2)^2}{h^2 (h^2 + 2a^2)} \right]$	$H_{1-2} = \frac{2}{\pi} \left(2a \sqrt{a^2 + h^2} \cdot \arctg \frac{a}{\sqrt{a^2 + h^2}} - 2a^2 \arctg \frac{a}{h} + \frac{h^3}{2} \ln \frac{(a^2 + h^2)^2}{(h^2 + 2a^2)} \right)$

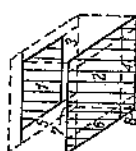
156 Пара неравных прямоугольников, расположенных в параллельных плоскостях



$$\varphi_{1-11} = \frac{H_{1-11}}{F_1}$$

$$\begin{aligned} H_{1-11} &= H_{1-2} + H_{1-8} = H_{1-3} + \\ &+ \frac{1}{2} (H_{1-11} - H_{1-2} - H_{1-8}) = \\ &= \frac{1}{2} (H_{1+11} + H_{1-2} - H_{1-8}) \\ &\quad \left(\begin{array}{l} I = 1 + 1' \\ II = 2 + 2' \end{array} \right) \end{aligned}$$

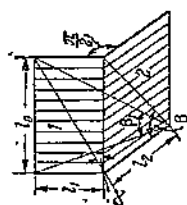
157 Пара неравных прямоугольников, расположенных в параллельных плоскостях



$$\varphi_{1-2} (2 + 4 + \dots) = \frac{H_{1(2+4+\dots)}}{F_1}$$

$$\begin{aligned} H_{1(2+4+\dots)} &= H_{(1+2+3+\dots)} (2+4+6+\dots) + \\ &+ H_{(3+5+\dots)} (4+6+\dots) - H_{(5+7+\dots)} (6+\dots) \end{aligned}$$

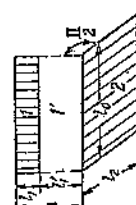
16 Два взаимно перпендикулярные прямоугольника с общей стороной l_0



$$\begin{aligned} \varphi_{1-2} &= \frac{1}{\pi} \left\{ \arctan \frac{l_0}{l_1} + \frac{l_2}{l_1} \arctan \frac{l_0}{l_2} - \right. \\ &- \sqrt{\left(\frac{l_2}{l_0} \right)^2 + 1} \arctan \frac{l_0}{\sqrt{l_1^2 + l_2^2}} + \\ &+ \ln \left[\frac{(l_0^2 + l_1^2 + l_2^2) l_2^2}{(l_0^2 + l_2^2) (l_1^2 + l_2^2)} \right]^{\frac{l_1}{4l_0}} \times \\ &\times \left[\frac{(l_0^2 + l_1^2 + l_2^2) l_1^2}{(l_0^2 + l_1^2) (l_1^2 + l_2^2)} \right]^{\frac{l_2}{4l_0}} \times \\ &\times \left[\frac{(l_0^2 + l_1^2) (l_0^2 + l_2^2)}{(l_0^2 + l_1^2 + l_2^2) l_0^2} \right]^{\frac{l_0}{4l_1}} \left. \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H_{1-2} &= \varphi_{1-2} F_1 = \varphi_{2-1} F_2; \\ H_{1-2} &= \frac{2l_0^2}{\pi} [f(\beta) - f(\beta_1) + f(\alpha)]; \\ f(x) &= \frac{1}{2} \left(x \operatorname{ctg} x - \frac{1}{2} \ln \sin x + \right. \\ &\quad \left. + \operatorname{ctg}^2 x \cdot \ln \cos x \right); \\ \alpha &= \arctan \frac{l_1}{l_0}; \\ \beta &= \arctan \frac{l_0}{l_2}; \\ \beta_1 &= \arctan \frac{l_0}{\sqrt{l_1^2 + l_2^2}} \end{aligned}$$

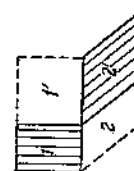
16a Пара неравных прямоугольников, расположенных в перпендикулярных плоскостях



$$\begin{aligned} \varphi_{1-2} &= \frac{H_{1-2}}{l_1 \cdot l_2} = \\ &= \frac{l_1 + l_1'}{l_1} - \varphi_{1-2} \cdot \frac{l_1'}{l_1} \end{aligned}$$

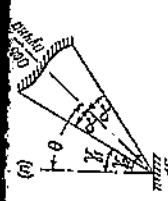
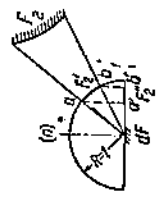
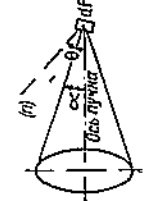
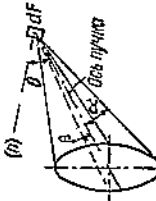
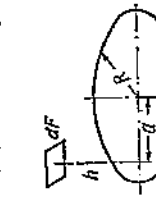
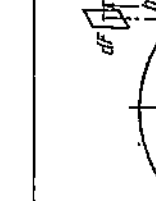
$$\begin{aligned} H_{1-2} &= H_{1-2} - H_{1-2} \\ (I &= 1 + 1') \end{aligned}$$

166 Пара неодинаковых прямоугольников в перпендикулярных плоскостях



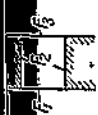
$$\begin{aligned} H_{1-2'} &= \frac{1}{2} (H_{1-11} - H_{1-2} - H_{1-2'}) \\ (I &= 1 + 1'; \quad II = 2 + 2') \end{aligned}$$

№ Случай	Род поверхностей	Схема	Коэффициент облученности	Взаимная (эффективная) поверхность (линейный поток) H
16в	Пара неодинаковых прямоугольников в перпендикулярных плоскостях		$\varphi_{1-2} = (\varphi_{1-\Pi} - \varphi_{1-2'}) \frac{l_1 + l_1'}{l} -$ $- (\varphi_{1-\Pi} - \varphi_{1-2'')}) \frac{l_1'}{l}$ $(I = 1 + 1'; \Pi = 2 + 2')$	$H_{1-2} = \varphi_{1-2} \cdot l_1 l_2 = H_{1-\Pi} - H_{1-1'} -$ $- H_{1-2'} + H_{1'+2'}$
17	Приближенная аналитическая формула для пары параллельных прямоугольников Для полюс и пары кругов формула точная		$\varphi = \left[\sqrt{1 + \left(\frac{h}{a}\right)^2} - \frac{h}{a} \right] \left[\sqrt{1 + \left(\frac{h}{a'}\right)^2} - \frac{h}{a'} \right]$ $A = \sqrt{a^2 + b^2}$ $a \text{ — меньшая сторона}$ $b \text{ — большая } "$	
18	Общие формулы для произвольных поверхностей		$\varphi(dF) = \frac{1}{\pi} \int_{(\omega)} \cos \vartheta_1 d\omega_1 =$ $= \int_{(F_2)} \frac{\cos \vartheta_1 \cdot \cos \vartheta_2}{\pi r^2} dF_2$ $\varphi_{1-2} = \frac{1}{\pi F_1} \int_{(F_1)} dF_1 \int_{(\omega_2)} \cos \vartheta_1 d\omega_1$	$H_{dF, d\omega} = \frac{1}{\pi} \cos \vartheta_1 d\omega_1 dF_1 =$ $= \frac{\cos \vartheta_1 \cos \vartheta_2 dF_1 dF_2}{\pi r^2}$ $H_{1-2} = \frac{1}{\pi} \int_{(F_1)} dF_1 \int_{(\omega)} \cos \vartheta_1 d\omega_1 =$ $= \frac{1}{\pi} \int_{(F_1)} dF_1 \int_{(F_2)} \frac{\cos \vartheta_1 \cos \vartheta_2}{r^2} dF_2$
19	Графический способ определения коэффициентов облученности (пространственная система)		$\varphi(dF) = \frac{F_2''}{\pi R^2}$	$H_{dF, \omega} = \varphi(dF) \cdot dF$

20	Элементарная площадка и цилиндрическое тело (плоскопараллельная система)		$\varphi(dF) = \frac{1}{2} (\sin \gamma_2 - \sin \gamma_1) = \cos \theta \sin \alpha$ $\theta = \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} \quad \alpha = \frac{\gamma_2 - \gamma_1}{2}$	$H_{dF_{ax}} = \varphi(dF) \cdot dF$
21	Графический способ (плоскопараллельная система)		$\varphi(dF) = \frac{F_2''}{2R}$	—
22	Круговой конический пучок, ось которого составляет угол θ с нормалью (n) к облучаемому элементу dF		$\varphi_n = \cos \theta \sin^2 \alpha$	$H_{(dF)_n} = \varphi_n \cdot dF$
23	Эллиптический пучок (с главными углами α, β), ось которого составляет угол θ с нормалью (n) к облучаемому элементу dF		$\varphi_n = \sin \alpha \cdot \sin \beta \cdot \cos \theta$	$H_{(dF)_n} = \varphi_n \cdot dF$
24	Элементарная площадка dF и произвольный круг, плоскость которого параллельна dF		$\varphi(dF) = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{h^2 + a^2 - R^2}{\sqrt{(h^2 + a^2 + R^2)^2 - 4a^2R^2}} \right]$	$H_{dF-F} = \varphi(dF) \cdot F \cdot dF$
25	Элементарная площадка dF и произвольный круг, площадь которого перпендикулярна к dF		$\varphi(dF) = \frac{h}{2a} \left[\frac{h^2 + a^2 + R^2}{\sqrt{(h^2 + a^2 + R^2)^2 - 4a^2R^2}} - 1 \right]$	$H_{dF-F} = \varphi(dF) \cdot F \cdot dF$

Случай	Род поверхностей	Схема	Коэффициент облученности	Взаимная (эффективная) поверхность (линейный поток) H
26	Элементарная площадка и часть кольца. Ось пучка составляет угол θ с направлением нормали к площадке dF		$\varphi_n = \frac{1}{2\pi} \cos \theta (\sin^2 \alpha_2 - \sin^2 \alpha_1)$	$H_{dF-dF} = \varphi_n \cdot dF$
27	Элементарная площадка и прямоугольник		$\varphi_a = \frac{1}{2\pi} (\beta_1 \sin \gamma + \gamma_1 \sin \beta)$ $\varphi_b = \frac{1}{2\pi} (\beta - \beta_1 \cos \gamma)$ $\sin \gamma = \frac{b}{\sqrt{h^2 + b^2}}$ $\sin \beta = \frac{a}{\sqrt{h^2 + a^2}}$ $\sin \beta_1 = \sin \left[\frac{\operatorname{tg} \beta}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \beta + S_c^2}} \right]$ $\sin \gamma_1 = \sin \left[\frac{\operatorname{tg} \gamma}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \gamma + S_c^2}} \right]$	—
27a	Элементарная площадка (dF) и прямоугольник, расположенный над dF и параллельный последнему, причем одна вершина прямоугольника расположена по нормали к dF		$\varphi_{(dF)} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{l_1}{\sqrt{h^2 + l_1^2}} \cdot \arctg \frac{l_2}{\sqrt{h^2 + l_1^2}} + \right.$ $\left. + \frac{l_2}{\sqrt{h^2 + l_2^2}} \arctg \frac{l_1}{\sqrt{h^2 + l_2^2}} \right)$ $\varphi_{(F)} - dF = \varphi_{(dF)} \cdot F \cdot \frac{dF}{F}$	$H_{dF-F} = \varphi_{(dF)} \cdot F \cdot dF = \varphi_F \cdot dF$
27б	Элементарная площадка dF и произвольный прямоугольник, плоскость которого параллельна dF		$\varphi_{(dF)} = \varphi_I + \varphi_{II} + \varphi_{III} + \varphi_{IV}$	$H_{dF-F} = \varphi_{(dF)} \cdot dF$
28	Обобщенная взаимная поверхность с учетом рефлекторного действия Обмуровки	См. фиг. 28а—д	$\varphi_{1-3} = \varphi_{1-3} + \frac{\varphi_{1-2} \cdot \varphi_{2-3}}{\varphi_{2-1} + \varphi_{2-3}}$	$H_1 \varphi_{1-3} = H_{1-3} + \frac{H_{1-2} \cdot H_{2-3}}{H_{1-3} + H_{2-3}}$

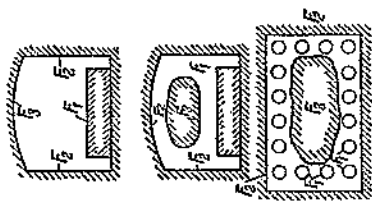
28а Частный случай 28. Цилиндрический канал с идеальной изоляцией



$$\psi_{1-3} = \frac{1 + \frac{\omega_1 - \omega_2}{2}}{2}$$

$$F_1 \psi_{1-3} = F_1 \frac{1 + \frac{\omega_1 - \omega_2}{2}}{2}$$

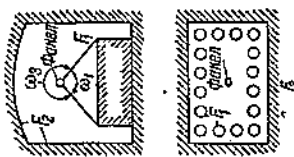
28б Частный случай 28. Факел (зона с номером 3) таких размеров и так расположен, что $H_{1-3} = H_{1-2}$



$$\psi_{1-3} = \varphi_{3-1} (2 - \varphi_{3-1})$$

$$F_1 \psi_{1-3} = F_1 \varphi_{3-1} (2 - \varphi_{3-1})$$

28в Частный случай 28. Бесконечно малый сферический факел в камере

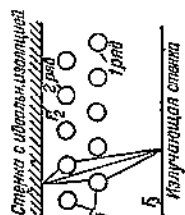


$$\psi_{1-3} = \varphi_{1-3} \left(1 + \frac{\omega_2}{\omega_1} \right)$$

$$F_1 \psi_{1-3} = H_{1-3} \left(1 + \frac{\omega_1}{\omega_2} \right) = S_{\phi}$$

S_{ϕ} — площадь поверхности малого факела

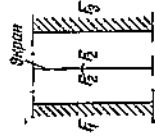
28г Частный случай 28. Неограниченная плоскость и двухрядный пучок труб



$$\psi_{1-3} = \varphi_{3-1} (2 - \varphi_{3-1})$$

—

28д Частный случай 28. Плоские стенки и экран между ними



$$\varphi_{1-3} = 0; \quad \varphi_{1-2} = 1; \quad \varphi_{2-3} = 0.5; \\ \psi_{1-3} = 0.5$$

—

между стенкой и трубой (фиг. 67). При этом согласно указанному правилу

$$H_{m-c} = \widetilde{A_1 A_2} + \widetilde{A_2 C M_2} - \widetilde{A_1 M_1 F_3 M_2};$$

$$A_1 A_2 = s; \quad A_2 C M_2 = \left(\frac{\pi}{2} + \beta \right) \frac{d}{2};$$

$$\begin{aligned} A_1 M_1 F_3 M_2 &= \widetilde{A_1 M_1} + 2 M_1 F_3 = \\ &= \left(\frac{\pi}{2} - \beta \right) \frac{d}{2} + d \operatorname{tg} \beta; \end{aligned}$$

$$H_{m-c} = s - d (\operatorname{tg} \beta - \beta).$$

Из прямоугольного треугольника $OM_1 F_3$

$$\operatorname{tg} \beta = \sqrt{\left(\frac{s}{d} \right)^2 - 1} \quad \text{и} \quad \beta = \operatorname{arctg} \sqrt{\left(\frac{s}{d} \right)^2 - 1}.$$

После этого

$$\begin{aligned} H_{m-c} = H_{c-m} &= s - p \sqrt{\left(\frac{s}{d} \right)^2 - 1} + \\ &+ d \operatorname{arctg} \sqrt{\left(\frac{s}{d} \right)^2 - 1}; \end{aligned} \quad (361)$$

$$\begin{aligned} \varphi_{m-c} = \frac{H_{m-c}}{\pi d} &= \frac{1}{\pi} \left[\frac{s}{d} - \sqrt{\left(\frac{s}{d} \right)^2 - 1} + \right. \\ &\left. + \operatorname{arctg} \sqrt{\left(\frac{s}{d} \right)^2 - 1} \right]; \end{aligned} \quad (362)$$

$$\begin{aligned} \varphi_{c-m} = \frac{H_{c-m}}{s} &= 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{d}{s} \right)^2} + \\ &+ \frac{d}{s} \operatorname{arctg} \sqrt{\left(\frac{s}{d} \right)^2 - 1}. \end{aligned} \quad (363)$$

В том случае, когда у стенки помещается много рядов труб, расчет для шахматного расположения труб в рядах делается также просто.

На первый ряд попадает доля φ_{c-m} всех лучей, испускаемых стенкой, на второй ряд попадает доля $\varphi_{c-m} \cdot (1 - \varphi_{c-m})$ и, наконец, на n -ый ряд попадает доля $\varphi_{c-m} (1 - \varphi_{c-m})^{n-1}$.

Поэтому облученность всего пучка из n рядов труб

$$\begin{aligned} \varphi_{c-nm} &= \varphi_{c-m} \cdot [1 + (1 - \varphi_{c-m}) + (1 - \varphi_{c-m})^2 + \dots \\ &+ (1 - \varphi_{c-m})^{n-1}], \end{aligned}$$

откуда получается приближенное выражение

$$\varphi_{c-nm} = 1 - (1 - \varphi_{c-m})^n. \quad (364)$$

При помощи этого метода легко удалось разрешить целый ряд типичных случаев и получить выражения для коэффициентов облученности. Эти случаи взаимного расположения тел и соответствующие формулы даны в табл. 39.

Часть приведенных в этой таблице формул, в том числе и (363), были выведены и ранее другими исследователями, но более сложными способами.

35. Излучение газов и паров. Совместная теплопередача соприкосновением и излучением в газоходах котла

Теплопередача вследствие излучения газов имеет место и в топке и в газоходах парового котла. Способностью излучать заметные количества тепла обладают в дымовых газах лишь трехатомные газы: углекислота, водяной пар. Двухатомные газы: водород, азот, кислород, излу-

чают настолько малые количества тепла, что при расчете теплопередачи оно не учитывается.

Твердые тела дают непрерывный спектр, т. е. испускают лучистую энергию всех длин волн. Но из них в практике паровых котлов имеют значение лишь длины в пределах 0,8—10 μ . Излучение CO_2 и H_2O слабее излучения светящегося факела, так как они дают полосатый спектр, состоящий из ряда полос, охватывающих лишь некоторые интервалы длин волн. Из этих полос в случае углекислоты и водяного пара практическое значение имеют лишь три более крупные полосы.

До последнего времени для определения количества тепла, излучаемого углекислотой и водяным паром, пользовались составленными Шаком в 1924 г. графиками. На этих графиках в зависимости от температуры газа и произведения $p l$ нанесено количество тепла q ккал/м² час, излучаемого данным газом в час на 1 м² элементарной площади dF , расположенной на поверхности, ограничивающей занятый газом объем. В настоящее время Хоттелом и Мангельсдорфом, а также Эккертом опубликованы новые данные по излучению CO_2 и H_2O . Эти данные отличаются от старых. По ним также построены графики такого же типа, как и графики Шака. Принципиальное отличие излучения H_2O по новым данным заключается в том, что при излучении H_2O имеет значение не только произведение $p l$, но и абсолютное значение p . Здесь p обозначает парциальное давление данного газа в ат, а l — среднюю длину луча в м, часто называемую эффективной толщиной газового слоя. Под средней длиной луча подразумевается радиус полусферы, описанной из центра рассматриваемой упоминавшейся выше элементарной площадки dF . Величина этого радиуса определяется из того условия, что газ, заполняющий полусферу, излучает на площадку dF такое же количество тепла, как и данный объем газа, имеющий по разным направлениям различные длины луча.

В табл. 40 даны значения средних длин луча для нескольких частных случаев. В таблице средняя длина луча дается в зависимости от характерного линейного размера заполненного газом объема.

Для параллелепипеда величина l может быть найдена по диаграмме фиг. 69, в которой представлена зависимость

$$\frac{l}{h} = f\left(\frac{F}{h^2}\right),$$

где h — высота, а F — та площадь параллелепипеда, в отношении которой определяется величина l .

В случае коридорного и шахматного пучков по s_1 , s_2 и d можно найти l для межтрубного пространства по графикам фиг. 70.

Для вычисления количества тепла, излучаемого продуктами горения (прозрачными газами), занимающими данный межтрубный объем в пучке, а также промежуток между пучками или элементами котельного

агрегата, необходимо знать парциальные давления $p_{\text{H}_2\text{O}}$ и p_{CO_2} , среднюю температуру продуктов горения $t_{\text{ср}}$ и величину l — среднюю длину луча для данного объема.

По ним, пользуясь графиками фиг. 71 и 72, можно найти количество излучаемого этими газами тепла q_{CO_2} и $q_{\text{H}_2\text{O}}$ ккал/м² час; значения $q'_{\text{H}_2\text{O}}$ исправляют по формуле

$$q'_{\text{H}_2\text{O}} = \varphi q_{\text{H}_2\text{O}}. \quad (365)$$

Здесь φ — поправочный коэффициент, учитывающий по Эккерту влияние парциального давления водяного пара в продуктах горения на величину его излучения.

После этого обычно суммируют найденные количества тепла, причем

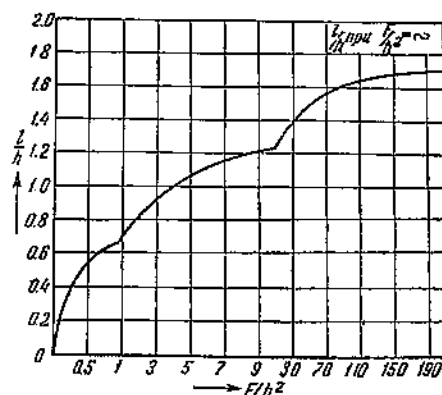
$$Q^p = (q_{\text{CO}_2} + \varphi \cdot q'_{\text{H}_2\text{O}}) H^p = (q_{\text{CO}_2} + q_{\text{H}_2\text{O}}) H^p. \quad (366)$$

При излучении газов в межтрубном пространстве пучка $H^p = H$.

Таблица 40

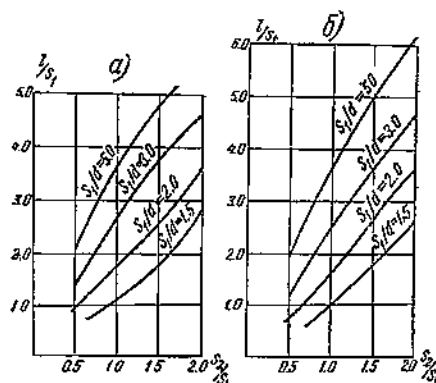
Средняя длина луча (эффективная толщина газового слоя) для некоторых частных случаев объема, заполненного газом

Геометрическая форма объема газа	Средняя длина луча (эффективная толщина газового слоя)
1. Газ между двумя бесконечно большими параллельными плоскостями с расстоянием h между ними. Излучение на плоскости.	$l = 1,8h$
2. Параллелепипед с отношением ребер 1:2:6. Излучение в центр широкой грани; наименьшее ребро имеет размер a .	$l = 1,3a$
3. Куб с ребром a . Излучение на площадку, расположенную в центре грани.	$l = 0,67a$
4. Шар диаметром d . Излучение на его поверхность.	$l = 0,65d$
5. Круглый цилиндр, высота равна диаметру d . Излучение на площадку, расположенную в центре основания.	$l = 0,77d$
6. Круглый цилиндр, высота $h = \infty$, диаметр равен d . Излучение на боковую поверхность.	$l = 0,95d$
7. Круглый цилиндр, высота $h = \infty$, диаметр равен d . Излучение на площадку, расположенную в центре основания.	$l = 0,9d$
8. Полуцилиндр, высота $h = \infty$, основание — полукруг радиуса r . Излучение на площадку, помещенную в центре диаметральной плоскости.	$l = 1,26r$
9. Пучок труб, расположенных в вершинах равнобедренных треугольников. Длина труб $l = \infty$; шаг труб $s = 2d$. Для газа, заполняющего объем между трубами.	$l = 2,8d$
10. То же, но при расположении труб в углах квадратов.	$l = 3,2d$
11. Расположение труб, как в п. 9, но $s = 3,0d$.	$l = 3,8d$



Фиг. 69. Диаграмма для определения средней длины луча (эффективной толщины газового слоя) l в излучающих газовых объемах в зависимости от формы объема $\frac{F}{h^2}$.

F — площадь грани, на которую рассчитывается излучение; h — расстояние до противоположной грани.



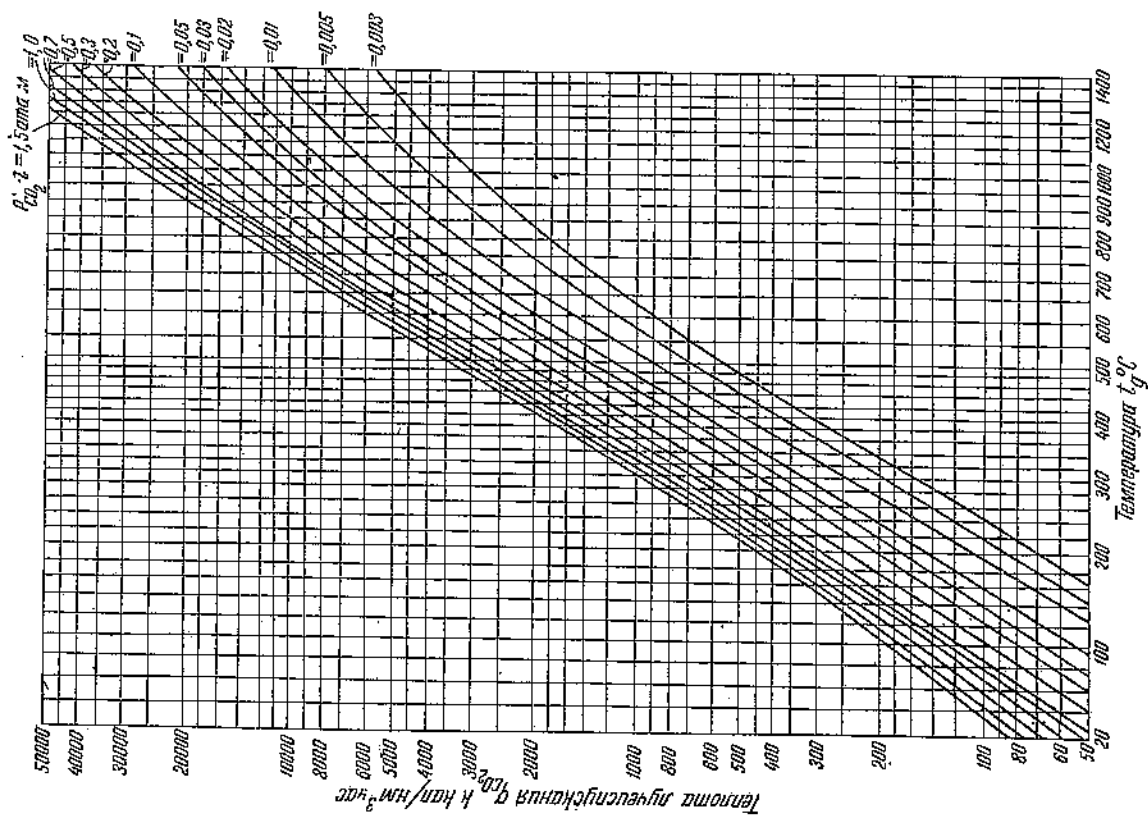
Фиг. 70. Диаграмма для определения средней длины луча излучающего газового объема: а — для коридорных пучков труб; б — для шахматных пучков труб.

В настоящее время Шаком предложены на основе данных Хоттеля, Мангельсдорфа, Эккерта и др. формулы для подсчета количества тепла, излучаемого данным объемом CO_2 и H_2O в зависимости от средней длины луча l м, парциального давления p и температуры $T^\circ \text{K}$:

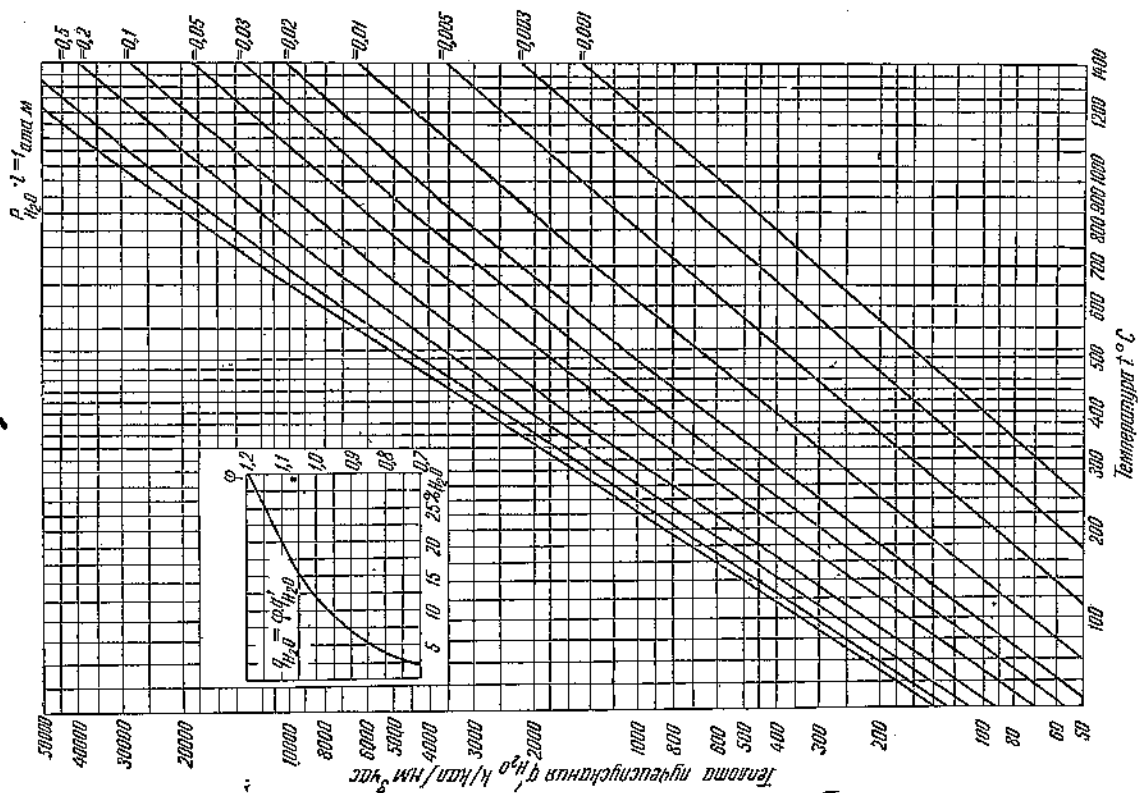
$$q_{\text{CO}_2}^p = 3,5 \sqrt[3]{p l} \left(\frac{T}{100} \right)^{3,5} \text{ ккал/м}^2 \text{ час}, \quad (367)$$

$$q_{\text{H}_2\text{O}}^p = 35 p^{0,8} l^{0,5} \left(\frac{T}{100} \right)^8 \text{ ккал/м}^2 \text{ час}. \quad (368)$$

При лучистом теплообмене в топочной камере и газоходе котла излучающие газы CO_2 и H_2O в свою очередь получают лучистое тепло от стенок газоходов и труб. Это обратное излучение поглощается газами лишь частично. Степень черноты газов, определяющая это поглощение,



Фиг. 71. Номограмма для определения теплоты излучения углекислоты q_{CO_2} в зависимости от парциального давления p_{CO_2} атм , средней длины луча l м и температуры газового слоя t_g $^{\circ}\text{C}$.



Фиг. 72. Номограмма для определения теплоты излучения водяных паров $q_{\text{H}_2\text{O}}$ в зависимости от парциального давления $p_{\text{H}_2\text{O}}$ атм , средней длины луча l м и температуры газового слоя t_g $^{\circ}\text{C}$.

зависит существенно от температуры излучающей стенки и практически почти не зависит от температуры самого газа. Эта степень черноты вычисляется для газа при температуре стенки.

Таким образом тепло, поглощенное стенкой, на которую лучеиспускают газы, будет равняться

$$\Delta q = \varepsilon_{ст} (q_g^p - q_{гст}^p), \quad (369)$$

где q_g^p ккал/м² час — количество тепла, излучаемое газами при их температуре;

$q_{гст}^p$ ккал/м² час — количество тепла, поглощаемое газами и равное количеству тепла, излучаемого газами при температуре стенки;

$\varepsilon_{ст}$ — степень черноты стенки, равная ее поглощательной способности. Для поверхностей нагрева котельного агрегата $\varepsilon_{ст}$ принимается равным 0,80—0,82.

Совместная теплоотдача соприкосновением и излучением. В топочной камере теплоотдача излучением поверхностям нагрева значительно превосходит теплоотдачу соприкосновением и последней обычно пренебрегают. В конвективных же поверхностях нагрева часто приходится учитывать оба вида теплоотдачи. Каждый из этих видов передачи тепла подчиняется своей собственной закономерности. Теплоотдача соприкосновением отдельно определяется по формуле (265), радиацию подсчитывают по формуле (266). При одновременном наличии обоих видов теплопередачи следовало бы пользоваться формулой (267). Однако для обычных технических расчетов формула подобного типа является громоздкой. Для упрощения расчета определение поверхности нагрева конвективных газоходов ведется по формуле (265) теплообмена соприкосновением, но при этом вводится условное понятие коэффициента теплоотдачи излучением $\alpha_{л}$ и суммарного коэффициента теплоотдачи соприкосновением и излучением $\alpha = \alpha_1 + \alpha_{л}$. Коэффициент $\alpha_{л}$ означает количество лучистого тепла в ккал, которое получает каждый квадратный метр стенки от газов на 1°С разности температур газов и стенки.

Коэффициент теплоотдачи излучением для какого-либо элемента котельного агрегата определяется из следующего соотношения:

$$\alpha_{л} = \frac{\Delta q^p}{t_g - t_{ст}} = \frac{\varepsilon_{ст} (q_g^p - q_{гст}^p)}{t_g - t_{ст}}. \quad (370)$$

Кох предложил номограмму (фиг. 73), пользуясь которой по температуре продуктов горения t_g °С, величине $p_{CO_2} \cdot l$ и $p_{H_2O} \cdot l$ в мм ат и температуре стенки $t_{ст}$ °С определяют степень

черноты каждого газа в процентах

$$\varepsilon_{CO_2} = \frac{q_{CO_2}^p}{E_0} \quad \text{и} \quad \varepsilon_{H_2O} = \frac{q_{H_2O}^p}{E_0},$$

где

$$E_0 = C_0 \left(\frac{T_g}{100} \right)^4.$$

По степени черноты в той же номограмме определяют

$$(\alpha_{л})_{CO_2} \quad \text{и} \quad (\alpha_{л})_{H_2O}$$

и затем

$$(\alpha_{л}) = (\alpha_{л})_{CO_2} + (\alpha_{л})_{H_2O}.$$

Выражение для коэффициента теплопередачи при учете радиации газов коэффициентом $\alpha_{л}$ принимает следующий вид:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1 + \alpha_{л}} + \sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}. \quad (371)$$

Теплоотдачу излучением газов обычно учитывают во всех газоходах котельного агрегата кроме воздухоподогревателя, где t_g невелико и $\alpha_{л}$ незначительно.

При расчете теплоотдачи соприкосновением и лучеиспусканием газов в газоходах определение различных постоянных, входящих в выражение для коэффициентов теплоотдачи, относится условно к средней температуре газов в газоходе. Достаточно точное для этих целей усреднение температур газов производится следующим образом. Определяется средняя температура нагреваемого тела — воды, пара, воздуха

$$t_i = \frac{t'_i + t''_i}{2} \quad (372)$$

и к ней прибавляется средняя температурная разность между греющим и нагреваемым телом

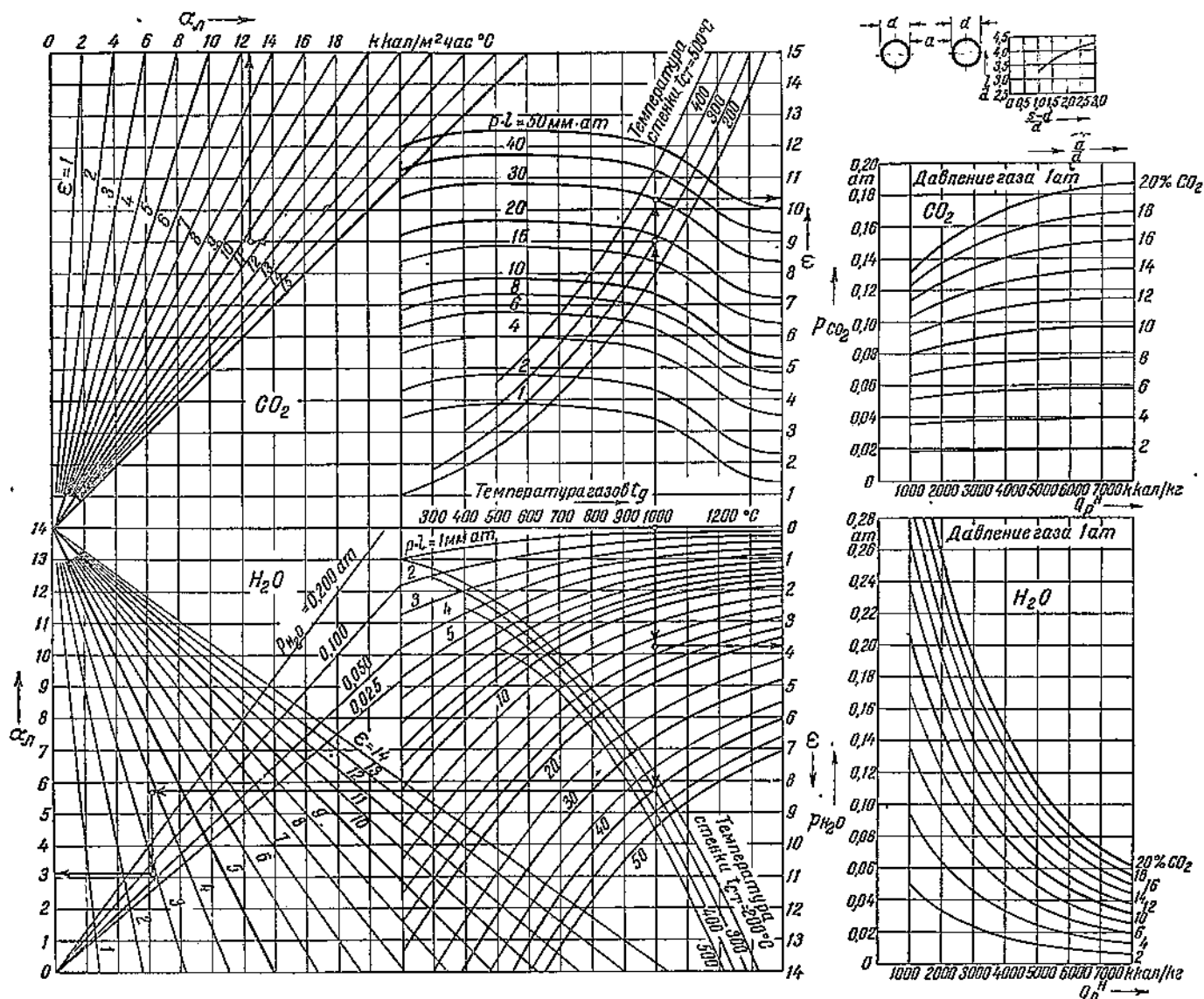
$$(t_g)_{cp} = (t_i)_{cp} + \Delta t_{cp}. \quad (373)$$

Величина Δt_{cp} определяется согласно § 29 по формуле (278).

Определение величин α_1 и $\alpha_{л}$ производилось лишь в лабораторных условиях. В действительности при работе котельных агрегатов имеет место внутреннее и внешнее загрязнение поверхностей нагрева, недостаточное их омывание газами и другие обстоятельства, приводящие к снижению величины α_1 и $\alpha_{л}$. По предложению Семенова-Деяткова (ЦКТИ) это учитывается коэффициентом $\xi \leq 1$, на который умножается теоретически найденная величина k для случая чистой поверхности.

Таким образом действительный коэффициент теплопередачи

$$k_d = \xi k \text{ ккал/м}^2 \text{ час } ^\circ\text{C}. \quad (374)$$



Фиг. 73. Номограмма для определения условного коэффициента теплоотдачи излучением для углекислоты и водяного пара (по Коху). На вспомогательной диаграмме справа сверху по оси ординат отложено отношение l/d , а по оси абсцисс $(s-d)/d$.

Если пренебречь незначительной величиной $\frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}}$, то

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1 + \alpha_n} + \frac{1}{\alpha_2}$$

или

$$k = \frac{(\alpha_1 + \alpha_n) \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_n + \alpha_2} \quad (375)$$

и, следовательно,

$$k_D = \xi \frac{(\alpha_1 + \alpha_n) \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_n + \alpha_2} \quad (376)$$

Подобное выражение применяется для воздухоподогревателей и пароперегревателей, где $(\alpha_1 + \alpha_n)$ и α_2 близки друг к другу по величине. Если же α_2 велико сравнительно с $\alpha_1 + \alpha_n$, как

это, например, имеет место в котельных и экономайзерных поверхностях, то

$$k_D \approx \xi (\alpha_1 + \alpha_n). \quad (377)$$

Величина ξ имеет различные значения для разных типов котлов и различных частей котельного агрегата. По данным ЦКТИ значения ξ можно брать по табл. 41.

При пользовании этим методом для определения α_n необходимо задаваться величиной $t_{ст}$.

Метод, принятый БПК и ВТИ, учитывает загрязнение поверхности нагрева коэффициентом теплового сопротивления стенки R . При этом для котла и экономайзера, где $\frac{1}{\alpha_n}$ мало

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1 + \alpha_n} + R,$$

откуда

$$k = \frac{\alpha_1 + \alpha_n}{1 + R(\alpha_1 + \alpha_n)} \quad (378)$$

Для воздухоподогревателей и пароперегревателей, где $\frac{1}{\alpha_2}$ больше,

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1 + \alpha_n} + \frac{1}{\alpha_2} + R,$$

откуда

$$k = \frac{(\alpha_1 + \alpha_n) \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_n + \alpha_2 + R \alpha_2 (\alpha_1 + \alpha_n)} \quad (379)$$

По данным ВТИ величина R колеблется для всех поверхностей нагрева в пределах $R = 0,005—0,010$.

БПК для расчета прямоточных котлов принимает эту величину в пределах $R = 0,003—0,005$.

Меньшие значения для R принимаются при низкой зольности топлива, малой липкости золы, наличии рациональной обдувки, повышенной скорости газов.

Учет неправильного омывания газами поверхностей нагрева при этом методе достигается тем, что в зависимости от той или иной степени отклонения от нормальных условий обтекания поверхностей нагрева газами, теоретическая величина α_1 , определяемая по § 31, уменьшается и принимается равной

$$\alpha' = \zeta \alpha_1, \quad (380)$$

где ζ — коэффициент омывания, учитывающий различия законов теплообмена в лабораторных и промышленных установках.

Для котла Бабкок-Вилькоккс морского типа ВТИ (Скворцов) даст следующие значения этого коэффициента:

для первого хода, включающего первый пучок $\zeta = 0,9$
 для второго хода, включающего одну часть второго пучка непосредственно после пароперегревателя $\zeta = 1,0$
 для третьего хода, состоящего из двух последовательно омываемых частей второго пучка $\zeta = 0,75$

Таблица 41
Значение поправочного коэффициента ξ

Тип котла и элемент котельного агрегата	Значение ξ для			
	первого хода	пароперегревателя	второго хода	других элементов котельного агрегата
Современные котлы с многорядными омываемыми поперечно пучками	0,75—0,85	0,80—0,90	—	—
Секционные котлы со слабо наклоненными трубами *	0,70—0,80 $\frac{F_{cp}}{F_{cv}}$ **	0,80—0,95	0,70—0,80	—
Котлы с круто наклоненными трубами . . .	0,55—0,65	0,80—0,85	0,90—1,0	—
Экономайзеры:				
а) змеевикового типа	—	—	—	0,90—1,0
б) Бабкок-Вилькоккс	—	—	—	0,55—0,65
Воздухоподогреватели:				
А. Пластинчатые	—	—	—	0,90—1,0
Б. Трубчатые	—	—	—	0,70***
В. Чугунный ребристый воздухоподогреватель	—	—	—	0,80
				0,80—1,0

* При сжигании мазута.

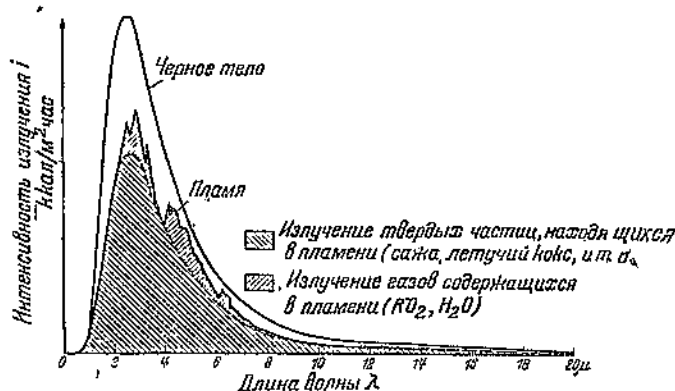
** F_{cp} м² — среднее сечение пучка; F_{cv} м² — среднее сечение пучка, не перекрытое перегородками.

*** Цифра 0,7 соответствует малому, а 0,8 большому температурному напору на горячей стороне.

Примечания:

1. При сжигании нешлакующих топлив (дрова, хорошо очищенный доменный газ) у новых котлов можно принимать для первого пучка, пароперегревателя и экономайзера $\xi = 0,90—1,0$.

2. При сжигании мазута и природного газа вследствие возможности сажистых отложений в воздухоподогревателях (зоны температур газов до 300—400°С) можно принимать $\xi = 0,60—0,80$. Более низкие значения ξ относятся и к более низким температурам.



Фиг. 74. Зависимость интенсивности излучения i ккал/м² час пламени от длины волны λ .

Этими цифрами можно с известным приближением пользоваться также для мелких котлов старых конструкций с аналогичным движением газов.

Для новых конструкций котлов, где в большинстве случаев имеет место строго поперечный характер потока, можно принимать $\zeta = 1,0$.

Определение величины α_d производится по формуле (370).

Для определения величины α_1 (см. § 31) и α_d необходимо знать температуру стенки $t'_{ст}$, под которой в данном случае следует подразумевать наружную температуру внешнего слоя загрязнений на поверхности нагрева. Эта температура в отдельных случаях может быть значительно выше температуры металла. Поэтому можно рекомендовать, задавшись первоначальной величиной $t'_{ст}$ и производя все расчеты, проверить затем величину $t'_{ст}$ по формуле

$$\left. \begin{aligned} t'_{ст} &= t_t + \frac{Q}{H} \left(R + \frac{1}{\alpha_2} \right), \\ t'_{ст} &= t_t + \left(R + \frac{1}{\alpha_2} \right) k \Delta t_{ср}. \end{aligned} \right\} \quad (381)$$

Если полученная при проверке величина $t'_{ст}$ отличается от принятой вначале более чем на 50° С в первых газоходах котельного агрегата или на 10—20° С в задних газоходах, то расчет следует откорректировать. Меньшая величина расхождения найденного предварительным расчетом и принятого вначале значений температуры мало сказывается на конечном результате и не требует дополнительного пересчета.

Метод исправления коэффициента теплопередачи по дополнительному тепловому сопротивлению более соответствует физическому смыслу действительных процессов и лучше учитывает влияние скоростей газов в газоходах. Но в настоящее время необходимые для различных случаев расчетные значения R еще недостаточно уточнены.

36. Теплоизлучение в топках

При одной и той же температуре процесса коэффициент излучения пламени в топках больше коэффициента прозрачных газов. Из фиг. 74 видно, что увеличенная способность излучения пламени объясняется присутствием сильно излучающих частиц: сажи, кокса, летучей золы. Большая толщина

факела, присутствие в факеле твердых частиц и наличие в топке незаэкранированных стен повышают приведенную степень черноты факела.

Ввиду чрезвычайной сложности и недостаточной изученности вопроса расчеты суммарного излучения в топках до сих пор производятся по эмпирическим формулам и данным. Таких формул и способов имеется очень много. Некоторые из них основываются, с рядом допущений, на общих законах теплопередачи радиацией, с введением эмпирических коэффициентов. Ниже приведены некоторые способы и формулы для расчета лучеиспускания в топках, предложенные у нас в самое последнее время. Ряд старых способов и формул опубликован в нашей технической литературе. ВТИ (Тимофеев) принимает для определения поверхности нагрева, воспринимающей тепло излучением топки, следующую расчетную формулу, исходящую из закона Стефана-Больцмана с рядом условных допущений:

$$H^p = \frac{Q^p}{\sigma'_0 \cdot T_\phi^4}, \quad (382)$$

где T_ϕ °К — средняя условная температура факела, излучающего в топке. При этом методе предлагается подсчитывать ее по формуле

$$T_\phi^4 = \tau_\phi (T'_\phi)^4 = T_z^2 (T''_m)^2 \tau_\phi, \quad (383)$$

где τ_ϕ — поправочный коэффициент усреднения температур излучения;

$\sigma'_0 \cdot 10^8 = \tau_\phi \cdot \sigma_0 \cdot 10^8$ — взаимный коэффициент излучения топки и поверхности нагрева с учетом обратного излучения обмуровки.

Здесь

$$\sigma_0 = 4,96 \cdot 10^{-8} \cdot \epsilon'_\phi \frac{1 - \psi \epsilon'_\phi}{\psi (1 - 2\epsilon'_\phi) + \epsilon'_\phi} \tau_\phi, \quad (384)$$

ϵ'_ϕ — степень черноты факела, если бы в нем были только несветящиеся газы;

ψ — степень экранирования топочной камеры равная $\frac{H^p}{H_{ст}}$, т. е. отношение эффективной лучевоспринимающей поверхности H^p к поверхности стен топки $H_{ст}$.

При данном способе расчета условно предполагается, что излучение газового факела эквивалентно излучению трехатомных газов [см. формулы (367) и (368)] при усредненной температуре $T'_\phi = \sqrt{T_z^2 \cdot (T''_m)^2}$. При этом состав газов берется в конце топки.

После деления величины q_{CO_2} и q_{H_2O} на $4,96 (T'_\phi)^4$ получается

$$\epsilon'_\phi = 7,06 \frac{\sqrt{p_{CO_2} \cdot l}}{(T'_\phi)^{0,5}} + 706 \frac{p_{H_2O}^{0,8} \cdot l^{0,8}}{T'_\phi}. \quad (385)$$

При этом условно принимается, что толщина излучающего слоя

$$l = \sqrt[3]{V_m \cdot \mu}; \quad (386)$$

τ_e — поправочный коэффициент к величине степени черноты топки, учитывающий отклонение действительных условий излучения в топке от принятых выше условий и наличие некоторого засорения поверхностей нагрева.

По данным ВТИ при этом методе расчета произведение величин τ_ϕ и τ_e , т. е. обоих принятых поправочных коэффициентов усреднения, $\tau = \tau_e \cdot \tau_\phi$ мало меняется для самых разнообразных топлив и топок.

Для величин $\frac{Q}{V_m} > 100\,000$ ккал/м³ час величина τ практически постоянна и равна примерно 0,6. При $\frac{Q}{V} < 100\,000$ ккал/м³ час величина τ для пылеугольных топок постепенно уменьшается и является функцией $\frac{Q}{V}$.

Учитывая эти выражения для отдельных величин, можно формулу (382) представить в следующем виде:

$$H^p = \frac{Q^p}{4,96 \cdot \tau \cdot \epsilon'_m \left(\frac{T_g}{100}\right)^2 \left(\frac{T_m}{100}\right)^2}, \quad (387)$$

где ϵ'_m — взаимная условная степень черноты топки (если излучают лишь трехатомные газы и обмуровка)

$$\epsilon'_m = \epsilon'_\phi \frac{1 - \psi \epsilon'_\phi}{\psi (1 - 2\epsilon'_\phi) + \epsilon'_\phi}, \quad (388)$$

а

$$\epsilon'_\phi = 0,706 \frac{\sqrt[4]{p \cos \alpha \cdot l}}{\sqrt{\frac{T_g}{100} \cdot \frac{T_m}{100}}} + 7,06 \frac{p_{H_2O}^{0,8} \cdot l^{0,6}}{\sqrt{\left(\frac{T_g}{100}\right) \cdot \left(\frac{T_m}{100}\right)}}. \quad (389)$$

Эффективная лучевоспринимающая поверхность топки

$$H^p = H_g^p + H_{\kappa}^p + H_{\text{гр}}^p, \quad (390)$$

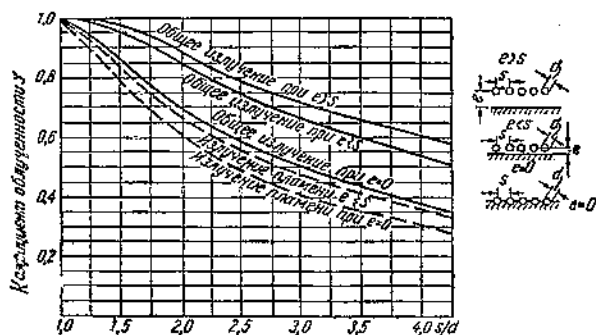
где H^p м² — суммарная эффективная лучевоспринимающая поверхность в топке;

H_g^p — эффективная лучевоспринимающая поверхность экрана;

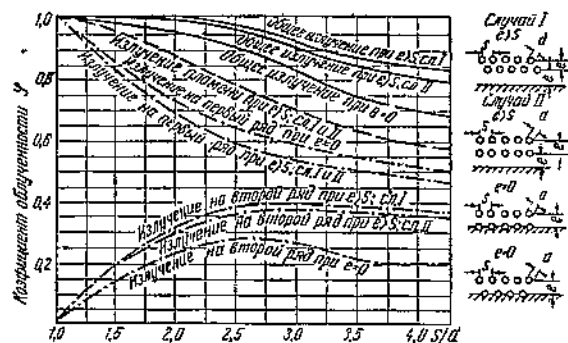
H_{κ} — эффективная лучевоспринимающая поверхность котельного пучка;

$H_{\text{гр}}^p$ — эффективная лучевоспринимающая поверхность гранулятора.

$$H_g^p = H_g \cdot \varphi_g,$$



Фиг. 75. Зависимость коэффициента облученности от $\frac{s}{d}$ для однорядных пучков.



Фиг. 76. Зависимость коэффициента облученности от $\frac{s}{d}$ для двухрядных пучков.

где H_g — полная поверхность нагрева экрана;
 φ_g — коэффициент облученности поверхности экрана с учетом обратного излучения (рефлекторного действия) кладки¹

$$\varphi_g = \left[1 - \frac{\left(\arctg \sqrt{\left(\frac{s}{d}\right)^2 - 1} - \sqrt{\left(\frac{s}{d}\right)^2 - 1} \right)^2}{\frac{s}{d}} \right] \frac{s}{d}. \quad (391)$$

Если отнести H_g^p не к полной поверхности труб экрана, а к поверхности экранированной стенки H_g^{cm} , то

$$H_g^p = H_g^{cm} \cdot \psi_g. \quad (392)$$

Между φ_g и ψ_g имеется следующее соотношение:

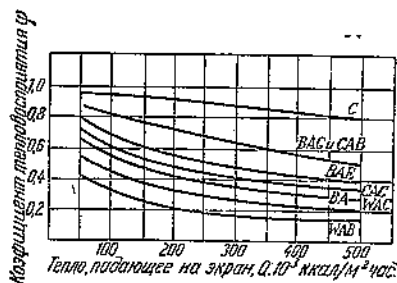
$$\psi_g = \varphi_g \frac{\pi}{s/d}. \quad (393)$$

Значения ψ_g можно определять также по графикам Эккерта (фиг. 75 и 76).

В случае применения плавникового экрана типа Муррей

$$H_g^p = 0,95 H_g^{cm},$$

¹ См. также табл. 39, графы 10 и 286.



Фиг. 77. Зависимость коэффициента теплового восприятия футерованных плит от теплового потока.

т. е.

$$\psi_g = 0,95. \quad (394)$$

Для футерованных плит (Бейли) коэффициент теплового восприятия ψ зависит от материала, размеров и конструкции плит, а также от теплового потока, падающего на них.

Для них также можно написать

$$H_g^p = \psi H_g^{cm}. \quad (395)$$

Тепловой поток, падающий на плиты, вычисляется из соотношения

$$\frac{Q^p}{H_g^p} = \frac{Q^p}{\psi_g H_g^{cm}}. \quad (396)$$

Величины ψ для футерованных плит в зависимости от интенсивности теплового потока приведены на фиг. 77.

Для обращенного в топочную камеру конвективного пучка котельного агрегата

$$H_g^p = b l,$$

где b — ширина пучка, обычно равная ширине топочной камеры;

l — длина труб со стороны топочной камеры, т. е. здесь

$$\psi_g = 1. \quad (397)$$

Для гладкотрубного гранулятора

$$H_{gp}^p = H_{gp} \varphi_{gp}, \quad (398)$$

где φ_{gp} вычисляется по формуле (363) (см. также табл. 39, случай 10) без учета обратного излучения кладки.

Влияние излучающего слоя топлива в слоевых топках при данном методе учитывается, принимая его излучение равным излучению раскаленной обмуровки, т. е. включая эту поверхность в обмуровку топки.

Величина Q^p — тепло, переданное радиацией в топочной камере, определяется как разность

между теплом, введенным в топку, и теплом газов, покидающих топку,

$$Q^p = B [Q_p^u \eta'_m - v_g c_g t'_m], \quad (399)$$

где η'_m — коэффициент теплового выделения в топке по отношению к теплотворной способности топлива, иначе называемый коэффициентом эффективности топки.

$$\eta'_m = 1 - \frac{q_3 + q_4 + q_5^m}{100} + \frac{Q_L + Q_B + (Q_g)_{pec} + Q_p^u - Q_\phi^w - Q_w}{Q_p^u}. \quad (400)$$

Здесь тепло, вносимое влажным воздухом в топку на 1 кг топлива¹,

$$Q_L = V'_0 \alpha''_{en} \left(1 - \frac{q_5^m}{100}\right) (c_L + 0,00129 d c_n) t''_{en} + (\Delta \alpha_{c,nc} + \Delta \alpha_m) V'_0 (c_L + 0,00129 d c_n) t_L. \quad (401)$$

Тепло, внесенное 1 кг топлива,

$$Q_B = c_B \cdot t_B. \quad (402)$$

Тепло, вносимое в топку рециркулирующими газами на 1 кг топлива,

$$(Q_g)_{pec} = (\Delta V_g)_{pec} (c_g)_{pec} (t_g)_{pec}. \quad (403)$$

Тепло, вносимое в топку паром на 1 кг топлива,

$$Q_\phi = W_\phi c_n t_n. \quad (404)$$

Тепло, затрачиваемое на испарение подаваемой в топку воды,

$$Q_w = Q_\phi^w (r - t_w). \quad (405)$$

Тепло, теряемое со шлаками на 1 кг топлива:

а) при гранулированном шлакоудалении

$$Q_m = \frac{A_p^m}{100} c_m \cdot t_m; \quad (406a)$$

б) при жидком шлакоудалении

$$Q_m = \frac{A_p^m}{100} (c_m t_m + r_m). \quad (406b)$$

При незначительной зольности топлива, если

$$A_p < \frac{Q_p^u}{150}, \quad (407)$$

влиянием золы и шлака можно пренебрегать.

¹ α''_{en} — в данном случае [формула (401)] относится к количеству воздуха, выходящего из воздухоподогревателя, а не к избытку в дымовых газах после воздухоподогревателя.

Точно так же выпадают из формул соответствующие члены, если нет рециркуляции, вбрызгивания воды или подачи пара.

При указанных выше обозначениях теоретическая температура горения

$$T_2 = t_2 + 273 = \frac{Q_p \cdot \eta'_m - \frac{A_p}{100} r_m + Q_{in}}{V_g c_g \left(1 - \frac{q_4}{100}\right) + \frac{A_p}{100} c_m + \Delta V_g^{pec} \cdot c_g^{pec} + W_{\phi}^n \cdot c_n + W_{\phi}^w \cdot c_n} + 273^\circ \quad (408a)$$

в том случае, если все вводимые в топку вещества попадают в корень факела.

Если же, как это иногда делается для борьбы со шлакованием, ввод дополнительного воздуха или рециркуляционных газов, или воды, или пара производится не в корень факела, а в конец топки, для снижения температуры перед первым газоходом, то

$$T_2 = t_2 + 273 = \frac{Q_p \cdot \eta'_m - \frac{A_p}{100} r_m - \Delta x_m V'_0 (c_L + 0,00129 d c_n) t_L - Q_g^{pec} - Q_{\phi}^n - Q_{\phi}^w + Q_{in}}{V_g c_g \left(1 - \frac{q_4}{100}\right) - \Delta x_m V'_0 (c_L + 0,00129 d c_n) t_L + \frac{A_p}{100} \cdot c_m} + 273. \quad (408b)$$

В случае, когда расчет преследует цель определения необходимой радиационной поверхности нагрева в топке, по заданным величинам B , t''_m и т. д. совместным решением уравнений (387) и (399) можно получить следующее выражение:

$$\psi = \frac{H^p}{H_{cm}} = \frac{2}{\left[y + 2 - \frac{1}{\epsilon_{\phi}}\right] + \sqrt{\left(y + 2 - \frac{1}{\epsilon_{\phi}}\right)^2 - 4 \epsilon'_{\phi} \cdot y}}, \quad (409)$$

$$\text{где } y = \frac{4,96 \cdot \tau \cdot H_{cm} \cdot \left(\frac{T_2}{100}\right)^2 \cdot \left(\frac{T''_m}{100}\right)^2}{Q^p}. \quad (410)$$

Из формулы (409) следует, что если $y = \frac{1}{\epsilon_{\phi}}$, то $\psi = 1$.

Поэтому при отсутствии промежуточных экранов в топке необходимо, чтобы $y > \frac{1}{\epsilon_{\phi}}$.

В случае если желательно иметь определенную степень экранирования ψ топки (например, сплошное экранирование), то, пользуясь формулами (409) и (410), можно соответственным образом подобрать величину y , за счет изменения в первую очередь величины H_{cm} , связанной с объемом топки.

Эффективная лучевоспринимающая поверхность экранов при вычисленном значении ψ определяется из уравнения

$$H^p = \psi H_{cm} - H''_c - H''_s. \quad (411)$$

Если при заданном экранировании топки необходимо определить температуру в конце топки,

то при совместном решении уравнений (387) и (399) получается

$$t''_m = \frac{2T_0}{1 + \sqrt{1 + \frac{4T_0}{x}}} - 273, \quad (412)$$

$$\text{где } T_0 = \frac{Q_p \cdot \eta'_m}{(V_g \cdot c_g)_m} + 273,$$

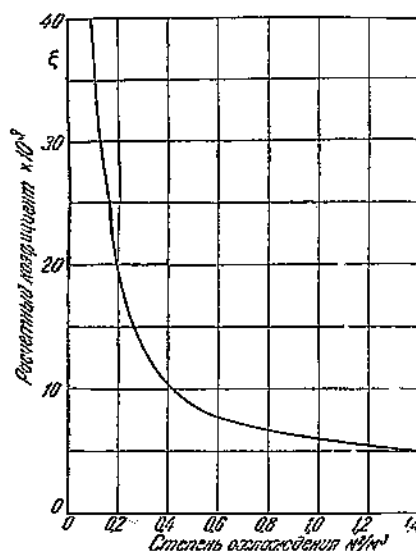
$$\text{а } x = \frac{B(V_g c_g)_m}{H^p \tau \cdot 4,96 \cdot \frac{1}{100} \cdot \left(\frac{T_2}{100}\right)^2}.$$

Величины V_g и c_g в формулах для T_0 и x принимаются при температуре и составе газов в конце топки.

Для определения t''_m необходимо предварительно ориентировочно задаться этой величиной для определения T_0 и x и затем вычислить ее по формуле (412).

По данным ВТИ изложенный выше метод расчета проверен на многочисленных опытах и дает весьма хорошую сходимость с опытами как по численному значению вычислений и опытной температуре газов в конце топки, так и ее зависимости от различных параметров топочного процесса.

Следует отметить, что данный метод расчета составлен для средних условий шлакования и не вводит дополнительных коэффициентов шлакования топки. Автор способа объясняет это тем, что при сильно экранированных топках в первое время после очистки зашлакованных поверхностей, в начальный период шлакования, оно хотя и уменьшает активную величину H^p , но одновременно увеличивает поверхность обмуровки и, следовательно, уменьшает ψ , что в свою очередь увеличивает ϵ'_m приведенную степень черноты топки. Это частично компенсирует в начале (с точки зрения величины t''_m) влияние уменьшения H^p . В дальнейшем, однако, увеличение степени черноты не может компенсировать уменьшения H^p , и t''_m быстро растет. Но при ее значительном росте шлакование резко интенсифицируется, повышается перегрев пара и т. д. Нормальная работа делается невозможной, и топка должна быть очищена от шлаков.



Фиг. 78. Зависимость коэффициента охлаждения ϵ от степени охлаждения топки

$$\chi_0 = \eta \frac{H^p}{V_m} \text{ м}^2/\text{м}^3.$$

Большой известностью пользуется и весьма часто применяется в последние годы в СССР для расчета теплоизлучения в топке формула Гурвича-Оррока. Ниже приведена эта формула в одной из последних ее модификаций¹.

Формула имеет следующий вид:

$$\mu = \frac{1}{1 + \frac{\epsilon}{\chi_0} \sqrt{\frac{BQ_p^{\eta_m}}{V_m}}} \quad (413)$$

Обозначения в этой формуле те же, что и выше. Дополнительно

μ — доля тепла на 1 кг топлива, передаваемая радиацией в топке, отнесенная к величине $Q_p^{\eta_m}$;

ϵ — расчетный коэффициент, связанный с величиной $\chi = \frac{H^p}{V_m}$, т. е. отношением эффективной поверхности радиации в топке к объему топки.

Связь между ϵ и χ , полученная на основании эмпирических данных, показана на фиг. 78.

В случае сжигания твердого топлива при этом методе предлагается учитывать влияние загрязнения радиационных поверхностей нагрева тем, что вместо чисто геометрического коэффициента χ учитывается коэффициент

$$\chi_0 = \chi \chi_z \quad (414)$$

где χ_0 — эффективная степень охлаждения топки при данном загрязнении;

χ_z — коэффициент загрязнения.

Значения коэффициента χ по данным Гурвича следующие:

для пылеугольных топок при постоянной действующей обдувке	0,92
то же, для средних условий	0,72
для слоевых топок	0,9

¹ См. журнал „Советское котлотурбостроение“ № 8 за 1940 г., стр. 258. Статья А. М. Гурвич и П. Н. Кендысь.

Впрочем авторы указывают, что даже при отсутствии заметного шлакования величина χ может колебаться в пределах 0,6—1,0.

В табл. 42 показаны характеристики топок, охваченных формулой (413) по данным авторов.

Пользоваться формулой (413) можно следующим образом.

При новом проектировании, если задана величина t_m'' , определяется величина μ из формулы (399) и формулы

$$\mu = \frac{Q^p}{B \cdot Q_p^{\eta_m}} \quad (415)$$

и из формулы (413) определяется величина ϵ . По полученной величине ϵ из графика фиг. 78 определяется величина χ_0 . Учитывая загрязнение, определяется

$$\chi = \frac{\chi_0}{\chi_z}.$$

Таблица 42

Границы применимости формулы (413)

Род топлива и способ сжигания	Степень охлаждения топки χ в м ² /м ³		Нагрузка топки $\frac{BQ_p^{\eta_m}}{V_m} \cdot 10^{-3}$ в ккал/м ³ /час		Теоретическая температура горения t_2 в °С		Доля тепла топлива, передаваемая радиацией μ в %	
	от	до	от	до	от	до	от	до
Жидкое топливо	0,15	3,5	15	1750	850	2100	20	75
Газообразное топливо			25	440	850	2000	15	65
Угольная пыль			50	350	1450	2150	20	65
Слоевое горение			130	400	1350	1950	15	40

После этого определяется H^p

$$H^p = V_m \cdot \chi_0 \quad (416)$$

Определение величины H^p аналогично предыдущему.

При проверочном расчете, т. е. при известном H^p , а следовательно и ϵ , определяется из формулы (413) величина μ . Из формулы (415) определяется Q^p , а по Q^p из формулы (399) определяется t_m'' .

Существующие формулы для расчета теплоизлучения в топках пока еще недостаточно точно отражают все сложные явления, происходящие в топочной камере. Поэтому дальнейшее развитие расчета излучения в топочных камерах имеет огромное значение, поскольку теплопередача в топочной камере является основным процессом в работе современных котельных агрегатов.

РАЗДЕЛ ВТОРОЙ

ТОПОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ХАРАКТЕРИСТИКА ТОПОК И ПРОЦЕССОВ, СОВЕРШАЮЩИХСЯ В НИХ. ТОПКИ С НЕПОДВИЖНЫМ СЛОЕМ ТОПЛИВА

37. Виды топочных устройств и общая характеристика их

В котельных установках применяются топки различных конструкций, что определяется разнообразием сжигаемых топлив. Конструкция топки сильно зависит от физического состояния топлива (кусковое, пылевидное, жидкое и газообразное), его теплотворной способности, размеров кусков, влажности, содержания горючих, спекаемости, зольности, характеристики шлака и т. п. Имеется два основных способа сжигания топлива: слоевой и камерный или факельный.

Объем топки между слоем топлива и поверхностью нагрева называется топочной камерой или камерой горения слоевой топки. В ней происходит сгорание вышедших из слоя горючих газов и мелких частиц топлива. Объем же, расположенный под решеткой, носит название зольника.

В камерных топках сжигают газ, жидкое топливо, искусственно приготовленную угольную пыль размером до 200 м, а иногда мелко дробленое топливо, фрезерный торф и древесные опилки. Горение топлив во взвешенном состоянии происходит в факеле, располагающемся в камере горения или топочной камере.

Жидкое топливо перед сжиганием подвергается распылению на капли примерно такого же размера, как и угольная пыль. Распыление осуществляется действием кинетической энергии струи пара или сжатого воздуха, либо же механическим путем. Соответственно этому распыление производится в паровых воздушных или механических форсунках. К механическим форсункам струю топлива подают под давлением, благодаря которому и осуществляется распыление. Угольная пыль и газ подаются в топочную камеру через пылеугольные и газовые горелки.

При камерном сжигании воздух, попадающий в топочную камеру вместе с топливом, носит

название первичного. Воздух, который вводится отдельно от топлива, называется вторичным. При слоевом сжигании первичным называется воздух, подаваемый через слой топлива, а вторичным — подаваемый непосредственно в топочную камеру. Сопротивления решетки, слоя топлива, горелок, воздушных коробов, запорных устройств на воздухо- и газопроводах преодолеваются тягодутьевыми устройствами, создающими разрежение в топочной камере, или же давление воздуха под решеткой (при слоевых топках) и перед горелкой (при факельных топках).

Типы топочных устройств можно разбить на следующие группы (фиг. 79):

1. Топки для слоевого сжигания

1. Топки с неподвижным слоем топлива
 - а) плоская решетка с ручной подачей топлива
 - б) плоская решетка с механизированной подачей топлива на слой.

2. Топки с движущимся слоем топлива:

- А. Движение слоя по неподвижной решетке под действием силы тяжести (полумеханические топки):
 - а) наклонные и ступенчатые решетки;
 - б) шахтные топки.

Б. Принужденное движение слоя вместе с решеткой (слой неподвижен относительно решетки):

- а) целные решетки.

В. Принужденное движение слоя по решетке под действием механизмов:

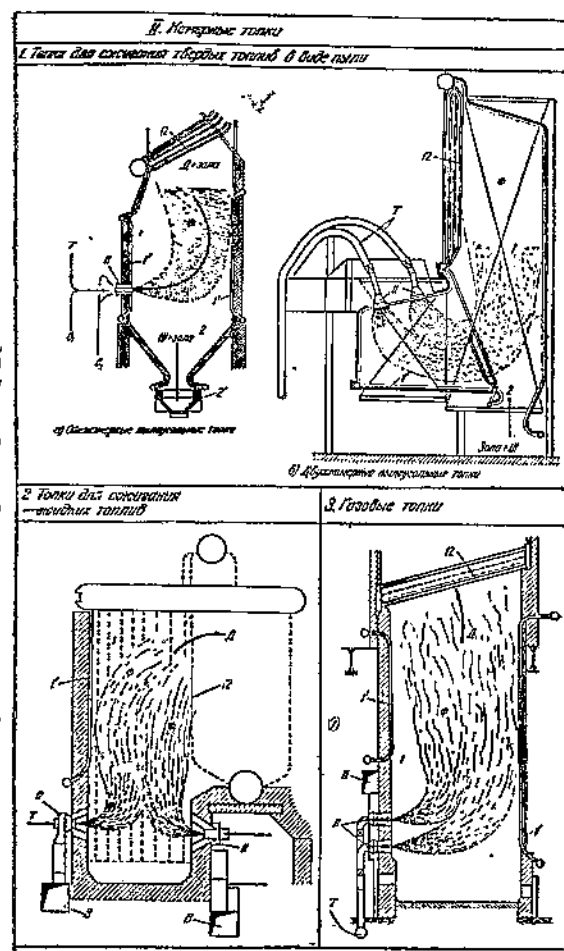
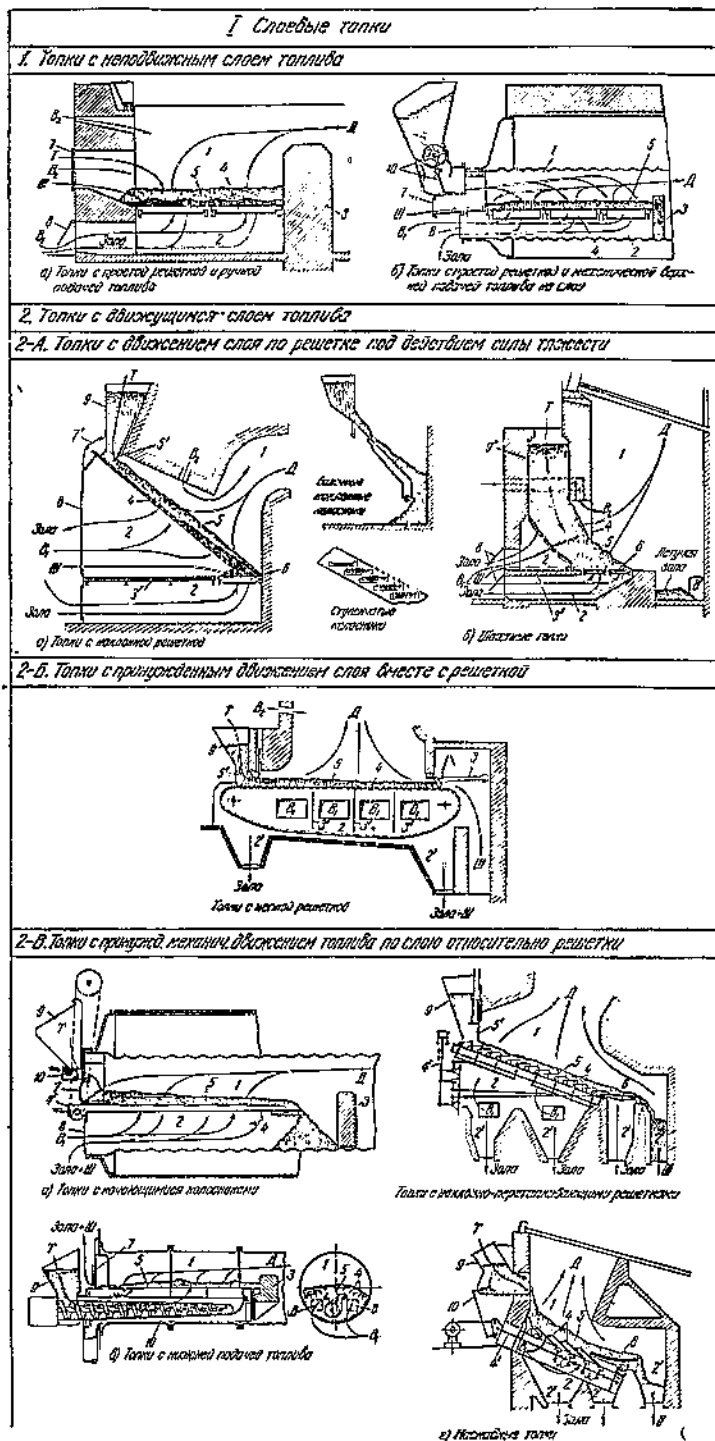
- а) решетки с качающимися колосниками;
- б) наклонно-переталкивающие решетки;
- в) решетки с нижней подачей топлива;
- г) каскадные решетки.

II. Камерные топки

1. Топки для сжигания твердых топлив в виде пыли:
 - а) однокамерные пылеугольные топки;
 - б) двухкамерные пылеугольные топки с жидким шлакоудалением.

2. Топки для сжигания жидких топлив.

3. Топки для сжигания газов.



Фиг. 79. Схемы топок различных типов.

1—топочная камера; 1'—топочный экран; 2—золинник; 2'—золовая воронка (или шлаковая воронка); 3—порог; 3'—стенка, разделяющая золинник на зоны; 4—колосниковая решетка; 4'—механизм для движения колосников; 5—слой топлива; 5'—шибер для регулирования слоя топлива; 6—шлаковая колосниковая решетка; 7—топочная дверка; 7'—дверка для выравнивания слоя топлива; 8—золинниковая дверка; 8'—дверка для удаления летучей золы; 9—затрубочная воронка; 9'—шахта для подсушивания топлива; 10—механизм для подачи топлива; 11—горелка (или форсунка); 12—первый конвективный пучок котла. Т—путь топлива; В₁—первичный воздух; В₂—вторичный воздух; Ф—факел; Ш—удаление шлака; Д—продукты горения (дымовые газы); Зола—зола+провал.

III. Камерно-слоевые топки и топки смешанного типа

1. Топки для камерного сжигания с дополнительной решеткой, сжигание фрезерного торфа, вихревая топка, шахтно-мельничная топка.

2. Слоевые топки с дополнительным сжиганием пыли или мелочи в камере.

3. Топки для сжигания неустойчивым слоем (взвешенное сжигание).

4. Топки для смешанного сжигания топлив—сжигание доменного газа с угольной пылью и другие комбинации.

В мелких и средних котлах старых конструкций топки по положению в котельном агрегате делятся на внутренние, нижние и выносные. Внутренние топки применяются в жаротрубных, паровозных и тому подобных котлах; они

размещаются либо в жаровых трубах, либо в огневых коробках. Нижние топki широко применяются в разнообразных типах котельных агрегатов. Выносные топki помещаются обычно перед котлом и имеют самостоятельную обмуровку. Они применяются в мелких котельных, преимущественно для сжигания низкосортных топлив и для увеличения мощности котлов.

Современные топki, органически связанные с конструкцией самих котельных агрегатов, трудно отнести к какому-либо из классов топок по положению их относительно котла.

Размер топki принято характеризовать тепловой мощностью, площадью активной части колосниковой решетки (для слоевых топок) и объемом топочной камеры.

Мощность топочного устройства выражается количеством тепла, выделяющегося в нем в час: $Q \text{ ккал/час} = BQ_p^u \text{ ккал/час}$, или количеством сжигаемого в нем топлива в час: $B \text{ кг/час}$. Последний способ определения мощности проще, но ввиду колебаний величины $Q_p^u \text{ ккал/кг}$ является менее определенным.

Величина слоевых топок часто характеризуется также площадью $R \text{ м}^2$ активной части колосниковой решетки, т. е. той ее части, над которой расположено зеркало горения.

Зеркалом горения называется часть поверхности слоя топлива на решетке, расположенная в топочной камере (см., например, фиг. 79). Когда площадь колосниковой решетки сильно отличается от площади зеркала горения $F_{з.г} \text{ м}^2$, величина топki характеризуется зеркалом горения.

Интенсивность работы слоевой топki характеризуется видимым тепловым напряжением колосниковой решетки или зеркала горения и видимым тепловым напряжением объема топочной камеры.

Видимым тепловым напряжением колосниковой решетки или зеркала горения называется количество тепла, выделившегося в топке в час, отнесенное к единице их площади:

$$\frac{Q}{R} = \frac{Q_p^u B}{R} \text{ ккал/м}^2 \text{ час}$$

или

$$\frac{Q}{F_{з.г}} \text{ ккал/м}^2 \text{ час} = \frac{Q_p^u B}{F_{з.г}} \text{ ккал/м}^2 \text{ час. (417)}$$

Видимым тепловым напряжением объема топочной камеры называется количество тепла, выделившегося в топке в час, отнесенное к единице объема топочной камеры:

$$\frac{Q}{V_m} = \frac{Q_p^u B}{V_m} \text{ ккал/м}^3 \text{ час. (418)}$$

В слоевой топке мощностью $Q = BQ_p^u \text{ ккал/час}$ часть тепла Q выделяется в слое и часть — в камере. Чем больше выход летучих горючих из

топлива, чем больше мелочи и продуктов неполного горения попадает из слоя в топочную камеру, тем большая доля тепла Q выделяется в камере. Действительными тепловыми напряжениями решетки и топочной камеры в этом случае являются

$$\frac{Q_c}{R} \text{ ккал/м}^2 \text{ час и } \frac{Q_k}{V_m} \text{ ккал/м}^3 \text{ час,}$$

где Q_k и Q_c — количества тепла, выделяющиеся в камере и слое, причем $Q_k + Q_c = Q$. Так как нет практически применимых методов разделения Q на Q_k и Q_c , то для слоевых топок принято пользоваться условными величинами видимых тепловых напряжений $\frac{Q}{R} \text{ ккал/м}^2 \text{ час}$ и $\frac{Q}{V_m} \text{ ккал/м}^3 \text{ час}$. Интенсивность работы камерных топок оценивается тепловым напряжением топочной камеры $\frac{Q}{V_m}$.

По количеству тепла, выделяющегося в топке в единицу времени, различают топki малой, средней и большой мощности.

К малым слоевым топкам относятся неподвижные решетки с тепловой производительностью до $4 \cdot 10^6 \text{ ккал/час}$. Шуровка (шевеление и разравнивание слоя) и удаление золы у подобных топок не механизированы. Подача топлива обычно осуществляется вручную, иногда же она механизруется с помощью специальных забрасывателей. Часто для указанных тепловых мощностей применяются также наклонные, шахтные и другие полумеханические топki.

К средним слоевым топкам относятся топki с тепловой производительностью до $20 \cdot 10^6 \text{ ккал/час}$. Для таких установок применяются полумеханические и полностью механизированные топki.

К слоевым топкам большой производительности относятся агрегаты мощностью до $150 \cdot 10^6 \text{ ккал/час}$. Эти топki выполняются исключительно как топki механические (цепные решетки, топki с нижней подачей и пр.).

Камерные топki пригодны для котельных агрегатов любых размеров, но применяются обычно для сжигания твердого топлива в пылевидном состоянии в котельных агрегатах средней и большой мощности.

Советские энергетические установки используют, главным образом, местное топливо и отходы угледобывающей и углеобогащающей промышленности. Это обстоятельство наряду с широким распространением котельных агрегатов средних и крупных мощностей вызвало значительное развитие сжигания топлива в виде пыли. Механические топki нашли у нас меньшее применение ввиду меньшей их универсальности. С большим успехом механические топki используются при сжигании кускового торфа.

В мелких котельных установках применяют, главным образом, слоевой метод сжигания. Камерные топки малой производительности для твердых топлив встречаются у нас очень редко. Жидкие топлива и газы сжигаются в камерных топках.

38. Общая характеристика процесса горения в котельных топках

В каждой топке подаваемое в нее топливо при повышении температуры проходит следующие стадии:

- предварительный подогрев;
- подсушку;
- разложение на летучие горючие газы и кокс;
- воспламенение;
- полное (до CO_2 , H_2O и SO_2) или неполное сгорание горючих газов и пирогенетическое превращение¹ их, происходящее в топочной камере;
- полное (до CO_2) или неполное (до CO) горение кокса;
- разложение (диссоциация) CO_2 и H_2O при высокой температуре в присутствии углерода;
- освобождение минеральных примесей из топлива;
- разложение, окисление и плавление некоторых из них — образование шлака;
- выжигание кокса из шлака.

Иногда образующийся в слое кокс спекается в крупные куски или же, наоборот, куски угля при нагреве растрескиваются и даже превращаются в пыль.

Тот или иной характер протекания этих стадий очень сильно зависит от свойств топлива, способа сжигания, особенностей топочного устройства и ухода за ним.

В топке для жидкого топлива выпадают процессы подсушки, разложения топлива на летучие и кокс, освобождения золы, образования шлака и выжигания кокса из шлака. Но зато при этих топливах возникает необходимость распыления жидкости и приобретают большое значение процессы пирогенетических превращений, почти всегда дающих в качестве продукта сажу, горящую затем в факеле. При газообразном топливе остаются лишь прогрев, воспламенение, пирогенетические превращения и горение газов в факеле.

Прогревание свежего топлива от 20 — 30° С до температур воспламенения совершается в силу соприкосновения его с находящимся в топке горящим топливом и горячими газами или же вследствие излучения тепла от факела и накалиной обмуровки.

¹ Пирогенетические процессы (пирогенетические превращения) происходят под влиянием высокой температуры и заключаются в превращении исходного вещества в другие без обязательного воздействия посторонних реагентов. Обычно при этом получают более простые вещества как более устойчивые при высокой температуре.

Испарение влаги топлива особенно интенсивно происходит при достижении топливом температуры 100° С.

Разложение топлива, являющегося соединением типа $\text{C}_x\text{—H}_m\text{—O}_n$, на летучие горючие и кокс идет наиболее интенсивно при достижении примерно 300 — 400° С. Выделяемые при этом летучие горючие газы состоят из CO_2 , H_2O , CO , метана CH_4 , ацетилена C_2H_2 и тяжелых углеводородов. Последние обычно претерпевают при дальнейшем повышении температуры пирогенетические превращения, переходя в вещества с меньшим молекулярным весом и давая в конце концов CH_4 , CO , а также CO_2 и H_2O . Выделение летучих горючих газов из топлива продолжается до температуры 1000° С и выше. В слоевой топке пирогенетические превращения и горение летучих совершается, главным образом, в топочной камере и лишь частично в слое топлива. В камерных топках эти процессы совершаются в определенной части объема факела.

Горение топлива в топке начинается после его воспламенения. В присутствии кислорода любое горючее вещество подвергается окислению даже при низких температурах. Однако при этом окисление идет очень медленно. По мере повышения температуры интенсивность окисления возрастает. Следует различать по интенсивности окисления две области температур. В первой из них тепло, выделяющееся при окислении, не в состоянии поддерживать температуру горючего вещества и идущего на горение воздуха или кислорода выше температуры окружающей среды. В области же высоких температур окисление идет настолько интенсивно, что температура поднимается до величины, значительно превышающей температуру окружающей среды, и поддерживается самим процессом окисления на этой высоте.

Температура, при которой совершается переход из первой области во вторую, называется температурой воспламенения горючего вещества.

Температура воспламенения есть нижний предел, при котором возможно горение топлива в топке. Процесс соединения горючего с кислородом до воспламенения обычно называется окислением, а после воспламенения — горением.

Температура воспламенения имеет определенное значение лишь для чистых химических элементов. Для химических соединений она часто теряет эту определенность, а для смеси горючих веществ понятие температуры воспламенения значительно усложняется. Температура воспламенения промышленных топлив является еще более неопределенной и может быть охарактеризована лишь приближенно в виде некоторой условной усредненной величины. Однако и эта величина, ввиду наличия у каждого топлива своих характерных особенностей, от которых может зависеть условная температура воспламенения, является весьма

важной характеристикой. Температуры воспламенения для горючих газов, жидких и твердых топлив даны в табл. 43.

Процесс воспламенения топлива играет большую роль в работе всех топок, так как он определяет устойчивость горения.

Количество тепла, необходимое для того, чтобы нагреть 1 кг топлива и участвующий в горении воздух от 0°С до температуры воспламенения, можно назвать удельной теплотой воспламенения. Эта величина для каменных углей при $W_p = 2,5\%$ составляет 22,4% от теплотворной способности топлива Q_p^u ; для сырого бурого угля при $W_p = 50\%$ она составляет 26,1% Q_p^u . Для металлургического кокса, который имеет $W_p = 3,0\%$, удельная теплота воспламенения составляет 33,0% Q_p^u .

Величина удельной теплоты воспламенения очень важна для конструкции и работы топки, так как эта теплота должна быть сообщена топливу и воздуху, поступающим в топку от какого-либо постороннего им источника, например, от нагретой кладки или от уже горящего в топке слоя топлива и факела. После воспламенения загоревшееся топливо отдает полученное им для воспламенения тепло следующим за ним порциям воздуха и топлива.

Уменьшение количества тепла, которое необходимо сообщить топливу и воздуху в самой топке для воспламенения топлива, возможно путем предварительного подогрева воздуха, а иногда и топлива.

Большая величина удельной теплоты воспламенения делает процесс горения менее устойчивым и требует специальных устройств для зажигания топлива в топке: зажигательных сводов, рециркуляции газов и т. п. Поэтому в подобных случаях, при наличии предварительного высокого подогрева воздуха до поступления его в топку, горение становится более устойчивым и конструкция топочного устройства упрощается.

Для колосниковых решеток подогрев воздуха имеет определенный предел, так как чрезмерный нагрев воздуха повышает температуру колосников. Эти пределы указаны в табл. 46 и 47. Процесс воспламенения и условия его осуществле-

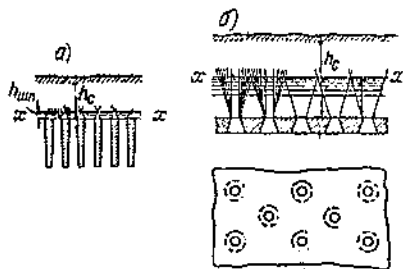
ния при разных топках и топливах накладывает заметный отпечаток на конструктивные элементы топочного устройства и на его эксплуатацию. От этого процесса зависит нижний предел производительности данного топочного устройства и котельного агрегата.

Для первоначального пуска топки необходимо создать достаточно мощный очаг горения. В слоевых топках это обычно достигается сжиганием на решетке определенного количества дров или древесных отходов, обладающих низкой температурой воспламенения. Иногда на решетку переносят необходимое количество накаливаемого кокса из соседней работающей топки. Полученный таким образом очаг горения начинают постепенно увеличивать, набрасывая на него свежее топливо и подавая в топку воздух. В камерных топках в качестве вспомогательных легко воспламеняющихся веществ при растопке применяются мазут и газ.

Процесс горения летучих и кокса происходит раздельно. Горение кокса идет в основном по поверхности кусочков его — в слое, пылинки — в факеле угольной пыли или же частичек сажи — в факеле жидкого топлива. Совершающаяся на поверхности кокса реакция соединения углерода с кислородом имеет очень большую скорость, и процесс горения твердого кусочка протекает бы весьма быстро, если бы было обеспечено столь же быстрое питание реакции необходимым ей кислородом и отвод получившихся продуктов горения от поверхности. Подвод кислорода к поверхности и удаление от нее продуктов горения происходят при помощи диффузии, импульсом для которой является возникающая вследствие горения разность концентраций у поверхности горящего кусочка и в окружающей его атмосфере. Диффузия одного газа в другом, в том числе кислорода и продуктов горения в атмосфере, окружающей горящий кусочек, происходит очень медленно. Все это приводит к тому, что результирующая скорость всего процесса горения в целом определяется скоростью подвода нужного количества кислорода к поверхности горящей частицы. Фактором, ограничивающим скорость горения углерода, является диффузия кислорода к поверхности горящего кусочка топлива. Увеличение скорости воздуха относительно топлива увеличивает скорость диффузии. Таким образом повышение дутья вызывает ускорение реакции горения углерода. Этот вывод находит непосредственное практическое применение в попытках интенсификации процесса горения на решетке увеличением скорости дутья. Однако усиление дутья приводит к значительному выносу из слоя в топочную камеру мелких частиц топлива и увеличению потери топлива с уносом. Практически приходится учитывать, что неравномерность движения воздуха по решетке и изменение структуры самого слоя не позволяют работать на скоростях, близких к предельным, определяющим стабильность слоя.

Таблица 43

Горючий газ или топливо	Водород H_2	Окись углерода CO	Метан CH_4	Дрова, торф и молодой бурый уголь	Каменный уголь	Антрацит, тощий уголь и кокс
Температура воспламенения, °С	600	650	650—750	250	300—350	650—700



Фиг. 80. Схема работы колосниковой решетки с большим (а) и малым (б) живым сечением.

xx—пояс наиболее интенсивного горения;
 h_c —полная толщина слоя; $h_{ш}$ —толщина шлаковой подушки.

Механизм горения углерода еще не изучен, в частности нельзя еще считать окончательно решенным, является ли первичным продуктом соединения углерода кокса с кислородом углекислота, окись углерода или тот и другой газ.

Большинство исследований, в частности работы Чуханова, Гродзовского, Хитрина и др., устанавливают одновременное появление CO_2 и CO .

Наблюдениями установлено, что как в слоевых, так и в камерных топках при высокой температуре под действием углерода может протекать восстановительный процесс перехода CO_2 в CO и H_2O в H_2 с образованием CO . Этот процесс является основным для газогенераторов, в котельных топках он имеет меньшее значение и возможен при чрезмерной толщине слоя топлив. При возникновении в факеле или в слое местных весьма высоких температур может происходить также частичное разложение CO_2 на CO и O вследствие диссоциации. При дальнейшем охлаждении факела происходит обратное соединение окиси углерода с кислородом в CO_2 .

Чрезвычайно важно в работе топок освобождение золы топлива, образование шлака и удаление их из топки. Зола топлива представляет сложную смесь различных минеральных веществ. Одни из них горят, другие при прокаливании разлагаются, третьи плавятся при температурах, имеющих место в топке, и, наконец, четвертые при нагреве подвергаются существенным изменениям. Зола и шлак накапливаются в работающей топке и должны время от времени удаляться из нее. Уборке золы и шлака уделяют большое внимание при проектировании, устройстве и работе всех топок, сжигающих твердые топлива, особенно многозольные и с легкоплавкой золой.

В ручных топках с неподвижным слоем шлак по мере прогорания слоя опускается и скапливается непосредственно на поверхности колосниковой решетки. Этот слой шлака носит название шлаковой подушки.

При высокой температуре плавления золы, большим избытке воздуха и влажном топливе шлако-

вая подушка получается пористой. В противоположном случае может произойти заливание колосников шлаком, т. е. образование настолько плотной шлаковой подушки, что через нее затрудняется проход воздуха.

Решетки с большим живым сечением (§ 39) обычно дают более плотную и более низкую шлаковую подушку, чем решетки с малым живым сечением. Причина этого явления заключается в том, что пояс интенсивного горения (фиг. 80) у первых ниже, а у вторых выше, так как в них тот уровень, где воздух заполняет все сечение слоя, лежит дальше от решетки. В слое же, непосредственно прилегающем к решетке, при малом ее живом сечении в отдельных участках около каждого отверстия образуется местный повышенный избыток воздуха, охлаждающий шлак у отверстия для воздуха. Это обстоятельство наряду с более интенсивным дутьем позволяет больше разрыхлить шлак, прежде чем он охладится и опустится на решетку. Толстая шлаковая подушка создает более легкие условия работы колосников вследствие защиты их от теплоотдачи из горящего слоя.

В топках с подвижным слоем скопление шлака происходит в конце решетки, считая по направлению его движения, где иногда помещается небольшая дожигательная колосниковая решетка, на которой происходит дожигание шлака. Выгреб шлаков из этих топок производится вручную, иногда же он механизирован.

В камерных топках часть золы и шлак обычно осаждаются в нижней части топочной камеры, где имеется шлаковая воронка. Большая часть золы—до 65—90% уносится в газоходы котла. Удаление скопившегося в воронке шлака производится под действием силы тяжести. Иногда в камерных топках шлак скапливается внизу на поду в жидком состоянии и время от времени спускается через специальную летку.

39. Работа слоя топлива на колосниковой решетке

Одной из наиболее существенных частей слоевой топки является колосниковая решетка, поддерживающая слой горящего топлива. Через отверстия в колосниках и щели между ними подводится и распределяется по слою топлива воздух для горения. Сквозь эти же отверстия проваливается часть золы, а также отдельные кусочки шлака и топлива. Чтобы щели и отверстия не забивались, их делают расширяющимися книзу. Колосники изготовляют чаще всего из чугуна. Формы колосников весьма разнообразны. Для решеток с ручным обслуживанием наиболее распространены балочные (фиг. 81) и плиточные (фиг. 82) колосники. Ширина щели между колосниками и отверстий в них зависит от размера кусков и обычно составляет от 3 до 15 мм.

Площадь всех отверстий и щелей колосниковой решетки называется живым сечением ее и выражается обычно в процентах от площади решетки.

Решетки с малым живым сечением (5—15%) применяются при сжигании мелкозернистых топлив с большим содержанием мелочи, а также с малым выходом летучих. Колосники этих решеток чаще всего имеют вид плит с круглыми отверстиями или щелями (фиг. 82). Такие решетки требуют искусственного дутья под колосники.

При сжигании дров и торфа с естественной тягой применяют решетки с большим живым сечением — в 25—40% и даже выше.

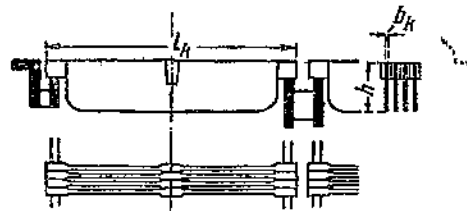
В различных типах топок решетки располагаются либо почти горизонтально (фиг. 79, I—I), либо наклонно с углом наклона до 45° (фиг. 79, I—2A).

Горение топлива в слое и связанные с этим особенности работы слоевой топки представляют наиболее характерные отличия топок этого типа от камерных топок. В камерной топке все топливо сгорает, двигаясь в факеле вместе с поступающим в топку воздухом. В слоевой же топке, как правило, основная масса топлива сгорает в лежащем на решетке слое, где куски топлива омываются проходящим через слой воздухом. Лишь летучие и небольшая сравнительно часть топлива в виде мелких кусочков, вырывающихся из слоя потоком воздуха, сгорают при своем движении с воздухом, как и в факеле камерной топки.

Чем больше летучих в топливе, тем большая часть теплотворной способности его выделяется в камере и тем меньшую роль играют процессы в слое. В наиболее чистом виде слоевой процесс происходит при сжигании антрацитов с минимальным содержанием летучих, доходящим иногда до 3%. Если же топливо имеет весьма большой выход летучих, т. е. в случае длиннопламенных и бурых углей, дров, торфа, то в топочную камеру переносится большая часть тепловыделения, и процесс горения в слоевой топке начинает приближаться к камерному.

Если скорость воздуха значительно увеличить, то при ограниченной величине кусочков топлива слой потеряет свою устойчивость и почти все топливо будет увлечено в камеру, где и будет происходить горение. Это обстоятельство используется в топках с неустойчивым слоем или со взвешенным сжиганием топлива, представляющим переходную ступень между камерными и слоевыми топками. В слоевых же топках скорость дутья имеет обычно такую величину, что в камеру увлекается из слоя лишь ничтожное количество мелочи.

Относительная скорость воздуха и топлива в камерных топках мала, в слое же топлива она достигает значительных размеров. Это обстоятельство заметно улучшает питание кислородом поверхности кусочков и увеличивает интенсив-



Фиг. 81. Балочный колосник.

ность горения топлива.

Происходящее на поверхности кусочков горение твердого топлива находится в сильной зависимости от диффузии кислорода, идущей из массы газа по направлению к этой поверхности, и диффузии продуктов горения от этой поверхности. С увеличением относительной скорости воздуха и топлива усиливается диффузия, что благоприятно влияет на интенсивность горения топлива.

Теплонапряжение объема горящего топлива (слоя или факела) $V_{\text{ем}} \text{ м}^3$ зависит от теплотворной способности топлива $Q_p^u \text{ ккал/кг}$, интенсивности поверхностного горения $k_s \text{ ккал/м}^2 \text{ час}$, количества одновременно горящего топлива $b_0 \text{ кг/м}^3$ и полной поверхности $f \text{ м}^2$ реагирующих частиц, зависящей от размера их, т. е. от тонкости помола:

$$\frac{Q}{V_{\text{ем}}} = Q_p^u k_s b_0 f \text{ ккал/м}^3 \text{ час}.$$

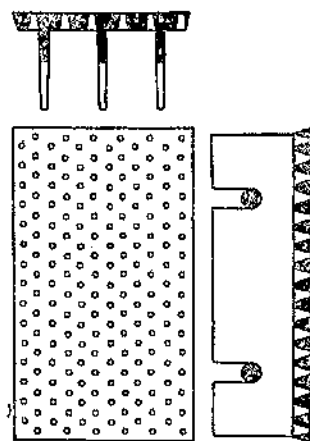
При факельном сжигании величина b_0 мала, составляя $0,02 \text{ кг/м}^3$, но величина f велика. При слоевом сжигании, наоборот, b_0 велико, равняясь $\sim 1000 \text{ кг/м}^3$, а f мала. Величина k_s независимо от скорости дутья больше для пылевых частиц. Основным фактором, определяющим $\frac{Q}{V_{\text{ем}}}$, остается b_0 . Поэтому видимое тепловое напряжение объема слоя всегда больше, чем напряжение горящего факела. В то время как первое напряжение измеряется величинами

$$(1 \div 10) \cdot 10^6 \text{ ккал/м}^3 \text{ час},$$

второе составляет обычно около

$$(0,1 \div 0,5) \cdot 10^6 \text{ ккал/м}^3 \text{ час}.$$

Топливо, попавшее в слоевую топку, обычно в самом слое проходит все стадии процесса го-



Фиг. 82. Плиточный колосник.

рения, за исключением горения летучих. В слое поэтому можно различать следующие зоны:

- а) зону подогрева топлива до воспламенения;
- б) зону подсушки;
- в) зону разложения топлива на летучие и кокс (зона выделения летучих);
- г) зону горения кокса;
- д) зону выделения золы и образования шлаков, а также выжигания из них углерода.

Кроме этих пяти зон в топках с подвижным слоем имеется еще так называемая восстановительная зона, где при высокой температуре происходит взаимодействие с углеродом продуктов горения CO_2 и H_2O с образованием CO и H_2 . Во всех случаях получившиеся в результате этого процесса CO и H_2 поступают в топочную камеру, где должны быть сожжены, как и летучие топлива.

Перечисленные зоны показаны на фиг. 86 для колосниковой решетки с ручной заброской топлива, на фиг. 99 для топки с наклонной решеткой, на фиг. 104 для шахтной топки и на фиг. 110 и 111 для цепной решетки.

В случае горизонтальной решетки с ручной заброской (фиг. 86) зоны располагаются горизонтально, в основном последовательно одна над другой.

Рассматривая на схеме слой топлива по высоте, начиная сверху, в нем можно обнаружить три части: свежезаброшенное топливо, горящий кокс и шлаковую подушку. Первая часть представляет собой зону подогрева топлива до воспламенения. В ней совершается также подсушка топлива и разложение его на летучие и кокс. Здесь, следовательно, имеются в наличии все нормальные зоны слоя.

Такое же строение имеет слой и у топок с механической заброской топлива поверх слоя.

У наклонных решеток, шахтных топок, цепных решеток и топок с качающимися колосниками зоны располагаются последовательно вдоль пути топлива или, что то же, вдоль решетки. Схематически можно представить, что эти зоны отделяются одна от другой плоскостями, расположенными под углом к плоскости решетки (фиг. 99, 104 и 110). Этот угол тупой для разделительной плоскости между первой и второй, второй и третьей, третьей и четвертой зонами и острый — для плоскости, отделяющей четвертую зону от пятой. Угол зависит от скорости движения слоя топлива по решетке или вместе с решеткой и от скорости протекания соответствующего процесса. Восстановительная зона помещается над зоной горения кокса и своей формой несколько напоминает эту последнюю.

В наклонно-переталкивающих решетках ввиду сильного перемешивания слоя плоскости, разделяющие зоны друг от друга, в случае идеального

перемешивания должны располагаться перпендикулярно к плоскости решетки. В действительности они в большей или меньшей степени приближаются к этому. Последовательность же расположения зон у этих топок такая же, как и у предыдущих (фиг. 158).

При каскадных топках кроме сильного перемешивания слоя имеет место еще и рециркуляция понизу части слоя топлива (фиг. 160). Здесь зоны недостаточно определенно выражены, но в общем можно считать их расположение примерно подобным расположению у топок с подвижным слоем. Благодаря рециркуляции и перемешиванию с верхним слоем на каскадной решетке возможно сжигание мусора и очень влажных топлив.

В топках с нижней подачей топлива последовательность зон идет в направлении пути топлива, т. е. снизу вверх. Здесь зоны разделяются одна от другой поверхностями, форма которых зависит от конструктивных форм решетки и подающих желобов и от их взаимного расположения.

Следует, кроме того, иметь в виду, что у всех топок соседние зоны обычно несколько перекрывают одна другую. Так, например, в случае высокой точки воспламенения последнее наступает лишь после того, как топливо прошло значительную часть зоны выделения летучих; выделение же летучих, хотя и с меньшей скоростью, продолжается на значительной части зоны горения кокса.

Строение слоя топлива и процесс горения его находятся в сильной зависимости от физических, химических и теплотехнических свойств топлива. Большое влияние здесь имеют теплотворная способность топлива, выход и состав летучих, содержание влаги, золы, состав золы, температура плавления золы и шлака, вязкость шлака, спекаемость кокса, способность его растрескиваться в огне, механическая прочность кусков кокса, пористость их и т. д. Учитывая влияние всех этих свойств, можно установить, на какой топке выгоднее всего сжигать то или иное топливо и как вести самый процесс сжигания его.

40. Толщина и сопротивление слоя топлива. Питание воздухом

Строение слоя топлива оказывает очень сильное влияние на процесс горения топлива, работу топки в целом, на уход за топкой во время работы и на регулировку ее. В этом отношении имеет также большое значение толщина слоя и связанное с ней и со структурой слоя сопротивление протеканию воздуха через слой. Толщина слоя топлива тем больше, чем больше в нем влаги и чем больше его куски. Вследствие этого дрова и торф, обладающие высоким содержанием влаги и сжигаемые большими кусками, требуют

более толстого слоя, чем другие топлива. При сжигании углей толщина слоя тем больше, чем меньше летучих содержится в топливе. Для зольных топлив с тугоплавкой золой применяют более толстый слой, чем для топлив малозольных и имеющих легкоплавкую золу. Тип топки также влияет на толщину слоя. Так, в топках с нижней подачей слой угля достигает значительной толщины, до 1,0 м и больше. Толщина слоя является условным понятием, так как, например, даже в топках с неподвижным слоем, где толщина постоянна по всей решетке, она зависит от толщины шлака: перед чистой слой толще, после чистки тоньше. В топке с подвижным слоем толщина его постепенно падает по пути топлива. В табл. 44 даны обычно применяющиеся средние значения толщины слоя топлива, не считая шлаковой подушки.

Сопротивление слоя топлива прохождению через него воздуха зависит от толщины и строения слоя, от размера кусков и равномерности их величины, от соотношения между количествами кусков разных размеров, от формы кусков и состояния их поверхности, от интенсивности тепло- и газовой выделений, от поведения топлива во время горения (степень растрескивания в огне, спекаемость), от изменения скорости в слое вследствие изменения температуры протекающих через него газов, испарения влаги, выделения летучих и образования газообразных продуктов полного и неполного горения, от характера шлакования и т. п.

Практически установлены некоторые средние эксплуатационные величины сопротивления слоя (табл. 45).

Сопротивление слоя складывается из сопротивления решетки, шлаковой подушки и остальной части слоя. Наибольшее сопротивление дает шлаковая подушка.

По данным Померанцева и Крюкова сопротивление слоя можно вычислять по формуле

$$\Delta p = \xi \frac{h_{cl}}{d_{cp}} \cdot \frac{w^3}{2g} \quad (419)$$

Под d_{cp} здесь подразумевается диаметр кусочка, а скорость w берется по всему сечению слоя. Величину $\xi = f(Re)$ для холодного слоя можно брать по диаграмме фиг. 83.

Если же вместо d_{cp} взять эффективный диаметр кусочка, равный примерно $d_e = 1,25 d_{cp}$, где d_{cp} находится по формуле

$$nd_{cp}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{i=m} n_i d_i^2}{\sum_{i=1}^{i=m} n_i}$$

то формула (419) несколько упрощается

$$\Delta p = \frac{2}{0,0005 Re} \cdot \frac{h_{cl}}{d_e} \cdot \frac{w_{\phi}}{g} \quad (420)$$

Здесь w_{ϕ} — скорость фильтрации;

$$w_{\phi} = \frac{V_{сек}}{F}$$

где $V_{сек}$ — объем воздуха в секунду, а F — полное сечение слоя. Значение

$$Re = \frac{w_{\phi} \cdot d_e}{\nu}$$

где ν — вязкость воздуха.

Полученные на практике при опытном сжигании донецких антрацитов сопротивления слоя даны для антрацита с тугоплавкой золой на фиг. 84

Таблица 44

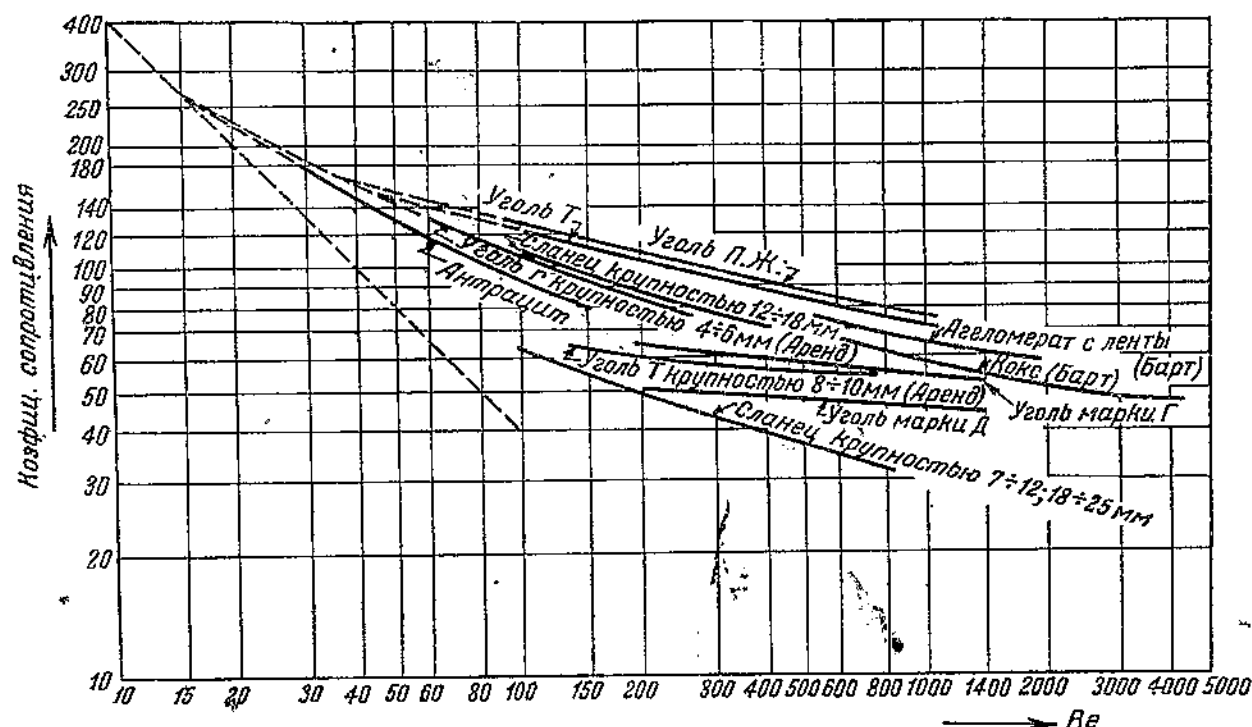
Нормальная толщина слоя топлива в мм

Вид топлива	Нормальная толщина слоя топлива
Подмосковный уголь мелкий . .	40
" крупный . .	70
Антрацит семечко с размерами кусочков 2—5 мм	60—80
Антрацит орех 2—30 мм	100—120
Антрацит крупный	200
Буроугольные брикеты размером 60 × 60 × 40 мм	250—300
Кусковой торф	300—900
Мелкий торф	400
Дрова	600—1500

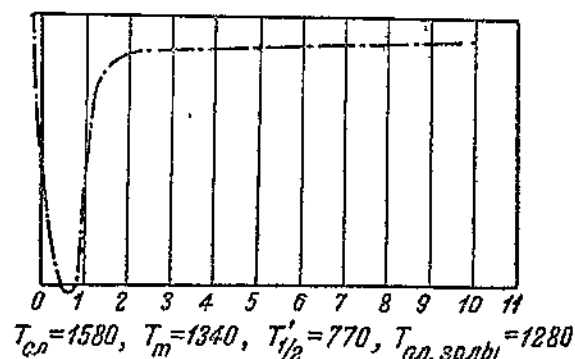
Таблица 45

Тепловые напряжения решетки и сопротивления слоя топлива в слоевых топках на разных топливах

Род топлива	Решетка	Тепловое напряжение решетки в ккал/м ² час	Пределы сопротивления в мм вод. ст.
Дрова	Ручная	1 · 10 ⁶ —1,5 · 10 ⁶	4—15
	Шахтная	1 · 10 ⁶ —1,5 · 10 ⁶	3—15
Торф кусковой	Ручная	1 · 10 ⁶ —1,5 · 10 ⁶	8—18
	Шахтная	1 · 10 ⁶ —1,6 · 10 ⁶	6—12
Угли бурые, подмосковные, богословские, каменные, донецкий Д и Г	Ручная	0,7 · 10 ⁶ —1,2 · 10 ⁶	10—80
Донецкий толстый уголь	"	0,7 · 10 ⁶ —1,0 · 10 ⁶	8—75
Донецкий антрацит АП и АК	"	0,7 · 10 ⁶ —1,3 · 10 ⁶	20—80
АМ и АС	"	0,7 · 10 ⁶ —1,0 · 10 ⁶	10—80
АРШ	"	0,7 · 10 ⁶ —1 · 10 ⁶	25—80



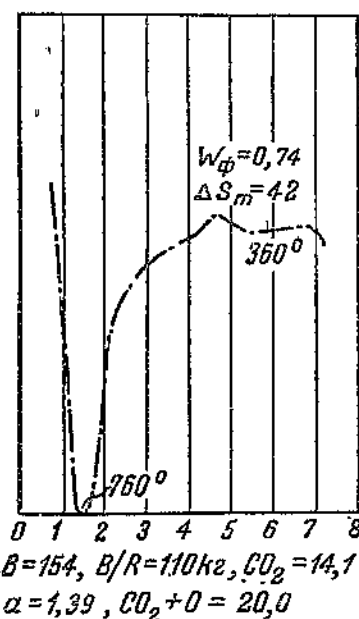
Фиг. 83. Коэффициент сопротивления холодного слоя в зависимости от критерия Re для различных топлив.



Фиг. 84. Изменение по времени (в часах) сопротивления слоя антрацита с тугоплавкой золой.

и с легкоплавкой — на фиг. 85. Опытами Арендта было установлено, что во время работы топки уже при умеренных скоростях воздуха из слоя выносятся мелкие частицы диаметром 0—3 мм и таким образом в слое в действительности всегда находятся кусочки по размеру больше 3 мм. Слой, в котором нет уже этой мелочи, может работать с более высоким тепловым напряжением: повышение составляет примерно 25%.

Питание воздухом отдельных зон и всего слоя в целом при отсутствии зонного дутья регулируемой тяги и регулируемой подачи вторичного воздуха в топочную камеру зависит от толщины



Фиг. 85. Изменение по времени (в часах) сопротивления слоя антрацита с легкоплавкой золой.

слоя, его структуры и сопротивления. Если установлено, что для данного топлива и топочного устройства процесс горения протекает лучше всего при некотором определенном значении коэффициента избытка воздуха α_m , то наилучшая работа топки будет достигнута в том случае,

когда независимо от времени и рассматриваемой части слоя соблюдается условие

$$\frac{dV'_L}{dV''_L} = \text{const}, \quad (421)$$

где dV'_L — потребное, а dV''_L — располагаемое в данное время или в данном месте слоя количество воздуха.

Анализ работы наиболее распространенных топочных устройств указывает, что соотношение (421) не соблюдается ни в одном случае без тех или иных мероприятий.

В топке с неподвижным слоем вскоре после заброски топлива, когда происходит очень интенсивное выделение летучих, потребность в воздухе весьма велика, а входит его мало, так как слой еще не прогорел и сопротивление его значительно. Перед следующей заброской через прогоревший, а потому более тонкий, слой ввиду уменьшения его сопротивления проходит очень много воздуха, потребность же в нем к этому времени значительно снижается. У топки с неподвижным слоем, но с механической верхней заброской топлива имеют место те же явления, хотя и в несколько смягченном виде.

Во всех топках с движущимся слоем ввиду разнородности структуры слоя по длине решетки или по пути топлива также не сохраняется условие (421). В начале решетки или пути топлива и в средней ее части потребность в воздухе велика, а слой еще толстый, сопротивление его значительно и поэтому поступление воздуха недостаточно. Недалеко же от конца этого пути или конца решетки, наоборот, горение уже ослаблено, так как там происходит лишь выгорание кокса из шлака, слой же там тоньше, сопротивление меньше и, следовательно, количество поступающего в топку воздуха больше.

Условие (421) можно представить в ином виде:

$$\frac{dV'_z}{dV''_z} = \frac{BdV_0}{B\alpha_m^x dV_0} = \frac{1}{\alpha_m^x} = \text{const}; \quad \alpha_m^x = \text{const}. \quad (421a)$$

Здесь под α_m^x подразумевается значение коэффициента избытка воздуха в рассматриваемом месте слоя и в данный момент времени.

Условие (421a) показывает, что слоевая топка работает лучше всего тогда, когда коэффициент избытка воздуха остается постоянным при переходе от одного места слоя к другому, а также не меняется с течением времени.

Усовершенствование топок большей частью связано с устройствами, которые позволяют в той или иной степени приблизиться к практическому выполнению условия (421) и (421a). Эту же цель преследуют и очень многие приемы работы, предложенные для улучшения процесса горения. В качестве примеров здесь можно указать меха-

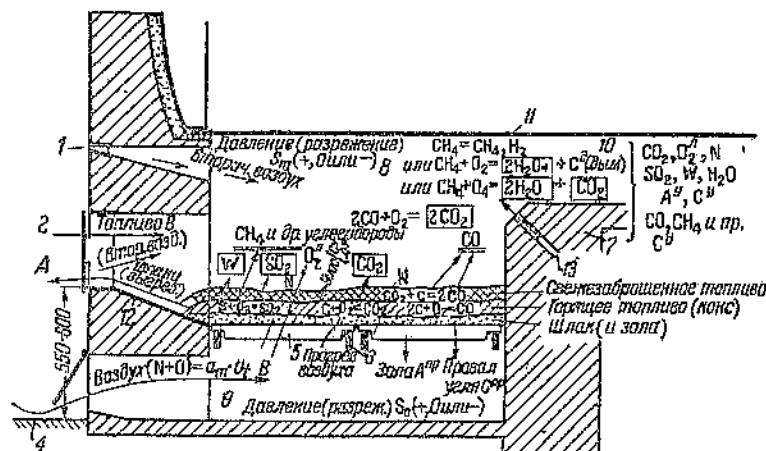
низацию заброски топлива, применение ввода вторичного воздуха в топочную камеру при слоевых топках с подвижным слоем, устройство шлаковых подпоров. Путем механизации заброски топлива достигается значительное приближение к непрерывной подаче его при закрытой топочной дверке. Это устраняет попадание огромного количества воздуха в топочную камеру в момент ручной заброски и снижает для камеры коэффициент избытка воздуха α , который в момент ручной заброски принимает чрезвычайно большие значения. Ввод вторичного воздуха имеет целью устранить недостаток воздуха в топочной камере во время бурного выделения летучих в топке с неподвижным слоем.

Зонное дутье, применяющееся при топках с подвижным слоем топлива, дает возможность подавать в каждую зону различные количества воздуха, отвечающие потребности в нем в этих зонах, и тем самым позволяет несколько уравнивать различные значения α в разных зонах, т. е. дает известное приближение к выполнению условия $\alpha_m^x = \text{const}$. В том же направлении действует шлаковый подпор цепной решетки, увеличивающий толщину и связанное с ней сопротивление слоя топлива в зоне дожигания шлака. Благодаря этому здесь α падает, приближаясь к значению, определяемому условием (421a).

Ниже при разборе отдельных типов топок на диаграммах более детально рассмотрен характер неравномерности горения для отдельных типов топок и указаны пути борьбы с нею.

Для работы топки, а особенно для ее обслуживания, большую роль играет взаимное направление движения топлива и воздуха, направление и способ удаления золы и шлаков из топки, наконец, способ заброски топлива. На фиг. 82 даны эти направления для всех основных типов топок. В топке с неподвижным слоем движения слоя топлива и воздуха направлены прямо противоположно (противоток). Удаление шлаков — ручное или частично механизированное при помощи поворотных колосников; у полумеханических топок, цепных решеток, наклонно-переталкивающих и каскадных топок топливо и воздух перемещаются по взаимно перпендикулярным направлениям (поперечный ток). У топок с нижней подачей топлива это перемещение происходит в одном и том же направлении (прямоток). Шлак и золу в полумеханических топках обычно удаляют ручным способом, в механических же это производится автоматически.

Характер изменения α по пути топлива в указанных трех случаях — прямотока, противотока и поперечного тока — один и тот же, а именно: в начале и конце пути избыток воздуха очень велик, так как там либо топливо еще не вступило в процесс горения, либо же оставшееся количество горючих ничтожно и, следовательно,



Фиг. 86. Схема простой топки с неподвижной колосниковой решеткой при ручной загрузке топлива.

1—гляделька; 2—топочная дверка; 3—зольниковая дверка; 4—пол; 5—балочные колосники; 6—опорные балочки; 7—порог; 8—топочный объем; 9—зольник; 10—газовое окно; 11—поверхность нагрева; 12—щелевая плита; 13—отверстие для добавочного воздуха.

потребность в воздухе очень мала по сравнению с его наличием. В середине же пути топлива, где идет интенсивное горение, значение α мало.

Обмуровка топки и шлаковой воронки подвергается действию высоких температур накаливаемого слоя и факела, излучающих на них тепло, а элементы колосниковой решетки, особенно верхняя поверхность колосников, находятся под действием высоких температур слоя топлива. Чтобы избежать механических и термических повреждений частей топочного устройства, необходимо обеспечить такие условия работы, при которых температура этих частей не поднималась выше предела, достигаемого для надежной работы их. Это достигается для обмуровки выбором материалов с достаточной термической устойчивостью и другими необходимыми качествами, правильной конструкцией обмуровки и искусственным охлаждением ее. Что касается колосников, то для увеличения срока их службы стремятся удалить от поверхности решетки те зоны слоя, где температура максимальная. Это достигается при помощи шлаковой подушки, надлежащего охлаждения колосников, главным образом, при помощи воздуха, а иногда и выбором соответствующих материалов для колосников.

Для повышения стойкости колосников их изготовляют из хромистого чугуна или алитированного чугуна (алитированными называются изделия, тонкий верхний слой которых представляет собой твердый раствор алюминия в железе, образующий при нагреве очень стойкую пленку окислы).

Охлаждение колосников в основном идет за счет нагрева воздуха, проходящего через прозоры колосников. Для хорошего охлаждения колосники должны быть достаточно высокими с большой боковой поверхностью, омываемой воздухом. Охлаждение колосников воздухом характеризуется степенью охлаждения ω , которая представляет собой отношение поверхности колосников, омы-

ваемой воздухом, к поверхности, соприкасающейся со слоем топлива.

В балочном колоснике (фиг. 81) степень охлаждения колосника

$$\omega = \frac{2h}{b_k}, \quad (422)$$

где h — высота колосника, омываемая воздухом;

b_k — ширина его верхнего сечения.

Обычно $b_k = 5-20$ мм; $h = (6-20)b_k$; длина колосника $l_k \approx 60 b_k$.

Иногда прибегают к дополнительному охлаждению паром или водой, подаваемыми под колосники. Обычно это делают после чистки и продолжают до тех пор, пока на решетке не образуется достаточно толстая шлаковая подушка. Колосники с водяным охлаждением в котлостроении применяются редко из-за отложения в них накипи.

При сжигании спекающихся углей вследствие наличия крупных кусков с плохой теплопроводностью температура решетки составляет 600—700°С. При сжигании несспекающихся углей горение может идти и непосредственно на решетке; в этом случае ее температура повышается до 850—950°С и шлак заливает прозоры между колосниками.

Высокозольные топлива с тугоплавкой золой создают благоприятные, а легкоплавкая зола — тяжелые условия для работы колосников.

Большое содержание влаги в топливе требует при слоевых топках применения всех мер, ведущих к повышению температуры слоя (которая низка вследствие затраты тепла на испарение влаги) и устранению всех причин, снижающих эту температуру. Чтобы повысить температуру в слое, необходимо увеличить его толщину, применять сильный подогрев воздуха, различные устройства для подсушки топлива до входа в топку, например, шахты. Уменьшение теплоотдачи из слоя при помощи затеняющих сводиков, устранение присосов воздуха, особенно при загрузке топлива, применение воздушного дутья вместо парового и работа на малых избытках воздуха также приводят к повышению температуры.

Охлаждение обмуровки топочной камеры и шлаковой воронки достигается установкой экранов, являющихся поверхностями нагрева. Степень охлаждения стен топочной камеры иногда оценивается отношением радиационной поверхности к объему топki $H^p : V_m$.

41. Топка с неподвижной колосниковой решеткой. Процесс горения в ней

На фиг. 86 показана схема конструктивного выполнения и основных этапов работы топki с неподвижной колосниковой решеткой при ручной

загрузке топлива. Эта топка предназначена для сжигания пламенных углей. Топливо забрасывается лопатой через топочное (загрузочное) отверстие, закрываемое дверкой 2 размером 350×300 мм, которая изготавливается обычно из чугуна. Выгреб шлака при чистке топки также производится обычно через эту же дверку. Топливо необходимо забрасывать в топку так, чтобы оно ложилось возможно более ровным слоем на колосниковой решетке. На схеме видны отдельные зоны слоя топлива, причем в этой топке обычно зоны подсушки и выделения летучих перекрываются зоной подогрева топлива, составляя зону свежесброшенного топлива.

На схеме нанесены далее зона горения кокса и шлаковая подушка.

Колосниковая решетка состоит из двух рядов балочных колосников 5, опирающихся на поперечные балочки 6, укрепленные в боковых стенках топки. Двумя рядами колосников можно обойтись лишь при коротких решетках, имеющих длину 1—1,5 м. Для решеток максимальной длины, достигающей до 2,0—2,5 м, число рядов колосников увеличивается. Под колосниковой решеткой помещается зольник с зольниковой дверкой. В зольнике собирается выпадающая из слоя через колосник зола, а также кусочки кокса и топлива (провал). Время от времени провал и золу выгребают из зольника через зольниковую дверку. Через эту же дверку в зольник поступает воздух, проходящий далее через слой топлива, где и используется для горения. Протекание воздуха через слой и отвод из него продуктов горения обеспечиваются избытком давления в зольнике против топочной камеры, где обычно бывает разрежение, измеряемое 2—7 мм вод. ст. Зольниковая дверка часто выполняется поворотной около горизонтальной оси и снабжается зубчатым сектором, позволяющим устанавливать любую величину прохода для воздуха.

Продукты горения, поднимаясь от слоя, переходят в топочное пространство 8. Сзади колосниковой решетки замыкается порогом 7—вертикальной стенкой, выходящей из огнеупорного кирпича. Порог не позволяет забросить топливо за пределы колосниковой решетки, придает вертикальное направление продуктам горения при выходе их из слоя и, образуя в ряде случаев сужение 10, называемое газовым окном, способствует перемещению продуктов неполного горения с избыточным кислородом и, следовательно, догоранию этих продуктов.

В конструкции топки по фиг. 86 топочная камера ограничивается спереди и с боков огнеупорной кирпичной кладкой, сверху—поверхностью нагрева 11, сзади же—порогом 7. Внизу отверстия топочной дверки укладывается чугунная плита 12, носящая название шуровочной или мертвой плиты. Основное ее назначение—предохранять кирпичную кладку от ударов шуро-

вочным инструментом (резак, кочерга) и от разрушающего действия слоя топлива.

При сжигании топлива с большим выходом летучих в топочную камеру часто вводят вторичный воздух через отверстие 1 или 13.

На схеме фиг. 86 перечислены составные части продуктов горения, поступающих в топочную камеру из отдельных зон слоя, а также указан окончательный состав газов после догорания за порогом.

Процесс горения в этой топке протекает при очень неблагоприятных условиях, главным образом, благодаря периодической загрузке в топку сравнительно больших порций холодного топлива и прорыва во время заброски топлива в топочную камеру значительного количества лишнего воздуха через открытую топочную дверку. Оба эти обстоятельства сильно снижают температуру в топочном объеме и нарушают нормальное протекание процесса горения. Порция свежесброшенного холодного топлива закрывает слой топлива, затеняя его накалившую поверхность, что ведет к снижению в это время радиации от слоя к поверхностям нагрева. По окончании заброски при закрытой топочной дверке через зону свежесброшенного топлива проходят горячие продукты горения и избыточный воздух из нижележащих частей слоя топлива, ускоряя прогрев, подсушку и разложение на летучие и кокс заброшенной порции топлива. Однако прогрев и воспламенение свежесброшенного топлива осуществляются не только за счет этого тепла, но и за счет теплопроводности от лежащего ниже накалившего горящего топлива и излучения раскаленной обмуровки. Из верхней зоны слоя в топочную камеру попадают влага топлива W и летучие, состоящие из CH_4 , H_2 , CO и CO_2 . В зоне свежесброшенного топлива может иногда протекать некоторое время восстановительная реакция превращения CO_2 в присутствии углерода в CO . Эта эндотермическая реакция, поглощая тепло, оказывает замедляющее действие на прогрев и воспламенение свежесброшенного топлива.

Во второй сверху зоне—зоне горения кокса—совершаются основные реакции горения углерода с получением CO_2 и CO и летучей серы, дающей SO_2 .

Наконец, третья зона, представляющая собой шлак и золу с оставшимися в них, а иногда и заплавленными в шлаке кусочками кокса, непосредственно прилекая к колосниковой решетке, отдает свое тепло поступающему снизу воздуху, который, таким образом, вступает в зону горения кокса в несколько нагретом состоянии. Накопленная сверху и охлаждаемая снизу проходящим через нее холодным воздухом шлаковая подушка является хорошей защитой колосников от действия высокой температуры вышележащей зоны горения углерода.

После заброски топлива расположение зон слоя вследствие горения постепенно изменяется. Шла-

ковая подушка увеличивается за счет новых порций шлака и золы, поступающих в нее из зоны горения кокса. Последняя же пополняется сверху новыми порциями воспламенившегося кокса, поступающими в нее из зоны свежезаброшенного топлива. Так длится до тех пор, пока все свежезаброшенное топливо не пройдет все подготовительные стадии и не воспламенится. В это время следует произвести заброску новой порции свежего топлива. Обычно период между двумя забросками составляет 5—10 минут. В результате горения в топочную камеру поступают влага топлива W , летучие горючие, включающие H и CH_4 и другие углеводороды, продукты полного горения CO_2 и SO_2 , продукты неполного горения: CO , оставшиеся неиспользованными азот и избыточный кислород, а также вырванные из слоя кусочки топлива, кокса и золы (C^y , A^y). При ручной заброске топлива иногда может возникнуть неоднородность строения слоя из-за неправильной заброски или неравномерного прогорания топлива. Через прогоревшие места в этом случае будет прорываться непосредственно из поддувала воздух, увеличивая, таким образом, коэффициент избытка воздуха и ухудшая работу топки и котельного агрегата.

Поступившие в топочную камеру горючие газы CO , CH_4 , другие углеводороды и H_2 нормально должны догореть в топочной камере. Удастся ли им полностью догореть, зависит прежде всего от температуры топочной камеры, достаточного в данное время и в данном месте количества кислорода и перемешивания этих газов с имеющимся в топочной камере кислородом. При неблагоприятных условиях горючие газы могут вовсе не сгореть или же может получиться неполное сгорание метана с образованием водяных паров и выделением углерода в виде сажи. Получившаяся таким образом сажа попадает в дым и окрашивает его в черный цвет. Сажа может образоваться также при неполном сгорании или распаде тяжелых углеводородов.

В топке с неподвижным слоем подача топлива производится периодически и сразу в количествах, соответствующих расходу его между загрузками. Это вызывает периодичность работы топки и понижение ее мощности и экономичности. Уже в момент загрузки топлива, а особенно при чистке топки от шлаков, через открытую дверку врывается в камеру много лишнего воздуха, снижающего температуру камеры и ухудшающего горение. Ввиду уменьшения разрежения в топочной камере просасывание воздуха через слой в это время почти прекращается и мощность топки снижается. По окончании заброски после закрытия топочной дверки работа слоя возобновляется. Но ввиду заметного утолщения слоя количество просасываемого через него воздуха при неизменной тяге уменьшается, возрастая лишь по мере

прогорания слоя. Это возрастание вначале идет очень медленно. Между тем вскоре после заброски начинается бурное выделение летучих, и потребность в воздухе становится очень большой. В это время в камере воздуха для горения не хватает. Вследствие несовершенства перемешивания и неравномерности строения слоя количество воздуха в этот момент обычно оказывается недостаточным для реакции, несмотря на общий избыток его в камере.

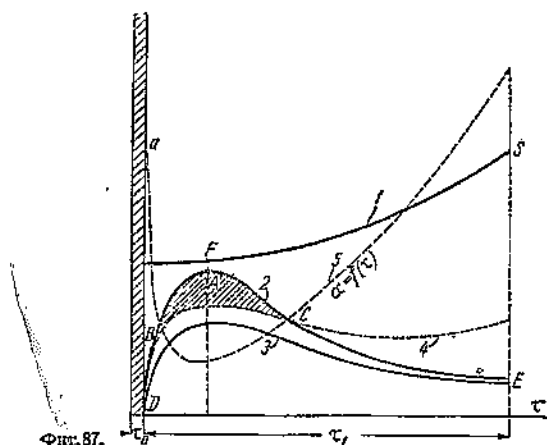
Дальнейшее прогорание слоя, снижая его сопротивление, является причиной заметного увеличения количества воздуха, поступающего в топку через слой. Между тем потребность в воздухе после выделения главной массы летучих становится меньше, тем более что и количество кокса в слое также уменьшается по мере его сгорания. Вследствие всего этого перед новой заброской топлива горение идет с весьма большим избытком воздуха. С новой заброской весь цикл этих явлений повторяется.

При сжигании антрацитов и тощих углей отмеченная выше неравномерность в работе топки при ручной заброске несколько смягчается, как и при механической загрузке топлива.

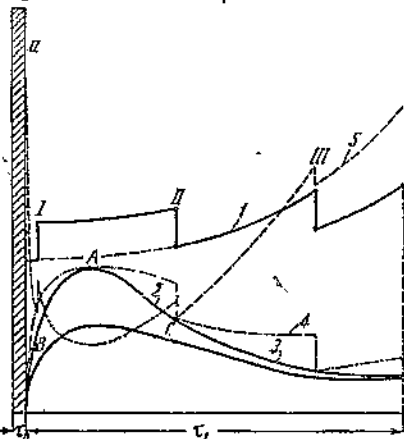
Для борьбы с этими органическими недостатками топки с периодической загрузкой были предложены ручное и автоматическое регулирование тяги и дутья, регулируемая подача вторичного воздуха и, наконец, переход к другим типам топок.

На диаграммах фиг. 87 кривая 1 и столбик a указывают схематически изменение по времени количества воздуха, вступающего в топочную камеру, от момента открытия топочной дверки для заброски топлива до начала новой заброски. За время τ_0 , когда топочная дверка открыта, в камеру входит большое количество воздуха, характеризующееся ординатами столбика a . После закрытия дверки приток воздуха снижается и в дальнейшем протекает примерно по кривой 1, постепенно нарастая из-за прогорания слоя. Количество воздуха, потребное для горения, быстро нарастает согласно кривой 2, начинающейся от точки D и имеющей максимум в точке A , отвечающей моменту наибольшего выделения летучих. Кривая 1 во всех своих точках имеет большие ординаты, чем кривая 2, так как в топку всегда должно поступать воздуха больше, чем необходимо для горения. Однако величина этого избытка ограничивается тем, что в конце кривой 1 избыток может достигнуть недопустимой величины. Количество воздуха, кислород которого может быть использован в топке для горения, на диаграмме фиг. 87 представлено кривой 4. Кривая 5 на фиг. 87 дает схематически картину изменения коэффициента избытка воздуха по времени между двумя забросками топлива.

Диаграмма фиг. 87 относится к топливу с большим выходом летучих. На ней нанесена также



Фиг. 87.



Фиг. 88.

кривая 3 изменения количества воздуха, потребного для горения кокса. Разность ординат кривых 4 и 3 дает количество воздуха, необходимого для горения летучих. Чем меньше летучих в топливе, тем более плавно протекает кривая 2. Поэтому недостатки топки с неподвижным слоем и периодической заброской топлива уменьшаются при топливах с малым содержанием летучих. Кроме того, топлива с малым содержанием летучих обычно сжигают толстым слоем на решетках с малым живым сечением при наличии довольно высокой шлаковой подушки, вследствие чего избыток воздуха при прогаре слоя не так сильно возрастает.

Так как к тому же потребность воздуха для горения топлив с малым содержанием летучих меняется по времени между двумя забросками более плавно, то коэффициент избытка воздуха при этих топливах меняется по времени не так резко и может быть ниже, чем при топливах с большим выходом летучих. На фиг. 88 показаны кривые питания топки воздухом при регулировании тяги и подачи вторичного воздуха между загрузками. Подача воздуха характеризуется при этом ступенчатой кривой I, из которой видно, что таким способом можно значительно уменьшить избыток воздуха.

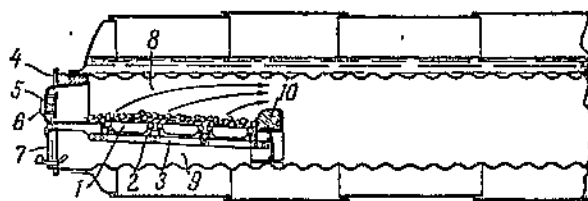
Применявшиеся на отдельных установках спо-

Фиг. 87. Диаграмма изменения количества воздуха, поступающего в топку с ручной решеткой в период времени между двумя забросками топлива. Подача вторичного воздуха и регулирование тяги отсутствуют.

а—количество воздуха, поступающее в топку при открытой топочной дверке; 1—то же, при закрытой дверке; 2—количество воздуха, потребное для горения; 3—количество воздуха, потребное для горения кокса; 4—количество воздуха, могущее быть использованным для горения; 5—коэффициент избытка воздуха; τ_1 —время заброски; τ_1 —время между двумя забросками топлива.

Фиг. 88. Диаграмма изменения количества воздуха, поступающего в топку с ручной решеткой в период времени между двумя забросками топлива. Топка с подачей вторичного воздуха и регулированием тяги.

I—увеличение тяги или впуск вторичного воздуха; II—уменьшение тяги или прекращение впуска вторичного воздуха; III—уменьшение тяги. Остальные обозначения те же, что на фиг. 87.



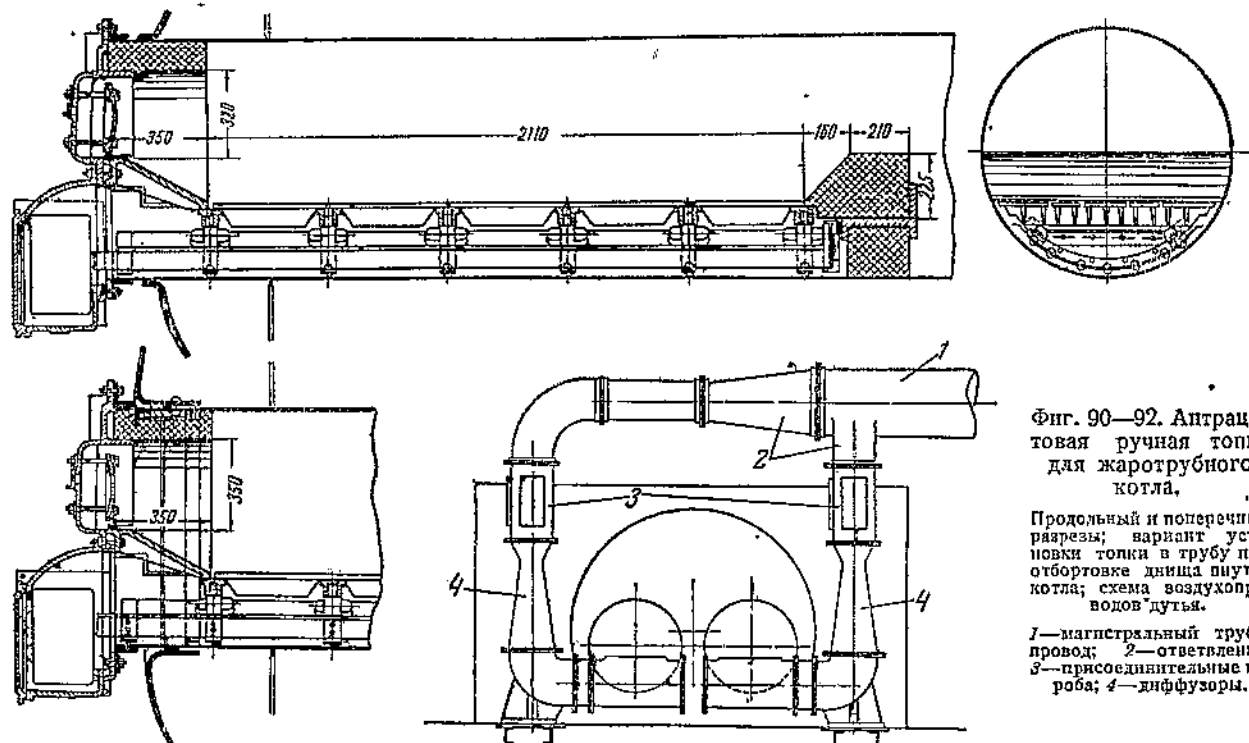
Фиг. 89. Простая колосниковая решетка с ручной заброской топлива, помещенная в жаровой трубе.

1—колосники; 2—поперечные балки; 3—продольные балки; 4—фронтальная плита; 5—топочная дверка; 6—ее защитный лист; 7—поддувальная дверка; 8—топочное пространство; 9—зольник; 10—порог.

собы автоматического регулирования тяги и ввода вторичного воздуха распространения не получили из-за сложности устройства и ненадежности действия. Ручное же регулирование обычно выполняется кочегаром неудовлетворительно, поскольку само ведение топки помимо регулирования требует от него много сил и внимания.

42. Конструкция топок с неподвижной колосниковой решеткой и регулирование процесса горения в эксплуатации

Топки с неподвижным слоем имеют различные конструктивные особенности в связи с тем, какое топливо в них сжигается. На конструкции топки прежде всего отражается влияние содержания летучих в топливе. Топливо с высоким выходом летучих можно сжигать на решетке с большим живым сечением при естественной тяге. Топлива же с низким содержанием летучих—антрациты и тощие угли, образующие толстую шлаковую подушку, требуют для своего сжигания, как указывалось выше, малого живого сечения и вдувания воздуха под решетку при некотором давлении. В последнее время и топлива с высоким содержанием летучих сжигают на решетках с малым живым сечением, применяя дутье под колосники, так как при этом легче



Фиг. 90—92. Антрацитовая ручная топка для жаротрубного котла.

Продольный и поперечный разрезы; вариант установки топки в трубу при отбортовке дна внутри котла; схема воздухопроводов дутья.

1—магистральный трубопровод; 2—ответвления; 3—присоединительные коробки; 4—диффузоры.

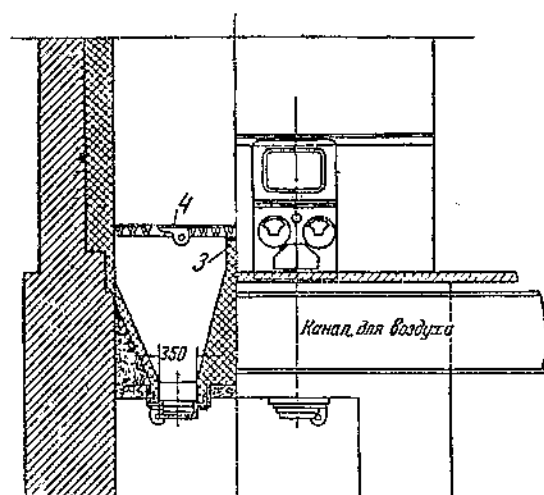
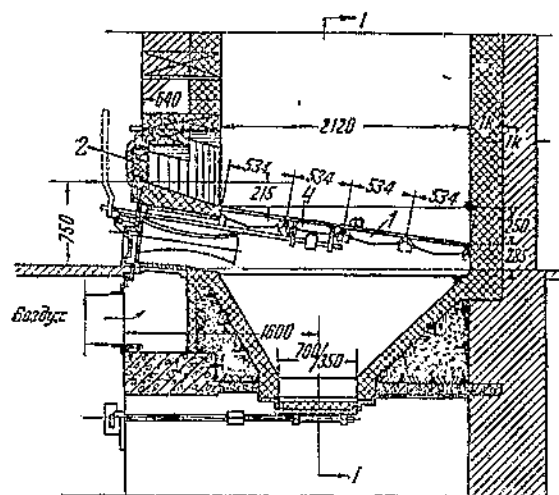
регулировать горение и поддерживать меньший избыток воздуха. Объем топочной камеры для антрацитов и тощих углей делается большим ввиду образования окиси углерода, иногда в значительных количествах, в слое этих топлив. На фиг. 89 показана топка с неподвижным слоем и ручной заброской, предназначенная для сжигания пламенных углей при естественной тяге. Балочная колосниковая решетка с большим живым сечением установлена в жаровой трубе. Три ряда колосников 1 уложены на поперечных балочках 2, опирающихся своими краями на жаровую трубу. Для разгрузки этих балочек и стенок жаровой трубы посредине вдоль решетки проложены балочки 3. Топка снабжена фронтальной чугунной плитой 4, к которой прикреплена топочная дверка 5, защищенная со стороны топочного пространства листом 6, и поддувальная дверка 7. Плоскость колосниковой решетки расположена вблизи горизонтальной диаметральной плоскости жаровой трубы. Колосниковая решетка отделяет топочное пространство 8 от зольника 9. Порог 10 помещен на чугунной отливке соответствующей формы.

Топочным пространством в этой топке является не только объем 8 над колосниковой решеткой, но также весь объем жаровой трубы за порогом, камера за жаровой трубой, а иногда—при длиннопламенном топливе—и боковые хода. Следовательно, в этом случае объем топочного пространства является величиной неопределенной.

На фиг. 90—92 представлена топка с неподвижным слоем и ручной подачей топлива, предназна-

ченная для сжигания антрацита. Отличие этой топки от предыдущей заключается в том, что колосниковая решетка значительно снижена, чтобы при толстом слое топлива последнее приходилось примерно на уровне нижнего края загрузочного отверстия. Длина колосниковой решетки 2100 мм для антрацита и пламенных углей является предельной. В связи с большой длиной решетки она составлена из пяти рядов рядов колосников. В остальных деталях эта топка (фиг. 90—92) почти не отличается от предыдущей (фиг. 89), за исключением аппаратуры для вдувания воздуха. Приспособление для вдувания воздуха состоит из магистрального воздухопровода 1, идущего от вентилятора, и двух ответвлений 2, каждое из которых подводит воздух к своей жаровой трубе. Присоединение ответвлений к жаровым трубам осуществляется при помощи коробов 3. На магистрали и на ответвлениях имеются диффузоры 4, в которых напор воздуха может быть увеличен действием струи пара из форсунки, вставленной в трубу в канале диффузора. Возможно также и применение одного только парового дутья.

При сжигании антрацита и других топлив с малым выходом летучих около 80—90% тепла выделяется в слое, что является причиной более высоких температур слоя, чем, например, при дровах и торфе. Угли с большим содержанием летучих при сжигании их без ввода вторичного воздуха дают более низкую температуру слоя, так как через слой в этом случае проходит и тот воздух, который используется в топочной

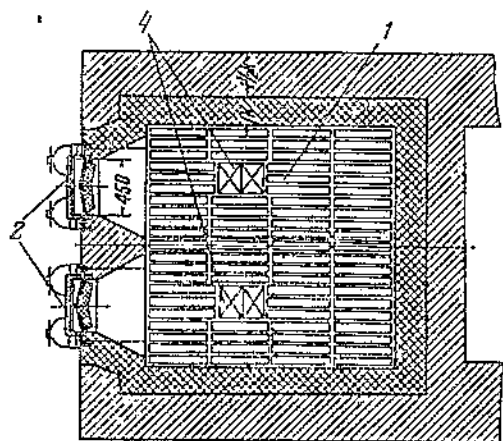


Срез по I-I

Вид с фронта

Фиг. 93. Антрацитовая ручная топка с опрочидными колосниками для водотрубного котла.

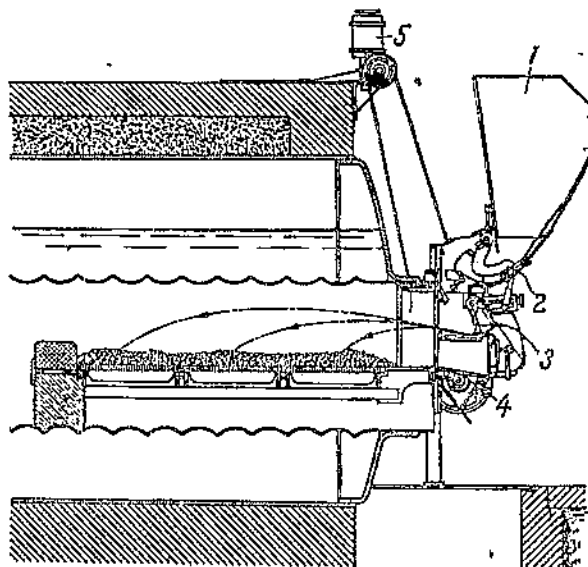
1—плиточные колосники; 2—топочные дверки; 3—продольные перегородки; 4—опрочидные колосники.



камере для горения летучих, нагреваясь в слое за счет его тепла.

Как указывалось выше, при сжигании углей с малым содержанием летучих необходима принудительная подача воздуха под колосники. Паровое дутье применяется лишь в очень мелких установках при невозможности работать на воздушном дутье из-за отсутствия энергии для привода вентилятора. Часто применяется комбинированное паровоздушное дутье. В топочной камере не следует создавать избыточного давления, так как оно может вызвать перегрев металлических дверок и фронта топки, а также выброс пламени из топки, что представляет опасность для обслуживающего персонала. Нормальным для топки в данном случае является разрежение в 2—8 мм.

Для воздушного дутья при антрацитовых топках обычно применяются вентиляторы с напором около 80—100 мм. Воздух от вентилятора подается через воздухоподводящий короб в зольник. При комбинировании парового и воздушного дутья паровым дутьем пользуются лишь изредка, в частности после чистки топки, когда отсутствует шлаковая подушка и требуется интенсивное охлаждение колосниковой решетки. Паровое дутье в этом случае помогает создать пористую

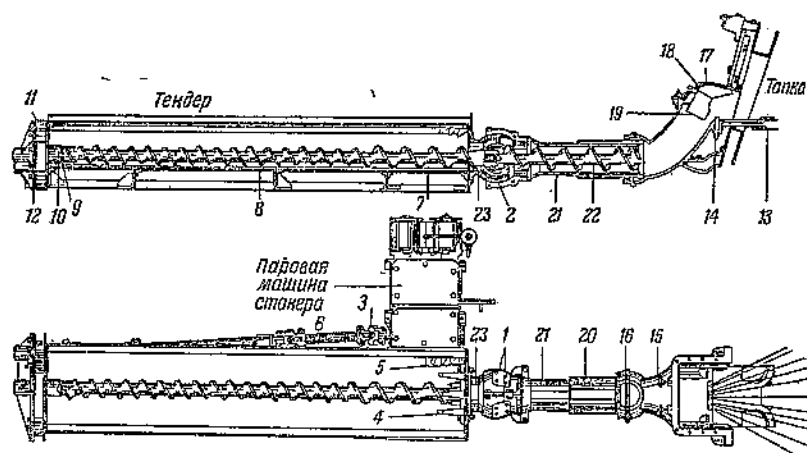


Фиг. 94. Топка с неподвижной решеткой, оборудованная приспособлением для механической заброски топлива.

1—загрузочная воронка; 2—подвижной дозер; 3—забрасывающая лопатка; 4—приводной механизм; 5—электромотор.

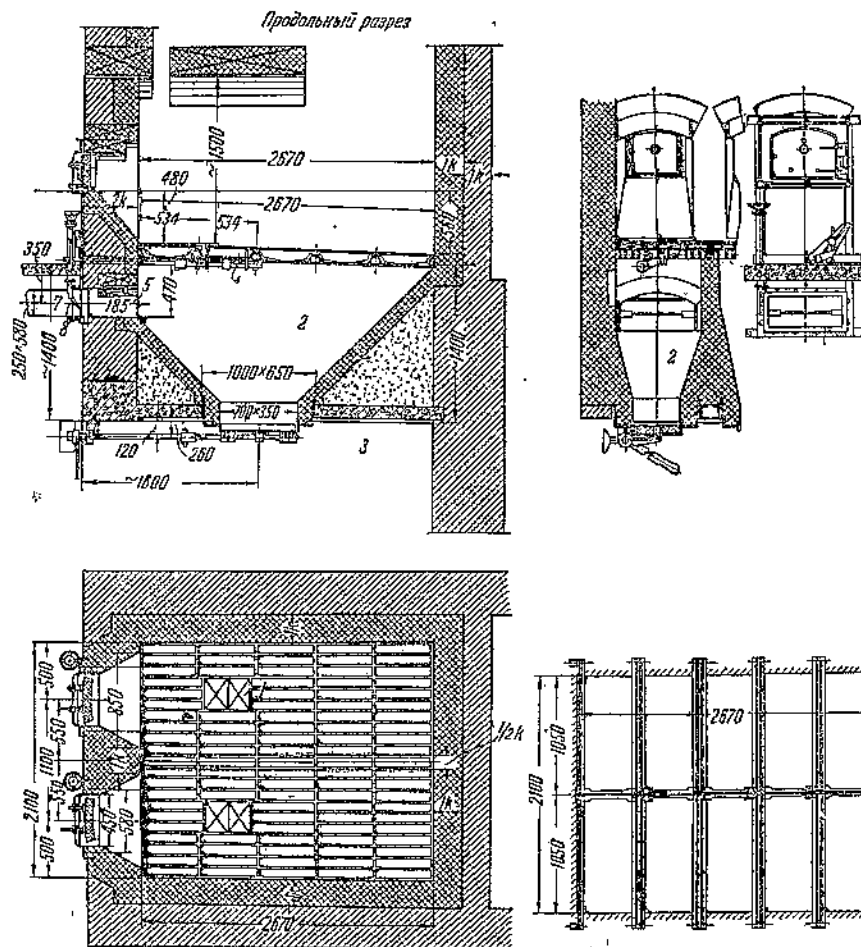
шлаковую подушку. При наличии достаточной шлаковой подушки паровое дутье бездействует. Если топка оборудована только воздушным дутьем, то для охлаждения решетки после чистки на ней оставляют часть старого шлака, чтобы ускорить образование шлаковой подушки.

На фиг. 93 показана топка с плиточными колосниками 1 для водотрубного котла, подобная топке на фиг. 92. Такие топки более широки и снабжаются несколькими дверками 2. Топка с двумя и больше дверками делится в зольнике на продольные зоны перегородками 3, позволяющими производить чистку одной части решетки без нарушения работы другой.



Фиг. 95. Паровозный стокер типа ЦЛПБ-1 производительностью 3 600 кг/час при мощности привода 15 л. с.

1—крышка коробки шарового соединения рукава; 2—кулак; 3—вилка; 4—плита главной углескробилки; 5—плита вспомогательной углескробилки; 6—вал привода; 7—винтовой транспортер на тендере; 8—корыто; 9—упорная шайба транспортера; 10—коробка упорной шайбы; 11—коробка зубчатой передачи; 12—крышка коробки; 13—распределительная плита; 14—сопло; 15—выходной рукав стокера; 16—крышка шарового соединения выходного рукава; 17—крышка стокерной головки; 18—задница на крышке; 19—дефлектор; 20—передний выходной рукав транспортера; 21—задний выходной рукав транспортера; 22—передний винт транспортера; 23—шаровое соединение рукава транспортера на тендере.



Фиг. 96. Ручная топка для подмосковного угля к водотрубному котлу.

Площадь решетки на одну дверку не более $2,7 \text{ м}^2$. Ширина решетки на одну дверку в среднем 1000—1200 мм. Для облегчения удаления шлака и золы при многозольном топливе решетка снабжается опрокидными колосниками 4. Во время работы опрокидные колосники занимают горизонтальное положение; при чистке шлака их поворачивают на 90° для сбрасывания шлака в зольник.

На фиг. 94 показана топка с неподвижным слоем и механизированной подачей топлива. Аппарат для механической заброски топлива может быть применен для сжигания как антрацита, так и пламенных углей, но при этом требуется сортировка топлива с определенным размером кусков, так как иначе нельзя отрегулировать механизм для получения равномерного слоя. Загрузочный аппарат состоит из загрузочной воронки 1, подвижного дозера 2, забрасывающей лопатки 3, приводного механизма 4 и мотора 5. Фронт топки должен быть приспособлен для присоединения забрасывающего аппарата. В остальном решетка по конструкции подобна предыдущим.

Механизмы для подачи топлива в виде так называемых стокеров применяются также на паровозах, где при размере решетки $R = 7-8 \text{ м}^2$ и напряжении ее $B/R = 400-500 \text{ кг/м}^2 \text{ час}$ ручная заброска оказывается уже непосильной. У нас такой стокер типа ЦЛПБ-1 применяется на мощных товарных паровозах серии ФД и на пассажирских ИС. В этом стокере осуществлена верхняя подача топлива с разбрасыванием угля по площади решетки действием струи пара. Топливо подается к топке из тендера при помощи винтового транспортера (фиг. 95). Разрешая вопрос о механизации заброски топлива для мощных паровозов, этот стокер в настоящее время еще дает значительную потерю от уноса и не обеспечивает равномерного распределения угля на площади решетки.

Топки для сжигания подмосковного и других бурых углей должны быть устроены так, чтобы удобно было работать с толстым слоем, необходимым ввиду большой влажности этих топлив. При сжигании толстым слоем топлив с большим содержанием влаги можно поддерживать достаточно высокую температуру в слое, находящуюся в допустимых пределах. Повышение

температуры по мере утолщения слоя происходит потому, что при этом доля тепла, излучаемого слоем в камеру, становится меньше по отношению к количеству тепла, аккумулированного в слое топлива.

На фиг. 96 показана ручная топка под водотрубным котлом для подмосковного угля. Вследствие большой зольности угля эти топки выполняются обязательно с поворотными колосниками 1, золовыми бункерами 2 и золовым подвалом 3. Ввиду большой влажности подмосковного угля здесь применяется только воздушное дутье. Подвод воздуха 5 осуществляется с фронта через патрубок 7 с заслонкой 8; воздух желательно подогревать до 100—150° С. Давление под колосниками равно 60—80 мм вод. ст. Длина решетки берется в пределах 2135—2670 мм. Глубина от уровня решетки до шуровочной дверки равна 480 мм. Это облегчает заброску и потому позволяет удлинить решетку. Слой шлака при сжигании подмосковного угля может достигать 500 мм. Для улучшения процесса горения топка перекрывается рядом сводов, уменьшающих радиацию от слоя, увеличивающих его температуру благодаря косвенному излучению от них и облегчающих догорание газов в топочной камере. Площадь решетки, обслуживаемая одной шуровочной дверкой, при длине решетки 2,67 м составляет максимум 3,74 м².

Шуровка и удаление золы, а особенно шлака, вручную затрудняют работу кочегара и ведут к потере тепла в связи со значительным увеличением избытка воздуха, охлаждением топки и удалением горячих шлаков.

Установка опрокидных колосников и золовых бункеров (фиг. 96) значительно упрощает обслуживание топки. Просыпающаяся в бункер зола и выброшенный туда шлак удаляются обычно вагонетками. Шлакование решетки и перегрев колосников менее вероятны при подмосковном угле ввиду высокого содержания в нем влаги.

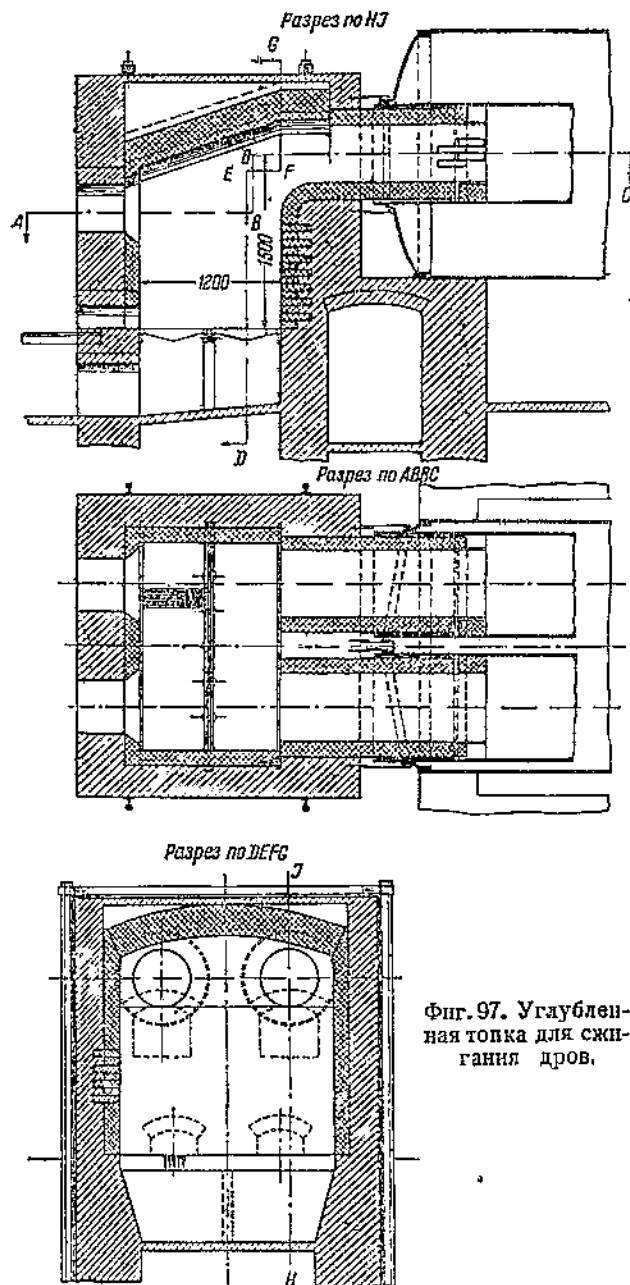
При сжигании дров с периодической загрузкой на неподвижной решетке (неподвижным слоем) приходится считаться прежде всего с высокой влажностью дров и с большими размерами поленьев, являющихся в данном случае кусками топлива. Указанные обстоятельства наряду с низкой теплотворной способностью дров и особенно малой теплоплотностью приводят к необходимости сжигания дров очень толстым слоем — от 700—800 мм для сухих и более мелких дров, до 1500 мм — для сырых дров и более крупных поленьев. При конструировании дровяных топок, учитывая это обстоятельство, колосниковую решетку помещают ниже загрузочного отверстия настолько, чтобы при полной толщине слоя его поверхность не подымалась выше нижнего края загрузочного отверстия. Размер отверстия делается несколько больше, чем для угля, доходя по ширине до 450—500 мм. Длину решетки устанавливают в зависимости от длины поленьев, принимая ее на 200—250 мм больше с учетом некоторой неравномерности в длине поленьев и в укладке их в слое. При сжигании дров в топке с неподвижным слоем при правильной толщине

слоя недостатки этой топки несколько смягчаются, несмотря на высокое содержание летучих в дровах. Причина этого лежит в большой толщине слоя и значительном запасе аккумулированного в нем тепла. Довольно легко при этом удается вести сжигание дров с малым избытком воздуха ($\alpha = 1,2—1,25$) при незначительной потере от неполного горения $q_3 = 0—20\%$. Потеря от механического недожога также мала ввиду ничтожного количества золы в дровах и не превышает $q_4 = 1,5—2,0\%$. Положительной стороной сжигания дров в углубленной топке является также почти полное отсутствие чистки топки от шлака, а также простота и дешевизна этой топки сравнительно с другими типами топок, на которых сжигают дрова. Пример подобной углубленной топки для сжигания дров при неподвижном слое и периодической загрузке показан на фиг. 97.

Сжигание кускового торфа в топках этого типа имеет много общего со сжиганием дров. Разница обуславливается тем, что торф имеет меньшую величину кусков и поэтому сжигается при меньшей толщине слоя. Кроме того, торф содержит больше золы, чем дрова. Последнее обстоятельство, вызывая необходимость усиленной чистки топки от шлаков, приводит к усложнению конструкции топки. В торфяной топке дверка, находящаяся у самой поверхности решетки и предназначенная для шуровки слоя, должна иметь такие размеры, которые позволяли бы подрезать шлак и даже частично выбрасывать его. Длина решетки для торфа не обуславливается размерами его кусков и решетка ставится не так глубоко, как при дровах, вследствие меньшей толщины слоя. В этом и заключаются отличия торфяной топки от дровяной.

Регулирование топок в эксплуатации. Как было указано выше, работа топок с неподвижным слоем и периодической загрузкой топлива страдает органическими недостатками, которые в известной степени смягчаются регулированием тяги и подачи вторичного воздуха. В эксплуатации топочных устройств приходится обычно приспосабливать производительность топочного устройства, развиваемую им в данный момент, к нагрузке котельного агрегата. Все это требует регулировки работы топки.

Средствами для регулировки рассмотренных в этом параграфе топок являются изменение тяги, достигаемое в основном перестановкой шиберов или изменением числа оборотов дымососа, и изменение дутья, если оно имеется. Вдувание воздуха в зольник топки производится либо дутьевым вентилятором, либо пародутьевым прибором. Пародутьевые аппараты состоят из диффузора и парового сопла. Паровое сопло устанавливается по оси диффузора на небольшом от него расстоянии. Действием струи пара, вытекающей из сопла в диффузор, засасывается воздух, большая скорость воздуха и пара в узком сечении диффузора постепенно по мере расширения диффузора переходит в давление, которое и заставляет воздух проходить через слой топлива. Для изменения дутья меняют число оборотов вентилятора, либо изменяют действие пара в пародутьевом аппарате, дроселируя его при помощи регулирующего вентиля, либо же, наконец, действуют заслонкой, поставленной на ответвлениях к топке или секции зольника.



Фиг. 97. Углубленная топка для сжигания дров.

Процесс удаления шлака из топок с неподвижным слоем является тяжелой и ответственной операцией. Шлак приходится удалять, когда его накопилось уже столько, что дальнейший рост шлаковой подушки угрожает опасностью уменьшения производительности топки из-за повышения сопротивления слоя, причем напор тягодутьевых устройств может оказаться недостаточным для их преодоления.

Перед чисткой прежде всего выжигают слой, т. е. доводят до минимума толщину коксового слоя над шлаковой подушкой. Оставшееся сравнительно небольшое количество кокса сгребают на одну половину топки, а на другой половине разламывают шлак на отдельные крупные куски, ставят их на ребро и оставляют на некоторое время при закрытой топочной дверке для лучшего выгорания кусочков кокса из шлака. Далее шлак удаляют из топки через топочную дверку на пол котельной, заливают его водой и убирают носилками или вагонетками на отвал. Затем сгребают весь кокс

на очищенную половину топки и забрасывают на него свежую порцию топлива, закрывают дверки и дают топливу разгореться. После этого очищают вторую половину топки от шлака, разравнивают слой топлива по всей решетке и начинают нормальную работу. При наличии поворотных колосников удаление шлака упрощается, так как его сбрасывают в отверстие, образующееся при установке опрокидного колосника в вертикальное положение.

При чистке топки от шлаков мощность топки сильно снижается на время чистки, доходя почти до нуля. В соответствии с этим обычно снижается и мощность всего агрегата. На этот период времени, иногда достигающий получаса, необходимо, чтобы другие котельные агрегаты приняли на себя нагрузку того, который находится в чистке. Для удлинения периода работы топки от одной чистки до другой прибегают к периодической подрезке шлака.

Неспекающиеся и растрескивающиеся мелкозернистые и пылеватые угли дают большой унос или провал топлива: так, например, при сжигании АШ на решетке потери с уносом и провалом достигают 25%, поэтому для улучшения сжигания неспекающихся углей желательна небольшая добавка к ним спекающихся углей. Сильно спекающиеся угли дают меньший унос, но требуют частой шуровки и тщательного наблюдения за состоянием слоя. Неравномерное спекание топлива по слою при сильном дутье бывает иногда причиной местного прорыва большого количества воздуха с образованием кратера. Причиной кратерного горения может быть также неравномерность строения слоя, различная крупность кусков топлива и неравномерность образования шлакового слоя. Заливание прозоров колосниковой решетки расплавленным шлаком также может привести к кратерному горению.

Обслуживание топок с неподвижным слоем топлива осуществляется кочегаром, нагрузка которого при ручной загрузке составляет 500—700 и не более 1000 кг/час угля. На обязанности кочегара лежит не только подача топлива в топку, но и наблюдение за правильностью работы топочного устройства, а иногда (в мелких котельных) и всего котельного агрегата. При обслуживании топочного устройства кочегару приходится прежде всего следить за состоянием слоя, не допуская его неравномерности и прогаров в нем. По виду пламени, состоянию слоя или по контрольным приборам опытный кочегар устанавливает наиболее удобный режим работы топки при данном топливе и нагрузке, определяющийся таким коэффициентом избытка воздуха, при котором сумма потерь тепла от неполного горения и в дымовую трубу достигает своего минимума.

Основные показатели достижимой на практике наиболее экономной работы топки с неподвижным слоем топлива и периодической его загрузки даны в табл. 46. Из этой таблицы видно, что ручные и полумеханические топки с неподвижным слоем работают в производственных условиях при коэффициентах избытка воздуха в конце топочной камеры $\alpha = 1,25 \div 1,4$. При этом потеря от химической неполноты горения $q_8 = 2-7\%$, а потеря от механической неполноты горения $q_4 = 1,5-7\%$. В случае очень зольных топлив эта потеря в зависимости от содержания золы может достигнуть и больших значений.

Топки с неподвижным слоем при периодической ручной загрузке топлива допускают сжигание на них любых твердых топлив. Но наилучшие результаты получаются при сжигании сортированного топлива с $Q_p^u = 3500-7000$ ккал/кг.

ТОПКИ С ПОДВИЖНЫМ СЛОЕМ ТОПЛИВА

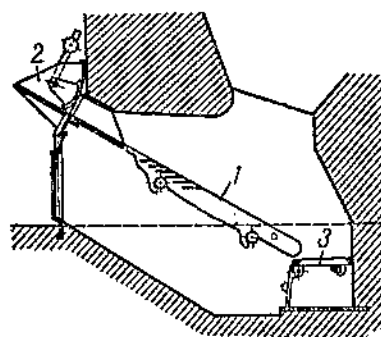
43. Полумеханические топки

У топок с наклонными решетками (фиг. 98), предназначенных для сжигания неспекающихся или мало спекающихся каменных углей, бурых углей, дров и торфа, колосники 1 расположены с наклоном под углом $40-45^\circ$ в зависимости от угла естественного откоса топлива. Топливо, засыпанное в расположенную наверху воронку 2, по мере сгорания опускается под влиянием собственного веса вниз.

Топливо загружается в топку непрерывно, чем устраняется неравномерность горения между закидками. С течением времени, двигаясь по решетке, топливо постепенно проходит через все стадии горения. Суммарный же процесс горения относительно всей топки в целом по времени не меняется, обладая более или менее установившимся состоянием. Поэтому основные органические дефекты топки с периодической загрузкой здесь уже отсутствуют. Подача к топливу воздуха в количествах, соответствующих потребности в различных стадиях горения, здесь может быть осуществлена, например, за счет изменения формы колосников или толщины слоя топлива по длине решетки, а также путем соответствующего изменения наклона решетки. Более рациональным является, как и в механических топках, создание в зольниковом пространстве особых зон с раздельным регулированием подачи воздуха в эти зоны.

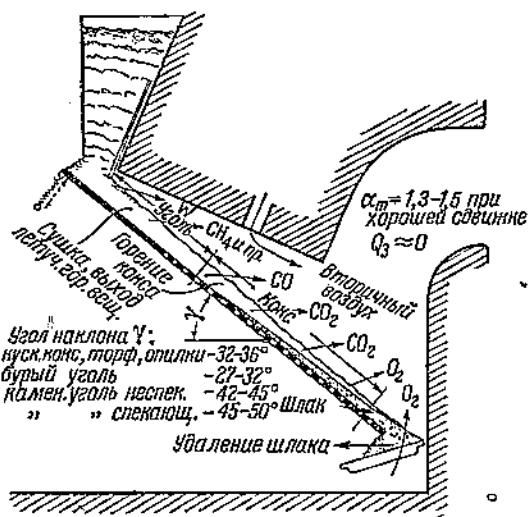
На фиг. 99 изображена схема полумеханической топки и показаны процессы, происходящие по отдельным зонам.

Загрузка топлива и обслуживание при полумеханических топках проще и менее утомительны, чем при горизонтальной решетке. Проникновение в топку излишнего воздуха при загрузке топлива здесь устранено. Колосники часто устанавливаются так, что ширина прозоров в нижней части решетки больше, чем в верхней. Этим достигается увеличение подачи воздуха под нижние колосники, что несколько уменьшает опасность их пережога внизу, где они наиболее подвержены воздействию горящего слоя. Часто колосники в верхней части решетки в прозорах снабжаются ребрами, чтобы в этом месте, где еще не начался процесс спекания топлива, воспрепятствовать провалу несгоревших частиц. К наклонной решетке иногда внизу примыкает состоящая из плит или колосников короткая горизонтальная шлаковая или дожигающая решетка 3 (фиг. 98), устроенная так, чтобы кочегар при очистке шлака мог выдвинуть ее вперед при помощи штанги с крюком.



Фиг. 98. Топка с наклонной решеткой.

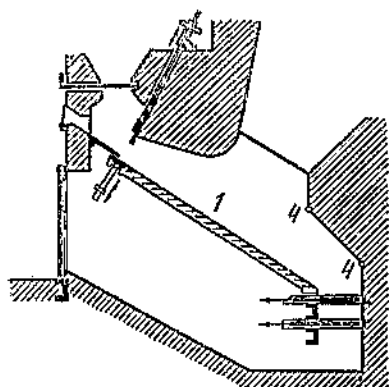
1—колосник; 2—загрузочная воронка; 3—дожигающая решетка.



Фиг. 99. Схема работы топки с наклонной решеткой.

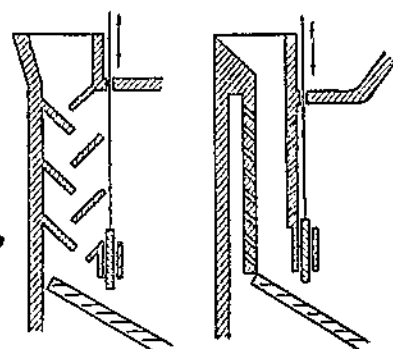
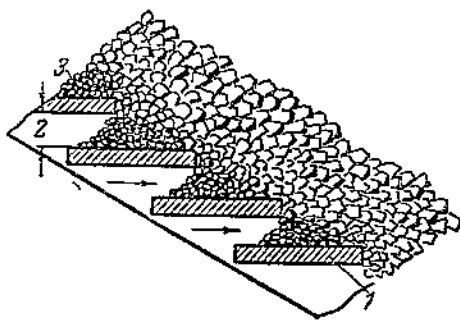
Топки с наклонными неподвижными решетками выполняются длиной и шириной до 2 м, так что общая площадь решетки доходит до 4 м^2 ; двойная решетка, следовательно, может быть изготовлена для нагрузки до $7 \cdot 10^6 \text{ ккал/час}$. Наклонные решетки применяются в настоящее время только для выносных топок.

Ступенчатые топки с неподвижной решеткой, применяемые для сжигания бурых углей, опилок и т. п. ($Q_p'' = 1700-3500 \text{ ккал/кг}$), имеют колосники, расположенные подобно ступеням лестницы (фиг. 100). Наклон колосни-



Фиг. 100. Топка со ступенчатой наклонной решеткой.

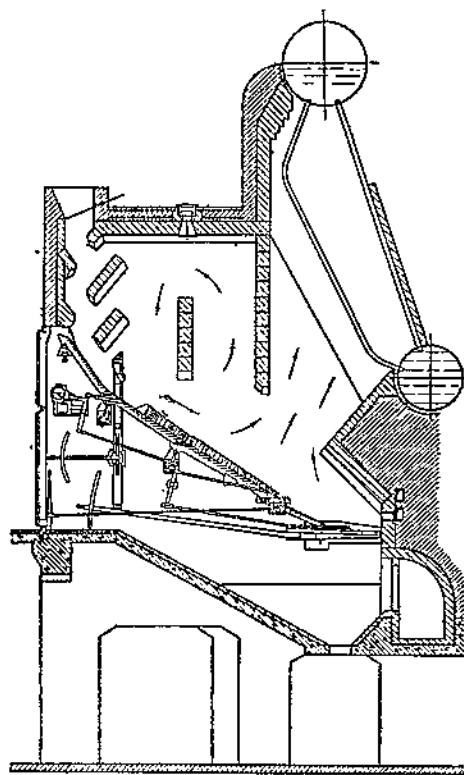
1—ступенчатые колосники; 2—прозор между ними; 3—очаги горения; 4—своды для отражения тепла на слой и для направления газов.



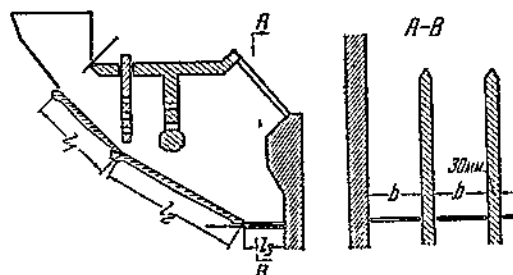
Фиг. 101. Подсушивающие шахты для бурого углей топок.

кового полотна во избежание скопления топлива внизу топки во время ее работы берется здесь меньшим, чем у наклонной решетки, и принимается несколько меньше угла естественного откоса соответствующих видов топлива, а именно $32-34^\circ$ для бурого угля, 30° для торфа, 40° для опилок. Шуровкой удается расположить топливо равномерно по поверхности решетки. Опоры ступенчатых колосников должны устанавливаться таким образом, чтобы можно было изменять угол наклона в пределах $\sim 5^\circ$ при необходимости приспособить топку к другому топливу.

Ступенчатые колосники 1 изготавливаются толщиной около 12 мм, шириной около 150 мм и длиной около 500 мм; по ширине решетки укладываются два-три колосника в один ряд; по длине решетки колосники перекрывают друг друга настолько, что, несмотря на прозор 2, равный около 20 мм, мелочь не проваливается. Ступенчатые колосники имеют очень небольшой показатель степени охлаждения $\alpha=1$, вследствие чего они пригодны только для влажных углей с большим выходом летучих, где в слое не развиваются высокие температуры. На ступенчатых колосниках топливо несколько задерживается, вследствие чего образуются небольшие очаги горения 3 (фиг. 100), воспламеняющие топливо, опускающееся по решетке. От этих очагов горения, распространяющихся по всей решетке, слой топлива подсушивается, вследствие чего в подобных топках оказывается возможным сжигание очень влажных бурых углей. Но очаги горения не обеспечивают надежного воспламенения, особенно когда влажность топлива достигает величин, близких к 60% . В этих случаях необходимо устройство шахты и других приспособлений для предварительной просушки топлива (фиг. 101). Подсушивающие шахты применяются при сжигании очень влажного бурого угля, дров и торфа, в случае мелкозернистых топлив действие их невелико. Иногда в топке при этом устанавливаются специальные своды (фиг. 102), дающие пламени и части продуктов горения обратное направление для



Фиг. 102. Топка со сводками для обратного направления газов и для излучения.



Фиг. 103. К определению площади ступенчатой колосниковой решетки.

обогрева свежего топлива сверху. Эти своды, кроме того, усиливают обогрев топлива, излучая на него тепло.

Для большей надежности воспламенения верхних слоев высоковлажного топлива кроме лучистого тепла пламени используют и отраженное тепло от специальных сводов обмуровки 4 (фиг. 100). Развитие пламени в этом случае происходит не на наклонной части решетки, как это должно было бы быть, а, как правило, на шлаковой решетке. Пламя, идущее от шлаковой решетки, омывает затем поверхность незагоревшегося еще топлива, быстро его высушивает, способствует выделению летучих и зажигает его сверху.

Шлаковая решетка состоит из плит или колосников, помещенных на общей раме. Для несильно шлакующих топлив целесообразно устанавливать дожигательную двухступенчатую решетку, на которой очаговые остатки могут находиться некоторое время для лучшего выжигания горючих.

Равномерность движения слоя по решетке очень важна. Шлакование может нарушить движение топлива, требуя вмешательства кочегара. Но и обвалы слоя вредно влияют на установившийся процесс горения и повышают потери в шлаке. Поэтому иногда (фиг. 102) в нижней части наклонной решетки располагается шуровочная тележка 1, которая перед очисткой шлаковой решетки выдвигается вперед, чтобы при открывании шлаковой решетки предотвратить внезапное смещение вниз топлива, лежащего на верхней части решетки.

Площадь наклонной решетки R вычисляется по формуле (фиг. 103):

$$R = (l_1 + l_2 + l_3) b,$$

где l_1 — длина передней подготовительной части решетки;

l_2 — длина пологой ее части;

l_3 — длина шлаковой решетки;

b — ширина ступенчатых колосников.

Общая длина такой решетки доходит до 6,5 м, а площадь может достигать 40 м². Удельное тепловое напряжение $\frac{Q}{R}$ может быть доведено до $0,5 \cdot 10^6$ ккал/м² час. Таким образом ступенчатые решетки дают теплопроизводительность до $Q = 20 \cdot 10^6$ ккал/час.

Часовое количество пара, отнесенное к 1 пог. м ширины топки, а следовательно, и котла, доходит до 2600 кг/м час.

Загрузка полумеханических топок легче, чем загрузка горизонтальной решетки. Поэтому при наклонных решетках допустима нагрузка для кочегара в пределах 1100—1300 кг/час.

Широкое распространение в СССР имеют шахтные топки с наклонными решетками, применяемые для сжигания дров и кусо-

вого торфа. Шахта служит для предварительной подготовки топлива, главным образом, для подсушки его. Подсушка топлива осуществляется по мере опускания слоя за счет постепенного прогрева топлива и подачи воздуха через слой топлива в шахте. Распределение воздуха по длине слоя регулируется в зависимости от влажности топлива, поэтому шахтные топки имеют несколько зон подвода воздуха. Подогрев воздуха улучшает подсушку и горение. На фиг. 104 показана схема шахтной топки и ее работы на дровах.

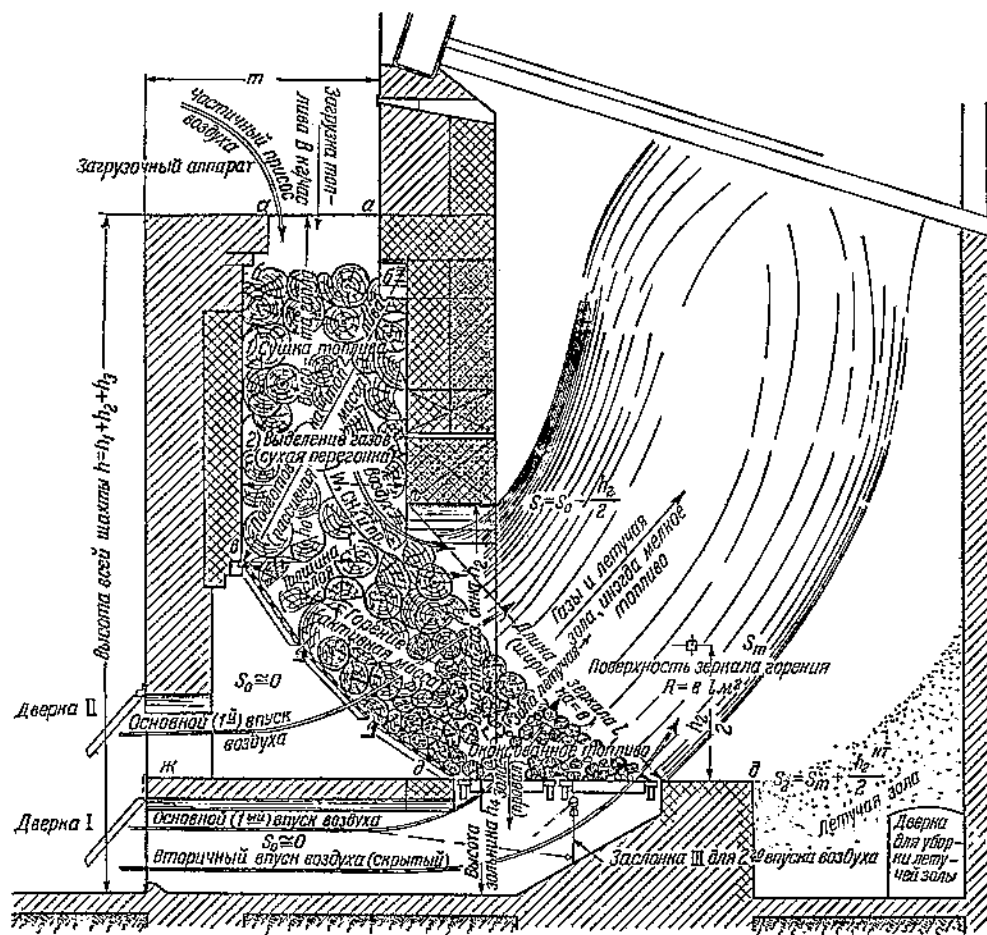
Для торфа устанавливают шиберы или специальные передвижные балки, с помощью которых регулируют высоту слоя в зависимости от влажности топлива.

На фиг. 105 и 106 показаны топки для дров и торфа. Топки имеют примерно одинаковую конфигурацию. Топливо поступает из шахты 8 на наклонную 9 решетку и затем, спускаясь, дегорает на горизонтальных колосниках 3. Топки имеют три зоны I, II, III подвода воздуха. В случае присадки фрезерного торфа добавляются вверху и внизу сводики 10 и 10а. Фрезерный торф подают через щель 15 в верхнем перекрытии 16. Колосники 1 топки кладутся на балочки 4, охлаждаемые водой. Форма колосников показана на фиг. 107. Живое сечение колосников для дров и торфа обычно бывает 20—30%.

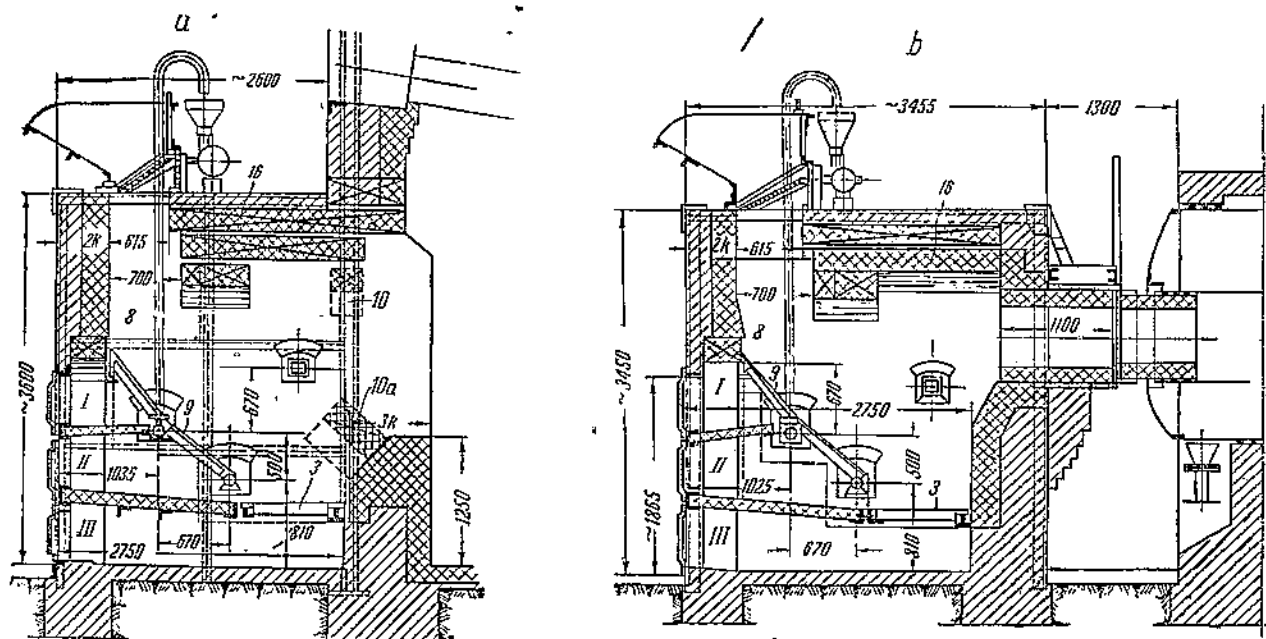
Высота горловины шахты около 2 м. Запас топлива в шахте на 1—1,5 часа. При установке двух шахт последние разделяются стенкой. Удаление золы и шлака из топки производится вручную. Разрежение в топочной камере не должно быть менее 4—5 мм вод. ст., так как в противном случае шахта может начать дымить. При работе на торфе и дровах шахтные наклонные решетки допускают теплонпряжения (900—1500) · 10⁶ ккал/м² час. Теплонпряжения объема топки до $300 \cdot 10^8$ ккал/м³ час. Потери $q_3 + q_4 = 1 + 4\%$ для торфа и 0,5—2% для дров; при $\alpha = 1,3$ потеря от химического недожога 2—3%.

Для сжигания опилок, коры и тому подобных древесных отходов часто применяется так называемая финская топка (фиг. 108) со свободной кучевой засыпкой на верхнюю часть 1 слабо наклоненной колосниковой решетки. Ниже решетка переходит в ступенчатую с большим наклоном. На верхней части решетки топливо задерживается и там создается очаг горения, подсушивающий топливо, спускающееся на нижнюю решетку. Дожигание топлива происходит на горизонтальной колосниковой решетке 2. Воздух подводится в три зоны соответственно к верхней, средней и нижней частям решетки. Кроме описанных выше имеется еще большое количество типов и конструкций полумеханических топок (лотковые, полугазовые и т. п.), не нашедших распространения в СССР.

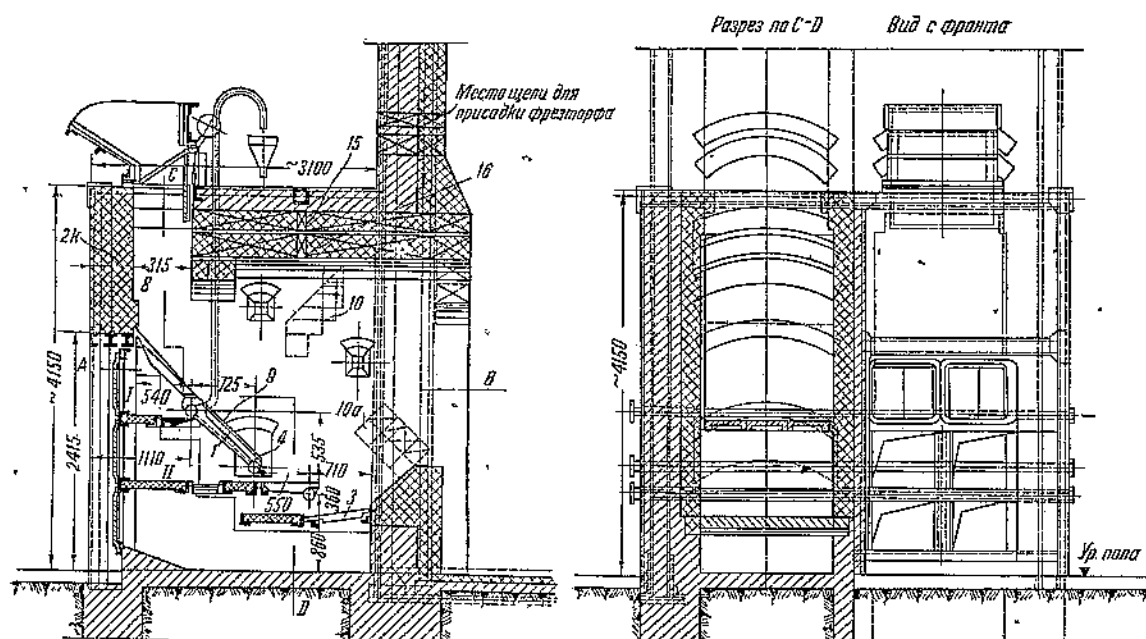
В табл. 46 (стр. 172) приведены характеристики ручных и полумеханических топок при сжигании в них типичных топлив Союза по данным Татищева (ВТИ). При пользовании этой таблицей необходимо иметь в виду, что потери со шлаком для углей и антрацитов определяются в зависимости от зольности по формуле, основанной на опытных данных, и находятся в пределах от 8 до 20%. Величины потерь с провалом, приведенные в табл. 46, получены из опытов с решетками, живое сечение которых составляло около 10%. Потери от химического недожога и уноса даются



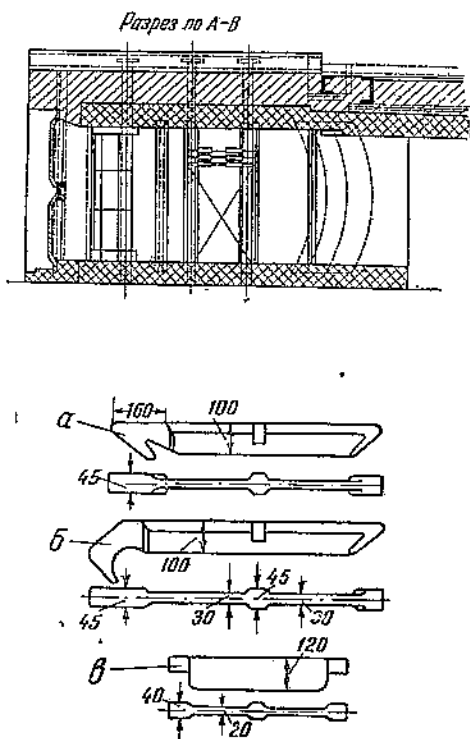
Фиг. 104. Схема работы шахтной топки для дров.



Фиг. 105. Шахтная топка для дров.

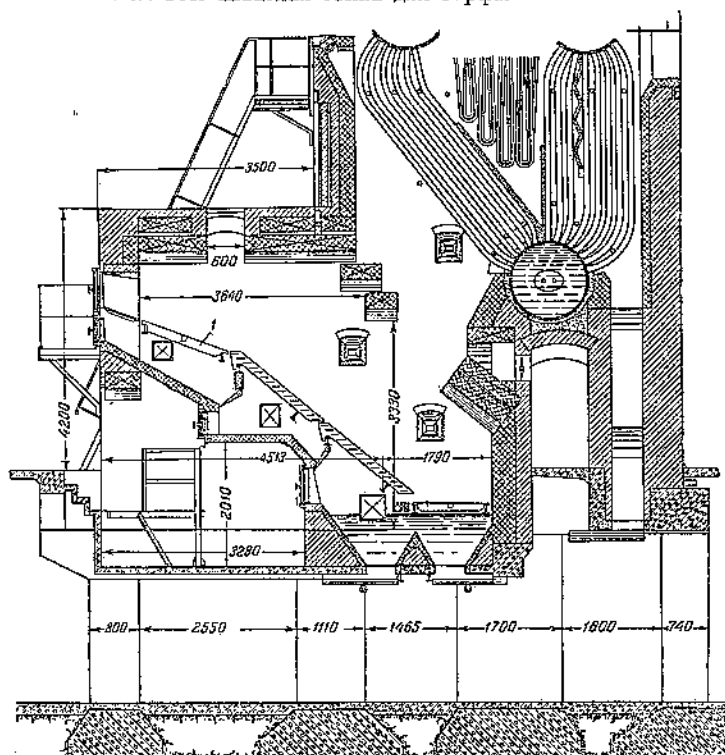


Фиг. 106. Шахтная топка для торфа.



Фиг. 107. Нормали колосников для шахтной топки.

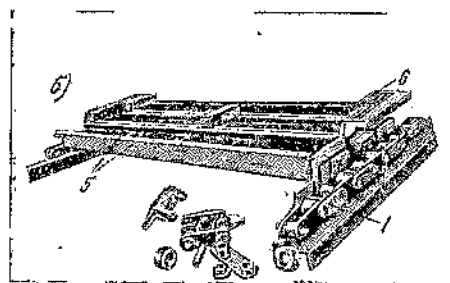
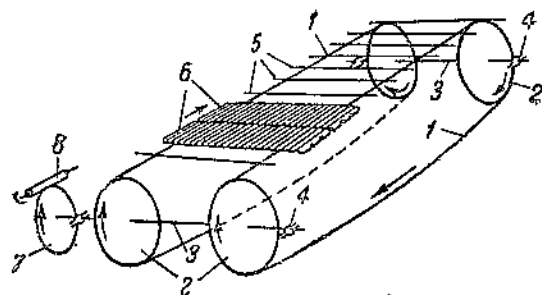
а — верхний наклонный колосник; б — нижний наклонный колосник; в — горизонтальный колосник.



Фиг. 108. Финская топка.

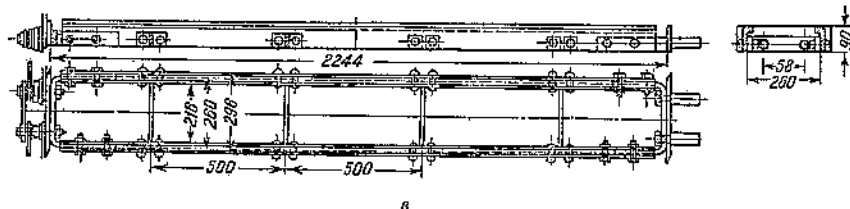
при указанном в таблице теплонапряжении объема и при работе топки без острого дутья. При введении острого дутья и сжигании каменных углей с большим выходом летучих потери от химического недожога можно понизить на 3—4%. Верхний предел производительности топочного устройства для

дров соответствует случаю сжигания сухих дров с влажностью 25—30%. Повышение влажности вызывает снижение производительности топочного устройства. Предельной влажностью для дров при сжигании их в полумеханических топках с наклонным зеркалом горения надо считать 45%. Для дров



Фиг. 109. Схема и детали цепной решетки.

а — схема решетки; б — детали решетки; в — бимс. 1 — бесконечная цепь; 2 — звездочки; 3 — валы; 4 — подшипники в станине (не показана); 5 — бимсы; 6 — колосники; 7 — червячное колесо; 8 — червяк, получающий вращение от привода.



с влажностью больше 50% следует ставить шахту с вертикальным зеркалом горения.

Снижение производительности торфяной полумеханической топки вызывается повышенной влажностью, зольностью и большим процентом мелочи. Для торфа нормального качества принято считать $W_p = 30\%$; $A_p = 8-10\%$, а содержание мелочи (при размере кусков до 25 мм) не больше 10%. Теплонапряжение решетки для такого торфа $\frac{Q}{R} = 1\,200\,000 \text{ ккал/м}^2 \text{ час.}$

44. Цепные решетки. Процесс горения в топках с цепными решетками и общая характеристика их работы

Цепная колосниковая решетка представляет собой бесконечное полотно, состоящее из двух или нескольких цепей 1, связанных между собой поперечными балками 5 (бимсами), на которые набираются колосники 6 (фиг. 109). Ранее применявшиеся цепи со сплошным полотном в настоящее время не строятся. Бесконечные цепи решетки натянуты на звездочки 2, которые сидят на переднем 3 и заднем 3' валах. Валы опираются на подшипники 4. Привод осуществляется от небольшого электромотора мощностью 1—5 л. с. и действует чаще всего на передний вал и укрепленные на нем звездочки, через червячную передачу 7, 8, задний же вал со своими звездочками является только направляющим. Натяжение цепи производится в этом случае перемещением подшипников 4 заднего вала. Цепи и колосниковое полотно, имеющее значительный вес, покоятся на станине (раме); раньше станины изготовлялись из чугуна, теперь же обычно из листового и профильного железа. Для разгрузки подшипников валов очень часто под нижней половиной колосникового полотна устанавливают опорные ролики.

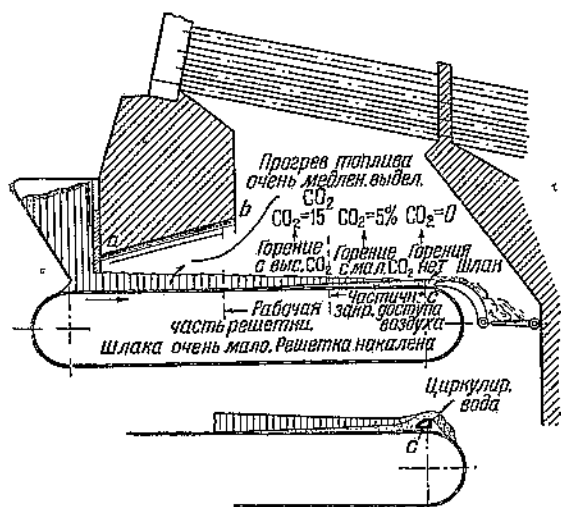
Для цепных решеток обычно применяются ша-

рикоподшипники. На решетках шириной более 2 м устанавливают три и больше цепей.

Колосники решетки вставляются в соответствующие пазы бимсов и замыкаются на торцах особыми замковыми колосниками. Разборка решетки очень проста и часто может производиться даже на ходу топки. На фиг. 109, в показан бимс решетки, установленной на Шатурской ГРЭС. Бимсы в настоящее время выполняются из железных балок специального профиля.

Колосники цепной решетки при своем движении выносят топливо из загрузочного ковша в топочную камеру. При движении цепи колосники только периодически подвергаются действию высоких температур, что увеличивает надежность их работы. На фиг. 110 схематически показано строение слоя топлива цепной решетки. На схеме фиг. 111 видны все пять зон, характерных для топок с подвижным слоем, и указано также примерное распределение их по решетке. Диаграмма фиг. 111 представляет изменение количества поступающего и потребного воздуха и изменение коэффициента избытка воздуха. Как видно из диаграммы, построенной по пути топлива или по длине решетки, здесь также имеется неравномерность процесса и несоответствие между потребным и подаваемым количествами воздуха. При достижении установившегося процесса величина ординаты в каждом данном месте решетки остается по времени постоянной. Для данной же порции топлива, перемещающегося вдоль решетки, эти ординаты получают различные значения в зависимости от того, в какой зоне и, следовательно, в какой стадии процесса находится эта порция топлива.

На диаграмме фиг. 111 показано влияние ввода вторичного воздуха, шлакового подпора и зонного дутья на работу цепных решеток. Из диаграммы видно, что вторичный воздух не может целиком устранить неравномерности работы решетки и несоответствия в питании воздухом с потребностью



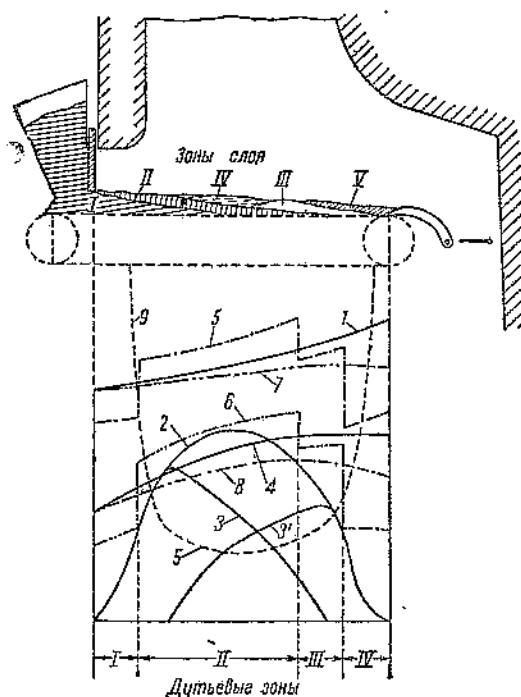
Фиг. 110. Схема работы цепной решетки.

в нем. Зонное же дутье уже при 4 зонах является средством, дающим практически вполне удовлетворительные результаты, еще более улучшающиеся при наличии шлакового подпора. Показанная на схемах картина распределения отдельных зон горения является, конечно, правильной лишь в основных чертах. При практическом осуществлении процесса горения эти схемы усложняются спекаемостью топлива, плавкостью золы и т. д., что влияет на горение слоя и его питание топливом и воздухом.

В цепных решетках воспламенение топлива начинается сверху вследствие действия лучистой теплоты факела и обмуровки из топочной камеры и постепенно распространяется вглубь слоя до самой поверхности решетки.

При сильном подогреве воздуха или наличии очагов горения розжиг топлива может происходить также и снизу. Такие очаги могут быть созданы при помощи колосников Бессерта или же окон и ступенек в предтопках и шахтах (фиг. 132). Колосники Бессерта (фиг. 112) применяются, главным образом, для сжигания на цепной решетке брикетов. На специальной колосниковой решетке КБ, находящейся под передним загрузочным ковшом и состоящей из изогнутых колосников, непрерывно поддерживается горение. Горящие частицы угля падают с этой решетки на переднюю часть цепи и образуют накалившую подушку под слоем свежего топлива. Воспламенение топлива, осуществляемое таким образом и снизу и сверху, идет значительно скорее. Этот же результат достигается в шахтно-цепных топках, в частности в топках Макарьева, устройством зажигательных окон на фронтальной стене шахты (фиг. 132).

Содержание влаги в топливе сильно сказывается на процессе воспламенения и горения в топках с цепными решетками, как и в других топках. Так, например, на цепных решетках без зонного дутья, подсушивающих шахт и подогрева воз-



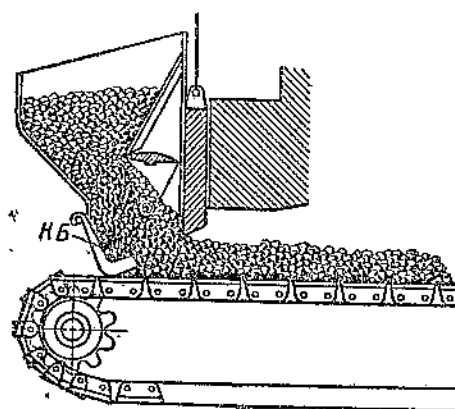
Фиг. 111. Изменение количества воздуха, подаваемого в топку с цепной решеткой, по пути топлива при наличии зонного дутья и шлакового подпора и без них.

Зоны слоя: I — свежего топлива; II — выделенная летучих; III — горения кокса; IV — восстановительных реакций; V — выжигания шлака.

Кривые, характеризующие питание слоя воздухом. Без зонного дутья и без шлакового подпора: 1 — количество воздуха, подаваемое в слой топлива; 2 — количество воздуха, необходимое для горения топлива; 3 — количество воздуха, необходимое для горения летучих горючих; 4 — количество воздуха, которое подается использованием в слое.

При наличии зонного дутья: 5 — количество воздуха, подаваемое в слой топлива; 6 — количество воздуха, которое подается использованием в слое.

При наличии шлакового подпора: 7 — количество воздуха, подаваемое в слой; 8 — количество воздуха, которое подается использованием в слое; 9 — кривая изменения коэффициента избытка воздуха по пути топлива.



Фиг. 112. Колосник Бессерта (КБ).

духа сжигание топлива, обладающего влажностью свыше 20%, уже вызывает затруднения. Эти трудности могут привести даже к затуханию решетки,

если воспламенение не наступит своевременно. При помощи специальных подсушивающих устройств, шахт, сводов и т. п. удается улучшить работу топки настолько, что предел влажности увеличивается до 55—60%. Воспламенение топлив затрудняется при малом содержании летучих (антрацит, тощий уголь), гладкой поверхности, больших размерах кусков, брикетах, крупных кусках антрацитов.

На цепной решетке поверхность, отделяющая уже воспламенившееся топливо от невоспламенившегося, может быть приближенно принята за плоскость. В тот момент, когда слой свежего топлива воспламеняется по всей высоте, соответствующее место этого слоя вследствие движения решетки продвигается на расстояние AD (фиг. 113) от начала зеркала горения, а плоскость воспламенения (фронт воспламенения) пересечет решетку по прямой, перпендикулярной к плоскости чертежа и проходящей через точку A . Наклон линии AE зависит от соотношения скорости движения решетки или слоя $w_{сл}$ и скорости воспламенения или розжига $w_{ог}$:

$$\operatorname{tg} \gamma_1 = \frac{w_{сл}}{w_{ог}}.$$

По углу γ и начальной высоте слоя легко находится точка A . Площадь AED представляет собой ту зону цепной решетки, которая частично занята для подготовки топлива. Наличие такой зоны на решетке уменьшает ее активную часть, увеличивает стоимость топочного устройства и при отсутствии зонного дутья ведет к увеличению α , так как воздух, проходящий через пассивную часть слоя AE , в горении участвует лишь частично. Этот воздух и полученные при большом α продукты горения, вступая в топочную камеру при пониженной температуре, охлаждают свод 2 и тем самым еще больше ухудшают процесс воспламенения. Пассивная часть решетки получается тем больше, чем выше влажность топлива, чем меньше выход летучих и чем крупнее его куски вообще, чем труднее оно воспламеняется; наконец, она тем больше, чем выше скорость решетки.

Увеличение выхода летучих горючих в топливе, сокращая пассивную часть AED слоя, улучшает процесс воспламенения. Выделение их начинается недалеко от места воспламенения. Летучие длиннопламенные топлива обычно содержат значительные количества паров высокомолекулярных углеводородов и сразу же воспламеняются, так как температура воспламенения этих паров $t_{ог} = 250—400^\circ \text{C}$. Антрациты, тощие и короткопламенные угли выделяют летучие, в состав которых входят, главным образом, H_2 , CH_4 , CO , имеющие более высокую температуру воспламенения $t_{ог} = 400—750^\circ \text{C}$.

Прогрев топлива в цепных решетках ускоряется излучением сводов, которым необходимо придать

правильную форму (фиг. 114). В прежние время эти своды часто выполнялись очень длинными и низкими. При правильном устройстве для лучшего излучения они должны быть достаточно открытыми в топочную камеру. Это достигается, когда $h_{св} = (0,2 \div 0,3) l_{св}$, когда свод имеет эллиптическую форму и когда он нагревает топливо обратным излучением или в конце свода имеется козырек (фиг. 115). Такие козырьки действуют хорошо, но при переходе на легче воспламеняющиеся топлива они подвергаются очень сильным повреждениям.

Устройство для рециркуляции топочных газов, ускоряющей воспламенение, показано на фиг. 116. Газы из топочной камеры 3 отбираются вентилятором непосредственно ушибера 1 через верхний сводик 2 и выбрасываются затем под колосниковую решетку. Над слоем свежего топлива устанавливается ток горячих газов, ускоряющий нагрев и воспламенение топлива. При этом передний сводик может иметь обычную для легко воспламеняющихся топлив форму. В связи с изменением влажности топлива или других его свойств, влияющих на его воспламеняемость, возможна регулировка количества засасываемых газов.

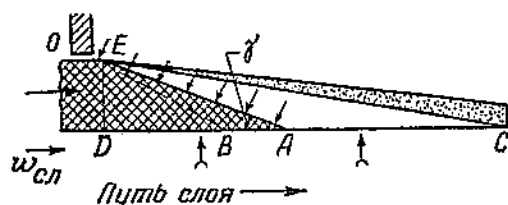
При описанном устройстве на цепной решетке удается сжигать угли с влажностью до 25%.

В настоящее время часто применяется конструкция короткого переднего сводика, подобная показанной на фиг. 114, но с другим соотношением размеров. Короткий сводик имеет малую длину $l_{св} = (0,1 \div 0,2) l_{реш}$ и большую высоту $h_{св}$ в задней части $h_{св} \approx l_{св}$ (фиг. 114). Этим путем значительно ускоряют прогрев свежее поступившего в топку угля за счет тепла пламени.

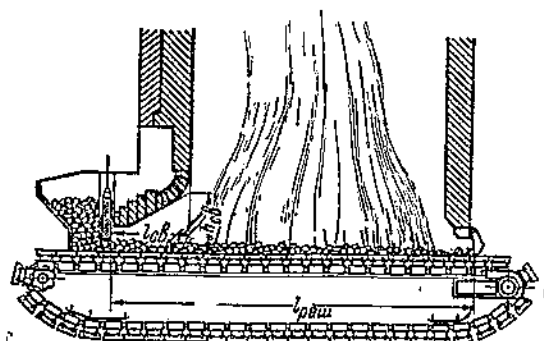
Применение коротких сводов наряду с высокими топочными камерами и с воздушным дутьем позволяет сжигать на цепных решетках тощие угли, антрацит и коксовую мелочь.

Длинные цепные решетки, особенно при сжигании антрацитов, снабжаются в конце коротким сводом, для которого $l_{св} = 0,15 l_{реш}$. В США для сжигания трудно воспламеняющихся антрацитов применяют топки с коротким передним сводом и длинным задним сводом для направления пламени к фронту или же сильно сужают горло, придавая значительные размеры и переднему и заднему сводам. Это устройство не только благоприятно влияет на процесс воспламенения, но вызывает также и хорошее перемешивание газов, что помогает их догоранию (фиг. 117). Удлинение переднего свода также несколько усиливает перемешивание газов.

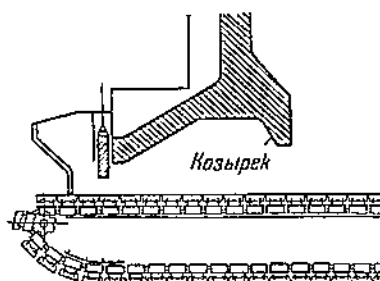
Опыт показал, что излучение тепла газами из большого объема открытой топки достаточно интенсивно, чтобы заменить своды. Однако в противоположность подтверждающей это немецкой практике в США придерживаются закрытых топок со значительно развитыми топочными сводами.



Фиг. 113. Схема выгорания и воспламенения топлива на цепной решетке.



Фиг. 114. Передний зажигательный свод топки с цепной решеткой.



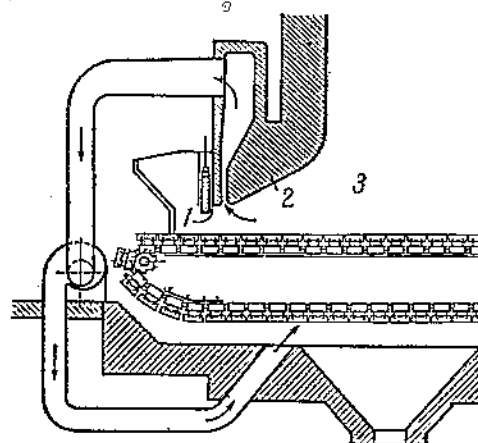
Фиг. 115. Передний свод с козырьком.

Работа топочных сводов не только сказывается на распределении тепла по слою, но влияет также и на процесс сжигания горючих газов в топочной камере.

С целью улучшения процесса воспламенения трудновоспламеняющихся, например, тощих углей, к ним примешивают иногда небольшое количество (до 25%) легко воспламеняющихся углей, для чего обычно устраивают две угольные воронки. Вспомогательное легко воспламеняющееся топливо подается поверх основного трудновоспламеняющегося.

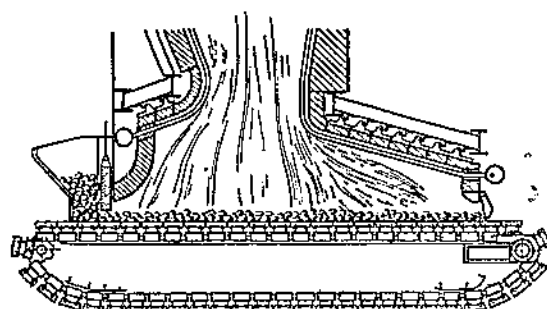
Работа цепной решетки хорошо иллюстрируется изменением состава газа по длине решетки.

Диаграмма фиг. 118 является характерной для работы цепной решетки вообще. Потребление кислорода сильно возрастает к средней части топки, где происходит горение летучих и кокса, к концу же решетки оно ничтожно. В середине топки имеется большой избыток горючих газов H_2 , CH_4 , CO при одновременном отсутствии

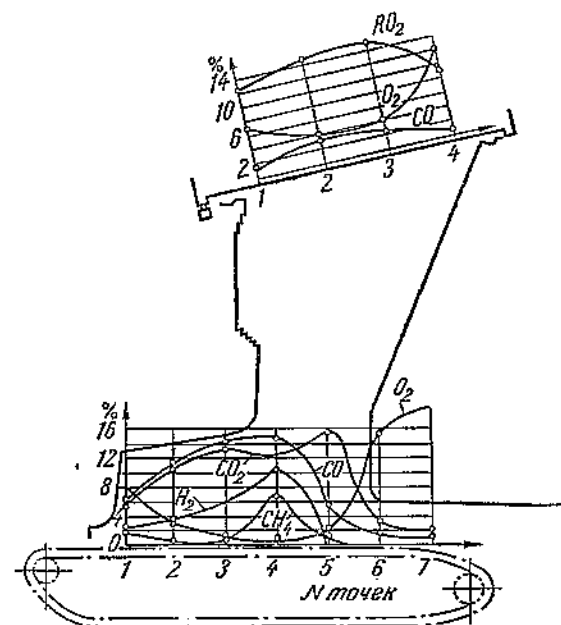


Фиг. 116. Применение рециркуляции топочных газов для ускорения процесса воспламенения в цепной решетке.

1—шибер; 2—верхний сводик; 3—топочная камера.



Фиг. 117. Антрацитовая цепная решетка с коротким передним и длинным задним сводами.



Фиг. 118. Состав газов над слоем топлива на цепной решетке и при входе в трубный пучок при сжигании челябинского угля.

в продуктах горения кислорода. Характерно протекание кривой CO_2 . На середине топки содержание CO_2 падает, кривая имеет вогнутость. Содержание CO_2 в зоне 4 минимально по сравнению с зонами 3 и 5. Такой характер протекания кривой CO_2 объясняется восстановительным процессом в середине топки.

В середине топки тепло топлива в самом слое используется не полностью. Значительное количество его должно выделяться при горении CO , H_2 , CH_4 в топочной камере. Повышение дутья в середине решетки не исправляет неравномерности использования воздуха слоем и не устраняет наличия над ним горючих газов и седлообразного протекания кривой CO_2 .

Максимальное выделение тепла по длине решетки имеет место при горении летучих в начале выгорания кокса. Сушка сопровождается поглощением тепла, а выжигание кокса — очень малым его выделением. Для достижения большей равномерности горения в слое и увеличения экономичности работы топки надо подводить количество воздуха, отвечающее условиям горения в различных зонах. Первым улучшением в распределении воздуха по решетке служит поэтому введение шлакового подпора. Шлаковый подпор повышает уровень топлива в конце решетки, увеличивает сопротивление слоя и улучшает использование воздуха. Значительно большее действие на работу цепных решеток оказывает введение зонного дутья, т. е. распределения воздуха по зонам топки с самостоятельным его регулированием для каждой из них. Но и при зонном дутье поступление горючих газов в камеру и неполное сгорание их имеют место вследствие трудности хорошего перемешивания с воздухом.

В тех же частях решетки, где выделяются из слоя летучие, невозможно покрыть потребность слоя и топочной камеры в воздухе без подачи в камеру вторичного воздуха.

Для полного горения газов необходимы следующие условия: достаточное количество воздуха и хорошее перемешивание его с горючими газами, достаточное время пребывания этих газов в камере и высокая температура. Обычно время пребывания газов в камере, достаточное для полного их сгорания, составляет 1—2 секунды.

Присутствие CO в конце топки вызывается, главным образом, неудовлетворительным перемешиванием горючих газов и воздуха; так, на диаграммах (фиг. 118) состав газов в конце топочной камеры отвечает составу их непосредственно у поверхности слоя. Перемешивание свежего воздуха с горючими газами может быть достигнуто при помощи диффузии, внутренней турбулентности потока и внешнего подвода воздуха, получившего название острого дутья.

Для равномерного смешивания газов путем диффузии требуется значительное время и большой объем топочной камеры. Более грубое перемешивание, но зато со значительно большими скоро-

стями возникает вследствие турбулентности потока. Над решеткой наблюдается неравномерность движения газов как по сечению ее, так и по времени. Это связано с непрерывным изменением структуры в каждой точке слоя, а особенно по длине решетки, и, как следствие, с изменением относительной скорости движения отдельных струй газа, что и приводит к внутренней турбулентности, определяющей перемешивание их.

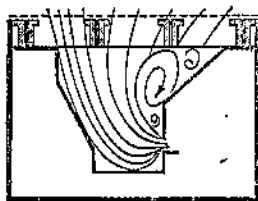
Перемешивание газов хорошо иллюстрируется на водяной модели. На фиг. 119 видны струи газа, исходящие из решетки. Как видно, размывание струй происходит за пучком труб котла и перемешивание идет неудовлетворительно. Для перемешивания струй газов в топке нужна значительная высота ее камеры. Улучшение перемешивания часто достигается особой формой обмуровки топки, имеющей сужение (фиг. 133). Наличие горла в топочной камере улучшает перемешивание газов, создавая над ним как бы особую камеру для дожигания горючих газов, генерируемых на поверхности решетки. Введение в камеру вторичного воздуха в виде тонких струй с большими скоростями (острое дутье) позволяет несколько исправить процесс горения горючих газов в камере. Острое дутье осуществляется по всей ширине передней, чаще же передней и задней стенок рядом круглых сопел, имеющих $d = 50-70$ мм и подающих воздух со скоростью $w_d = 60-70$ м/сек. Подача вторичного воздуха несколько исправляет неравномерность распределения воздуха в топочной камере и улучшает процесс горения горючих газов, уменьшая, таким образом, потерю от химического недожога топлива.

Интенсификация работы топочной камеры, т. е. повышение теплонапряжения топочного объема, связана с улучшением перемешивания горючих газов, получаемых в слое, с воздухом, подаваемым в топочную камеру. Перед техникой сжигания топлива лежит задача повышения интенсивности горения в слое. Задача эта не решается обычной конструкцией цепной решетки, но она может быть решена при ином подходе к созданию процесса горения. Использование принципов повышенных скоростей приводит к созданию так называемой скоростной топки, дающей возможность получить теплонапряжение поверхности решетки до $2 \cdot 10^6 - 4 \cdot 10^6$ ккал/м² час.

Нарушения работы цепной решетки возможны вследствие неправильного ввода воздуха в зону. На фиг. 120 показано направление воздушных потоков в зоне, установленной по методу моделирования. Несмотря на наличие уравнивающей камеры, в зоне имеются застойные вихри в углах, что нарушает даже на небольшом расстоянии равномерность подачи воздуха. Следовательно, правильная конфигурация уравнивающей камеры и правильный ввод воздуха играют огромную роль для надлежащего действия зонного дутья при цепной решетке (тем большую, чем шире решетка). Всегда следует уменьшать скорость воздуха при входе в зону, если можно придать входному сечению достаточно большие размеры. Из слоя топлива в топочное пространство уходят газы, нагретые до некоторой температуры за счет выделившегося в слое тепла, а также газы, способные еще гореть и обладающие, следовательно, еще невыделившейся тепловой энергией. На фиг. 121 представлены кривые распределения теплотворной способности газов, движущихся по топочной камере. Наиболее высокая теплотворная способность их равна 1000 ккал/м³ — эти газы находятся вблизи слоя топлива. Благодаря большой высоте топочной камеры к концу ее достигнуто почти полное выгорание газов.

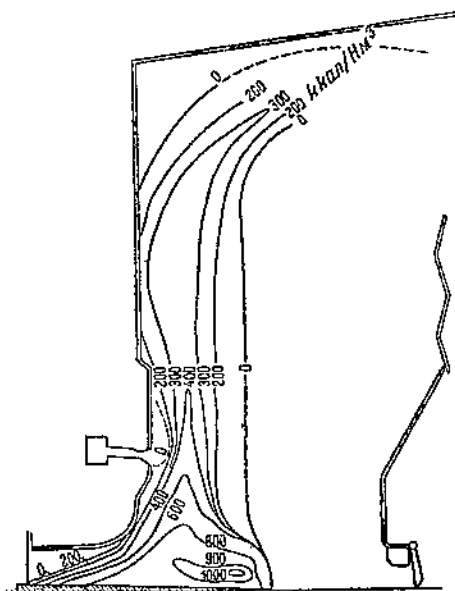


Фиг. 119. Направление струй газов над колосниковой решеткой.



Фиг. 120. Направление потоков воздуха и газов в зоне цепной решетки, установленное по методу моделирования.

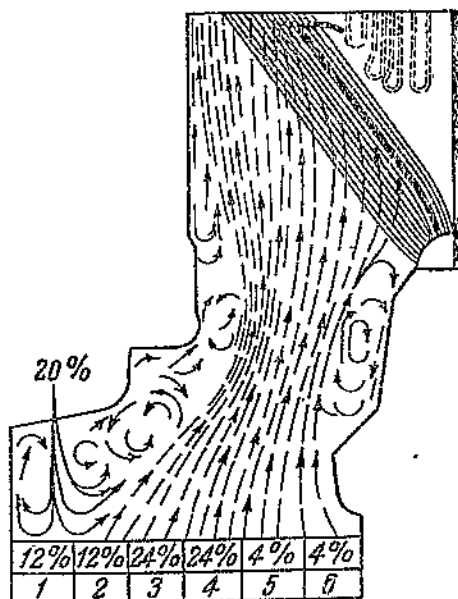
Фиг. 121. Кривая распределения теплотворной способности газов в топочной камере при недостаточном подводе вторичного воздуха и отсутствии дутьевых зон.



Однако диаграмма фиг. 121 показывает, что смешение газов в топочной камере идет неудовлетворительно. Это объясняется тем, что примерно в середине решетки происходят восстановительные процессы. По краям слоя, а особенно в конце решетки, имеются продукты полного горения и большой избыток воздуха. Чтобы работа топочной камеры была правильной, эти раздельные потоки горючих газов и воздуха должны быть искусственно перемешаны недалеко от начала их пути по топочной камере. Часто этого можно достигнуть устройством соответствующего сужения, разделяющего топочный объем на камеру смешения и камеру дожига. Введение вторичного воздуха при правильной конфигурации топочной камеры и правильном выборе места его ввода также может дать хорошие результаты. Наилучшим местом ввода вторичного воздуха является горловина или стены поблизости от нее. Скорость ввода вторичного воздуха должна быть достаточной для сплошного перемешивания. Иногда при квадратном сечении камеры у места ввода вторичного воздуха его вводят тангенциально. На фиг. 122 показано движение струй газов при неправильной конфигурации топочной камеры, не имеющей горловины, и неправильном вводе вторичного воздуха, вызывающего местные вихри и могущего повести к пережогу переднего свода из-за усиления горения над ним вследствие ввода сюда вторичного воздуха.

Цепная решетка является одной из наиболее распространенных конструкций механических топок. Она может быть приспособлена для сжигания разнообразных топлив.

Труднее всего на ней используются несортированные неспекающиеся угли с большим содержанием мелочи. Отсевы тощих углей, антрацитовые штыбы сжигаются на этой решетке неэкономично. Сильно спекающиеся угли благодаря отсутствию шуровки также сжигаются на ней недостаточно хорошо. Сильно спекающийся слой может повести к местным прогарам; получается кратерное горение и требуется шуровка слоя, что при широких решетках затруднительно. При сжигании антрацитов наилучшие результаты получаются при сортированном антраците с раз-



Фиг. 122. Неправильное движение газов в топочной камере.

мером зерен 10—50 мм. Наиболее пригодны для сжигания на цепной решетке сортированные слабо спекающиеся газовые угли.

В табл. 47 (стр. 190) даны величины средних допускаемых видимых тепловых напряжений зеркала горения и топочного объема для различных топлив, а также другие показатели работы цепных топок. Эти данные получены из наблюдений над работой действующих цепных решеток.

Для цепных решеток характерным является наличие химического недожога q_3 . Величина эта зависит от сорта топлива и прежде всего от содержания летучих в нем, а также от действи-

тельного теплового напряжения объема. При увеличении форсировки топки время пребывания газов в камере уменьшается и процесс горения не успевает полностью закончиться, в результате чего q_3 увеличивается. Борьба с химическим недожогом должна вестись в основном правильным регулированием подачи воздуха. Уменьшить q_3 возможно установкой специальных смешивающих газы сводов и острого дутья.

Потери со шлаком, потери в провал и потери с уносом зависят от теплового напряжения решетки и зольности топлива (табл. 47). При повышенных скоростях решетки время пребывания топлива в топке уменьшается и недожог увеличивается. При прочих равных условиях с увеличением содержания золы в топливе уве-

личивается и $q_4^{ш.л.}$. Значительное уменьшение недожога может быть получено при снабжении решетки шлаковыми подпорами, удлиняющими время пребывания шлаков на решетке, или дожигательными шахтами.

Потеря со шлаком для спекающихся углей на цепной решетке со шлакоснимателем при $\frac{Q}{R} = (1200 + 1300) \cdot 10^3$ ккал/м² час может быть оценена по выражению:

$$q_4^{ш.л.} = 0,2 A_c \%$$

что для углей марки Г в среднем дает $q_4^{ш.л.} = 2 - 4\%$. Для торфа q_4 составляет 0,2—0,5%.

Потеря с уносом $q_4^{ун.}$ зависит от зернистости

Таблица 46
Тепловая работа ручных и полумеханических топок на различных топливах
(по данным Татищева, ВТИ)

Показатели работы топки	Обозначение	Размерность	Ручные топки										Полумеханические топки	
			Дрова	Торф (хусковей)	Бурый уголь			Каменный уголь		Антрацит			Дрова	Торф
					рабочей	мелкий типа подмосковного АС	сортированный тип на подмосковного К	песляющийся типа Д	спекающийся типа Г	АП и АК	АС и АМ	АРИ		
Нормальное видимое тепловое напряжение решетки	Q/R	тысяч ккал/м ² час	1100 1500	900 1200	850 1000	650 700	900 1000	850 1000	900 1100	900 1100	850 900	700 800	1100 1500	900 1200
Потери со шлаком	$q_4^{ш.л.}$	%	—	1	0,2 A _c —0,5	—	—	0,2 A _c —0,5					—	—
Потеря с провалом	$q_4^{пр.}$	%	—	0,5	0,5	—	—	0,5	0,5	0,5	0,5	1,5	—	—
Потеря с уносом	$q_4^{ун.}$	%	—	0,5	2—3,5	—	—	3	1,5	4	5	6	—	—
Полная потеря	q_4	%	1,5	2	(2+3,5)+0,2 A _c	7	5	3,0+0,2 A _c	1,5+0,2 A _c	4+0,2 A _c	5+0,2 A _c	7+0,2 A _c	0,5—2	2—4
Потеря от химической неполноты сгорания	q_3	%	2—3	2—3	2—3	3—4	3	3—7	3—7	2—3	2—3	2—3	2—3	2—3
Коэффициент избытка воздуха в конце топки	α_m	—	1,25 1,30	1,25 1,30	1,30	1,3 1,4	1,3	1,35 1,4	1,35 1,4	1,3	1,3	1,35 1,40	1,25	1,30
Нормальное видимое тепловое напряжение топочной камеры	Q/V	тысяч ккал/м ³ час	300 350	300	275	250	275	250 275	250 275	300	300	275	350 350	300
Допускаемая температура дутья при нормальной нагрузке	t_d	°C	25 150	25 150	25 150	25 150	25 150	25	25	25	25	25	25 150	25 150
Давление дутья под решеткой при перегрузке	s_d	мм вод. ст.	15	30	50	60—80	60—80	60—80	60—80	80			15	20
Необходимое разрежение в топке	s_m	мм вод. ст.	3—4	3—4	3—4	3—4	3—4	4—6	4—6	2—3	2—3	2—3	5—6	5—6

топлива и от его спекаемости. Для мелкозернистых и неспекающихся топлив процент уноса может достигать очень значительной величины, особенно при больших нагрузках.

Потеря с провалом $q_{\text{п}}^{\text{пр}}$ определяется в основном конструкцией решетки и колосников и может быть доведена до незначительной величины в пределах 0,5%.⁰

Потеря топливом в окружающую среду невелика и составляет на каждый квадратный метр наружной поверхности кладки топки 400—500 ккал/час.

Площадь решетки определяется по формуле:

$$R = bl \text{ м}^2,$$

где b — ширина решетки;

l — расстояние между осями звездочек.

Часто за длину l принимают расстояние от топливного шибера до шлакоснимателя. Нормально решетки выполняются шириной до 6 м, причем до 2 м — с простыми сводами, а свыше 2 м — с подвесными. Длина решетки нормально доходит до 7—8 м, так что площадь одной решетки составляет около 40—45 м².

На хороших углях напряжение цепной решетки может быть доведено до $1,5 \cdot 10^6$ ккал/м² час, что соответствует ее теплопроизводительности $Q \approx 60 \cdot 10^6$ ккал/час. Для котла, дающего $D = 140—150$ т/час пара, необходимы две таких цепных решетки.

Теплопроизводительность цепной решетки на 1 пог. м ширины топки составляет около $8,5 \cdot 10^6$ ккал/м час. При сжигании низкосортных углей $\frac{Q}{R}$ снижается и Q уменьшается иногда вдвое.

На торфе теплонапряжение цепной решетки $\frac{Q}{R}$ может быть доведено до $2,5 \cdot 10^6$ ккал/м² час и ею можно обслуживать агрегат, дающий до 200 т/час пара.

Иногда ширина цепной решетки доходит до 7,5 м. При этом площадь двух решеток на один котел достигает величины 100—105 м². Есть попытки построить решетку, имеющую ту же площадь в одном агрегате.

45. Регулирование работы цепных решеток. Конструктивные детали их

Производительность цепной решетки определяется количеством подаваемого на нее топлива и дутьевого воздуха. Количество топлива зависит от скорости движения решетки и от высоты слоя. В связи с этим регулирование топки с цепной решеткой заключается в изменении подачи воздуха, скорости движения решетки, которую можно доводить до 20—25 м/час, и толщины слоя топлива.

Цепная решетка с позонным воздушным дутьем хорошо регулируется и дает возможность быстрого сброса и подъема нагрузки. Наблюдения показали, что при горячем резерве максимальную нагрузку на котле можно получить в течение 1—2 минут и также быстро можно ее сбросить. Такой быстрый подъем нагрузки осуществляется в основном за счет изменения коли-

чества подаваемого воздуха. В этом отношении топки с зонным дутьем почти равноценны камерным топкам.

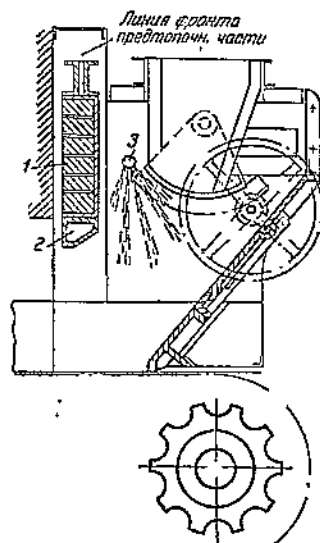
Регулирование скорости движения решетки большей частью производится при помощи коробки скоростей, включаемой между мотором и передним ведущим валом, а также изменением числа оборотов самого мотора. В последнее время применяются также механические передачи с плавным регулированием.

Применение того или другого метода регулирования зависит от местных условий и особенностей работы решетки. Увеличение скорости движения решетки отодвигает зону горения кокса к концу решетки и дает возможность покрыть заднюю часть решетки горящим слоем. Увеличение толщины слоя при определенной длине решетки ведет к удлинению зоны подготовки топлива на решетке и смещению зоны горения кокса к задней части решетки. Без дополнительного изменения дутья и то и другое может повести к повышению недожога в шлаках. Поэтому, исходя из условий работы котельного агрегата, при регулировании работы решетки необходимо пользоваться всеми тремя методами, добиваясь наиболее экономного использования топлива. Изменение количества подаваемого воздуха очень сильно отражается на форсировке слоя, поэтому при быстрых поднятиях или сбросах нагрузки прежде всего необходимо воздействовать на дутье под решетку.

Толщина слоя определяется качеством топлива. При легко воспламеняющихся и богатых летучими топливами желательна большая скорость подачи топлива и невысокий слой его. Это обеспечивает меньшую неравномерность слоя и состава газов по пути топлива и устраняет необходимость шуровки.

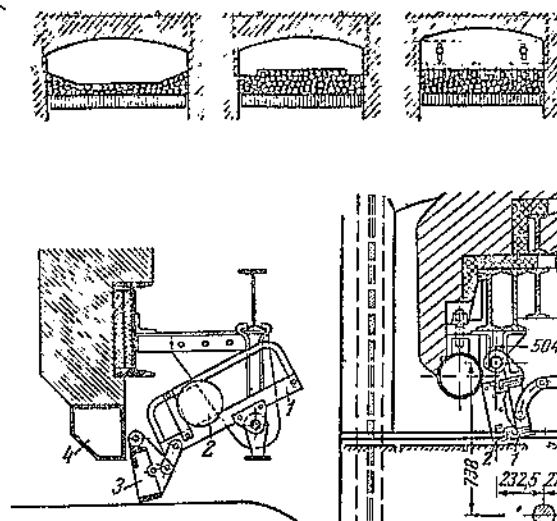
Толщина слоя топлива на цепных решетках устанавливается поднятием и опусканием топливного шибера I , являющегося регулятором слоя (фиг. 123). Толщина слоя определяется положением нижнего края регулирующего шибера по отношению к полотну решетки. Загрузка решетки топливом благодаря указанному обстоятельству чрезвычайно облегчается. В целях защиты регулятора от прогорания нижняя часть его снабжается балкой, охлаждаемой водой. Вода в балку подается через гибкий шланг. Слою топлива по ширине решетки можно придать любое очертание, обеспечивающее правильное распределение воздуха. Для этой цели к нижнему краю регулировочного шибера привинчивают листовое железо желаемого профиля (фиг. 124, 125, 126). Применяют также разрезной регулятор, каждая часть которого управляется самостоятельно.

Механическое удаление шлака из топки с цепной решеткой осуществляется шлакоснимателем или шлаковым подпором. Шлаковые подпоры в работе лучше шлакоснимателей. Фиг. 127 показывает шлаковый подпор Штейнмюллера. Он состоит из отдельных качающихся секций, автоматически дающих выход скапливающемуся перед ними шлаку. Секции выполнены в виде балансирных рамок I с перекатывающимися грузами 2 и колосниками 3 большого живого сечения. Подпор предохраняется от действия высоких температур охлаждаемой водой балкой 4 . За счет воздуха, проникающего через секции подпора, идет дожигание шлака и охлаждение колосников. В случае необходимости кочегар может поднять шлаковый подпор для спуска шлака. Обычно, когда давление шлака преодолевает вес груза, рамка поворачивается и груз перекатывается на противоположный конец рамки, закрепляя ее на момент прохода шлака в этом положении. После того как шлак сошел с решетки, вес рамки возвращает груз в первоначальное положение. В практике эксплуатации торфяных топок Шатурской ГРЭС подпор фирмы Штейнмюллера работал недостаточно хорошо. Основным его недостатком является недолговечность колосников. Лучшее работает подпор бимсового типа (фиг. 128). Подпор состоит из бимсов I с наборными колосниками 2 . Системой рычагов 3 создается соответствующее давле-



Фиг. 123. Загрузочный ко-
роб с регулятором слоя для
угольных цепных решеток

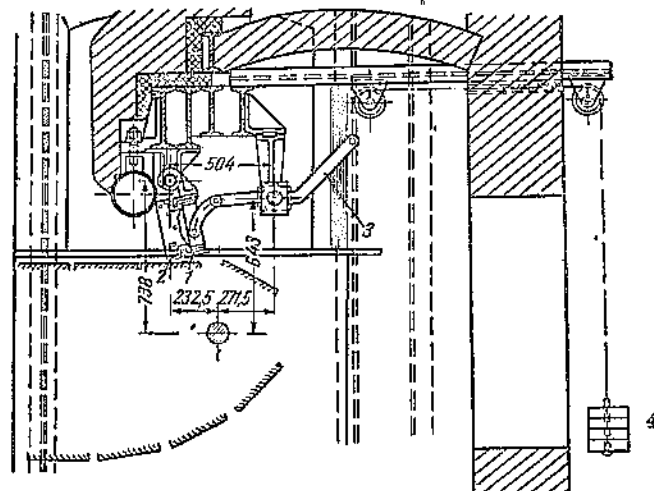
1—топочный шибер; 2—охлажда-
емая водой балка; 3—труба для
подвода воды.



Фиг. 124, 125, 126. Различные
формы сечения слоя топлива
на цепной решетке.

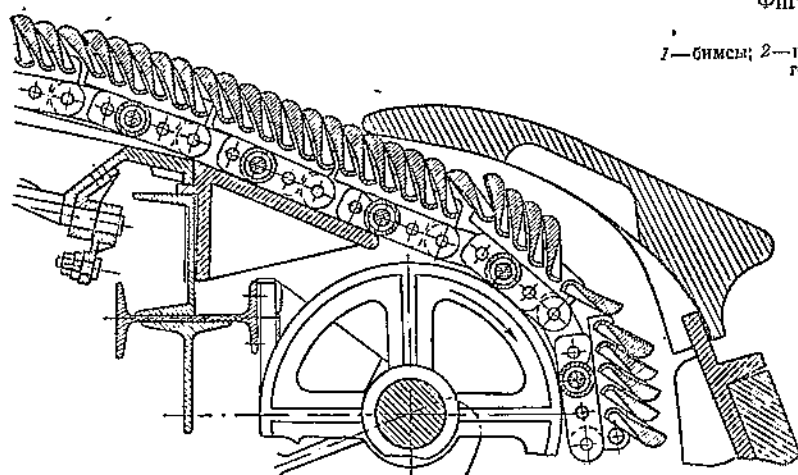
Фиг. 127. Шлаковый подпор
Штейнмюллера с охлаждае-
мой водой балкой.

1—балансирующая рамка; 2—пере-
гатывающий груз; 3—подпорный
колонник; 4—охлаждаемая балка.



Фиг. 128. Бимсовый шлаковый подпор
(Шатурская ГРЭС).

1—бимсы; 2—наборные вертикальные колонники; 3—система рыча-
гов; 4—груз для натягивания рычагов.



Фиг. 129. Шлакосниматель беспровальной решетки.

ние от грузов и регулируется высота шлакового
слоя.

На фиг. 129 показан шлакосниматель беспровальной
решетки. Шлакосниматель подрезает шлак на решетке
и сбрасывает его в шлаковый бункер.

На цепной решетке слой топлива неподвижен отно-
сительно колосниковой полотна, поэтому при сжига-
нии на ней зольных или сильно шлакующих топлив
желательна шуровка слоя. При решетках небольшой
ширины приходится прибегать к ручной шуровке через
специальные боковые отверстия в кладке топки. При
топках с большой шириной полотна это практически
невозможно и для шуровки применяются специальные
конструкции, например, шуровочная труба, охлаждаемая
водой. Труба при помощи рукоятки может быть опу-
щена почти до поверхности решетки либо несколько
поднята над слоем. Для шуровки слоя труба опускается
на поверхность решетки, набегающий на нее слой
топлива ломается, переходя через трубу, и более равно-
мерно заполняет решетку.

ного дутья в виде так называемого острого дутья.
В подобных случаях воздух подводится над слоем
через ряд сопел с большой начальной скоростью, до-
ходящей до 60—70 м/сек. Вентильатор острого дутья
должен давать напор 300—350 мм вод. ст. Количество
вторичного воздуха зависит от конфигурации топочной
камеры и составляет обычно 5—10% от всего воз-
духа, необходимого для сгорания. Вторичный воздух
должен пронизывать объем топки, энергично переме-
шиваясь с горючими газами. В топках фиг. 130, 131
острое дутье вводится через ряд круглых сопел,
установленных в передней стенке. Во избежание
шлакования, а также в целях повышения мощности
котла, стены камеры экранятся.

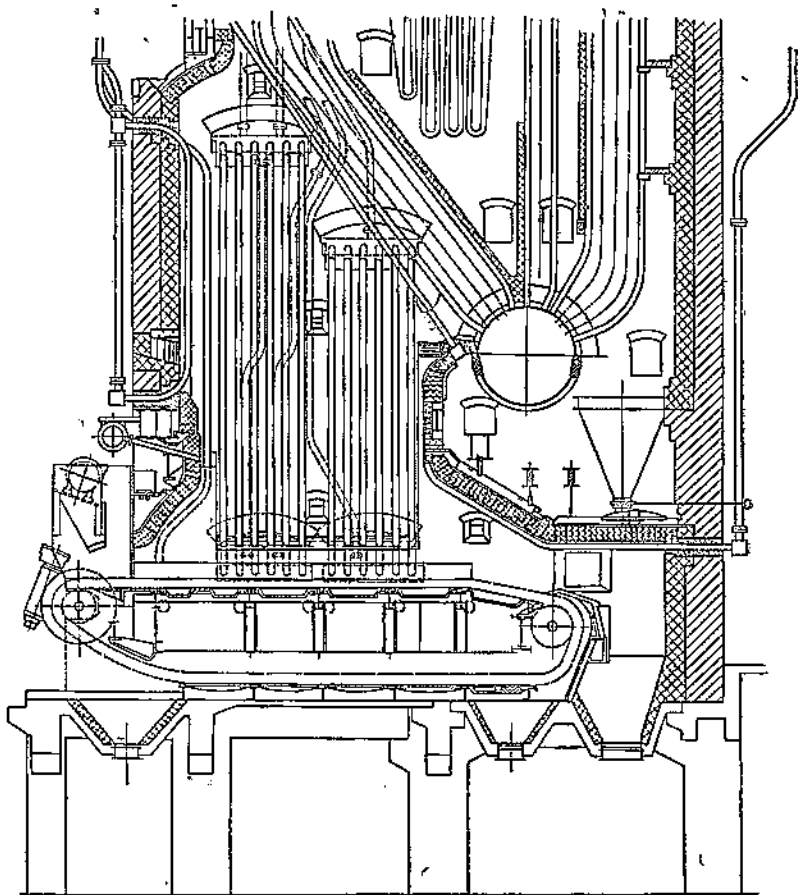
Для влажных бурых углей полное открытие ре-
шетки нецелесообразно, так как при этом несколько
затрудняется процесс зажигания топлива. На фиг. 131
показана обмуровка одной из топок Челябинской ГРЭС,
работающей на челябинских бурых углях. Она имеет
передний сравнительно высокий свод 2, открытый

конец решетки, экранированные стены камеры. Острое дутье *1* установлено как со стороны передней, так и задней стенки. Количество вторичного воздуха составляет $4 \div 6\%$ от первичного. Для лучшей работы острого дутья вторичный воздух желательно подавать горячим ($200-250^\circ$).

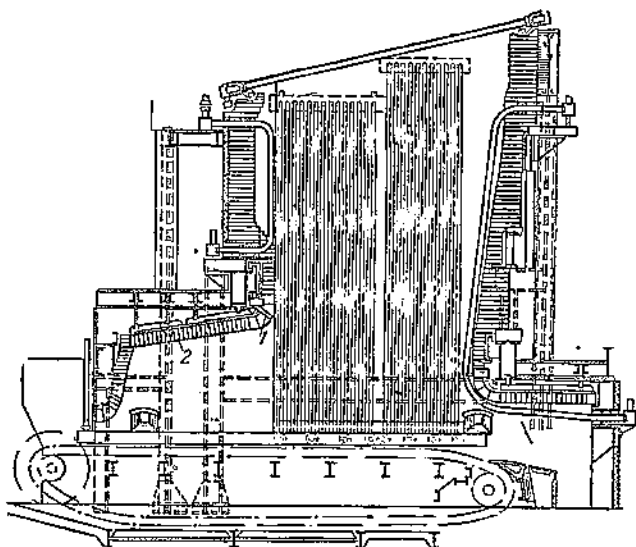
Для влажных бурых углей ($W_p > 20$) желательна установка подсушивающей шахты, так как подсушка такого топлива на решетке сильно снижает производительность установки. Действительно, в одном случае сжигание сортированного подмосковного угля в шахтно-цепной топке благодаря предварительной подсушке угля в шахте дало возможность получить напряжение решетки, достигающее до $1800 \cdot 10^3 \text{ ккал/м}^2 \text{ час}$. Наличие мелочи ухудшает процесс сушки, увеличивая сопротивление слоя топлива, и горение получается недостаточно экономичным.

Сжигание кускового торфа, при своей основной ему большой влажности, требует для подсушки обязательного устройства подсушивающих шахт. На фиг. 132 показана типичная обмуровка шахтно-цепной топки системы Макарьева для сжигания кускового торфа. Сравнительно высокая шахта снабжена рядом промежуточных ступенчатых перекрытий, представляющих собой пустотелые балки *a*, укрепленные на каркасе в топке. Балки охлаждаются водой и облицованы фасонным огнеупорным кирпичом. Подсушка топлива в подобной шахте происходит за счет очагов горения, образующихся на промежуточных перекрытиях. Передние балки усилены профильным железом, поддерживающим огнеупорный кирпич. Предтопок изолирован от притока наружного воздуха фронтовым ограждением, через которое производится шуровка и очистка очагов горения. Пространство между фронтовым ограждением и ступенями предтопка разделено подвижными заслонками *f* на три зоны, в которые через окна *e* поступает горячий воздух. Заслонки *f* служат для спуска из очагов горения золы и шлака, выгребаемых через люки на фронте. Для отделения шахты от топливного бункера она снабжается специальным затвором в виде железного листа, поставленного под большим углом к горизонту. Лист передвигается с помощью реечной конструкции. Во избежание попадания газов в бункер в случае опускания топлива ниже уровня шахты последняя в верхней части иногда снабжается качающимся затвором с противовесом, который автоматически закрывает шахту в случае понижения топлива ниже определенного уровня в шахте. Этим предотвращается проникновение пламени из шахты в бункер. Качающийся затвор открывается под влиянием веса топлива и пропускает топливо в шахту.

Нижняя балка, висящая на тягах, играет роль регулятора слоя топлива. Для перемещения ее в вертикальном направлении в кладке предусмотрена щель, которая после установки балки в нужном положении закладывается кирпичом. Изменение толщины слоя во время работы когда невозможно и производится периодически в зависимости от влажности торфа. Для лучшего использования длины решетки шахту необходимо устанавливать возможно ближе к передней звездочке. Боковые стенки топки и задний свод над решеткой экранированы, экранируется также и передняя стенка топки. Желательно применение острого дутья,



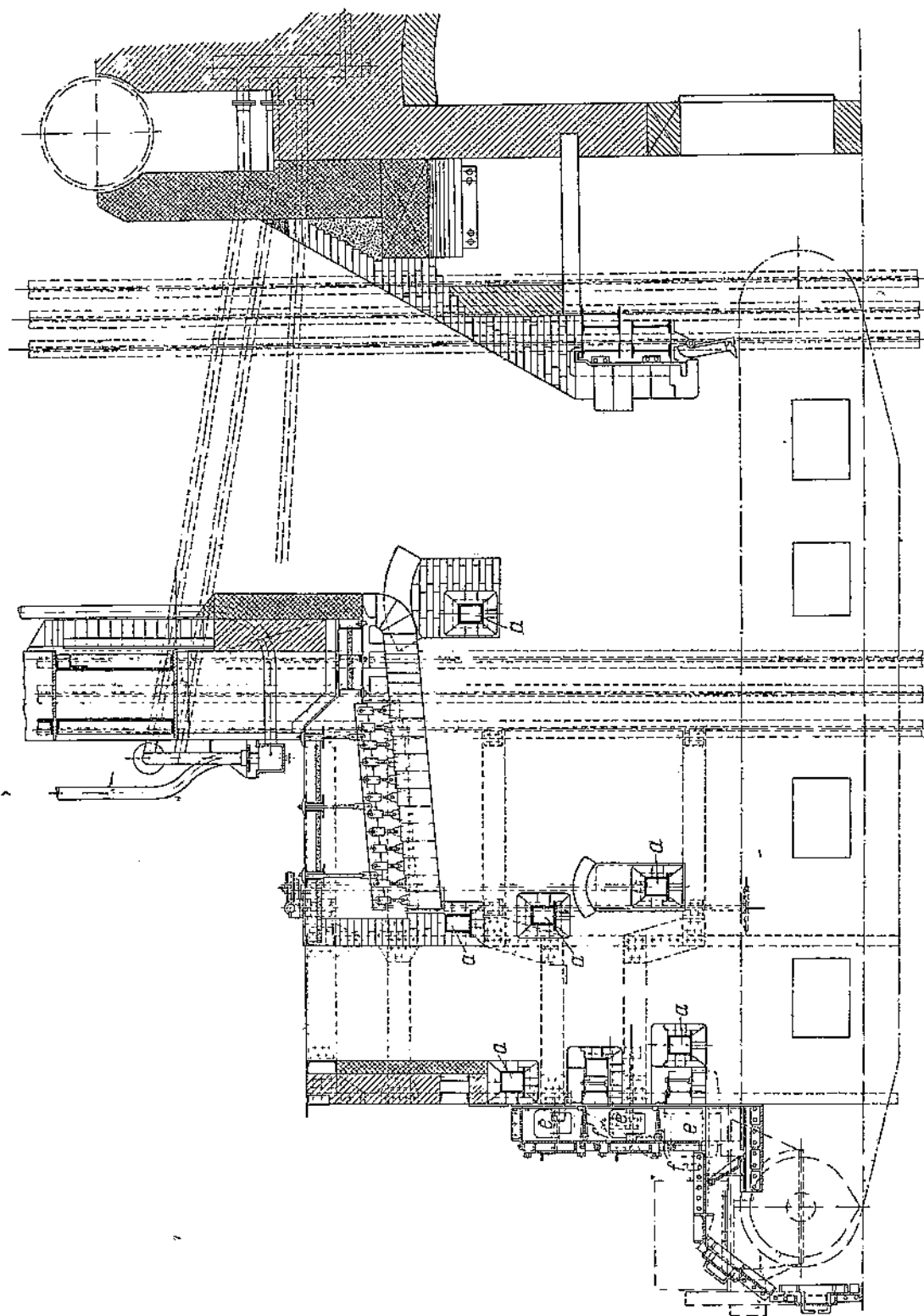
Фиг. 130. Экранированная широко открытая топка с цепной решеткой для длиннопламенных углей и солами острого дутья (над передним сводом).



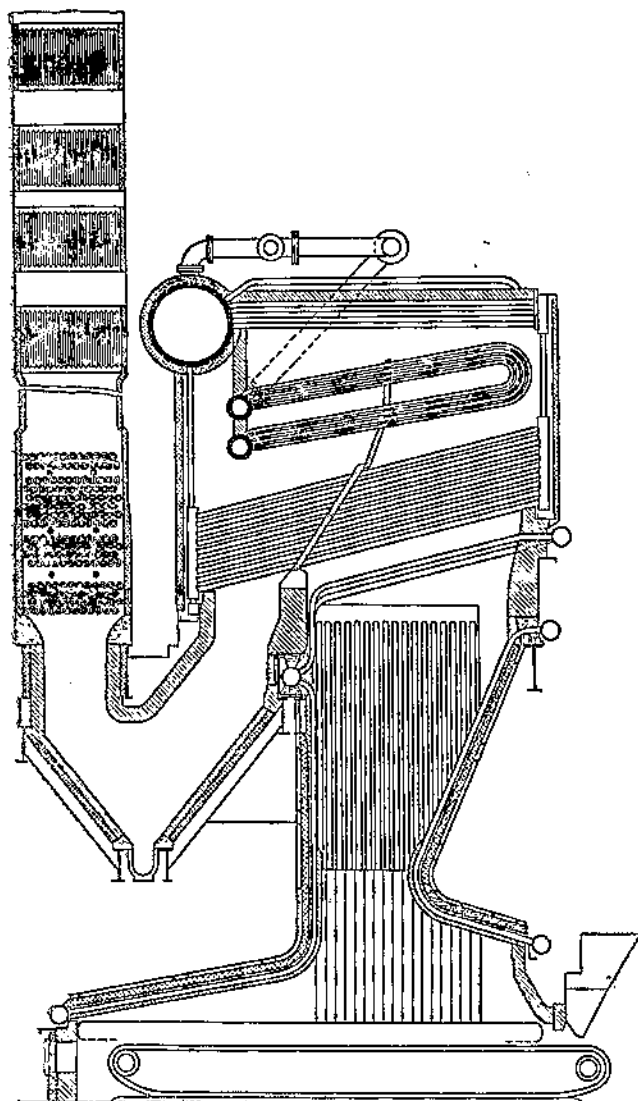
Фиг. 131. Обмуровка топки при сжигании на цепной решетке челябинского угля.

1—сопла острого дутья; 2—передний свод.

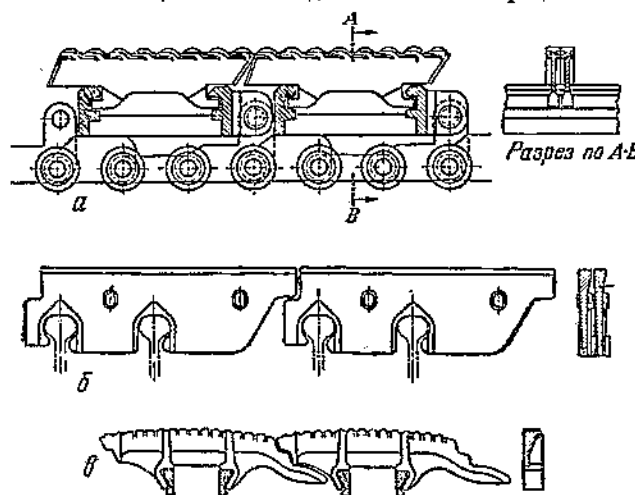
особенно необходимо острое дутье при совместном сжигании кускового и фрезерного торфа. При горячем позонном дутье теплонатяжение решетки для кускового



Фиг. 132. Шахтно-цепная топка системы Макарьева для кускового торфа.



Фиг. 133. Цепная топка для сжигания антрацита.



Фиг. 134. Различные конструкции крепления колосников цепной решетки.

торфа может достигнуть $(2000 \div 2500) \cdot 10^3 \text{ ккал/м}^2 \text{ час}$. Для больших котлов своды тонки выполняются подвесными.

При совместном сжигании кускового и фрезерного торфа последний в количестве до 25% подается через щель в верхнем перекрывающем своде и сгорает во взвешенном состоянии. При сжигании антрацита для облегчения воспламенения применяются длинные зажигательные своды (фиг. 133). Стены толки покрываются футерованными в нижней части вырванными поверхностями.

На фиг. 134 показаны колосники различной конструкции. Благодаря большой высоте колосников степень охлаждения доходит до 20%, почему колосники не перегреваются. При цепных решетках с бимсами смена колосника может производиться даже на ходу путем сбивания поврежденных колосников, уплотнения ряда и насадки новых, со снятием краевого, или закового колосника. В прежних конструкциях, в которых колосники образовывали цепь, этого сделать было нельзя.

Чтобы избежать прорыва воздуха между краями решетки и неподвижными стенками, решетки снабжаются особыми уплотняющими приспособлениями (фиг. 135). Во избежание прилипания шлака к боковым стенкам нарушения работы слоя, в стенках топки над решеткой устанавливаются панели, охлаждаемые водой. Вода для охлаждения панелей включается в циркуляцию котла.

Для сжигания мелочи во избежание провала под решетку применяют беспровальные полотна, получившие широкое распространение (фиг. 136); провал на подобных решетках снижается до минимума.

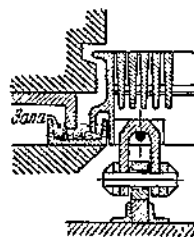
Для той же цели служат откидные колосники, показанные на фиг. 137.

На фиг. 138 показана чешуйчатая решетка, состоящая из ряда цепей с откидными колосниками. Кроме предохранения от провала конструкция по фиг. 138 имеет также и то преимущество, что колосники, откидываясь при обратном ходе, автоматически очищаются от шлака. Часто устанавливается еще особое очистительное приспособление (фиг. 144) у перелома решетки при возвратном ходе.

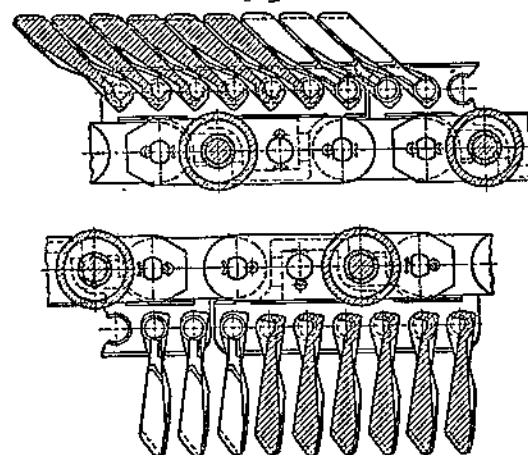
Ценным улучшением конструкции цепных решеток является зонное дутье, при котором подвод предварительно подогретого воздуха осуществляется через воздушные камеры (зоны), помещенные между верхней и нижней частями цепи. Воздух подводится в зоны большей частью с боков, причем количество подводимого воздуха регулируется заслонками.

Для очистки воздушных каналов под решеткой от провала и золы применяются золосовые щетки или поворачивающиеся заслонки. Содержание в газах CO_2 получается на 2—3% больше, чем при решетках без зонного дутья.

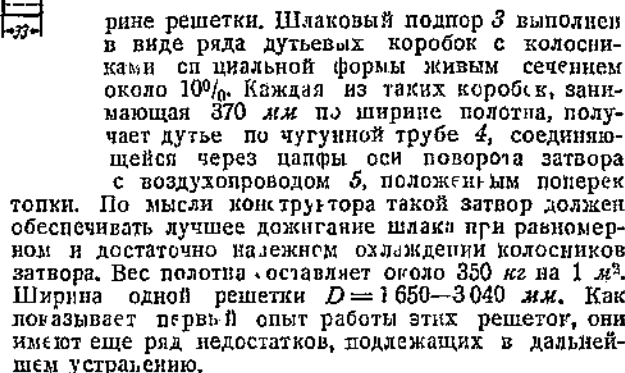
На фиг. 139—141 показана решетка с зонным дутьем для сжигания угля. Рама решетки 1 сварная. Цепь между осями звездочек 2 и 3 имеет длину 5500, 6500 и 7900 мм при четырех-пяти зонах для дутья. Первая и последняя зоны короче средних. Ширина решетки доходит до 6000 мм. Шлаковый подпор 4 подвесной. Воздух к решетке подводится по каналу 5. Температура подогретого воздуха для влажных топлив допускается до 300°С. Расход охлаждающей воды в боковых панелях 6 ориентировочно составляет для шахтно-цепной топki около 2 т/час при нормальной нагрузке. Для угольной топki такого же котла количество охлаждающей воды может быть принято около 8—10 т/час. Решетка приводится в движение передним валом 2. Через редуктор 7 осуществляется регулирование скорости решетки в зависимости от нагрузки



Фиг. 135. Боковое уплотнение полотна решетки Ганномаг.

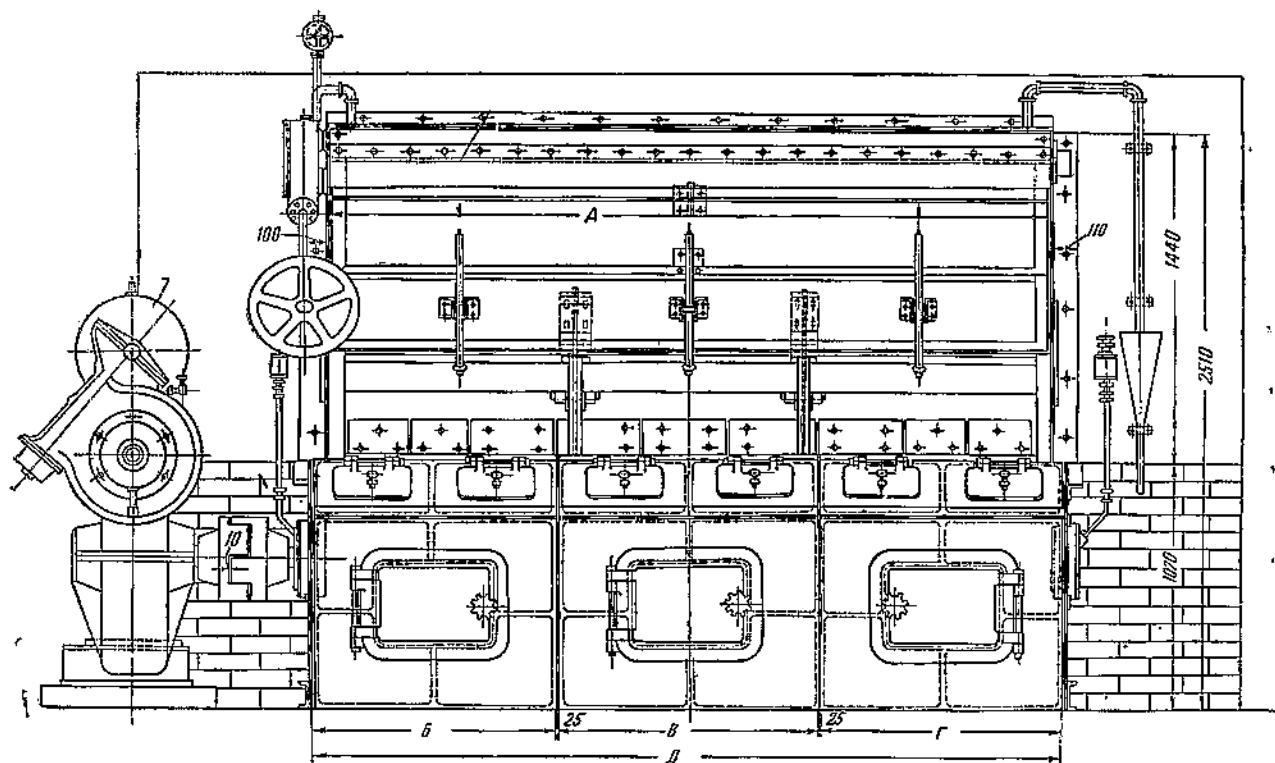


Фиг. 138. Чешуйчатая решетка (стрелки показывают направление движения).



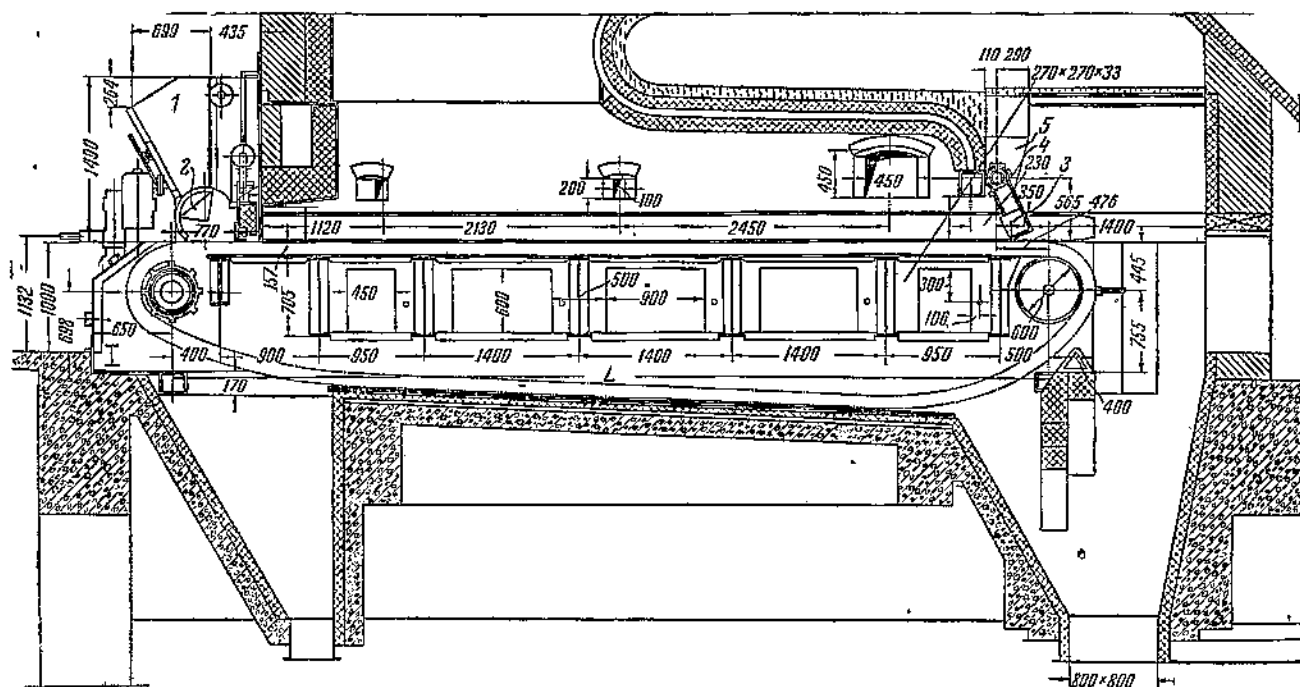
топки. По мысли конструктора такой затвор должен обеспечивать лучшее дожигание шлака при равномерном и достаточно наклонном охлаждении колосниковых затвора. Вес полотна, оставляет около 350 кг на 1 м². Ширина одной решетки $D = 1650 - 3040$ мм. Как показывает первый опыт работы этих решеток, они имеют еще ряд недостатков, подлежащих в дальнейшем устранению.

Цепная беспрозвальная решетка (ЦБР) сделана 1938 г. состоит из 10 цепей с беспрозвальными колесиками и. Ходовая часть решетки показана на фиг. 142 и 143. Подача топлива осуществляется из загрузочной воронки 1 с секторным затвором 2. Грн ширине решетки выше 3 000 мм уголь подается качающимся рукавом, равномерно распределяющим куски и мелочь по ши-



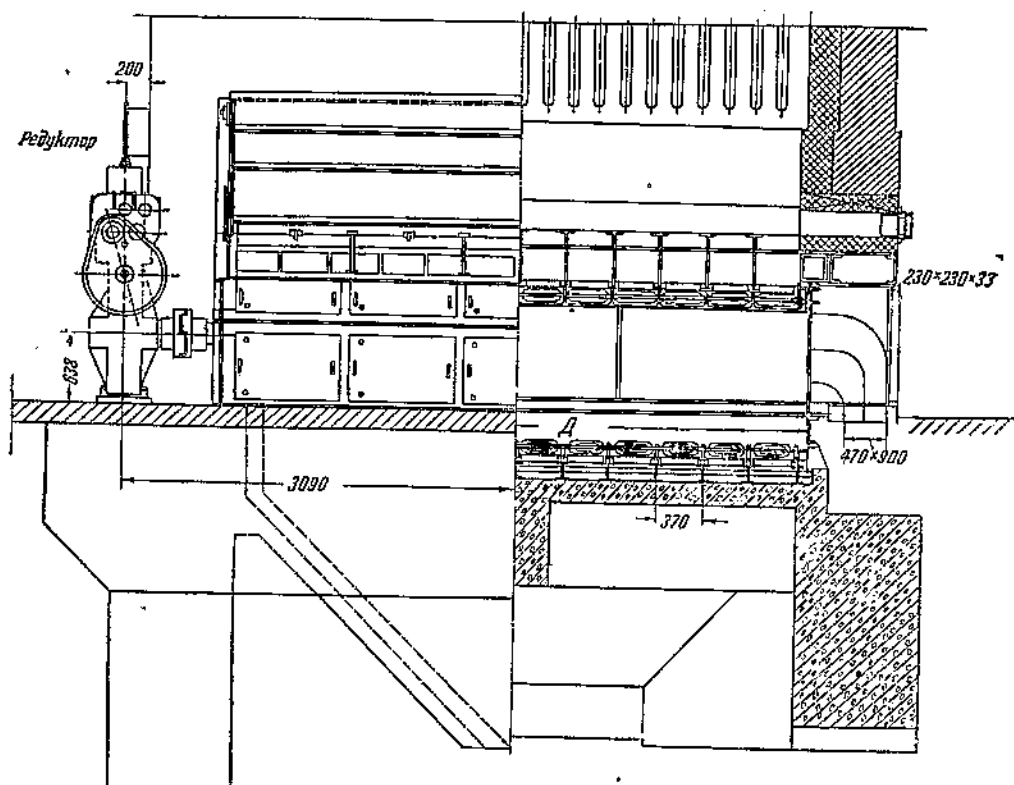
Фиг. 141. Цепная решетка с зонным дутьем для сжигания угля. Вид спереди.

7—редуктор.

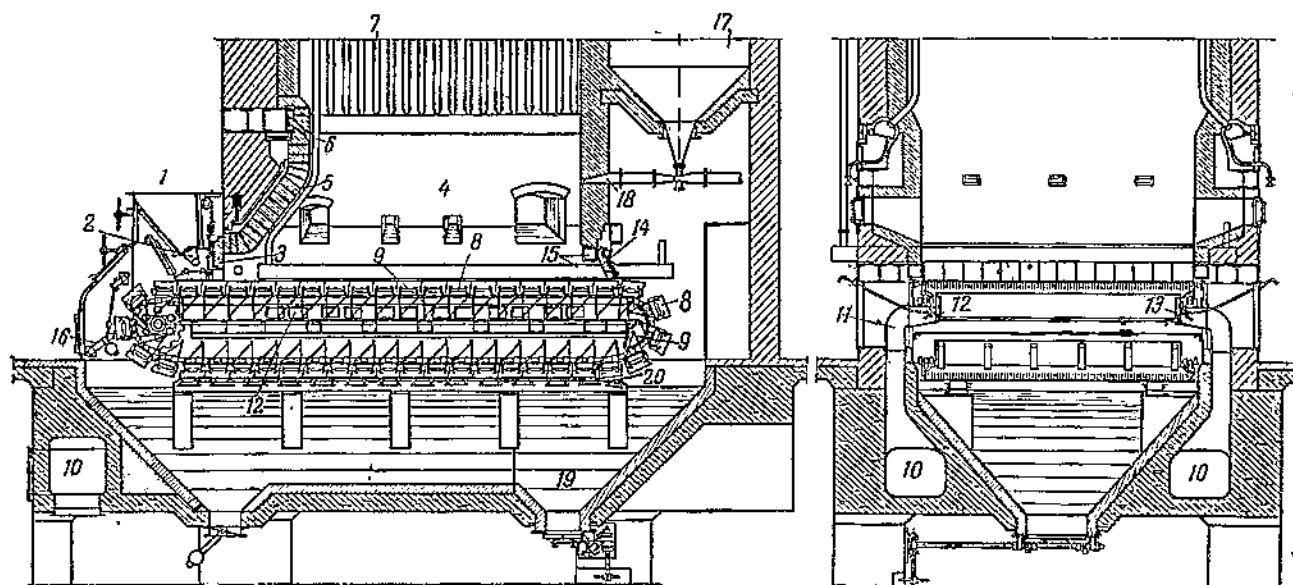


Фиг. 142. Целная беспровальная решетка 1938 г. Продольный разрез.

1—загрузочная воронка; 2—секторный затвор; 3—шлаковый подпор; 4—труба для дутья; 5—воздухопровод.



Фиг. 143. Цепная беспровальная решетка 1938 г. Поперечный разрез и вид спереди.



Фиг. 144. Цепная решетка Дюрра с передвигающимися зонными перегородками.

1—угольная воронка; 2—шибер для регулирования подачи угля; 3—шибер для регулирования слоя; 4—топочная камера; 5—подвесной свод; 6—вторичный воздух; 7—экраны; 8—колосники; 9—разделительные стенки между зонами; 10—подвод первичного воздуха; 11—распределительные каналы первичного воздуха; 12—регулирующие заслонки; 13—боковая стенка; 14—шлаковый подпор; 15—охлаждаемые балки; 16—устройство для очистки колосников; 17—бункер для летучей золы; 18—обратный ввод летучей золы в топочную камеру; 19—золовая воронка; 20—опорные ролики.

На фиг. 144 показана цепная решетка с зонным дутьем системы Дюрр, в которой разделительные стенки 9 зонных камер передвигаются вместе с решеткой. Подвижные зоны получают воздух по каналам 10—11 через регулируемые отверстия 12 в боковых

стенках 13 решетки. Таким способом удается увеличить число зон и лучше регулировать распределение воздуха. Решетка снабжена приспособлением 16 для очистки колосников, установленным у ее переднего конца.

При применении зонного дутья теплонапряжения решетки можно довести в среднем до $1,5 \cdot 10^6 \text{ ккал/м}^2 \text{ час}$ и выше против $1,0 \cdot 10^6$ на решетках без зон. При зонном подводе воздуха на цепных решетках можно сжигать низкосортные и тощие топлива, например, коксовую мелочь.

При зонном дутье весьма важно тщательное уплотнение между зонами. Уплотнение между подвижной и неподвижной частями решетки осуществляется с помощью перекрытий, закрывающих пролеты между соседними бимсами. Во избежание продольного протекания воздуха между колосниками, могущего возникнуть вследствие разности давлений в зонах, колосники 8 изготовляют с поперечными ребрами, создающими достаточную плотность вдоль длины полотна.

Удаление провала топлива из-под решетки следует производить систематически во избежание его догорания, что может вызвать перегрев и коробление деталей решетки.

46. Решетки, переталкивающие топливо

В отличие от цепных наклонно-переталкивающие решетки устроены так, что их колосники все время остаются почти на месте и поэтому подвергаются длительному действию высоких температур. С помощью различных приспособлений (шнека, поршней и движения колосников решетки) топливо в процессе сгорания постепенно передвигается по решетке от места загрузки до места отвода очаговых остатков. Работа колосников протекает поэтому в трудных условиях. Замена поврежденных колосников во время работы здесь обычно невозможна. Наклонно-переталкивающие решетки с верхней подачей применяются, главным образом, для бурых углей, а также для низкосортных и среднего качества каменных углей, имеющих Q_p до 3500 ккал/кг . При этих топливах нагрев колосников несколько ограничивается вследствие повышенного выхода летучих, влажности топлива и защитного действия слоя шлака. При сжигании высокосортных спекающихся топлив колосники перегреваются и быстро изнашиваются.

Переталкивающие топki обычно выполняются с наклонной решеткой, редко с горизонтальной. Наклон должен быть меньше угла естественного откоса сжигаемого угля.

Наклонно-переталкивающие топki механизмируют загрузку, движение топлива, его шуровку и удаление золы и шлака, что важно при сжигании шлакующихся топлив. Механизация шлако- и золоудаления, введение нижнего дутья и зонного подвода подогретого воздуха улучшают работу переталкивающих топок. Топки с переталкивающими решетками могут иметь большие мощности. В них можно сжигать угли с различным углом естественного откоса, не изменяя самой топki.

Благодаря шуровочному действию колосников переталкивающие топki могут быть использованы для сжигания топлив с высоким содержанием золы и для топлив с легкоплавкой золой, как угольный шлам, полукокс, бурые угли и пр.

По роду движения различают топki переталкивающие с верхней подачей топлива, переталкивающие с нижней подачей топлива и обратно переталкивающие топki.

Топки с верхней подачей. В переталкивающих топках с верхней подачей свежее топливо подается на переднюю часть решетки на слой горячего угля. Затем топливо движется от начала решетки к концу за счет движения колосников. Процесс воспламенения происходит не только сверху от излучения и соприкосновения с горячими газами, но также и снизу вследствие перемешивания горящего слоя со свежо загруженным.

При сжигании низкосортных бурых углей употребляются колосники в форме плит (фиг. 145). Плиты решетки часто выполняются в виде ступенек (фиг. 146). Однако показатель степени охлаждения ϕ подобных плиточных колосников невелик, большей частью ниже 3. При сжигании более высокосортных углей приходится применять наборные колосники (фиг. 147), у которых $\phi \approx 8$.

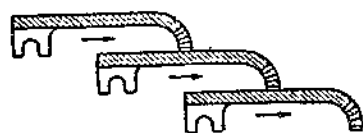
На фиг. 148 показана схема движения колосников наклонно-переталкивающей решетки системы Борзига.

На фиг. 149—150 показана топка ПР для сжигания низкосортных влажных и зольных топлив, преимущественно бурых углей, например, подмосковно о углей. Решетка состоит из чередующихся рядов подвижных 1 и неподвижных 2 колосников. Подвижные колосники своим вильчатым концом опираются на круглые штанги 5, уложенные в подвижных тележках 6. Другие концы подвижных колосников лежат на неподвижных колосниках, которые одним концом опираются на подвижные следующего ряда, а другим при помощи круглых штанг 3 на неподвижную раму 4. Необходимый для горения воздух подводится к топливу через отверстия с горизонтальной осью, расположенные в торце колосников, что уменьшает провал. Подвижные колосники уложены в подвижных тележках 6, получающих горизонтальное возвратно-поступательное движение от поршневого сервомотора 7 через шатун 8, рычаг 9 и тягу 10. В нижней части топki устанавливаются шлаковые колосники 11, склепанные в пакет по 6—8 штук. Они скользят на специальных опорах и приводятся в движение от своего сервомотора. Угол наклона решетки обычно равен $20\text{--}30^\circ$, шлаковых колосников $7\text{--}10^\circ$.

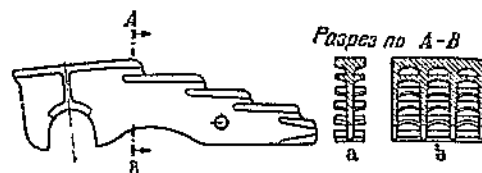
Для уменьшения шлакования стен устанавливают панели 12 (фиг. 150) с водяным охлаждением.

Тепловое напряжение наклонно-переталкивающих решеток на буром угле без дутья может быть доведено до $\frac{Q}{R} = 0,6 \cdot 10^6 \text{ ккал/м}^2 \text{ час}$, при применении нижнего дутья от $0,8 \cdot 10^6$ до $1 \cdot 10^6 \text{ ккал/м}^2 \text{ час}$. Самая большая топка подобного типа имеет поверхность решетки $84,4 \text{ м}^2$ при длине $8,05 \text{ м}$ и ширине $10,4 \text{ м}$, что может обеспечить получение в одном агрегате мощности до $80\text{--}85 \text{ т пара}$ в час.

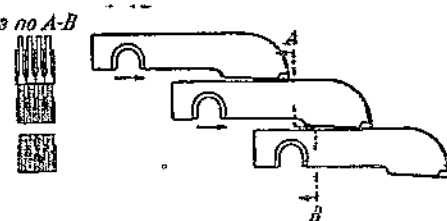
Фиг. 145. Плиточные колосники наклонно-переталкивающей топки.



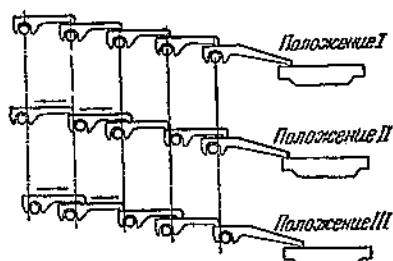
Фиг. 146. Ступенчатые колосники Штейнмюллера для наклонно-переталкивающей топки.



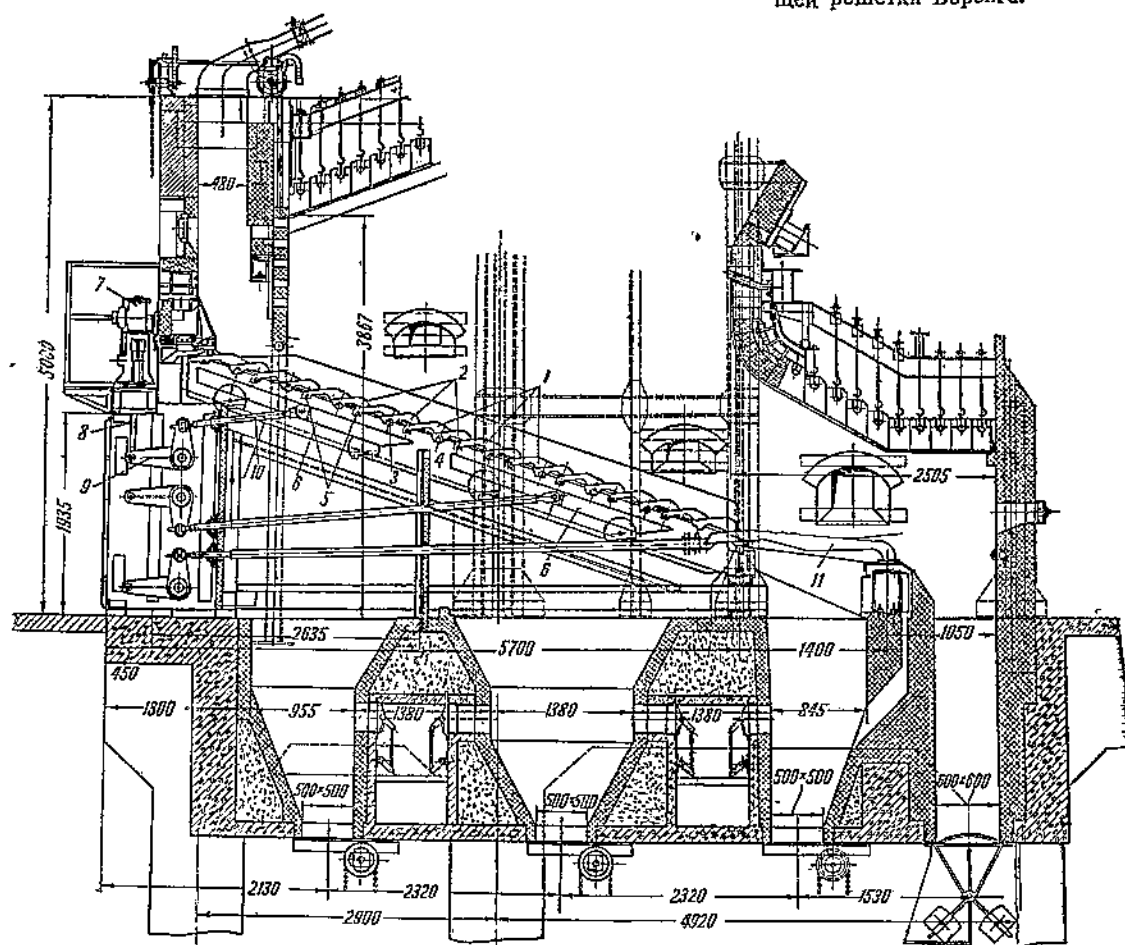
Разрез по А-В



Фиг. 147. Наборные колосники наклонно-переталкивающей топки.



Фиг. 148. Схема движения колосников наклонно-переталкивающей решетки Борзига.

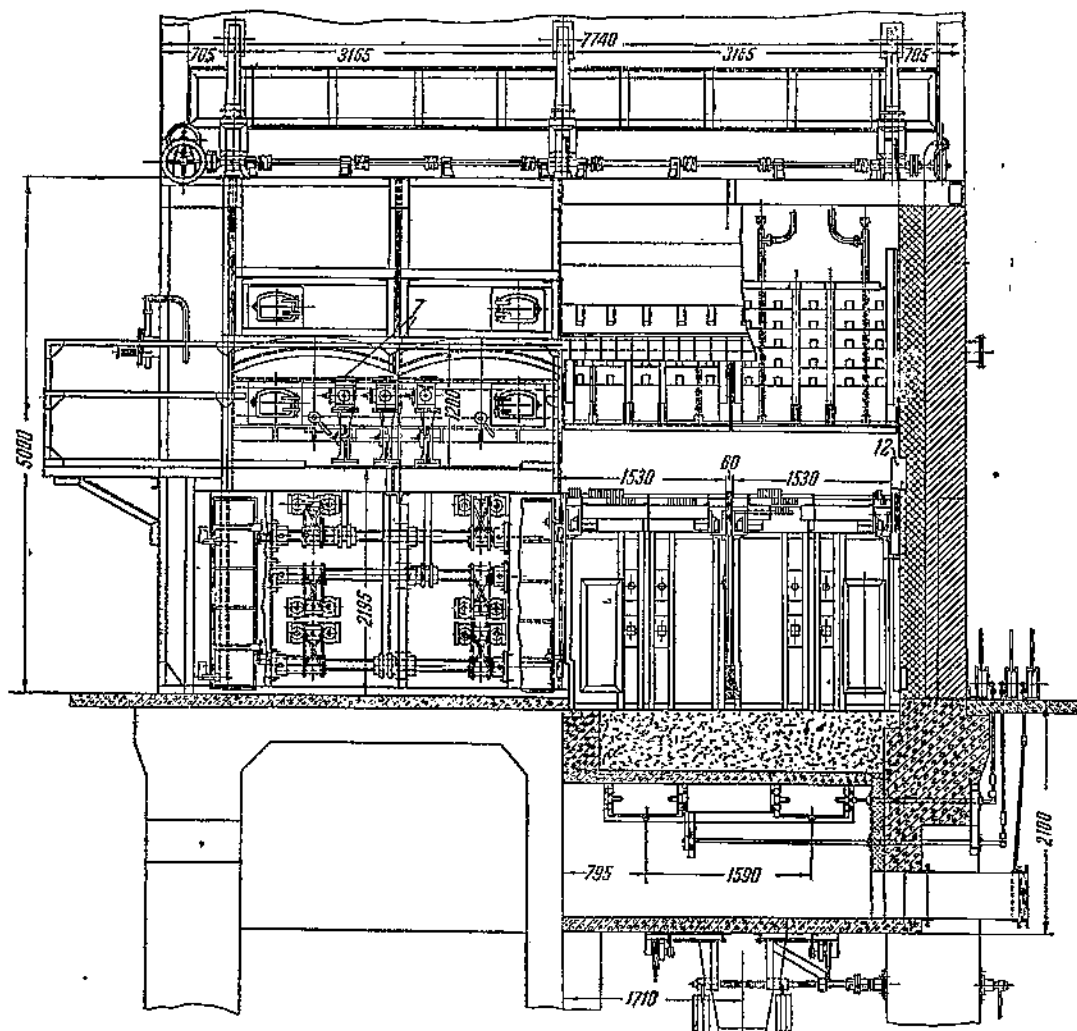


Фиг. 149. Наклонно-переталкивающая решетка ПР. Продольный разрез.

1—подвижные колосники; 2—неподвижные колосники; 3—опоры неподвижных колосников; 4—неподвижная рама; 5—опоры подвижных колосников; 6—подвижные тележки; 7—сервомотор; 8—шагуны; 9—рычаги; 10—тяги к тележке 6; 11—шлаковые колосники.

Раньше у нас применялись наклонно-переталкивающие решетки системы Каблиц и РЭТ, уступающие решетке типа ПР по надежности и экономичности. В настоящее время изготовление их прекращено.

Топки с нижней подачей топлива. В топках с нижней подачей свежее топливо обычно с помощью плунжеров или поршней направляется под слой ранее загруженного и уже горящего топлива, от которого оно и воспламеняется. Под давлением поршня масса топлива выталкивается на решетку вверх и раздается



Фиг. 150. Наклонно-переталкивающая решетка ПР. Вид спереди и поперечный разрез.

12—панели с водяным охлаждением.

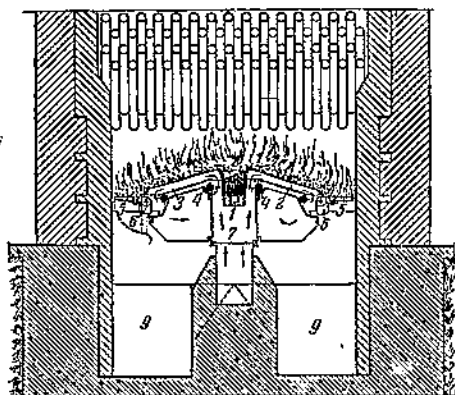
на края ее. На малых решетках достаточно только приспособления для загрузки угля; большие решетки требуют добавочных приспособлений для приведения в движение деталей решетки. Существует много различных конструкций топок с нижней подачей. Отличительной особенностью подобных топок является большая толщина слоя, достигающая 1 000 мм, вследствие чего во всех случаях необходимо применять нижнее дутье с напором до 100 мм вод. ст.

Воздух подается с большими скоростями через боковые стенки реторты и под боковые колосники. Процесс подготовки топлива и самый процесс горения в топках с нижней подачей протекают несколько своеобразно. Летучие начинают интенсивно выделяться из топлива при прохождении его по реторте. Поток летучих пронизывает топливо, проходя через горящий слой кокса. Смешанные с воздухом летучие интенсивно горят непосредственно в слое, в каналах, образуемых горящими кусками кокса. Этим в значительной степени ускоряется процесс горения как твердой, так и газовой части топлива. По мере выгорания, в соответствии с движением слоя, частицы топлива передвигаются вверх. На верху слоя остаются зола и шлак, сползающие на нижнюю часть решетки и выбрасываемые затем со шлаковых колосников в шахту, в которой происходит окончательное выгорание остатков углерода.

Повышенная интенсивность горения объясняется как одновременным сгоранием кокса и летучих в слое, так и концентрированным подводом воздуха. Воздух, пронизывающий слой с большими скоростями, требует достаточной устойчивости слоя, достигаемой за счет большой высоты его и, главным образом, за счет спекания ости топлива. Неспекавшиеся угли не могут поэтому успешно сжигаться в топках с нижней подачей. В этих топках затруднительно также сжигание топлива с влажностью и зольностью больше 20%. Повышенная влажность удлиняет процесс подготовки топлива и в сильной степени нарушает процесс горения слоя. Повышенное содержание золы, особенно с низкой температурой плавления, создает неблагоприятные условия для протекания газов и воздуха, и процесс горения в значительной степени затрудняется. Поэтому повышенная зольность требует пониженного теплонапряжения слоя, что уменьшает преимущества топки с нижней подачей.

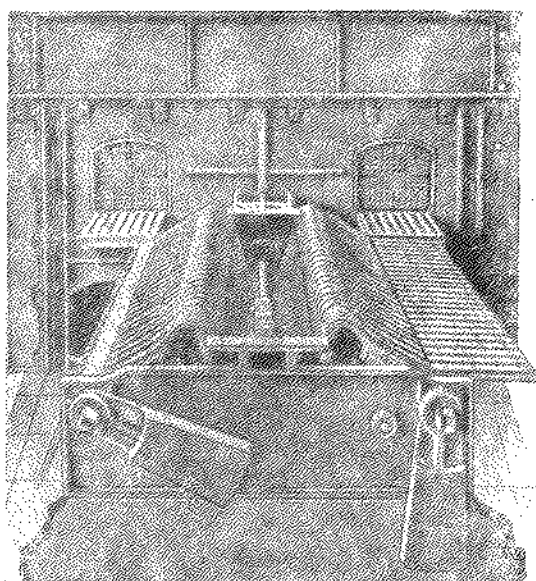
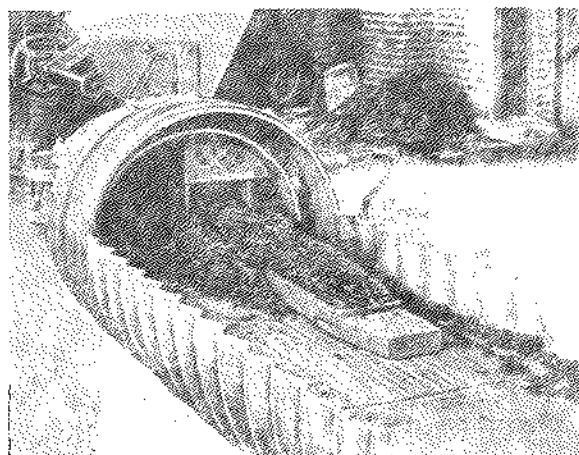
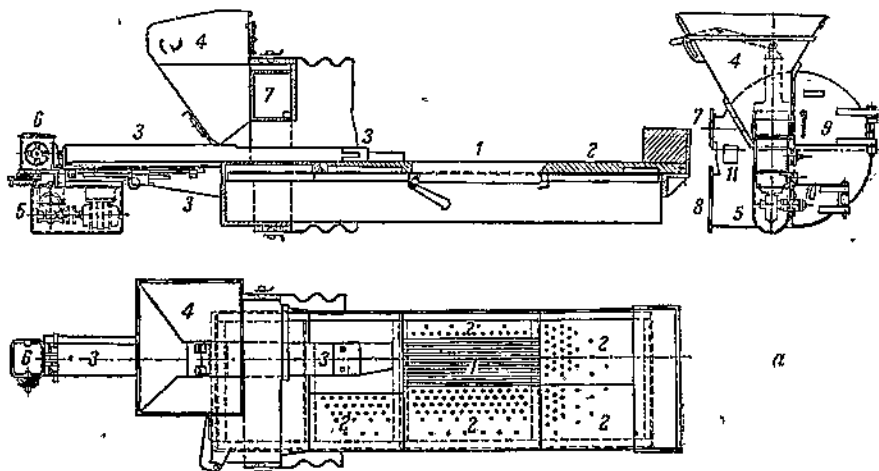
Хотя сортировка топлива для топок с нижней подачей не обязательна, но все же размер кусков, поступающих на решетку, желателен не меньше 20 мм, так как большой процент мелочи понижает допустимую интенсивность горения. Содержание летучих должно быть от 15 до 30%.

Для малых установок, в первую очередь для жаротруб-



Фиг. 151. Однолотковая топка с нижней подачей топлива.

1—качающаяся плита для подачи топлива; 2—подвижной пустотелый колосник; 3—неподвижный пустотелый колосник; 4—распределительный вал; 5—откидная шлаковая решетка; 6—ось шлаковых колосников; 7—воздушный короб; 8—сопла в колосниках; 9—золотой бункер.



Фиг. 153. Топка с нижней подачей Доби.

1—основная колосниковая решетка; 2—дожигательная решетка; 3—подающий поршень (ползун); 4—угольная воронка; 5—электромотор с червячной передачей; 6—коробка скоростей; 7—подача вторичного воздуха; 8—подача первичного воздуха; 9—топочная дверка; 10—золотая дверка; 11—гляделка.

Фиг. 152. Однолотковая топка с нижней подачей топлива с качающейся боковой решеткой.

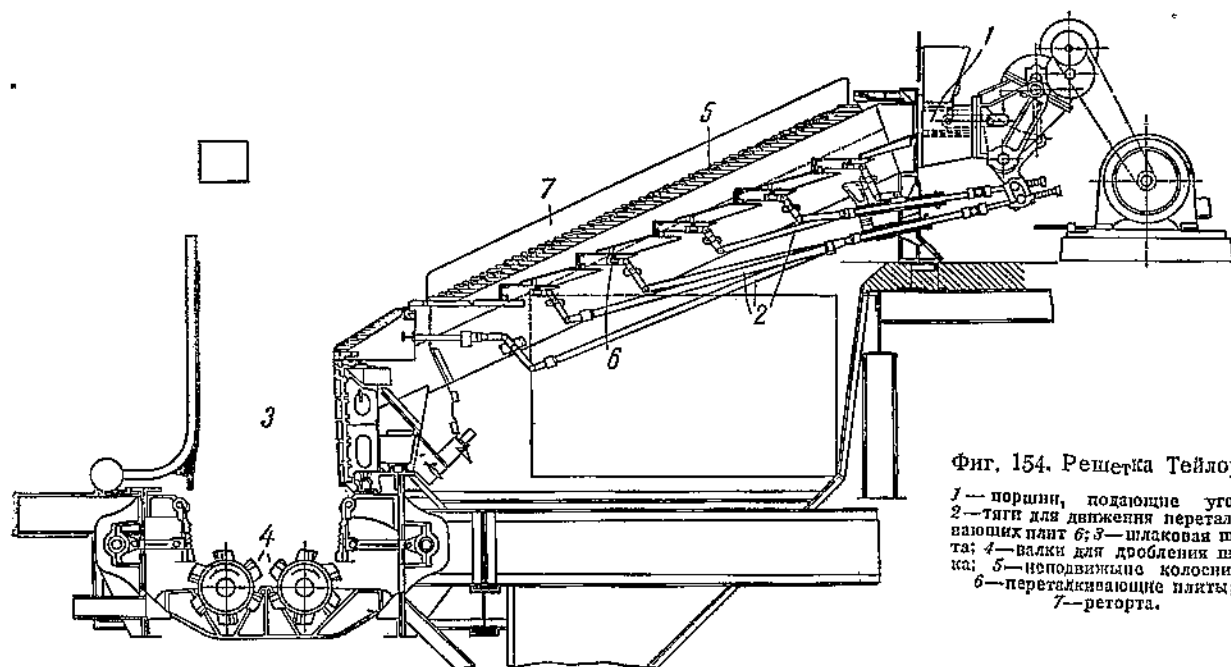
ных котлов, применяется лотковая решетка, по своей плоской форме родственная горизонтальной неподвижной решетке (фиг. 151). Топливо при помощи толкателя 1 подается в лоток (корыто). К лотку по его длине примыкают наклонные колосники 2 и 3, на которые поступает уголь из лотка. За ними помещается шлаковая решетка 5. Часть колосников имеет качательное движение (встряхивается). Общий вид такой топки представлен на фиг. 152. В качестве другой конструкции подобного типа можно указать на стокер с горизонтальным колосниковым полотном, например, решетку Доби (фиг. 153).

Большое значение имеют применяемые на крупных установках многоретортные топки с нижней подачей. На подобных топках установлено в ряд несколько наклонных реторт шириной 500—600 мм и длиной до 5 м; каждая реторта образована из одного

лотка и двух плитчатых колосников с отверстиями. Эти реторты к концу решетки переходят в подвижную выжигательную решетку, в которой большей частью примыкает еще выжигательная шахта с вальсами для дробления шлака. Показатель степени охлаждения ретортных колосников очень мал (от 1 до 3), и колосники сильно страдают, когда слой угля при горении снизу или при малой нагрузке становится слишком тонким. Решетки системы Тейлора (фиг. 154) имеют неподвижные ретортные колосники 5. Каждый ретортный лоток 7 оборудован переталкивающими плитами 6, сообщающими движение топливу помимо расположенного в начале решетки подающего поршневого механизма.

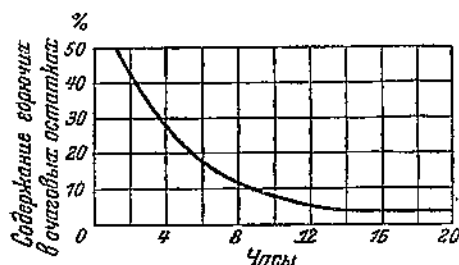
Часто такие решетки снабжаются зонами для подвода воздуха. Распределение воздуха идет в продольном и в поперечном направлении; число зон доходит до 34. Температура горячего воздуха при топках с нижней подачей допускается до 175—200° С.

Американские топки с нижней подачей топлива, имеющие очень большую высоту топочной камеры (до 8 м), пригодны для сжигания умеренно спекающихся каменных углей в кусках величиной от 0 до 60 мм, так как провал при колосниковом полотне такой

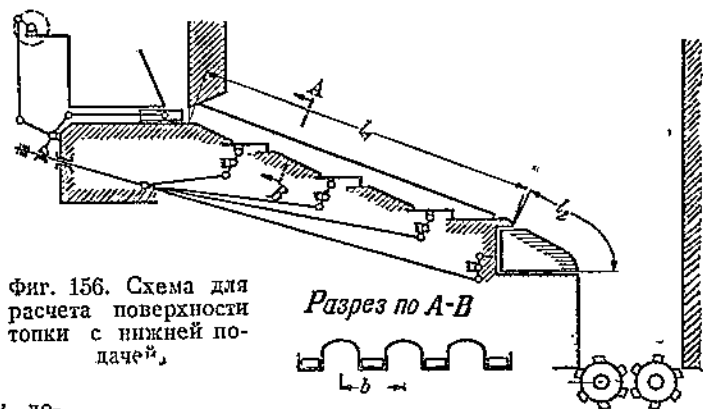


Фиг. 154. Решетка Тейлора.

1 — воронки, подающие уголь;
2 — тяги для движения переталки-
вающих плит 6; 3 — шлаковая шах-
та; 4 — валки для дробления шла-
ка; 5 — неподвижные колосники;
6 — переталкивающие плиты;
7 — реторта.



Фиг. 155. Содержание горючих в очажовых остатках в зависимости от времени пребывания в зажигательной шахте.



Фиг. 156. Схема для расчета поверхности топки с нижней подачи.

Разрез по А-В

решетки почти не имеет места. Износ решетки довольно значителен: при периодической эксплуатации он больше, нежели при непрерывной; в течение полугода изнашивается 30—50% всего полотна. По Мюнцингеру в этих топках можно сжигать и тощие угли, если они удовлетворительно слекаются и не слишком тверды. Наши неспекающиеся тощие угли на таких решетках сжигать нельзя.

Топки с нижней подачей обычно значительно экранованы. Нижняя часть экранов топки, соприкасающаяся непосредственно с решеткой, обычно закрывается плитками Бейли 1, защищающими стены от действия расплавленного шлака.

Очаговые остатки почти полностью выгорают в дожигательной шахте, так как они могут там оставаться до 10 часов и больше, что обеспечивает ничтожные потери со шлаком. В конструктивном же отношении выжигательная шахта очень хорошо комбинируется с решеткой. О благоприятном влиянии на выжигание продолжительности пребывания в шахте можно судить по кривой (фиг. 155), где дана зависимость содержания несгоревших частиц в шлаке от продолжительности пребывания шлака в выжигательной шахте. Применение дожигательных шахт-генераторов для таких топок вызывается тем, что они дешевле самих решеток. При больших тепловых нагрузках решеток

удаляемые с решетки и содержащие много горючих шлаки выгоднее дожигать в этих шахтах. При цепных и других топках установка таких шахт и одновременное уменьшение поверхности решетки невыгодны и могут рассматриваться лишь как метод увеличения общей мощности агрегата при достижении предельно больших размеров решетки.

Благодаря большому запасу топлива на решетке она поддается быстрой форсировке, в то же время они могут длительно работать с пониженной нагрузкой.

Площадь решетки определяется следующим образом (фиг. 156):

$$R = (l_1 + l_2) b z \text{ м}^2,$$

где z — число рядов реторт, b — ширина одной реторты.

Наиболее употребительные величины: $b \approx 0,5—0,6 \text{ м}$; $l_1 \approx 5,5 \text{ м}$; $l_2 \approx 1,5—1,75 \text{ м}$.

Теплонапряжение

$$\frac{Q}{R} = (1,4—1,8) \cdot 10^6 \text{ ккал/м}^2 \text{ час.}$$

Широкое использование у нас местных топлив, отбросов угледобывающей и углеобогащающей промышленности ограничивает возможность применения в СССР топок с нижней подачей.

Обратно-переталкивающие топки. Подача топлива на обратно-переталкивающих решетках осуществляется

1 См. стр. 249 и фиг. 252.

сверху, как и на обычных наклонно-переталкивающих решетках. Решетка толки образует род лотка с наклоном назад, с шурующими ступенями, имеющими поступательно-возвратное движение. Движение шурующих ступеней, состоящих из колосников, осуществляется так, что нижняя часть угольного слоя переталкивается вперед к фронту толки, в то время как верхний слой угля сползает вниз.

Обратно-переталкивающие решетки Мартина предназначались, главным образом, для сжигания мусора с большим содержанием золы и низкой теплотворной способностью, но постепенно они стали с успехом применяться и для других низкосортных топлив: угольного шламма, отходов после промывки угля, бурого и каменного угля.

На фиг. 157 дан разрез толки Мартина. Топливо с помощью механического забрасывателя 2 подается на переднюю неподвижную часть решетки 5. Колосники 3 приводятся в движение с помощью механизма 4, поднимая нижние слои топлива и подавая их несколько к фронту толки. Дожигание топлива заканчивается на горизонтальной решетке 6 с подвижным колосником и в шахте 14. Топка имеет позонное дутье, подаваемое через канал 8.

В конце толки находится шлаковая решетка 6 с подвижными горизонтальными колосниками. Толщина слоя на решетке составляет 300—400 мм. Своеобразное движение топлива: с конца на фронт в нижней части слоя и поступательное вперед в верхней части, осуществляемое при обратно-переталкивающей решетке (фиг. 158), действует благоприятно на воспламенение топлива. Вглубь слоя топлива проникают горящие кусочки, и кроме того, при подобном движении топливо более продолжительное время остается в решетке, что очень желательно при использовании низкосортных углей. Решетка строится короткой, что обуславливает высокие тепловые нагрузки на ней. Толка Мартина работает с нижним дутьем, которое может быть и зонным. Давление воздуха под решеткой доходит до 120 мм вод. ст. Обратно-переталкивающие решетки изготавливаются до 6 м ширины и до 7 м длины, следовательно, площадью до 40 м².

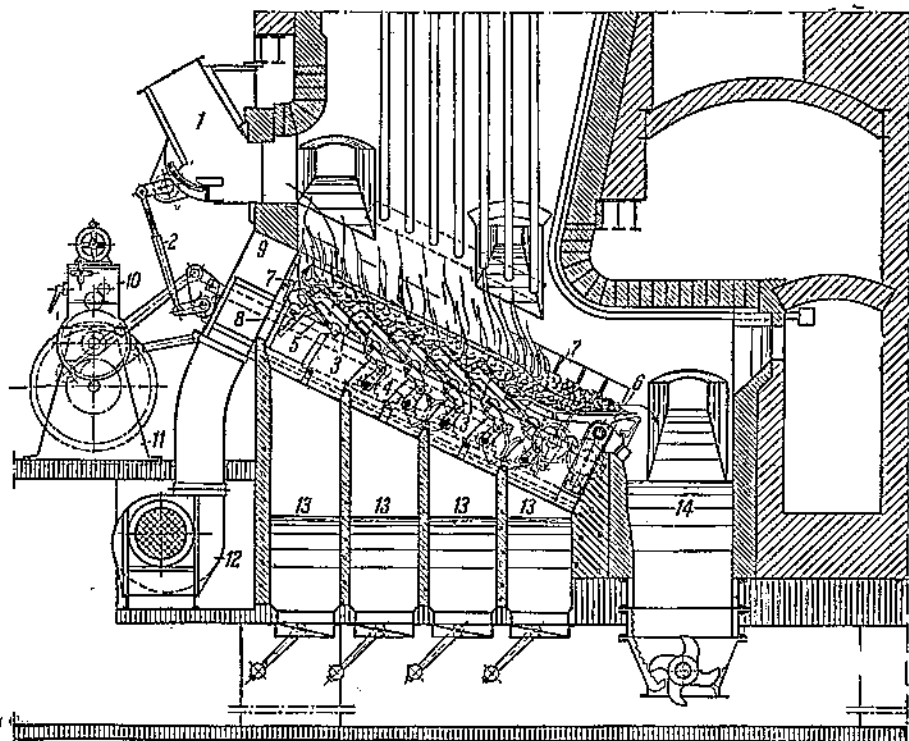
На опыте получены следующие тепловые напряжения решетки;

$$\frac{B}{R} = 770 \text{ кг/м}^2 \text{ час или } \frac{Q}{R} = 2,46 \cdot 10^6 \text{ ккал/м}^2 \text{ час.}$$

На отходах после промывки угля при $A_p = 50\%$ и $Q_p^* = 3200 \text{ ккал/кг}$

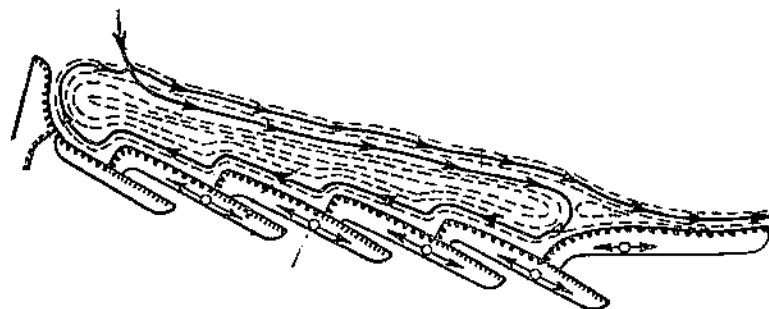
$$\frac{B}{R} = 1150 \text{ кг/м}^2 \text{ час; } \frac{Q}{R} = 1,96 \cdot 10^6 \text{ ккал/м}^2.$$

На буром угле при $W_p = 60\%$ и $Q_p^* = 1700 \text{ ккал/кг}$.



Фиг. 157. Обратно-переталкивающая толка системы Мартина.

1—угольная воронка; 2—механизм для подачи топлива; 3—шурующие колосники; 4—приводной механизм; 5—передняя подающая топливо решетка; 6—шлаковая решетка; 7—пустотелые панели воздушного охлаждения, служащие одновременно для подогрева дутья; 8—9—воздушные каналы; 10—11—мотор с приводом; 12—дугевого вентилятор; 13—дугевые зоны; 14—золовой бункер.



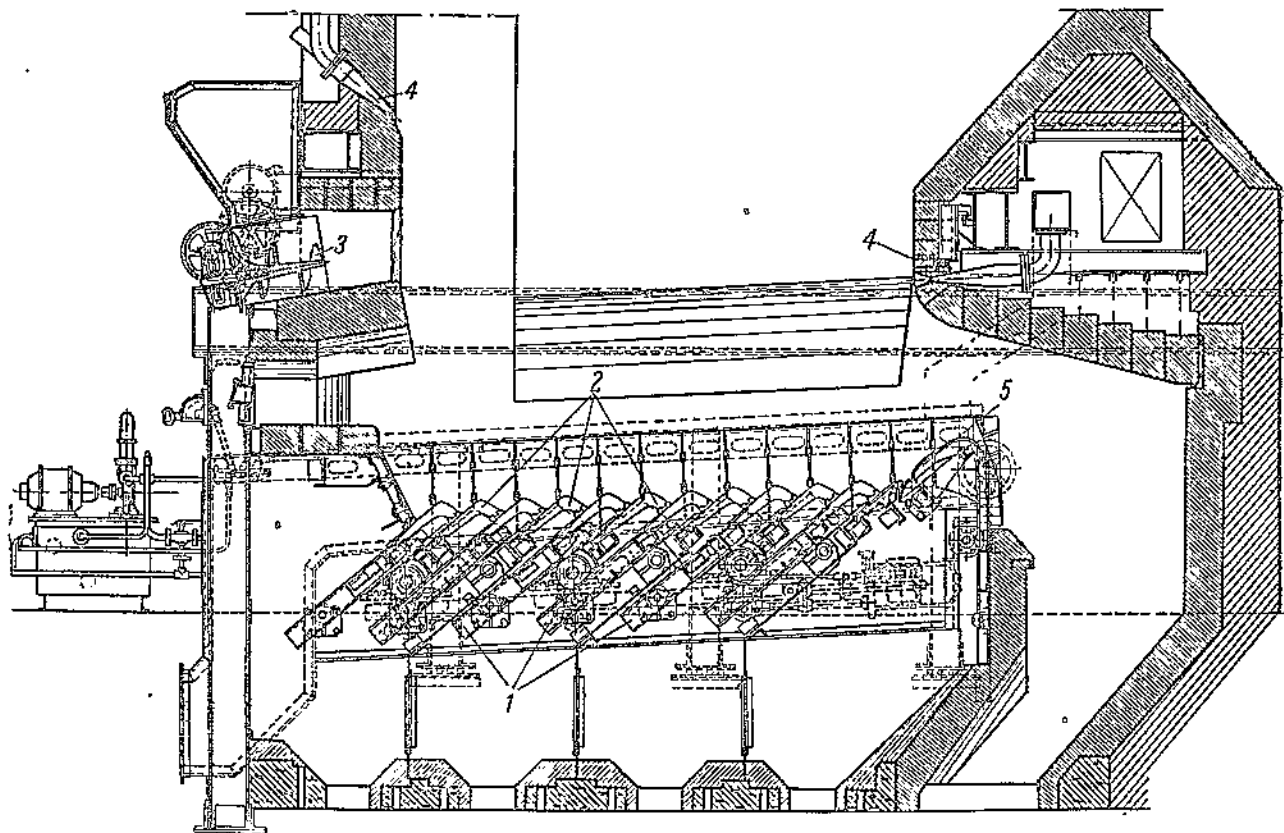
Фиг. 158. Схема движения топлива в слое на обратно-переталкивающей решетке Мартина.

При высокоценном каменном угле $\frac{Q}{R}$ доходит до $2 \cdot 10^6 \text{ ккал/м}^2 \text{ час}$.

Тепловая нагрузка на 1 м ширины решетки доходит до 15 т/м час нормального пара.

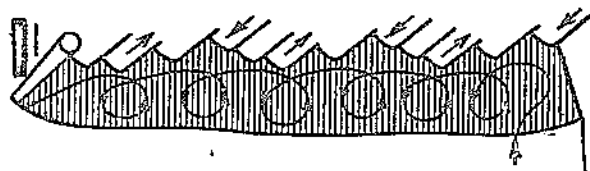
Каскадная толка аналогична толке Мартина, но имеет горизонтальное или наклонное от конца решетки к фронту полотно (фиг. 159).

Полотно каскадной толки состоит из чередующихся по длине решетки подвижных 1 и неподвижных 2 колосников. Колосники поставлены под углом 35—37° к горизонту. При движении колосникового полотна кусочки топлива совершают в слое круговое движение и, пройдя несколько петель, передвигаются к шлаковому подпору (фиг. 160). Ход колосников достигает 350 мм, обеспечивая, таким образом, глубокую шуровку слоя и хорошее выжигание шлака даже при очень зольном топливе. Для регулировки толщины слоя в конце решетки устанавливается шлаковый порог 5.



Фиг. 159. Каскадная топка.

1—подвижные колосники; 2—неподвижные колосники; 3—шнек для загрузки топлива; 4—сопла вторичного дутья; 5—шлаковый порог.



Фиг. 160. Схема движения топлива в слое на каскадной решетке.

Наклоном порога регулируется толщина слоя на решетке. Топливо подается на решетку из угольного бункера с помощью шнековых питателей 3, расположенных на фронте топки. Количество питателей подбирается так, чтобы заполнение решетки было полное. Топка снабжена вторичным дутьем; сопла 4 для этой цели поставлены как на передней, так и на задней стенке. Топка разделена на четыре зоны.

На каскадной топке с горизонтальным полотном было проверено сжигание фрезерного торфа. Скорость распространения воспламенения торфа вглубь слоя оказалась весьма большой, что следует объяснить интенсивной шуровкой слоя. Теллонапряжение решетки достигало $(1,5-1,6) \cdot 10^6 \text{ ккал/м}^2 \text{ час}$. Есть основание думать, что эти цифры не являются пределом форсировки топки. Потеря с провалом получилась сравнительно небольшая: до 1,9% при чистом фрезерном торфе. Топка работала с небольшим избытком воздуха $\alpha = 1,1$, вследствие чего потеря от химического недожога доходила до 4% против нормальных 0,5-1%. Потеря со шлаком составляла 1,3%.

Сжигание отходов углеобогащения кизеловских углей с зольностью около 50% показало возможность

сжигания этого рода топлива с $\frac{Q}{R} = 1350 \text{ ккал/м}^2 \text{ час}$ при использовании 2/3 решетки. Потеря со шлаком была, однако, велика, составляя ~10%.

Полученные результаты позволяют предполагать, что топка этой конструкции оправдывает себя при сжигании углей с большой зольностью и отбросов обогащенных фабрик. По расходу металла каскадная топка более выгодна, чем цепная решетка. Так, например, для цепной топки вес решетки составляет 2,35 т, а для каскадной — 2,1 т на 1 м² решетки. Ввиду высокой температуры слоя и решетки колосники обратноперегреваемых топок делаются из жароупорного чугуна с содержанием хрома до 20%.

47. Выбор типа слоевой топки для топлив СССР

Выбор типа топок для энергетических и промышленных установок СССР определяется, с одной стороны, мощностью котельного агрегата, с другой, — качеством топлива, которое приходится сжигать в данной установке.

На основании сказанного в предыдущих параграфах можно установить следующие области применения отдельных систем слоевых топок в зависимости от мощности котла.

1. Ручные топки применимы в малых установках до производительности котельного агрегата 6-8 т/час.
2. Полумеханические топки для сжигания дров и торфа — до производительности 9 т/час.
3. Цепные решетки:

а) уголь — для паропроизводительности котельного агрегата 10—100 т/час;

б) торф при шахтно-цепных топках — для паропроизводительности 25—200 т/час.

4. Наклонно-переталкивающие топки для паропроизводительности до 70 т/час.

5. Каскадные топки с глубокой шуровкой — для паропроизводительности 10—100 т/час.

6. Топки с нижней подачей — для паропроизводительности до 300 т/час.

В отношении качества и сорта топлива отдельные группы слоевых топок предъявляют следующие основные требования:

1. Ручные топки почти универсальны в отношении сжигаемого топлива.

2. Полумеханические топки допускают эффективную работу лишь на крупном малозольном топливе, дровах и торфе.

3. Цепные решетки являются наиболее распространенной конструкцией, пригодной для разнообразных топлив. Однако высокая экономичность при высоких форсировках не может быть достигнута при мелкозернистом топливе с малым выходом летучих (АШ). Непригодны эти топки также для топлив, сильно растрескивающихся при горении (тощие угли). Неудовлетворительно используются цепные решетки для сжигания топлив при $A_c > 40\%$ (отбросы углемойки и др.).

Повышенная влажность топлив не мешает использованию их на цепных решетках в случае установки подсушивающих шахт. Работа подсушивающих шахт на углях изучена еще недостаточно. Бурые угли типа челябинских с успехом могут быть использованы на цепных решетках, в особенности на решетках беспровального типа.

Хорошие показатели при сжигании на цепной решетке дает кусковой торф. Примесь к нему до 25% фрезерного торфа еще не нарушает в целом работы цепной решетки. Подача фрезерного торфа должна производиться на слой с возможностью максимального сжигания фрезерного торфа во взвешенном состоянии.

4. Наклонно-переталкивающие топки с верхней загрузкой топлива пригодны для влажных топлив с большим выходом летучих. Угли типа подмосковных хорошо сжигаются в топках ПР. Эти топки работают неудовлетворительно при высококалорийном топливе и особенно плохо при топливе с малым выходом летучих.

5. Топки с нижней подачей предназначены для сжигания лишь высококалорийных слабоспекающихся углей с невысоким содержанием золы и влаги.

6. Каскадные топки с глубокой шуровкой слоя пригодны для сжигания низкосортных топлив с содержанием золы до 50% и влаги до 60% (бурые угли, отходы углеобогащательных фабрик).

При выборе того или иного типа топок для различных установок необходимо кроме изложенных выше соображений и данных, касающихся работы топок на заданном сорте топлива, учитывать возможность перехода этих топок на другой сорт топлива без серьезных переделок. В некоторых случаях, когда снабжение установки вполне определенным сортом топлива безусловно обеспечено, например, в непосредственной близости к местам добычи этих топлив, этот вопрос решающей роли не играет. В противном же случае часто выгодней выбрать тип топки, даже несколько менее экономичный для данного сорта топлива, но зато допускающий сжигание хотя бы с несколько сниженными показателями и других сортов, снабжение которыми мыслимо для данной установки.

Поэтому у нас получили наибольшее распространение более универсальные типы топок, а такие топки, как, например, с нижней подачей, дающие возможность применять слоевой метод сжигания под крупными агрегатами, не нашли применения, уступая место более универсальному и менее чувствительному к качеству топлива камерному методу сжигания топлива в виде пыли.

В табл. 47 приведены тепловые характеристики слоевых топок при сжигании в них типичных углей СССР.

При пользовании таблицей надо иметь в виду следующее:

1. Площадь цепной решетки подсчитывалась как произведение ширины полотна на его длину, считая последнюю от топливного шибера до шлакоосциллятора. Соответственно для шахтно-цепных топок за активную длину решетки принималось расстояние от отсекающего свода шахты до шлакового подпора.

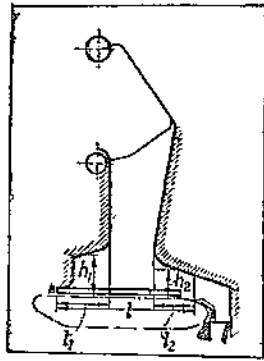
Для топок с глубокой шуровкой слоя, а также для топок с нижней подачей площадь решетки исчислялась как проекция активной части решетки на горизонтальную плоскость. Генератор или опрокидные шлаковые колосники решетки с нижней подачей в рабочую площадь не включались.

2. При сжигании смеси кускового и фрезерного торфа все характеристики даны для случаев добавки фрезерного торфа в размере 25% по топливу. Подача фрезерного торфа предполагается сверху с возможностью сжигания половины его количества во взвешенном состоянии.

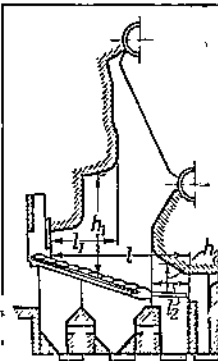
3. Тепловые нагрузки при сжигании бурых углей приведены для топлива с влажностью, не превышающей 20%. Для наклонно-переталкивающих топок дана характеристика для топлив с влажностью 20—30%.

4. Потери с провалом для цепных решеток приняты применительно к работе современных беспровальных решеток (чешуйчатое полотно). Живое сечение современного беспровального полотна принималось равным 6—8%. Для полотна другой конструкции потери с провалом следует считать иными. При сжигании бурых углей типа челябинского сплошное полотно дает потери с провалом 3—4%, полотно с накладными колосниками системы ТИ — 2—3%, полотно с накладными колосниками системы Вирт — 1—0,5%.

Таб
Основные показатели тепловой работы механических топок на

Показатели работы топки	Обозначение	Размер- ность	Цепные решетки					
			Щела	Торф		Бурый уголь типа челябинского	Каменные угли	
				куско- вой	кусковой и фрезерный		неспекаю- щийся типа Д	спекающийся типа Г
Нормальное видимое напряже- ние решеток	$\frac{Q}{R}$	тысячи ккал/м ² час	1 500	2 000— 2 500	1 500— 2 000	900 — 1 000	900—1 200	1 200—1 300
Потери со шлаком	$q_4^{шл}$	%	—	—	—	$1 \pm 0,08 A_c$	$1 \pm 0,08 A_c$	$0,2 A_c$
Потери с уносом	$q_4^{ун}$	%	1—3	0,0—0,2	—	1—1,5	2,0	1,0
Потери с провалом	$q_4^{пр}$	%	—	—	—	0,5	0,5	0,5
Полная потеря	q_4	%	—	—	—	$3 \pm 0,08 A_c$	$3,5 \pm 0,08 A_c$	$1,5 \pm 0,2 A_c$
Потери от химической непол- ноты сгорания	q_5	%	3	4	5,5	1	2	1,5
Коэффициент избытка воздуха в конце топки	α_m	—	1,2	1,25	1,25	1,30 1,25	1,25—1,30	1,30
Характеристика обмуровки		Топка со сводами: $h_1=2,5-3,0$ $l_1=0,4$ l $h_2=1,0$ $l_2=0,45$ l	Шахтно-цепная: $h_1=3,0-3,5$ $l_1=(0,4-0,6)$ l	Топка со сводами: малая мощ- ность — $D < 15$ т/час $h_1=1,5$ $l_1=0,4$ l $h_2=0,8$ $l_2=0,2-0,3$ l	Топка со сводами: повышенная мощность — $D > 15$ т/час $h_1=2,0-2$ $l_1=0,45$ l $h_2=1,0$ $l_2=0,2$ l	Топка со сводами или открытая топка: $h_1=2,5-3,0$ $l_1=(0,3-0,4)$ l $h_2=1-1,5$ $l_2=(0,1-0,4)$ l		
Характер экранирования	—	—	Передний свод без экрана: экран руется задний свод и затем боковые стены			в первую очередь	Экранируются передний и задний своды (стены) и боковые стены	
Нормальное видимое напряже- ние объема топки	$\frac{Q}{V}$	тысячи ккал/м ³ час	300	300 350	300	250 275	250	250
Температура дутья при нор- мальной нагрузке	t_D	°C	250	250	230	200	200	150
Давление дутья под решеткой при перегрузке	p_D	мм под. ст.	25	45—55	45—55	50	50	60
Влажность	W_p	%	25—45	35	кускового 85 фрезер- ного 45	До 20	10—15	4—8
Зольность на сухую массу	A_c	%	1	—	—	До 20—30	—	—
Содержание дутья на горячую массу	L_c	%	от	5	до	70%	—	—
Допускаемое процентное содер- жание мелочи 0—3 мм	—	%	—	—	—	20	20	25
Максимальный размер куска	d_N	мм	—	—	—	25—40	25—40	25

разных топливах (по данным Татищева, ВТИ)

Наклонно-переталкивающие топки системы							№	Топка с нижней подачей
Антрацит АС	Каблиц	Зейбот	Каблиц	Зейбот	Каблиц	Зейбот	Каскадная Мартина	Каменный слабо спекающийся уголь
	Бурые угли с понижен- ным содержанием бал- ласта типа челябинского		Бурые угли с повышенным содержанием балласта типа подмосковного				Отбросы обогасти- тельных фабрик	
			Дробленый уголь		Рядовой уголь			
1030—1100	800 900		650 750		650 750		1900	1600 1800
—	0,5±0,05 Ас		0,5±0,5 Ас		4±0,05 Ас		—	$0,5 \pm 0,21 A_c +$ $+(0,11 \pm 0,005 A_c) \frac{Q}{R} \frac{1}{1000}$
—	2		1,5		1,5		—	1,5
—	6	1	6	1	6	1	—	0,5
7	8,5±0,05 Ас	3,5±0,05 Ас	8±0,05 Ас	3±0,05 Ас	11,5±0,05 Ас	6,5±0,05 Ас	9,5	$2,5 \pm 0,21 A_c +$ $+(0,11 \pm 0,005 A_c) \frac{Q}{R} \frac{1}{1000}$
1	1,5		1,5		1,5		1,5	1,5
1,25	1,3		1,30		1,30		1,30	1,25
Топка со сводами: малая мощ- ность: — D < 15 м/час h ₁ =1,5 l ₁ =0,4 л h ₂ =0,8 l ₂ =0,3 л	повыше наз- мощность: — D > 15 м/час h ₁ =1,5 l ₁ =0,3 л h ₂ =0,8 l ₂ =0,5 л		Топка со сводами: малая мощность до 15 м/час h ₁ =1,5 l ₁ =0,4 л h ₂ =0,7 l ₂ =0,5 л		Повышенная мощность 15 м/час h ₁ =2,5 l ₁ =0,4 л h ₂ =1,5 l ₂ =0,3 л		Открытая топка	Открытая топка
								
Экранируются задний свод и боковые стены	То же, что для цепной решетки		Слабо экранируется (задняя стена)		—		Экранируются все четыре стены топки	
275	275		275		275		275	200 225
150	150	200	150	200	150	200	120	200
60	50		50		50		100	100
5	До 20—25		До 30—35		До 30—35		До 15	До 15
—	9—20		20—30		20—30		20—50	До 20
—	20		20		20		—	Не менее 20
—	20		20		20		—	—
15	25		25		125		50	—

ПОДГОТОВКА ТОПЛИВА К СЖИГАНИЮ ЕГО В ВИДЕ ПЫЛИ

48. Значение пылесжигания. Предварительное дробление топлива

При сжигании в пылеугольных топках топливо размельчается в достаточно тонкий порошок, размеры отдельных частиц которого зависят от сорта топлива. Так, например, АШ обычно превращают в пыль, имеющую по весу 90—95% частиц размером меньше 88 μ . Для подмосковного угля весовое содержание таких частиц может быть уменьшено до 70—75%. Частицы топлива должны иметь такие размеры, которые позволяли бы с достаточной полнотой выжигать его горючую часть за небольшой промежуток времени пребывания в камере.

Такой тонкий порошок, тщательно перемешанный с воздухом, подается в топочную камеру и сгорает в ней в виде пылевоздушной смеси, которая закигается в начале нефтяным факелом и затем устойчиво горит. Процесс сгорания угольных частиц должен заканчиваться целиком во взвешенном состоянии. Топливо, выпадающее из факела или покинувшее топочную камеру несгоревшим, является потерей (механический недожог). Во избежание такой потери и необходимо иметь достаточно мелко измельченный порошок.

Развитие теплотехники за последние годы показывает, что пылесжигающие установки получили широкое распространение. Данные американской статистики за 1936/1937 г. показывают, что 90% всех угольных котлов снабжаются камерными топками. В советских энергетических установках 90—95% углей сжигается в виде пыли.

Способ сжигания топлива в виде пыли отличается широкой приспособляемостью к топливам любого качества. Это дает возможность экономично использовать топлива, не находившие ранее почти никакого применения.

Для советских установок вопрос о рациональном использовании низкосортных и местных топлив является особо важным. Поэтому пылесжигание получило у нас наибольшее распространение по сравнению с другими способами сжигания. Некоторые виды низкосортного топлива, например, антрацитовые штыбы, могут сжигаться достаточно экономично только в виде пыли. Раньше антрацитовый штыб выбрасывался в отвал, введение же пылевидного метода сжигания позволило использовать его в качестве топлива на наших электростанциях (ЗуГРЭС, ШтерГРЭС, АртемГРЭС и др.). Также успешно решена задача сжигания подмосковного, челябинского, богословского и других местных бурых углей.

В камерных топках отсутствуют какие-либо подвижные детали, обычно создающие эксплуата-

ционные затруднения в других топках. Благодаря этому топки для сжигания топлива в виде пыли надежно обеспечивают длительную непрерывную работу котла.

Таким образом наряду с высокой надежностью способ сжигания топлива в виде пыли применим к любому топливу вне зависимости от его зольности или влажности. В камерных топках можно сжигать сланцы при зольности их до 60—65%. Сушка во взвешенном состоянии позволила упростить процесс приготовления пыли и для таких топлив, как бурные угли или фрезерный торф с влажностью W_p до 50—55%. Переход с одного вида топлива на другой осуществляется легче на пылесжигающих установках. Это дает возможность иметь агрегаты, годные для использования многих видов топлив.

К недостаткам камерных топок относится дополнительный расход энергии на приготовление пыли, значительно снижающий общий к. п. д. нетто по сравнению с механическими топками. Процесс пылеприготовления сложен и удорожает начальную стоимость установки и ее эксплуатацию. В связи с этим современная техника стремится всемерно упростить процесс пылеприготовления и найти возможность сжигать топливо во взвешенном состоянии при грубом размоле, с размером кусочков в пределах 0—10 мм. Задачей последнего способа является полный отказ от пылеприготовления. Однако в настоящее время точечная техника не преодолела еще всех трудностей на этом пути. Процесс горения при таком сжигании протекает несколько иначе, чем в обычной пылеугольной топке.

Каждая установка, использующая топливо в виде пыли, имеет пылеприготовительную установку; в ней готовится и подается к горелкам пыль нужной тонкости и влажности.

Предварительное дробление топлива. Прежде чем пустить топливо в мельничный агрегат, его предварительно подвергают дроблению до определенного размера кусков. Допускаемый после дробления конечный размер кусков для топлив, требующих специальной сушки перед размолем, имеет пную величину, чем для топлив, направляемых в мельницу без предварительной подсушки.

Сушка, независимо от начальной влажности топлива, в настоящее время чаще всего объединяется с процессом приготовления пыли и не требует особых устройств для предварительного удаления влаги из топлива вне системы пылеприготовления. Поэтому каких-либо специальных требований к топливу по влажности современные схемы пылеприготовления не предъявляют.

Допускаемый размер кусков угля, поступающих в систему пылеприготовления, связан с влажностью топлива. Обычно при сушке топливо доводится до гигроскопической влажности; для бурых углей допустимо превышение последней на 3—5%. Для углей, у которых рабочая влажность превышает гигроскопическую больше чем на 8—10%, необходимо применение спе-

циальных сушилок в системах пылеприготовления. Для таких установок начальный размер кусков должен быть не больше 10 мм. Чем мельче продукт, поступающий в сушильно-мельничную систему, тем экономичнее и надежнее работает как система сушки, так и система размола.

Для углей, у которых рабочая влажность превышает гигроскопическую не больше чем на 8—10%, возможно осуществить пылеприготовление без наличия сушилки. Сушка в этом случае производится в самом мельничном агрегате. Для углей с указанной влажностью допустим начальный размер кусков до 20—25 мм. Дробильное устройство, дающее максимальный размер кусков 20—25 мм, обычно состоит из одной дробилки. Некоторое повышение расхода энергии на размол в этом случае перекрывается с избытком упрощением дробильной установки.

Таким образом размер начального куска, а следовательно, и схема дробильной установки связаны с влажностью топлива. Для углей, имеющих $W_p - W_c > 10\%$, начальный размер кусков не должен быть больше 10—12 мм; для углей, имеющих $W_p - W_c < 8-10\%$, начальный размер кусков допустим до 25 мм.

Топливо обычно прибывает на станции с размером кусков 0—200 мм, а иногда (сланцы) до 600 мм. Так как в систему пылеприготовления и сушки топливо должно поступать кусками 0—25 или 0—10 мм, оно подвергается предварительному дроблению в валковых или молотковых дробилках. На дробильные машины топливо поступает с размером кусков не более 200 мм. Незначительная часть (2—3%) кусков угля размером больше 200 мм дробится вручную на решетках разгрузочного помещения.

Уменьшение размера кусков в дробильной машине характеризуется кратностью дробления. Под этой величиной подразумевают отношение максимального размера начальных кусков D_k к максимальному размеру кусков раздробленного материала d_k :

$$e = \frac{D_k}{d_k} \quad (423)$$

Кратность дробления зависит от конструкции дробилки и от принципа дробления.

Чтобы предохранить дробильные машины от повреждения могущими попасть в них с топливом металлическими частями, перед ними устанавливают магнитные сепараторы, улавливающие железо. Для лучшего использования дробилок перед ними устанавливают качающиеся грохоты, отделяющие мелочь, имеющуюся в топливе. Грохот распределяет топливо по ширине дробилки и равномерно подает в нее топливо. Схема совместной работы грохота и дробилки показана на фиг. 161.

Производительность дробильной машины определяется из уравнения:

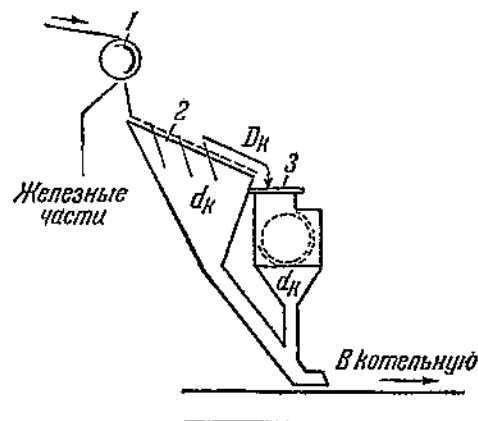
$$B_{др} = B_{гр} - \eta_{гр} B_{мел} \quad (424)$$

где $B_{гр}$ т/час — количество топлива, поступающего на грохот;

$B_{мел}$ т/час — количество топлива размером меньше отверстия в сите грохота;

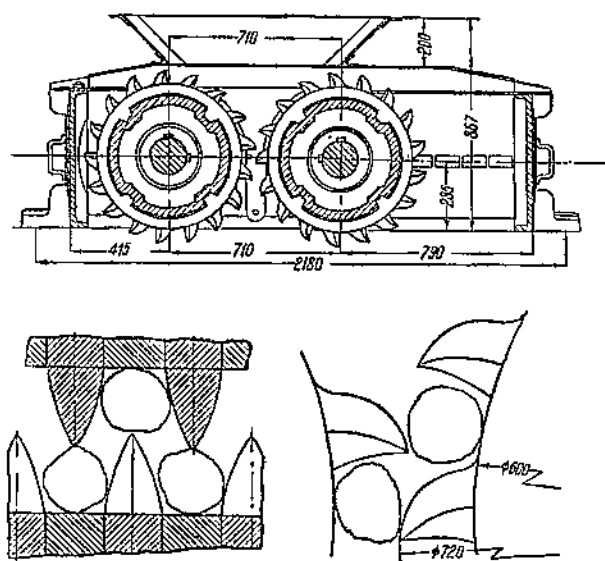
$\eta_{гр}$ — к. п. д. грохота, обычно равный 0,6—0,75.

Шиповая валковая дробилка, иногда применяемая в котельных установках, состоит из двух валков, снабженных шипами и вращающихся навстречу друг другу (фиг. 162). Один из валков вращается в неподвижных, а другой — в скользящих подшипниках. При вращении куски топлива захватываются зубцами в полости дробилки и раздавливаются. При этом размер кусков доводится до величины, отвечающей зазору



Фиг. 161. Общая схема одноступенчатой дробильной установки.

1—магнитный сепаратор; 2—грохот; 3—дробилка.



Фиг. 162. Валковая дробилка.

между валками. В случае попадания очень твердого материала или металла подвижный валок отодвигается. Этим дробилка предохраняется от поломок. Под действием пружины отошедший валок возвращается в прежнее положение. Шиповые дробилки работают, главным образом, по принципу раздавливания и частично по принципу раскалывания.

Привод дробилки осуществляется через ременную передачу.

Как показывает практика, применение валковых дробилок целесообразно в том случае, когда кратность дробления должна быть не больше 4—5 и размер кусков при выходе из дробилки не меньше 15—20 мм. Для более мелкого дробления шиповые дробилки не пригодны. Валковые же дробилки с гладкими или рифлеными валками работают неудовлетворительно вследствие замазывания барабанов влажным топливом.

Для надежной работы валковой дробилки необходимо, чтобы диаметр валка превышал размер куска по крайней мере в три-четыре раза, иначе возможно заваливание дробилки крупными кусками, не проходящими между валками. Для предохранения дробилки от замазывания устанавливаются ножи, снимающие

грязь с валков во время работы. Установка ножей вызывает необходимость коридорного расположения шпиров на валках.

Расход энергии на дробление обычно невелик и колеблется в пределах от 0,3 до 0,4 квт час/т в зависимости от материала и кратности дробления; мощность мотора дробилки может быть грубо приближенно

найдена из выражения:

$$N_{др} = 0,1 \cdot e \cdot B_{др} \text{ квт.} \quad (425)$$

Таблица 48

Основные размеры и данные работы валковых дробилок для угля и кокса

Выписка из ОСТ/НКТП 3435

№ дробилок	Основные размеры валков в мм		Для угля								Ориентировочные габариты в мм			Ориентировочный вес в т
	диаметр <i>D</i>	длина <i>L</i>	Максимальная крупность кусков исходного материала в мм	Щель между валками в мм	Число оборотов валков в минуту		Наименьшая производительность в т/час		Наибольшая установочная мощность в кВт	длина	ширина	высота		
					быстроходные валки	тихоходные валки	быстроходные валки	тихоходные валки						
1	450	500	200	50	120	50	40	40	9	2,25	2,25	0,75	3	
2	600	750	250	60	120	50	80	80	14	2,75	2,75	0,9	6	
3	900	900	360	90	100	40	120	120	20	3,5	3,25	1,1	10	
4	900	1 200	360	90	100	40	160	160	28	3,75	3,75	1,1	15	
5	1 200	900	480	120	75	30	220	220	40	4,4	3,5	1,3	15	
6	1 200	1 200	480	120	75	30	300	300	55	4,5	4,0	1,3	20	

Примечание. Производительность дана как наименьшая при нормальном питании.

Таблица 49

Основные размеры и данные работы молотковых дробилок

Выписка из ОСТ/НКТП 3436

№ дробилок	Основ- ные раз- меры в мм		Ширина загрузочного отверстия в мм		Число оборотов ротора в минуту		Наименьшая производи- тельность в т/час для каменного угля при ши- рине разгрузочной ще- ли между колосниками 25 мм при числе об/мин ротора		Устано- вочная мощ- ность в квт		Ориентиро- вочные габ- аритные раз- меры в мм			Ориентировочный вес в т
	диаметр <i>D</i>	длина <i>L</i>	мини- мальное	макси- мальное	мини- мальное	макси- мальное	мини- мальная	макси- мальная	длина <i>P</i>	ширина <i>Q</i>	высота <i>R</i>			
1	375	200	150	1 500	2 800	1,7	2,5	7	10	700	950	720	0,50	
2	450	600	200	1 250	2 300	10,0	15,0	20	35	770	1 500	750	1,60	
3	800	600	400	1 000	1 300	36,0	48,0	55	70	1 300	2 100	1 200	3,80	
4	800	900	400	1 000	1 300	62,0	92,0	80	100	1 300	2 500	1 200	4,70	
5	1 000	800	500	800	1 000	66,5	106,0	85	120	1 400	1 500	1 420	7,90	
6	1 000	1 200	500	800	1 000	98,0	147,5	120	180	1 400	3 100	1 450	11,70	
7	1 300	1 200	750	600	800	126,0	170,0	150	210	1 750	3 150	1 750	16,50	
8	1 300	1 600	650	600	800	169,0	276,0	200	280	1 800	3 600	1 800	19,00	

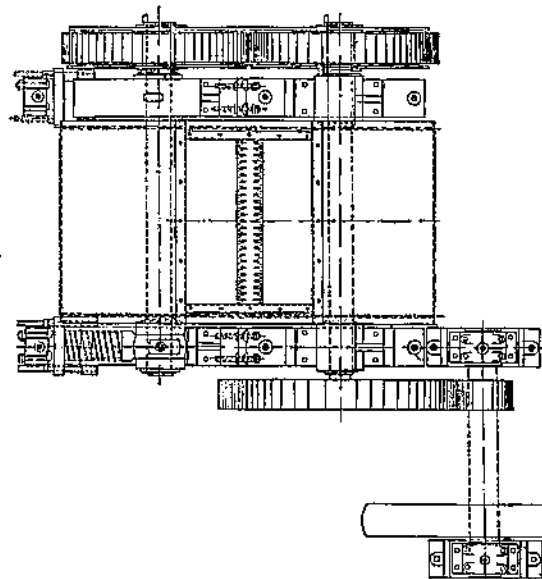
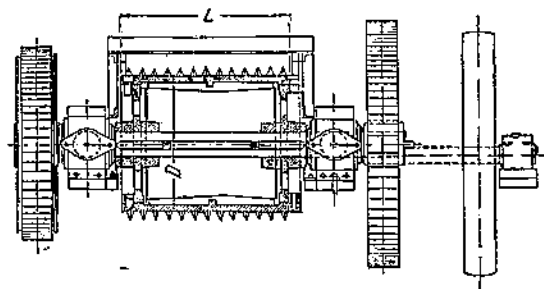
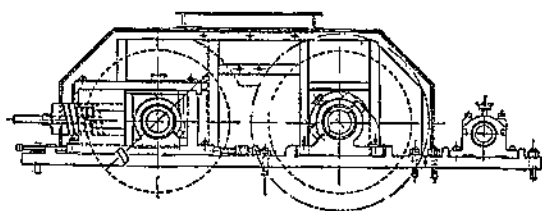
В эксплуатации валковые дробилки просты и надежны. Более всего изнашиваются зубья. Дробилка при этом начинает хуже захватывать материал и производительность ее понижается. Это требует смены валков или отдельных зубьев. Вследствие малой кратности дробления и ограниченной пригодности для мелкого дробления валковые дробилки на энергетических установках имеют узкую область применения.

Фиг. 163 и табл. 48 дают основные размеры шиповых дробилок по ОСТ/НКТП 3435. Допустимый размер начальных кусков 60—480 мм; конечный продукт не мельче 0—15 мм.

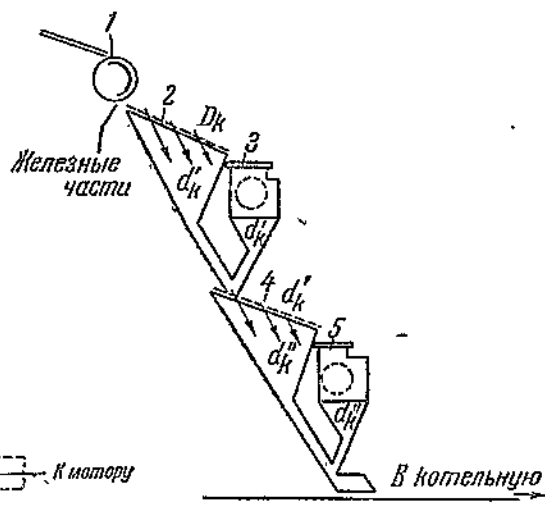
Молотковая дробилка работает по принципу удара. Она состоит в основном из ротора, вращающегося в корпусе 1 (фиг. 164). Ротор дробилки представляет собой вал 2 со свободно качающимися на осях 4 молотками 3. Уголь равномерно подается в дробилку через верхнее отверстие питателем или грохотом. Ударами молотков уголь дробится. Куски топлива отбрасываются на плиты 5, где продолжается размельчение кусков. Окончательное дробление осуществляется в полости машины на специальной решетке 6, отверстия которой определяют конечные размеры кусков. Скорость вращения ротора изменяется в пределах от 500 до 1 000 об/мин при окружной скорости молотков от 30 до 50 м/сек. Зазор между молотками и решеткой равен 3—5 мм. Первоначальная величина кусков угля, поступающего в дробилку, может доходить до 250 мм. Кратность дробления зависит от размера отверстий решетки 6. Обычная кратность дробления находится в пределах 8—10, но при очень мелком дроблении может доходить до 15—25. Привод дробилки осуществляется через ременную передачу или непосредственно через муфту. Последнее при установке предохранительных шпилек проще и надежнее.

При влажном топливе работа молотковых дробилок удовлетворительна лишь до определенной тонкости дробления. При высокой тонкости дробления и влажном топливе происходит замазывание отверстий решетки, вследствие чего производительность дробилки сильно падает, а удельный расход энергии возрастает. Поэтому для влажных материалов конечный размер кусков ограничивается 8—10 мм. Дробление влажных сланцев для вихревых топок Макарьева, требующее размера кусков 2—3 мм, на этих дробилках происходит неудовлетворительно.

Производительность молотковой дробилки по мере износа молотков и по мере увеличения промежутка между решеткой и ротором падает.

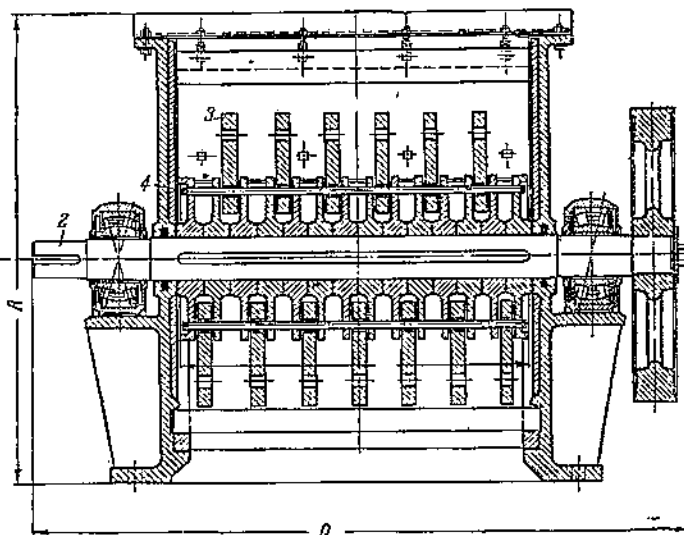
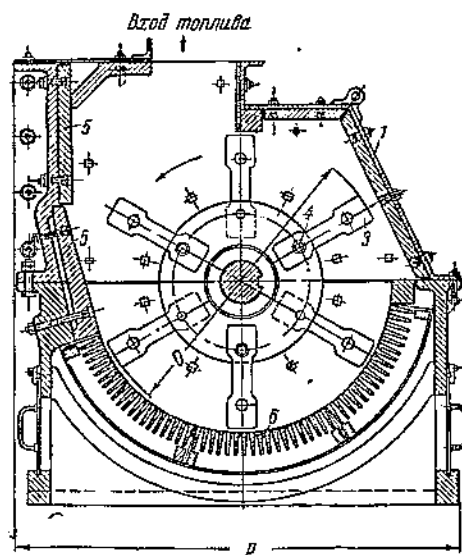


Фиг. 163. Вальковая дробилка. Габаритный чертеж.



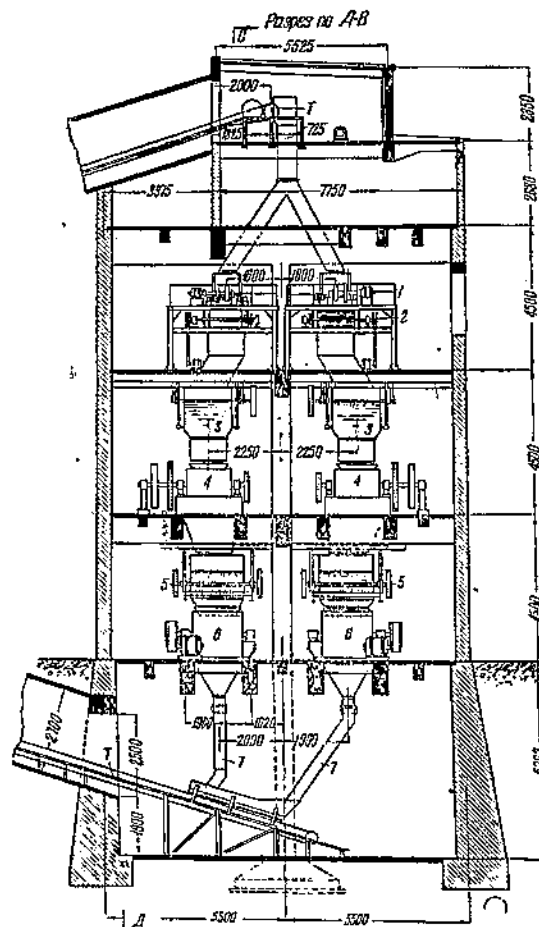
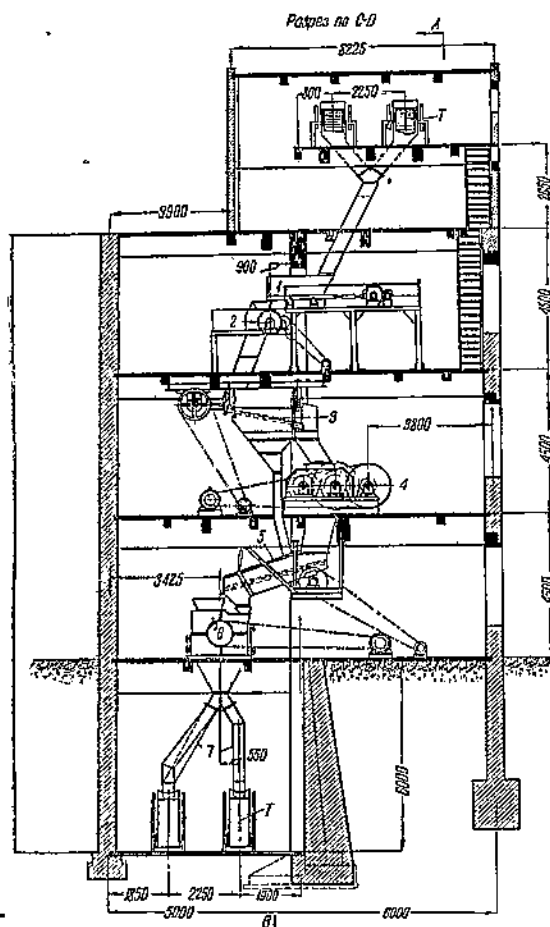
Фиг. 165. Общая схема двухступенчатого дробления.

1—магнитный сепаратор; 2—грохот первой ступени; 3—дробилка первой ступени; 4—грохот второй ступени; 5—дробилка второй ступени.



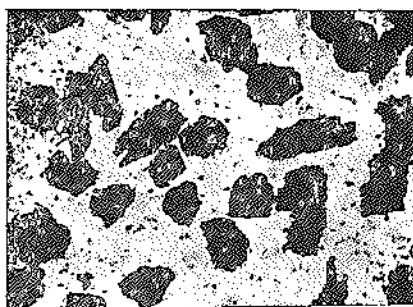
Фиг. 164. Однороторная молотковая дробилка.

1—корпус; 2—вал; 3—молотки; 4—оси молотков; 5—плиты футеровки; 6—решетка.



Фиг. 166. Дробильное устройство для подмосковного угля.

1—питатель; 2—магнитный сепаратор; 3—грохот первой ступени; 4—валковая дробилка первой ступени; 5—грохот второй ступени; 6—молотковая дробилка второй ступени; 7—течка к транспортеру; Т—транспортер.



Фиг. 167. Микрофотография угольной пыли, оставшейся на сите № 70×50.

Одновременно увеличивается количество крупных фракций.

Износ металла у молотковых дробилок сравнительно велик, что требует частой смены молотков. Расход металла молотков только на истирание составляет обычно от 10 до 20 г на тонну производительности. Используется же на дробление $1/5$, $1/10$ веса молотков, т. е. полный расход металла находится в пределах от 100 до 200 г на тонну пропускаемого продукта.

Расход энергии на дробление зависит от кратности дробления и колеблется от 0,5 до 2,5 $квт/т$. Мощ-

ность дробилки можно грубо определить из выражения

$$N_{др} = keB_{др} \text{ квт}, \quad (426)$$

где для бурых подмосковных углей:

$$\begin{aligned} \text{при } e = 2-8 & \quad k = 0,1, \\ \text{при } e = 20-30 & \quad k = 0,05; \end{aligned}$$

для сланца:

$$\begin{aligned} \text{при } e = 2-8 & \quad k = 0,15, \\ \text{при } e = 20-25 & \quad k = 0,1. \end{aligned}$$

Основные размеры молотковых дробилок даны в табл. 49.

При кратности дробления $e \geq 20$ применяют обычно двухступенчатое дробление. В первой ступени возможно использование валковых дробилок (дробление с 200 до 50 $мм$), а во второй — молотковых (дробление с 50 до 8 $мм$). Общая схема такой дробильной установки показана на фиг. 165.

При последовательной работе двух дробилок совместно с грохотами для наимыгоднейшего использования мощности устанавливаемых машин целесообразно больше загружать первую ступень. Наимыгоднейшая кратность дробления первой ступени грубо составляет

$$e_1 = 0,5 e.$$

На фиг. 166 показано типичное дробильное устройство при установке на первой ступени валковой дробилки и на второй ступени — молотковой дробилки.

Согласно правилам технической эксплуатации при наличии двух ступеней дробления должна быть предусмотрена возможность работы помимо первой ступени дробления.

Опытами, проведенными ВТИ в 1939—1940 г. на Сталиногорской ГРЭС — по дроблению подмосковного угля и на СартэЦ — по дроблению сланца, показано, что измельчение этих топлив с 200 до 10—12 мм вполне надежно обеспечивается в одной ступени дробления при применении молотковых дробилок. Работа одноступенчатого дробления проверена как для летних, так и для зимних условий. И в том и в другом случае дробление протекало бесперебойно. Измельчение мерзлого материала требует значительно большей затраты энергии (для сланцев почти в два раза).

Базирываясь на этих опытах, следует рекомендовать в качестве основной одноступенчатую схему дробления, изображенную на фиг. 161. Эта схема помимо простоты самой дробильной установки дает возможность значительно удешевить и всю схему топливоподачи. При малых установках это особенно заметно.

49. Свойства и характеристика угольной пыли

Обычно угольная пыль представляет смесь частиц размером от 0 до 300 μ с преобладанием мелких фракций. Максимальное количество пыли падает на размер от 20 до 50 μ в зависимости от тонкости помола.

Пылинки, рассматриваемые под микроскопом, обнаруживают неправильную форму (фиг. 167). Конфигурация их определяется, главным образом, родом топлива и не зависит от метода получения пыли. Форма пылинки значительно отклоняется от куба или шара, что затрудняет точное определение поверхности пыли.

Свеже насыпанный порошок представляет собой рыхлую пушистую массу с малым насыпным весом. Насыпной вес свежесыпанной пыли составляет 0,45—0,5 $т/м^3$. Со временем порошок слеживается и насыпной вес его может достигать 0,8—0,9 $т/м^3$. При расчетах бункеров пыли величину среднего насыпного веса можно принимать равной 0,7 $т/м^3$.

Угольная пыль сыпуча и легко растекается под влиянием легких толчков. В бункере угольной пыли можно утонуть и задохнуться, поэтому вход в бункер, наполненный пылью, запрещается; внутренний осмотр опорожненных бункеров требует осторожности. Угол естественного откоса острожно насыпанной пыли составляет 25—30° и зависит от вида топлива и тонкости помола. Тонкая пыль, особенно углей, богатых летучими, склонна к быстрому слеживанию, чем объясняются частые завалы и образование сводов в бункерах пыли. Угрубление пыли улучшает процесс вытекания и уменьшает опасность сводообразования.

В смеси с воздухом при больших концентрациях пыли (25:1) пыль образует подвижную эмульсию, легко перекачиваемую, как вода. Это свойство пыли используется в пневматическом

транспорте пыли на большие расстояния. В обычных системах пылеприготовления пыль легко транспортируется воздушным потоком. Запыленный воздух с трудом очищается от пыли, что является основным затруднением в применении так называемых разомкнутых систем пылеприготовления, требующих сброса потоков отработанного воздуха в атмосферу.

При лежании пыли, особенно углей, богатых летучими, склонна к самовозгоранию. Это является одной из главных причин взрывов пыли в системах пылеприготовления. Пылевоздушная смесь в концентрациях, обычных в котельных установках, взрывоопасна и поэтому требует специальных мер, предохраняющих установки от взрывов.

Качество угольного порошка с точки зрения тонкости помола обычно определяется методом просева отобранной пробы пыли через ряд сит со стандартным размером отверстий.

В нашей практике для рассева применяются сита американского и германского стандартов.

Обычно сита, употребляемые для анализа угольной пыли, представляют собой цилиндры высотой 50—80 мм, диаметром 200 мм. Низ такого цилиндра затягивается металлической сеткой — ситом. Сито сверху закрывается крышкой и внизу имеет приставное дно. Соответствующая штамповка ободов сит позволяет надевать одно сито на другое (фиг. 168).

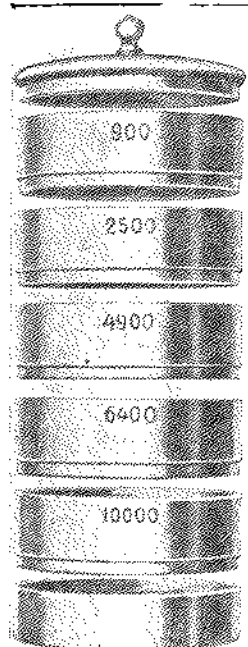
Германские сита характеризуются числом отверстий на один линейный сантиметр. Это число является номером сита. Таким образом на один линейный сантиметр сита № 30 приходится 30 отверстий, следовательно, 900 отверстий на 1 $см^2$. Сито № 100 имеет на одном линейном сантиметре 100 отверстий и на квадратном 10 000 $отверстий/см^2$.

Американские сита характеризуются числом отверстий на линейный дюйм. Номер сита у них определяет количество отверстий, приходящихся на линейный дюйм.

Для рассева угольной пыли обычно применяют пять номеров сит (табл. 50). Характеристика сит разных стандартов дана в табл. 50—52. В качестве основных сит для определения тонкости помола в нашей практике употребляют сита № 70 и № 30 германского стандарта или сита № 170 и № 65 американского стандарта.

При подробном анализе состава пыли тонкость ее определяют путем рассева на ряде сит пробы весом 25 или 50 г. При ручном рассеве проба просеивается предварительно на тонких ситах. Та часть пробы, которая остается на сите, носит название остатка R ; она выражается в процентах от первоначально взятого количества и принимается за характеристику тонкости помола.

В индексе при R ставится номер сита. Та часть пыли, которая проходит через сито, называется проходом или просевом и обычно обозначается буквой D , причем номер сита также ука-

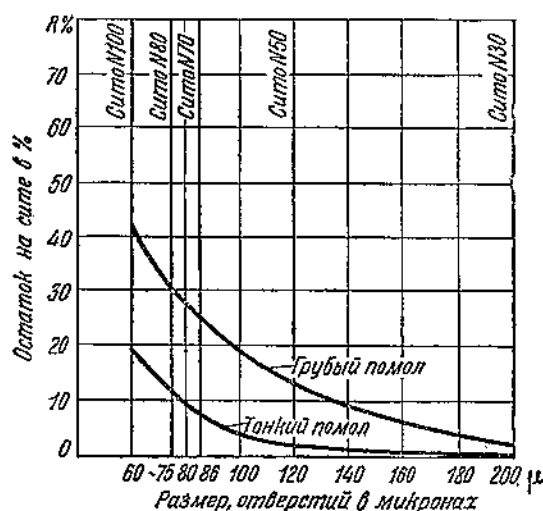


Фиг. 168. Набор сит для исследования угольной пыли.

зывается в индексе. В американской практике проход обозначается знаком минус, остаток — знаком плюс. Так, обозначение 90% минус 200 меш (отверстий) обозначает 90% прохода через сито № 200, или, иначе, 10% остатка на сите № 200.

В качестве основной чисто практической характеристики тонкости помола в нашей практике считается остаток на сите № 70 (170) R_{70} , иногда к нему добавляют остаток на сите № 30 R_{30} . В американской практике характеристикой тонкости помола считается проход через сито № 200 американского стандарта.

Различные типы топлив требуют различной тонкости помола. Например, АШ рекомендуется размалывать так, чтобы остаток на сите № 70 был равен 8%. Пыль



Фиг. 169. Неполные помольные характеристики угольной пыли.

АШ с остатком 20—25% на сите № 70 не пригодна для сжигания, характеризуя грубый помол.

Однако характеристика тонкости помола одной или двумя точками не дает полного представления о действительном распределении фракций помола во всем образце. Для установления закономерности и большей наглядности полученные на всех пяти ситах результаты выражают в виде диаграммы. На оси абсцисс такой диаграммы откладывают размер частиц в микронах (или что то же, размер отверстий сита), на оси ординат — остатки на каждом сите в процентах. Такие кривые называются неполными помольными характеристиками (фиг. 169) — неполными потому, что они охватывают лишь определенный диапазон пылевых частиц, возможных для анализа методом ситового отсева. Для определения количества более тонких фракций, чем 60 μ , применяют иные методы (метод отцеивания или метод отстоя).

Помольная характеристика зависит от сорта топлива, метода размола и качества отсеивания. Обычно первые два условия оказывают влияние при грубом размоле, при тонком размоле особое значение имеет качество сепарации.

Таблица 50
Характеристика германских сит (DIN 1171 1934 г.)

№ сит	Количество отверстий на 1 см ²	Ширина отверстий в μ	Диаметр проволоки в μ
30	900	200	130
50	2500	120	80
70	4900	90	55
80	6400	75	50
100	10000	60	40

Таблица 51
Характеристика сит Американского бюро стандартов

№ сит	Количество отверстий на 1 см ²	Размер отверстий в μ	Диаметр проволоки в μ
70	810	210	140
80	1125	177	119
100	1580	149	102
120	2240	125	86
140	3150	105,5	74
170	4270	88	63
200	6180	74	53
230	8770	62	46
270	10330	53	41
325	15620	44	36

Таблица 52
Характеристика сит Тейлора

№ сит	Количество отверстий на 1 см ²	Размер отверстий в μ	Диаметр проволоки в μ
65	652	208	183
100	1540	147	107
115	2030	124	96,5
150	3480	104	66
170	4450	88	61
200	6180	74	53

Как было сказано, качество пыли характеризуется остатком на сите № 30 и 70. Между этими двумя величинами существует следующая связь, вытекающая из общей закономерности для помольных характеристик [см. формулу (429)]:

$$R_{30} = 100 \left(\frac{R_{70}}{100} \right)^{2,22^n} \% \quad (427)$$

где величина n та же, что и в формуле (429), и зависит от названных выше условий. Величина n меняется при изменении R_{70} согласно зависимости

$$n = n_0 \approx a R_{70}, \quad (428)$$

где n_0 и a — постоянные.

Выражение (427), представляющее наиболее универсальную связь между R_{30} и R_{70} , справедливо при изменении остатков от 0 до 100%.

В узких пределах изменений R_{30} между R_{70} и R_{30} обычно применяется линейная зависимость. Например, для сланца при $30 < R_{30} < 10$:

$$R_{70} = 1,025 R_{30} + 22\%.$$

В широких диапазонах изменения R_{30} последний тип формулы непригоден и заменяется выражением (427).

Пользуясь ситовыми характеристиками, можно определить поверхность всех пылинок, если принять форму пылинок за шар или куб. По Розину помольная характеристика выражается следующим уравнением:

$$R = 100 e^{-bx^n}, \quad (429)$$

где b и n — постоянные коэффициенты, причем b определяет тонкость помола образца;

x в м — размер зерна;

e — основание натуральных логарифмов.

Обработкой формулы Розина было получено выражение для определения поверхности пыли. Формула эта при $n = 1,25$ имеет следующий вид:

$$O = 260 \sqrt[1,25]{\ln \frac{100}{R_{70}}} \text{ м}^2/\text{кг}. \quad (430)$$

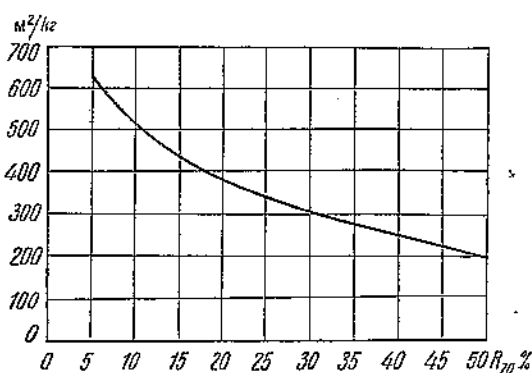
На фиг. 170 показана поверхность 1 кг пыли в зависимости от тонкости помола. Удельный вес топлива принят равным 1,2.

Превращение крупнокускового материала в порошок требует расхода энергии. Чем больше кратность дробления, т. е. чем тоньше помол, тем больше затрачивается энергии на единицу веса получаемого продукта.

Согласно закону Риттингера расход энергии на размол прямо пропорционален количеству вновь обнажаемых поверхностей материала. Этот закон может быть выражен следующей формулой:

$$\mathcal{E} = A(O_2 - O_1) \text{ кватч/кг}, \quad (431)$$

где A кватч/м² — коэффициент пропорциональности, показывающий расход энергии на единицу поверхности;



Фиг. 170. Поверхность 1 кг пыли в зависимости от тонкости помола, т. е. остатка на сите № 70.

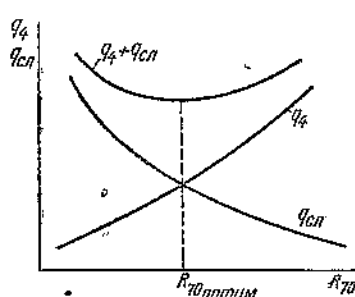
O_2 м²/кг — конечная удельная поверхность материала после размолы;
 O_1 м²/кг — начальная удельная поверхность материала до размолы.

Чем меньше остаток на сите № 70, тем более тонким получается продукт; удельная поверхность пыли при этом возрастает. Таким образом чем тоньше помол, тем больше расход энергии на получение 1 т порошка. Следовательно, с точки зрения уменьшения расхода энергии на пылеприготовление целесообразно идти на более грубый помол.

Экономичность установки определяется не только работой пылеприготовления. С угрублением пыли растет потеря топлива от недожога в топочной камере; например, для пыли АШ потеря с механическим недожогом увеличивается почти прямо пропорционально остатку на сите № 70. Экономия, полученная в процессе приготовления пыли, теряется при сжигании топлива. Ввиду этого тонкость помола необходимо выбирать с учетом потерь как в пылеприготовлении, так и в топочной камере.

Тонкость помола, при которой сумма затрат по обоим процессам имеет минимальное значение, является наиболее экономичной в условиях данной установки.

На фиг. 171 показаны примерно изменения расходов в системе пылеприготовления и потери от недожога в топочной камере в зависимости от тонкости помола порошка, характеризуемой остатком на сите № 70. Кривая $q_{сл}$ показывает затраты на пылеприготовление, уменьшающиеся с увеличением остатка на сите № 70.



Фиг. 171. Определение оптимальной тонкости помола.

q_4 — потери с механическим недожогом; $q_{сл}$ — расход на пылеприготовление.

Кривая $q_{сд}$ строится на основе эксплуатационных данных по формуле:

$$q_{сд} = \frac{\partial \cdot 860}{\eta_{см} Q_p} A_m + p A_m + A_e \quad (432)$$

где ∂ ккал/т — расход на пылеприготовление, включая и пневматический транспорт, в зависимости от R_{70} ;

$\eta_{см}$ — средний к. п. д. станции, изменяющийся обычно в пределах 18—23%;

Q_p ккал/кг — низшая теплотворная способность топлива;

A_m — стоимость топлива в руб.;

p — удельный расход металла на разлом в кг/т;

A_m — стоимость этого металла в руб/кг;

A_e — служебные расходы (смазка, обслуживание и т. п.) в руб/т.

Последняя величина мало меняется от R_{70} , поэтому может считаться постоянной, почти не влияющей на выбор экономической величиной R_{70} .

Кривая q_d дает затраты, связанные с потерей топлива с механическим недожогом, увеличивающимся при угрублении помола. Суммарный расход дает минимум при некоторой тонкости помола, которая и является наиболее экономичной для рассматриваемого случая.

В практических условиях для оценки этой величины необходимо знать зависимость потери с механическим недожогом и удельного расхода энергии на пылеприготовление от изменения тонкости помола. Более или менее точное определение экономической тонкости помола является задачей сложной и требует накопления значительного количества экспериментального и эксплуатационного материала. Поэтому для приближенного определения рациональной тонкости помола для той или другой установки следует пользоваться практическими данными работы других установок.

Наивыгоднейшая тонкость помола зависит прежде всего от количества летучих, содержащихся в угле. При углях, богатых летучими, время горения меньше по сравнению с тощими углями при неизменной тонкости помола, т. е. угли с большим выходом летучих допускают более грубый помол (при одинаковой потере от механического недожога).

На основании ряда практических материалов можно рекомендовать следующее эмпирическое выражение для определения наивыгоднейшей тонкости помола в зависимости от количества летучих в угле:

$$R_{70} = 6 + 0,7 L_p \% \quad (433)$$

Опыт работы советских установок дает возможность вместе с тем указать желаемую тонкость помола для разных углей СССР. Табл. 53 дает рекомендуемую тонкость помола для различных топлив. В последней колонке приведены значения остатка R_{70} по нормам Главэнергопрома и Главэнерго, а в предпоследней колонке — значения, полученные по вышеприведенной формуле.

Как видно, самая тонкая пыль требуется при размоле АШ (8% остатка на сите № 70). Для сланцев, содержащих до 80% летучих на горючую массу, тонкость помола по данным ВТИ рекомендуется 50% остатка на сите № 70 с возможностью, в зависимости от типа топочной камеры, увеличения остатка до 60—70%.

Новейшие исследования размола и сжигания бурых углей с большим выходом летучих (подмосковных, челябинских и др.) показали, что указанная тонкость помола для этих углей чрезмерна.

Экономическое сжигание бурых углей возможно при $R_{70} = 35—40$ и даже 50%. Это позволит значительно уменьшить удельный расход энергии. Так, при размоле подмосковного угля в шаровых барабанных мельницах суммарный расход энергии можно понизить до 10—11 ккал/т против обычного 15—17 ккал/т. При применении шахтно-мельничных установок расход энергии на размол подмосковного угля уменьшается до 7—8 ккал/т.

50. Мельницы для размола топлива

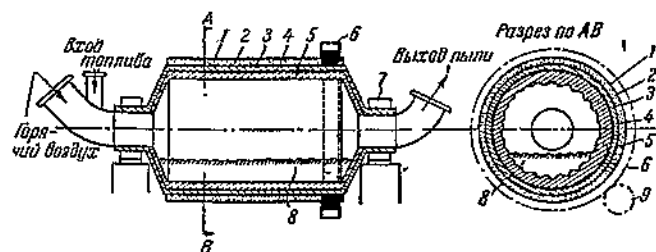
Шаровая барабанная мельница. Наибольшее распространение в СССР получили шаровые барабанные мельницы. Такая мельница чаще всего представляет собой цилиндрический барабан диаметром от 2 до 3 м и длиной от 3 до 5 м. Барабан, заполненный шарами, вращается со скоростью 18—25 об/мин. Шаровые мельницы поэтому относятся к классу тихоходных машин. Окружная скорость барабана составляет 2,5—3 м/сек. При вращении барабана шары, находящиеся внутри мельницы, поднимаются на определенную высоту, с которой падают на ниже лежащий слой шаров, разбивая при этом частицы угля. Иногда шары перекатываются один по другому. Размол угля осуществляется как истиранием его между шарами, так и ударами падающих шаров. Барабан

Таблица 53

Рекомендуемая тонкость помола (остаток на сите № 70) для различных углей СССР

Уголь	$A_p\%$	$W_p\%$	$L_p\%$	$L_p\%$	$Q_p\%$	По формуле	Нормальное
						$R_{70}\%$	$R_{70}\%$
АШ	16	7,4	4	3,06	6 040	8,1	8
Газовый донецкий	10,4	5,9	39	32,65	6 430	28,9	20
Подмосковный	18,2	32	45	22,4	2 980	21,7	20
Кизеловский	21,5	5,5	41	29,92	5 720	27,0	20
Челябинский	15,6	19	41	26,8	4 850	24,8	20
Карагандинский	16,3	7	29	22,25	6 120	21,5	10—12
Кузнецкий (прокопьевский)	6,6	6	18	16,6	7 090	17,6	15
Араличевский	14,6	9	12	9,16	6 090	12,5	10
Егоршинский антрацит	17,9	5,9	8	6,1	6 050	10,3	13—15
Сланцы волжские	13	57,9	79	23	2 010	50*	—

* По данным ВТИ.



Фиг. 172. Конструктивная схема шаровой барабанной мельницы.

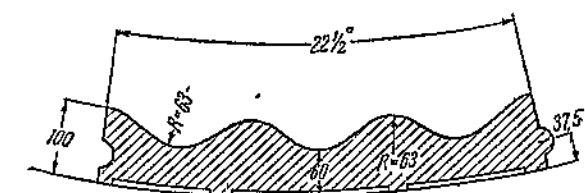
1—обшивки; 2—тепловзвуконная изоляция; 3—стенки барабана; 4—асбестовая прокладка; 5—броня; 6—большая шестерня; 7—подшипник; 8—шары; 9—малая шестерня.

мельницы футерован изнутри толстыми защитными плитами, чаще всего волнистой формы, изготавливаемыми из марганцовистой стали. Торцевые крышки барабана несут полые цапфы, через которые с одной стороны загружается сырой уголь, а с другой выдается угольная пыль (фиг. 172). Форма брони влияет на работу мельницы. Согласно практике советских установок лучший эффект дает волнистая броня (фиг. 172а).

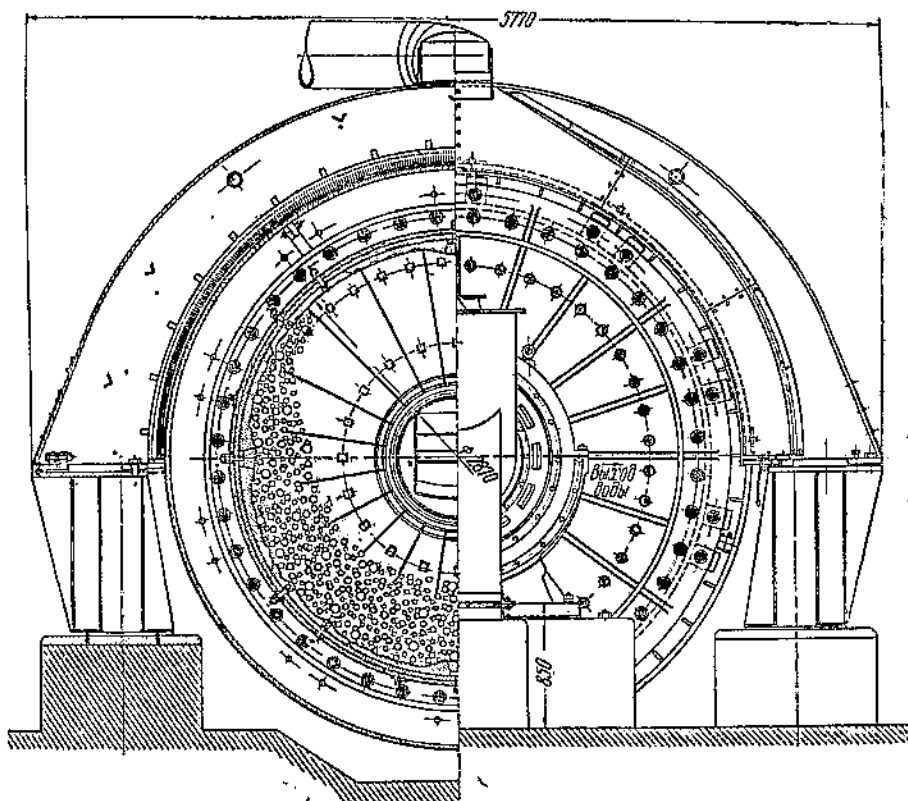
Барабан загружается шарами до 20—35% своего объема. Шары при размоле сильно изнашиваются и поэтому изготавливаются обычно из марганцовистой стали, обладающей чрезвычайно высоким сопротивлением износу при ударной нагрузке. Весь барабан покоится на двух подшипниках, в наших конструкциях скользящего типа, охлаждаемых маслом или водой. При таком охлаждении допускается температура проходящего через подшипники воздуха до 300—350°. Для вращения барабана служит надета на него большая шестерня-венец, сцепляющаяся с малой шестерней, приводимой во вращение через редуктор от мотора.

Следует отметить, что в эксплуатационных условиях редуктор мельницы и ее шестеренная передача оказываются наиболее ненадежными частями машины.

В связи с этим большой интерес для нашей промышленности представляет применение к шаробарабанным мельницам привода Фридкина (фиг. 173). В этой конструкции электропривод объединяется непосредственно с самой мельницей: ротор мотора неподвижно соединен с корпусом барабана. Первые испытания этого привода в 1939 г. указали на полную надежность его в эксплуатационных условиях.



Фиг. 172а. Деталь броневой плиты мельницы типа Кеннеди. Броня набирается из 16 плит по окружности. Ширина каждой плиты 140 мм. Радиус барабана 1500 мм.

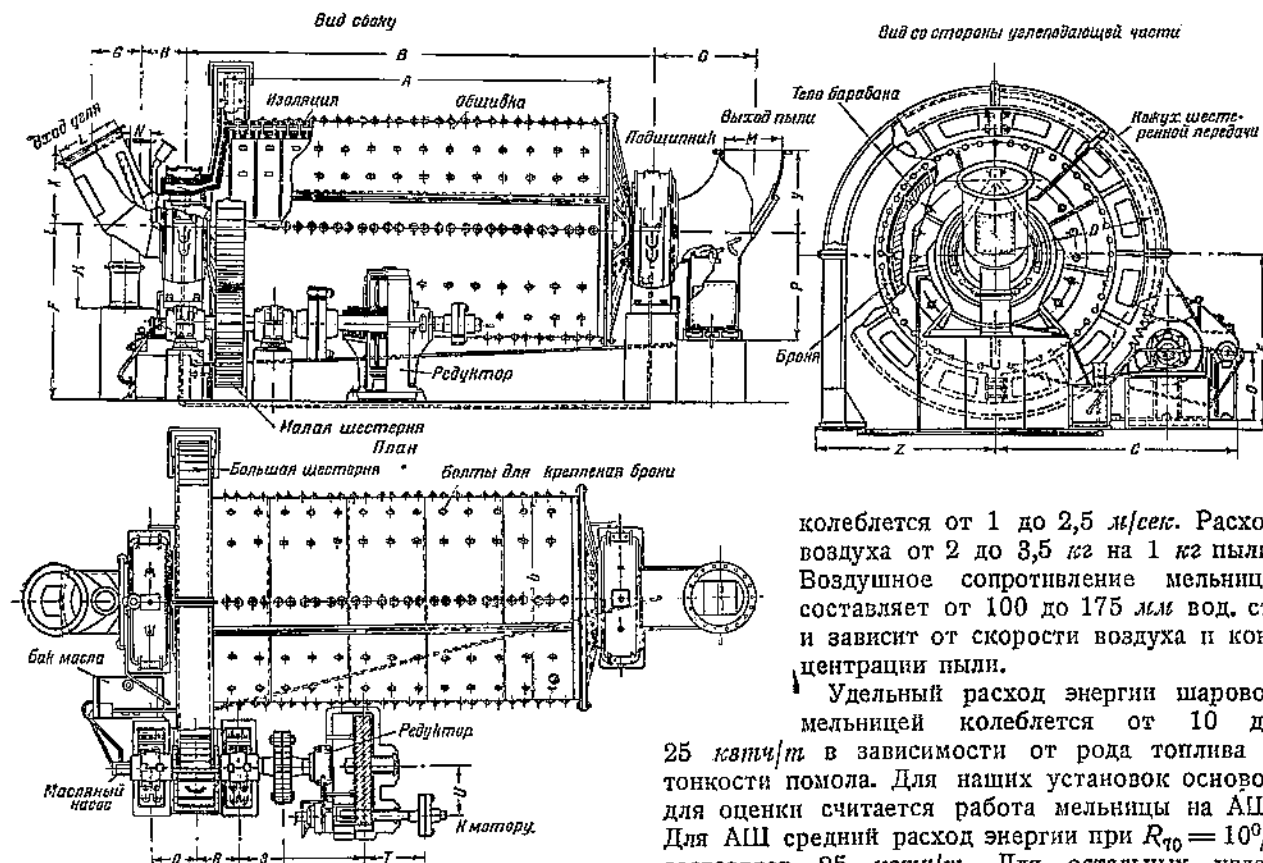


Фиг. 173. Шаровая углеразмольная мельница типа 287/470 с приводом Фридкина.

При высокой температуре газов во избежание потери тепла барабан мельницы изолируется. Тепловая изоляция одновременно является и звуковой, которая крайне желательна, так как сильный шум работающих шаров вредно действует на окружающих. Для изоляции применяются асбестовые или пробочные прокладки между броней и корпусом барабана. Кроме того, обычно поверх барабана настилается слой войлока толщиной до 70 мм.

На фиг. 174 показан габаритный чертеж мельниц советского изготовления.

Пыль, получаемая в шаровой мельнице, обычно удаляется из нее воздушным потоком. Скорость воздуха, отнесенная к полному сечению барабана,



Фиг. 174. Габаритный чертеж шаровой мельницы.

Размеры шаровых барабанных мельниц
(По каталогу НКМ СССР, 1939 г.)

№ по пор.	Тип мельницы	Основные размеры	b	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Ш-8	232/380	2 593	4 096	4 950	2 463	3 360	1 944	1 120	1 050	490	700
2	Ш-12	287/430	3 143	4 503	5 598	2 865	4 030	1 950	1 950	1 220	560	800
3	М-1	287/470	3 128	—	6 025	3 911	4 568	1 850	1 850	1 475	—	1 003

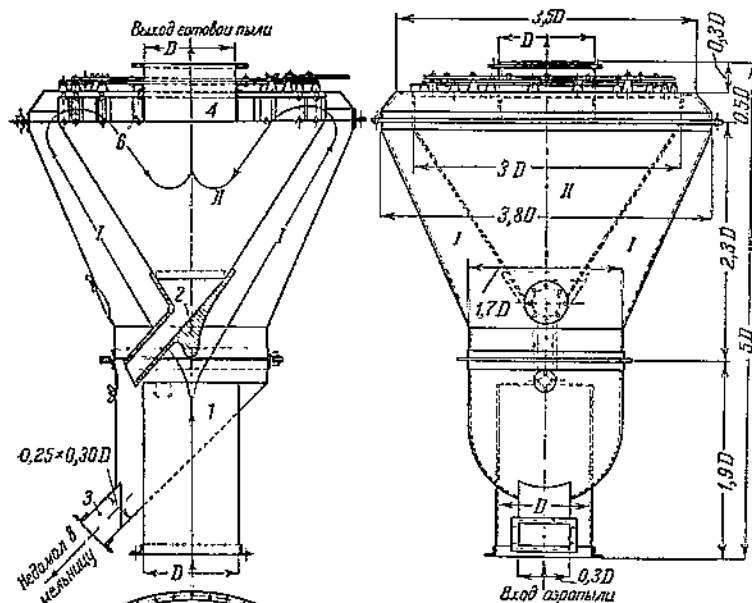
№ по пор.	Тип	Основные размеры	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
1	Ш-8	232/380	1 120	650	650	200	930	1 014	400	400	427	1 465	614
2	Ш-12	287/430	1 140	750	750	200	900	1 140	400	400	472	1 895	715
3	М-1	287/470	1 100	700	700	310	—	1 100	560	560	—	—	836

№ по пор.	Тип	Основные размеры	Мотор		Вес шаров, т	Завод-изготовитель
			квт	об/мин		
1	Ш-8	232/380	260	730	23	Таганрогский завод «Красный котельщик» ЛМЗ
2	Ш-12	287/430	460	730	38	
3	М-1	287/470	380	730	28	
			430		32	
			525		39	

колеблется от 1 до 2,5 м/сек. Расход воздуха от 2 до 3,5 кг на 1 кг пыли. Воздушное сопротивление мельницы составляет от 100 до 175 мм вод. ст. и зависит от скорости воздуха и концентрации пыли.

Удельный расход энергии шаровой мельницей колеблется от 10 до 25 квтч/т в зависимости от рода топлива и тонкости помола. Для наших установок основой для оценки считается работа мельницы на АШ. Для АШ средний расход энергии при $R_{10} = 10\%$ составляет 25 квтч/т. Для остальных углей расход энергии меняется в зависимости от качества самого топлива, его сопротивляемости помолу и допустимой тонкости помола.

Сепаратор. Для регулирования тонкости помола и уменьшения количества крупных фракций служат сепараторы. На фиг. 175 изображен сепаратор, применяемый на советских мельницах. Воздух с пылью поступает к сепаратору со скоростью 15—20 м/сек. Скорость во внешнем конусе сепаратора I снижается до 4—6 м/сек и крупные частицы в этой части сепаратора выпадают. Далее смесь воздуха и пыли направляется в верхнюю часть сепаратора, где проходит через ряд окон с тангенциально поставленными в них створками и попадает во второй конус сепаратора II. Здесь вследствие направления потока по касательной возникает центробежная сила, под действием которой происходит дальнейшее выпадение крупных пылинки и окончательное разделение готовой пыли от недомолотой. Крупные частицы, осевшие во втором конусе, направляются обратно в мельницу по каналу 3. Таким образом в сепараторе для разделения пыли применяются два принципа: понижение скорости и центробежная сила. Регулирование тонкости помола осуществляется, главным образом, за счет изменения центробежной силы. Поворотом створок направление потока может быть сделано ближе к касательной или к нормали. При тангенциальном направлении



Фиг. 175. Мельничный сепаратор.

I — внешний конус; II — внутренний конус; 1 — вход аэропыли; 2 — отбойный конус; 3 — спуск недомолотой пыли; 4 — выход готовой аэропыли; 5 — управление створками; 6 — регулирующие створки (жалюзи). Диаметр входного патрубка $D=650, 750, 900, 1050$ мм.

потока центробежная сила растет, количество выпадающей крупной пыли увеличивается, тонкость помола улучшается. Для лучшего использования центробежной силы входная скорость потока в малый конус II не должна быть меньше 10 м/сек . Сопротивление сепаратора воздушному потоку колеблется в пределах $70\text{—}150 \text{ мм вод. ст.}$. Оно тем больше, чем больше нагрузка мельницы по воздуху и чем больше концентрация пыли.

Качество работы сепаратора определяется по его к. п. д., под которым подразумевается отношение количества тонких фракций определенного размера, выходящего из сепаратора, к количеству этих фракций, поступившему в сепаратор. Если в сепаратор (фиг. 176) поступает $B' \cdot D'$ пыли в час, то количество мелких фракций перед сепаратором будет $B' \cdot D'$, где D' — проход (в долях) через какое-то условное сито.

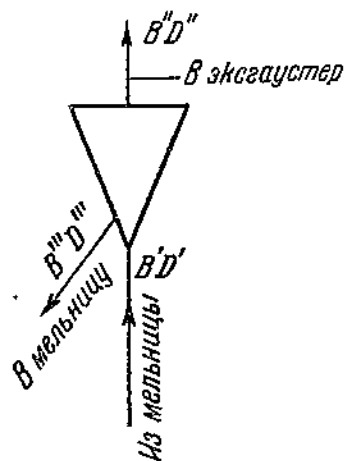
Точно так же в готовом порошке тонкой пыли того же размера будет $B'' \cdot D''$.

Коэффициент полезного действия сепаратора:

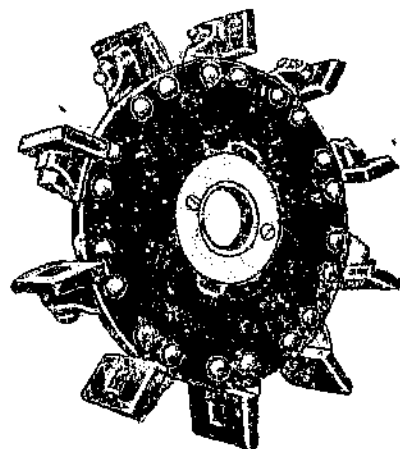
$$\eta_{\text{сеп}} = \frac{B'' \cdot D''}{B' \cdot D'} = \frac{D''}{B' \cdot D'} = \frac{D''}{K_c \cdot D'} \quad (432)$$

Величина $K_c = \frac{B'}{B''}$ называется кратностью циркуляции.

Понижение к. п. д. сепаратора не означает понижения производительности мельницы, так как с увеличением



Фиг. 176. Схема работы сепаратора.



Фиг. 177. Ротор аэробильной мельницы.

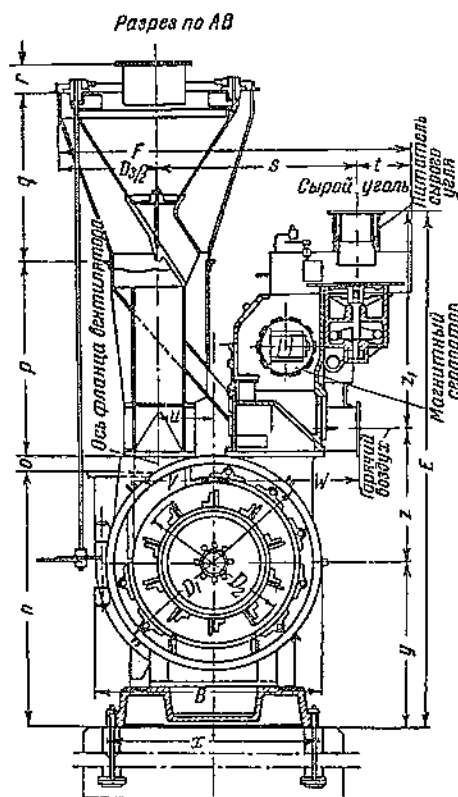
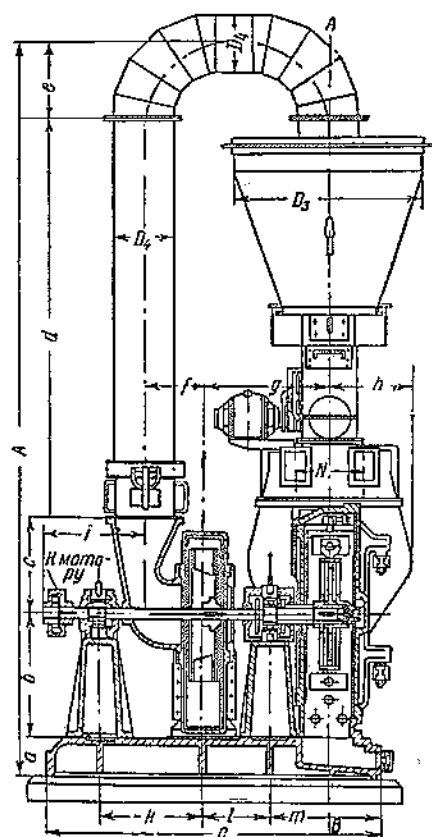
K_c растет общее количество мелких фракций перед сепаратором и количество пыли, выдаваемой сепаратором (производительность мельницы).

Быстроходные мельницы. Быстроходные мельницы являются мельницами ударного типа. Наибольшее распространение получили мельница типа Резольтор и аэробильная мельница ЦККБ. Основной мелющей деталью этой мельницы является диск с укрепленными неподвижно по окружности его биллами (фиг. 177).

Таблица 54

Характеристики аэробильных мельниц ЦККБ

Характеристика	Размерность	Тип А	Тип Б
Производительность по бурому углю	т/час	2,5	5,0
Мощность мотора	л. с.	50	120
Число оборотов в минуту		1500	1500
Расход воздуха	$\text{м}^3/\text{час}$	4200	8000
Разрежение эксгаустера при 20°C	мм вод. ст.	350	350
Допустимая температура воздуха	$^\circ \text{C}$	300	300
Вес мельницы	т	5,7	—



Фиг. 178—179. Габаритные размеры аэробильной мельницы ЦККБ.

Диск помещается в бронированный кожух и закрепляется консольно на валу. Число оборотов диска обычно 1 500 в минуту. Диаметр диска 850—1 000 мм. Окружная скорость 60—75 м/сек.

На фиг. 178—179 показан общий вид быстроходной мельницы ЦККБ, а в табл. 54—55 даны характеристики и габаритные размеры мельниц типов А и Б. Подача угля в мельницу регулируется дисковым питателем. Уголь, пройдя магнитный сепаратор, поступает в полость мельницы. Под влиянием ударов топливо размельчается и выбрасывается из корпуса мельницы в сепаратор, откуда недомолотая пыль снова направляется в мельницу. Производительность аэробильных мельниц ЦККБ

Холостой ход мельницы составляет примерно 30—35%.

Расход энергии на аэробильные мельницы малой мощности 15—17 квтч/т подмосковного угля при $R_{70} = 20—22\%$.

Главным недостатком этих мельниц является сильный износ бил, требующий смены ротора через 150—250 час.

Поэтому для размола твердых углей или содержащих много колчедана, а именно антрацита, кизеловского и подмосковного угля и др. эти мельницы не пригодны. При размоле угля с большим содержанием колчедана перед мельницей необходимо устанавливать сепаратор колчедана.

типов А и Б равна соответственно 2,5 и 5 т/час по бурому углю. Мельницы компактные, легкие и неприхотливы в эксплуатации. Как видно из фиг. 178, на одном валу с мельницей устанавливается и эксгаустер. Наиболее пригодны эти мельницы для малых мощностей при размоле мягких углей. Мельница хорошо справляется с влажным углем. Воздух для сушки подводится частью с углем, частью через специальную розетку на торце мельницы по оси вала. С ростом влажности топлива производительность мельницы падает. Так, для подмосковного угля при повышении влажности топлива от 15 до 35% и температуре воздуха $t_a = 200^\circ \text{C}$ производительность мельницы падает с 1 200 (100%) до 750 кг/час (62%). Работа мельницы на очень влажном топливе ненадежна вследствие замазывания отдельных ее деталей (питателя, сепаратора). С повышением температуры воздуха производительность этой мельницы, как и других, растет.

Таблица 55

Габаритные размеры аэробильных мельниц ЦККБ

Тип	A	B	C	c	F	a	b	c	d	e	f	g	h	i	l	k	m	n	o
А	4 059	1 325	1 970	3 055	2 044	253	650	600	2 059	500	375	760	400	610	420	650	630	1 500	40
Б	4 977	1 570	2 110	3 310	2 324	250	770	670	3 807	500	425	830	535	650	430	700	720	1 640	130

Тип	p	q	r	s	t	u	v	w	x	y	z	z ₁	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	s ₁	s ₂	P ₁
А	954	910	155	1 164	380	335	480	865	1 110	900	830	1 325	1 255	850	1 000	275	650	760	1 040
Б	1 267	1 170	290	1 284	380	365	583	955	1 330	1 020	925	1 365	1 460	1 000	1 320	375	700	830	1 250

По мере износа бил ухудшается тонкость помола и падает производительность мельницы.

Среднеходные мельницы. В США имеют большое распространение среднеходные шаровые мельницы, работающие по принципу раздавливания. Конструкция такой мельницы, запатентованной ЦКТИ по типу американских мельниц, дана на фиг. 180. Размол топлива происходит путем раздавливания топлива катящимися шарами. Давление на шары создается весом самих шаров, кольца и усилием пружин. По американским данным для удовлетворительного размола необходимо давление на каждый шар около 700 кг.

Вертикальный вал мельницы в конструкции ЦКТИ приводится во вращение от безредукторного электропривода Фридкина. На верхней части вала насажено среднее кольцо, вращающееся вместе с валом. При вращении кольца благодаря давлению пружин и силе трения кольцом увлекаются оба ряда шаров. Нижнее неподвижное кольцо удерживается от вращения шпонкой 1, а верхнее кольцо — упором 2, приваренным к корпусу мельницы. По мере износа шаров и колец вся мелющая часть мельницы опускается. Давление пружин при этом регулируется винтами 3.

Топливо подается на верхний ряд шаров. Пройдя шары, топливо, отброшенное центробежной силой на кольцевую решетку, просыпается вниз через отверстия решетки на второй ряд шаров, где происходит дальнейший процесс размола. Воздух с температурой 200—250° С поступает в мельницу непосредственно под нижний ряд шаров. Пройдя шары и отверстия среднего размольного кольца, воздух, захватывая пыль, поднимается мимо верхнего ряда шаров в сепаратор. Грубые частицы, выпадающие из сепаратора, снова направляются на верхний ряд шаров.

Мельница не приспособлена для влажного топлива, так как топливо попадает под верхний ряд шаров, не соприкасаясь с горячим воздухом, что может привести к замятию кольца и торможению мельницы. Она может применяться для углей с небольшой внешней влажностью, 5—6%, или работать при малых концентрациях.

Применение шаровых мельниц раздавливания ограничивается углями с большим коэффициентом трения. Скользкие угли (АШ) не пригодны для размола на таких мельницах. Размеры кусков топлива, поступающих в мельницу, при диаметре шаров 230—250 мм не должны превышать 10—12 мм.

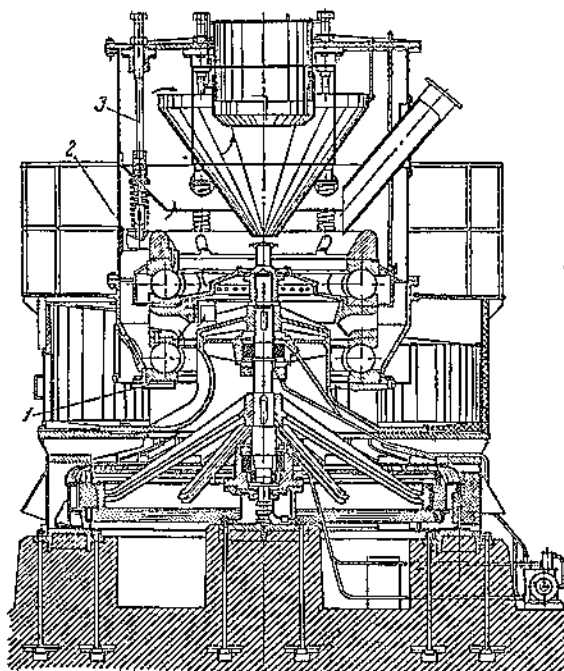
Число оборотов вала мельницы 100—150 в минуту, окружная скорость 8—9 м/сек. Такие мельницы строятся в США производительностью до 50 т/час. При уплотнении рабочей камеры шаровые мельницы могут работать под давлением, что упрощает и удешевляет систему индивидуального пылеприготовления. В СССР область применения таких мельниц может ограничиваться углями Кузнецкого бассейна, тонкими углями, отсевами газовых углей и т. п. Расход энергии по тощему углю 12—15 кат/т, при $R_{70} \approx 150\%$.

51. Основы расчета барабанных мельниц и характеристика их работы

При вращении барабана шаровой мельницы шары в барабане поднимаются до определенной высоты, зависящей, с одной стороны, от степени заполнения барабана, с другой, — от числа его оборотов. Чем выше число оборотов барабана, тем больше центробежная сила, прижимающая шары к стенке. При некотором числе оборотов центробежная сила будет равна весу шаров:

$$mg = m \frac{w^2}{r}, \quad (435)$$

где m кг·сек²/м — масса шара;



Фиг. 180. Фрикционная шаровая мельница ЦКТИ.

1—вход сырого угля; 2—верхнее размольное кольцо; 3—нижнее размольное кольцо; 4—ведущее среднее кольцо (стрелками показано движение воздуха).

w м/сек — окружная скорость шара;

r м — радиус барабана.

Если подставить $w = \frac{\pi D_g n}{60}$, то получается уравне-

ние для определения числа оборотов барабана, при котором центробежная сила равна силе тяжести шара. Это число оборотов носит название критического. Из вышеприведенного уравнения

$$n_{кр} = \frac{42,3}{\sqrt{D_g}} \text{ об/мин.} \quad (436)$$

Обычно мельница работает с числом оборотов, составляющим примерно 75% от $n_{кр}$, поэтому

$$n_{кр} = \frac{32}{\sqrt{D_g}} \text{ об/мин,} \quad (437)$$

что по теории шаровой мельницы соответствует наилучшим условиям работы шаров. При критическом и большем критического числе оборотов наступает явление прилипания шаров к броне и работа мельницы нарушается.

В действительности прилипания шаров в рабочих условиях даже при критическом числе оборотов еще не происходит. Ряд экспериментальных наблюдений показывает, что работа мельничной установки при доведении числа оборотов до критического продолжает улучшаться.

Мощность мотора для привода шаровой барабанной мельницы зависит от веса шаров в ней, числа оборотов и качества выполнения мельницы (последнее определяет мощность холостого хода). В зависимости от веса шаров при 20—25-процентном заполнении объема барабана шарами мощность холостого хода (без за-

грузки топливом) может быть достаточно точно выражена формулой:

$$N_{\text{ш}}^{\text{в}} = 7 \cdot G_{\text{ш}} \sqrt{D_{\text{б}}} \text{ квт}, \quad (438)$$

где $G_{\text{ш}}$ — вес шаровой загрузки;
 $D_{\text{б}}$ — внутренний диаметр барабана.

Это выражение относится к числу оборотов барабана, определяемому из формулы (437). При повышении числа оборотов мощность, затрачиваемая на вращение, растет почти пропорционально числу оборотов.

При размоле потребляемая мощность определяется из выражения:

$$N_{\text{ш}} = k \cdot 0,23 G_{\text{ш}} \cdot n \cdot D \text{ квт}, \quad (439)$$

где k — коэффициент, зависящий от сорта топлива и тонкости помола. Чем меньше коэффициент трения и тоньше помол, тем ближе к единице коэффициент k . В расчетах можно принимать для сланцев $k = 1,2$ при $R_{70} = 40-50\%$; для тощего угля $k = 1,1$ при $R_{70} = 15-20\%$; для АШ $k = 1$ при $R_{70} = 8-10\%$;

n — число оборотов барабана в минуту.

Формула (439) при обычных формах брони справедлива при изменении n от 0 до $n_{\text{кр}}$ и степени загрузки мельницы до 30—35%.

Производительность мельницы растет пропорционально затрачиваемой мощности, поэтому при повышении числа оборотов производительность увеличивается. Вместе с тем, как показывает опыт, улучшается тонкость помола. Таким образом при повышении числа оборотов барабана мельница, давая большую производительность, работает при понижении удельном расходе энергии на размол. Во всех случаях мощность мотора зависит лишь от количества загруженных шаров и числа оборотов и не зависит от производительности мельницы. Мощность на вращение пустого барабана без шаров составляет обычно 10% от $N_{\text{ш}}$ при $\varphi = 0,2$, где φ — степень заполнения барабана.

При постоянном числе оборотов производительность мельницы зависит от тонкости помола, количества загруженных шаров, скорости и температуры воздуха, формы брони, сорта мента шаров, работы сепаратора. Связь между тонкостью помола и производительностью мельницы определяется выражением:

$$B_{\text{ш}} = a \cdot R^n \text{ т/час}, \quad (440)$$

где n — показатель, зависящий от качества сепарации и сорта топлива.

Чем тоньше помол, тем меньше величина n . Для АШ этот коэффициент у мельниц с сепарацией равняется 0,25; для подмосковного угля — 0,25—0,3; для бессепараторных мельниц величина n колеблется в пределах 0,58—0,75.

При увеличении веса загруженных шаров затрачиваемая мощность растет; производительность мельницы, однако, не увеличивается пропорционально весу загруженных шаров. Связь между весом загруженных шаров G и производительностью мельницы $B_{\text{ш}}$ может быть дана в виде эмпирической формулы:

$$B_{\text{ш}} = b \cdot G^m \text{ т/час}, \quad (441)$$

где m меняется в пределах 0,5 (ЦКТИ) до 0,6 (ВТИ).

Из выражения (441) видно, что чем больше шаров в мельнице, тем работа их хуже. Объясняется это тем, что по мере заполнения объема барабана значительно ухудшается работа внутреннего слоя шаров. Можно компенсировать это ухудшение, увеличивая скорость воздуха.

Как правило, при увеличении скорости воздуха в барабане производительность мельницы возрастает. По опытам СталГРЭС при увеличении скорости воздуха, считая по сечению пустого барабана, с 1,5 до 2,5 м/сек

производительность мельницы возрастала с 30 до 32 т/час, т. е. примерно на 7%.

Чем выше начальная температура воздуха, тем легче протекает размол; поэтому желательна высокая скорость воздуха в барабане и высокая начальная температура воздуха. Во избежание взрыва надо следить за тем, чтобы конечная температура воздуха на выходе из мельницы не превышала допускаемых величин — для АШ 90—100°С; для углей, богатых летучими, 70°С.

При гладкой или сильно изношенной волнистой броне производительность мельницы уменьшается, так как при гладкой броне подъем шаров незначителен. Лучшие результаты дает броня с накладками или волнистая. Поэтому целесообразно на гладкой или изношенной волнистой броне наваривать накладки. Высота накладок должна быть не больше максимального диаметра шара, расстояние между накладками — не меньше 8—10 диаметров шара.

При волнистой броне и мелком топливе (АШ—0—6 мм, подмосковный уголь 0—12 мм), загружаемом в мельницу, лучшие результаты дают мелкие шары (30 мм). При ступенчатой броне, обладающей большей захватывающей способностью, при твердых углях (кизельский) и имеющих большие начальные размеры кусков (0—20; 0—25 мм) целесообразно применение более крупных шаров (40 мм).

Чем лучше сепаратор выделяет готовую пыль из пылевоздушного потока, тем лучше протекает работа мельницы в целом. Чем больше подается материала в сепаратор, тем больше он выделяет пыли нужного качества. Другими словами, чем выше концентрация пыли перед сепаратором, тем выше производительность мельницы. Чем выше скорость воздуха в барабане мельницы, тем больше кратность циркуляции топлива, тем выше производительность мельницы.

Величина удельной загрузки шаров, необходимая для получения 1 т пыли, зависит от качества топлива и от диаметра барабана. Из формулы (438)

$$G = \frac{N_{\text{ш}}^{\text{в}}}{C \sqrt{D_{\text{б}}}}$$

поэтому

$$\frac{G}{B} = \frac{N_{\text{ш}}^{\text{в}}}{BC \sqrt{D_{\text{б}}}}$$

или, поскольку

$$\frac{N_{\text{ш}}^{\text{в}}}{B} = \mathcal{A},$$

зависимость шаровой загрузки от расхода энергии получает такой вид:

$$\frac{G}{B} = \frac{\mathcal{A}}{C \sqrt{D_{\text{б}}}}. \quad (442)$$

Расход энергии зависит от качества топлива и тонкости помола, определение целесообразной величины которой указано было ранее.

В табл. 56 приведены данные, характеризующие работу шаровых мельниц для различных углей СССР. В последнем столбце дан переводной коэффициент производительности мельницы на определенном топливе по сравнению с работой мельницы на АШ. Коэффициент отнесен к рекомендуемой тонкости помола.

Размер шаров в барабане постоянно уменьшается вследствие их истирания. Истосившиеся шары целесообразно заменять новыми. Шары добавляются обычно периодически — раз в несколько дней. Количество догружаемых шаров определяется из выражения

$$\Delta G = k_{\text{ш}} t \cdot G \text{ кг},$$

где k_m — расход металла на 1 т шаров в кг/т час;
 t — число часов работы мельницы между загрузками в час;
 G — начальный вес шаров в мельнице в т.

Величина k_m зависит от типа установки и качества металла. Обычно она колеблется в пределах 0,15—0,2 кг/т час. Уменьшение веса шаров в барабане обычно видно по амперметру мотора мельницы.

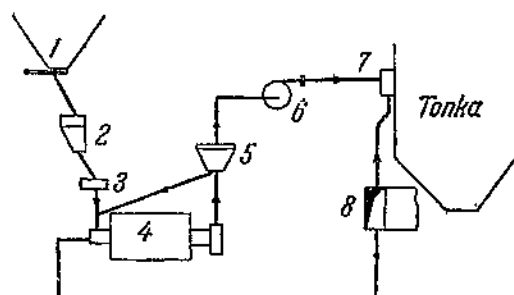
По правилам технической эксплуатации следует загружать мельницы, а также добавлять в них шары диаметром 30 и 40 мм. Добавка шаров производится не реже одного раза в шесть суток. Смена шаров с их взвешиванием необходима не реже чем через 2500—3000 час. работы.

При смене шаров обычно выбрасывают шары диаметром менее 15 мм. При начальной загрузке новыми шарами первая сортировка шаров может быть сделана через 7000—8000 час. работы. В течение дальнейшей работы изношенных шаров сортировка необходима через 2500—3000 час., так как за это время уже накапливается 5—7% мелких шаров (<15 мм).

52. Системы пылеприготовления

Индивидуальная схема пылеприготовления. Индивидуальной схемой пылеприготовления называется такая, в которой отсутствует запас готовой пыли в бункерах и мельница снабжает пылью только непосредственно присоединенный к ней котел.

Сырой уголь (фиг. 181) подается из бункера 1 на автоматические весы 2 и затем на питатель мельницы 3. Назначение питателя — дозировать топливо в нужных пределах и равномерно подавать его в мельницу 4. Уголь проходит через полую цапфу мельницы и подается в барабан воздушным потоком. Получаемая пыль подымается



Фиг. 181. Схема индивидуального пылеприготовления.

1—бункер сырого угля; 2—весы; 3—питатель сырого угля; 4—мельница; 5—сепаратор; 6—эксгаустер; 7—форсунки; 8—короб горячего воздуха.

затем в сепаратор 5. Недомолотые частички возвращаются обратно в мельницу. Готовая пыль эксгаустером 6 нагнетается в топку через ряд горелок 7.

Для подачи сырого угля применяется дисковый питатель (фиг. 182). В основном он состоит из вращающегося диска 1, на который топливо поступает сверху через трубу 2, поставленную по центру диска. Топливо с вращающегося диска сбрасывается с помощью ножей 3. Изменяя положение ножей, можно изменить количество подаваемого топлива. Кроме того, уменьшая высоту трубы над диском, возможно менять высоту слоя, а тем самым, и производительность питателя. Дисковый питатель надежен в работе и достаточно тонко регулируется.

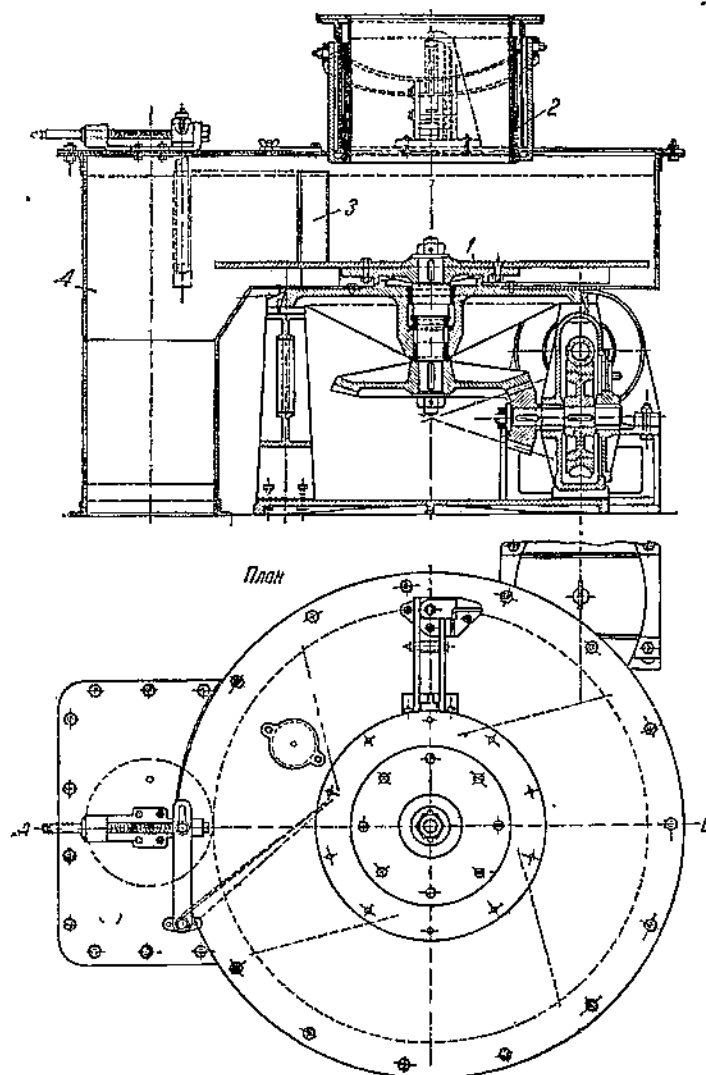
Производительность мельницы при индивидуальной схеме регулируется изменением подачи

Таблица 56

Характерные показатели работы шаровых мельниц типа 232/380 и 287/470 при $\varphi = 0,2—0,22$

№ по пор.	Уголь	Тонкость помола $R_{70}^{\%}$	Удельный расход энергии $\mathcal{E}$ катч/т	Величина шаровой загрузки на весовую единицу топлива		Износ металла на тонну топлива q г/т	Коэффициент размолоспособности k
				$G:B$ т шаров/т топлива			
				$D = 2,32$	$D = 2,87$		
1	АШ	8	25	2,55	2,11	400	1,0
2	Подмосковный	22	11	1,03	0,93	180	2,25
3	Челябинский	25	14,5	1,36	1,22	230	1,72
4	Тоцкий	15	16	1,5	1,35	260	1,55
5	Газовый	25	16	1,5	1,35	260	1,55
6	Кизеловский	25	18,5	1,74	1,56	300	1,35
7	Сланец (Савеловский) . . .	50	12,0	1,12	1,0	195	2,08

Примечание. Удельный расход энергии $\mathcal{E}$ и величина шаровой загрузки $\frac{G}{B}$ для сланцев дается в предположении бессепараторной установки по опытам ВТИ.



Фиг. 182. Дисковый питатель сырого угля.

1—диск; 2—телескопическая регулируемая труба; 3—нож; 4—спускная труба.

топлива питателем с одновременным изменением числа оборотов эксгаустера, т. е. изменением количества воздуха, пропускаемого через мельницу.

При известной тонкости помола количество воздуха должно отвечать производительности мельницы и обеспечивать хорошее использование барабана. При этом необходимо поддерживать нормальное количество угля в барабане. Лучше и проще всего этого можно добиться изменением режима работы эксгаустера, поэтому в индивидуальных схемах эксгаустер должен обязательно иметь регулирование числа оборотов (реостатом или гидромuftой). Это регулирование благоприятно и с точки зрения износа ротора эксгаустера. Регулирование работы эксгаустера влияет на тонкость помола; установка определенной

тонкости помола осуществляется окончательно за счет изменения положения створок сепаратора.

Мощность мотора эксгаустера в индивидуальной системе зависит от сопротивлений, которые эксгаустер должен преодолеть. Обычно вся система (при шаровых барабанных мельницах) поддерживается под некоторым разрежением — от 0 до 20 мм вод. ст.

При переполнении барабана мельницы углем ее сопротивление быстро возрастает, почему степень загрузки мельницы может быть определена посредством дифференциального тягомера. Этот метод является в настоящее время наиболее надежным. Кроме того, степень загрузки мельницы обычно определяется на слух. При опорожнении мельницы ясно слышны удары шаров по броне. При переполнении барабана звук делается глухим, исчезающим.

Полный напор, который должен развивать эксгаустер, с учетом сопротивления горелок, обычно колеблется в пределах от 300 до 400 мм вод. ст. Расход воздуха составляет от 1,5 до 2 кг на 1 кг топлива.

Зная общий напор, развиваемый эксгаустером, и количество пропускаемого воздуха, можно определить мощность мотора эксгаустера в случае пропуска через эксгаустер всего количества топлива:

$$N_0 = \frac{1,1 V_L \cdot H}{1,36 \cdot 75 \cdot 3600 \eta_0} (1 + \mu) \text{ квт}, \quad (443)$$

где H мм вод. ст. — общий напор вентилятора;

$\eta_0 = 0,5 - 0,6$ — к. п. д. вентилятора;

μ кг/кг — концентрация топлива у эксгаустера.

Объем воздуха V_L м³/час вычисляется при температуре за мельницей.

Индивидуальная схема пылеприготовления имеет свои достоинства и недостатки, определяемые синхронностью нагрузки котельного агрегата и мельницы. Вследствие синхронной работы мельницы и котла при падении нагрузки котельного агрегата производительность мельницы соответственно уменьшается, а тонкость помола улучшается. Процесс сжигания делается поэтому более устойчивым, что очень важно при пониженной нагрузке котла. Индивидуальная схема пылеприготовления является наиболее дешевой и простой в обслуживании.

Отсутствие промежуточных запасов пыли заставляет выбирать производительность мельницы $B_{\text{м}}$ по максимуму расхода топлива на котел $B_{\text{мах}}$.

$$B_{\text{м}} = \frac{B_{\text{мах}}}{n_{\text{м}}} \text{ т/час}, \quad (444)$$

где $n_{\text{м}}$ — число мельниц на один котел.

При крупных агрегатах (свыше 90 т/час) обычно устанавливают две барабанные мельницы на котел, при меньших агрегатах — одну. Тесная связь котла и мельницы означает полную зависимость работы котла от работы мельницы. Это требует максимальной надежности действия мельничного оборудования, что в случае сравнительно больших мощностей возможно лишь при шаровой барабанной мельнице. Все же отсутствие резерва у котла является одним из основных неудобств индивидуальной схемы пылеприготовления. При наличии одной мельницы на котел это неудобство особенно резко сказывается.

При индивидуальной схеме во время обычной работы котельного агрегата с нагрузками ниже максимальной мельница недогружена, что увеличивает удельный расход энергии и металла на размол.

Если через N_m обозначить максимальную мощность мельницы, то удельный расход энергии при неполной нагрузке

$$\vartheta = \frac{N_m}{\beta \cdot B_m}, \quad (445)$$

где B_m т/час — производительность мельницы;

β — отношение действительной нагрузки к нормальной.

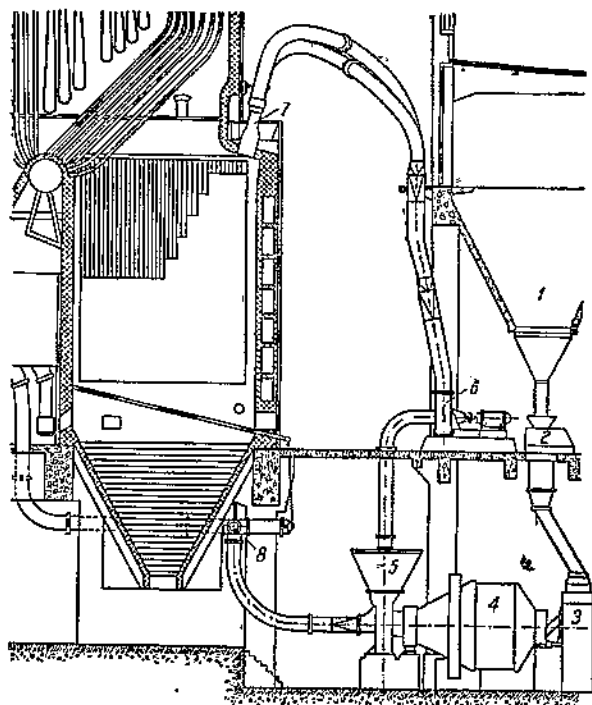
Такой же закономерности подчиняется и расход металла.

Для экономии энергии и металла при пониженной нагрузке котельного агрегата обычно стремятся перейти на работу одной мельницей, если агрегат снабжен двумя мельницами.

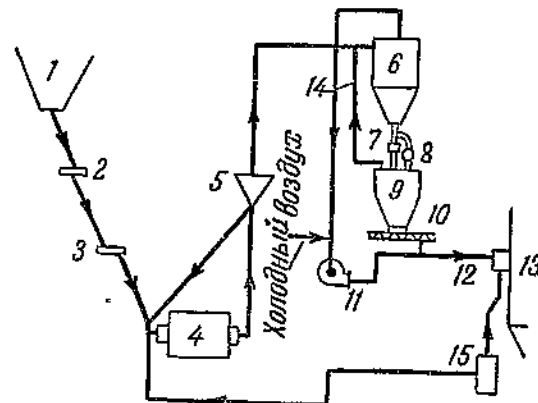
При индивидуальной системе пылеприготовления вся произведенная пыль проходит через эксгаустер, ротор которого изнашивается поэтому за 300—600 час. работы. Частый ремонт эксгаустера понижает как экономичность, так и эксплуатационную надежность схемы, хотя при благоприятных условиях смена ротора не требует ни значительного труда, ни времени. Борьба за удлинение срока работы эксгаустера ведется различными способами. Целесообразно установить эксгаустер с малой окружной скоростью. Утолщение лопаток ротора может повысить длительность работы эксгаустера. Применение стойких материалов (сталинит, вокар и др.) также дает значительный эффект.

Из всего этого следует, что в случае применения индивидуальной системы экономичность обеспечивается лишь при сравнительно ровном графике станции. Надежность же пылеугольной части установки обуславливается наличием на станции двух мельниц на котел или резервных котлов. При установке быстроходных и среднеходных мельниц указанные недостатки индивидуальной схемы пылеприготовления в значительной мере отпадают.

По чисто индивидуальной схеме в СССР работает ряд крупнейших установок (ЗуГРЭС,



Фиг. 183. Пылеприготовительная система ЗуГРЭС.
1—бункер; 2—автоматические весы; 3—питатель; 4—барабанная мельница; 5—сепаратор; 6—экстаузер; 7—горелки; 8—горячий воздух.

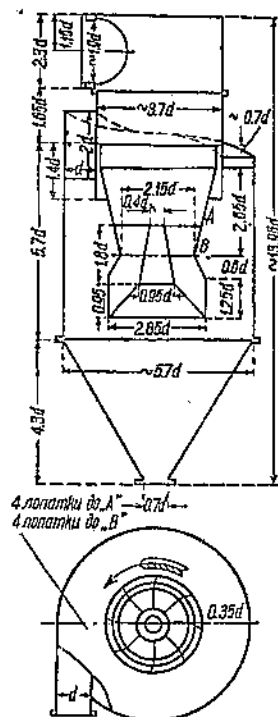


Фиг. 184. Схема пылеприготовления с промежуточным бункером.

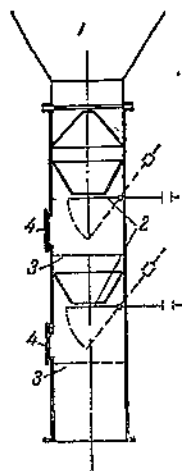
1—бункер сырого угля; 2—весы; 3—питатель сырого угля; 4—мельница; 5—сепаратор; 6—циклон; 7—доплатный затвор; 8—шнек; 9—промежуточный бункер; 10—питатель пыли; 11—эксгаустер; 12—горелки; 13—топки; 14—отсос влаги из бункера; 15—короб горячего воздуха.

СталГРЭС и др.). На фиг. 183 показана установка мельничного оборудования на ЗуГРЭС (котлы 1—8).

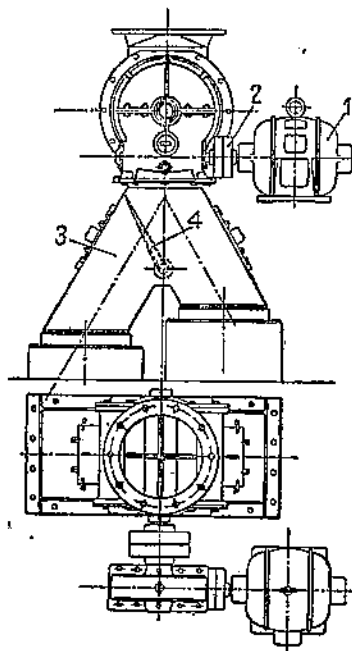
Схема пылеприготовления с бункером пыли. Для устранения недостатков чисто индивидуальной системы применяется система пылеприготовления с промежуточным бункером пыли. В схеме с промежуточным бункером (фиг. 184) уголь из бункера 1 сырого угля подается на весы 2, а затем в питатель 3, откуда забрасывается в мельницу 4. Пыль, полученная в мельнице, подымается в се-



Фиг. 185. Пылевой циклон системы ЦКТИ. Все размеры циклона отнесены к ширине входного патрубка d . Стандартные размеры циклона: $d = 370, 425, 485, 575, 635$; $D = 5,7$, $d = 2100, 2400, 2750, 3250, 3600$.



Фиг. 187. Схема спуска пыли из циклона через две мигалки и две сетки для улавливания пыли. 1—циклон; 2—мигалки; 3—сетки; 4—лючки для осмотра сеток.



Фиг. 186. Лопастной затвор.

1—мотор; 2—муфта; 3—сuction рукав; 4—переходной клапан.

паратор 5, где крупные частицы отделяются от мелких для возврата их в мельницы. После сепаратора пыль подымается воздушным потоком в циклон 6, где 90—92% пыли отделяется от воздуха. Слабо запыленный воздух из циклона отсасывается эксгаустером 11 и направляется к питателям пыли 10 и оттуда к горелкам 12. Пыль, отделенная в циклоне, осаждается в нижней его части, из которой через мигалку или лопастной затвор 7 опускается затем в промежуточный бункер пыли 9, либо в пылевой шнек 8, посредством которого полученную пыль можно передавать в бункер другого котла. Горячий воздух берется из короба у топки 15 и направляется к входной части мельницы. Трубопровод 14 служит для отсоса влаги из бункера пыли.

Подсос холодного воздуха у эксгаустера делается для возможности работы эксгаустера при бездействии системы пылеприготовления. Направление потоков показано на схеме стрелками. По сравнению с чисто индивидуальной схемой описываемая схема

усложнена помимо промежуточного бункера большим количеством пылепроводов, циклоном, шнеком и питателями пыли. В схеме с промежуточным бункером возможны полное отключение мельниц от котла и работа котла за счет запасов пыли в промежуточном бункере или за счет подачи пыли от соседних мельниц. Наличие промежуточных бункеров позволяет равномерно и экономично загружать мельницы, компенсируя колебания нагрузки котельного агрегата за счет емкости пылевых бункеров.

Равномерная нагрузка мельниц дает возможность выгодно использовать их с точки зрения расхода энергии и металла. В лучших условиях в этой системе работает и эксгаустер мельницы, подсасывающий очищенный от пыли воздух, вследствие чего число часов работы его значительно увеличивается по сравнению с индивидуальной системой.

Система с промежуточным бункером получила в СССР наибольшее распространение. Для станций мощностью 25 мвт, оборудованных тремя-четырьмя котлами и имеющих по одной мельнице на котел, система с промежуточным бункером пыли наиболее надежна.

При схеме с промежуточным бункером суммарная производительность всех мельниц может выбираться по максимальной нагрузке всей котельной, если мельницы резервируют одна другую, что дает минимум капитальных затрат. Однако это требует связи между системами не только по пылевому шнеку, но и по воздуху, что недопустимо для взрывоопасных углей, поэтому и при наличии промежуточного бункера производительность мельничной системы большей частью выбирают по максимальному потреблению топлива котлом. Однако мельницы в эксплуатационных условиях не должны постоянно находиться в работе, как в индивидуальной схеме.

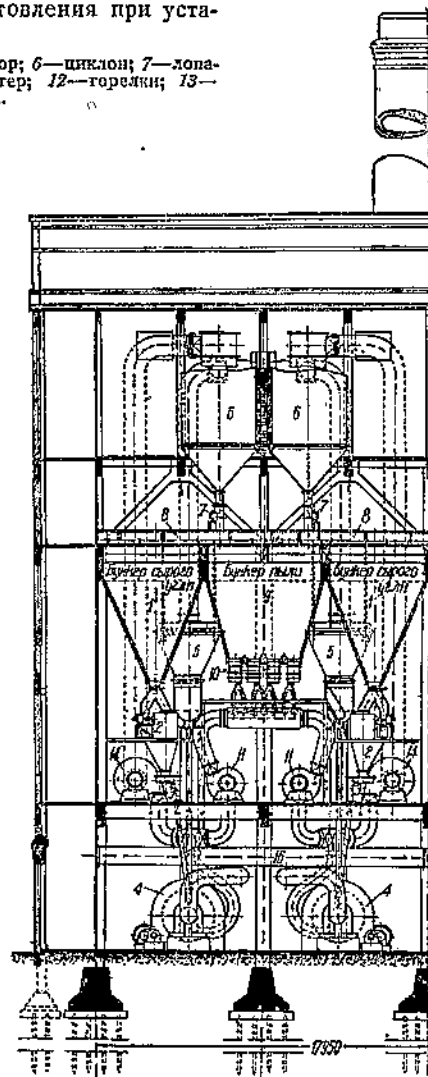
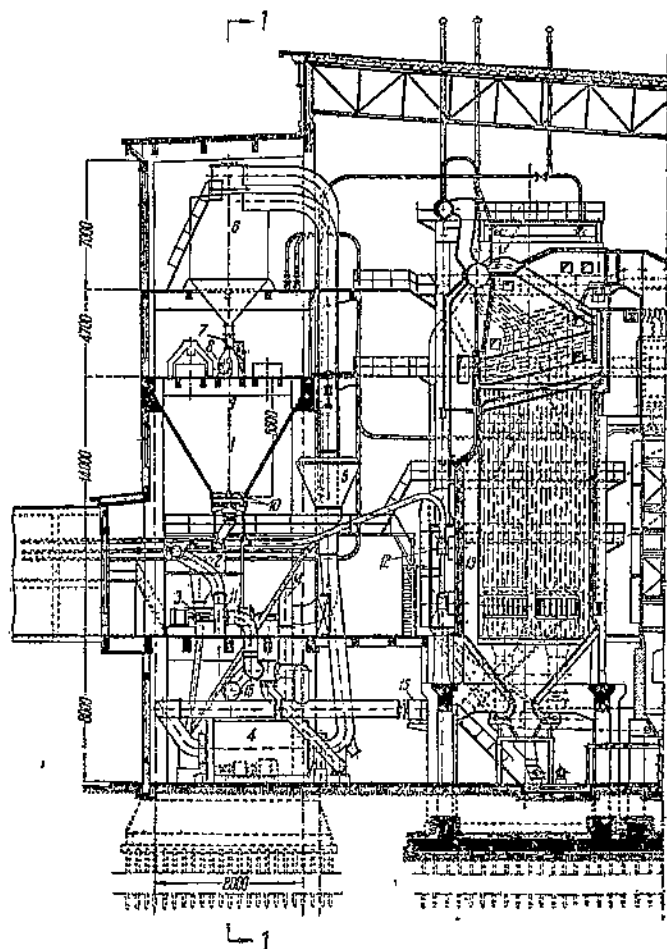
При недогрузках котла мельницы работают с полной нагрузкой, создавая запас пыли в промежуточном бункере, и по заполнении его останавливаются. Запас пыли в промежуточном бункере обычно принимается на 4—6 час. работы котла.

При остановке мельниц в значительных худших условиях работают эксгаустеры вследствие недогрузки. Для транспорта пыли в этом случае используется в значительном количестве холодный воздух, что несколько понижает к. п. д. котельного агрегата за счет уменьшения количества воздуха, проходящего через воздухоподогреватель. Из-за плохого к. п. д. эксгаустера повышается расход энергии на пневматический транспорт. Расход на пневматический транспорт в системе с промежуточным бункером значительно больше, чем при индивидуальной системе, вследствие большего сопротивления системы (добавочные пылепроводы, циклоны и питатели пыли).

Регулирование числа оборотов ротора эксгаустера ввиду необходимости работать иногда без

Фиг. 188. Компановка оборудования промежуточной схемы пылеприготовления при установке двух мельниц на котел.

1—бункер сырого угля; 2—весы; 3—питатель сырого угля; 4—мельница; 5—сепаратор; 6—циклон; 7—лопастной затвор; 8—шнек; 9—промежуточный бункер; 10—питатель пыли; 11—экстаузер; 12—горелки; 13—топки; 14—отсос влаги из бункера; 15—короб горячего воздуха.



системы пылеприготовления осуществляется либо изменением числа оборотов мотора, либо установкой гидромолта. Расход энергии на пневматический транспорт в системах с промежуточным бункером составляет от 7 до 10 $\text{квт}/\text{т}$ пыли.

На фиг. 185 представлен пылевой циклон. Пылевоздушная смесь входит в циклон по касательной со скоростью 18—22 $\text{м}/\text{сек}$, причем взвешенные частицы отбрасываются к периферии. Пыль входит в циклон через прямоугольный патрубок шириной d , высотой $2d$. Пыль, отброшенная к стенкам, сползает по ним в нижнюю конусную часть циклона и оттуда в бункер пыли.

Циклон находится под полным разрежением, создаваемым экстаузером. Для удаления из циклона пыли без нарушения герметичности циклона иногда применяется лопастной затвор (фиг. 186), представляющий собой барабанную звездочку, приводимую во вращение от мотора мощностью 1,5—2 квт . Лопастной затвор работает плохо вследствие забивания его влажной пылью. На

многих установках спуск пыли осуществляется с помощью автоматического клапана-мигалки (фиг. 187). Мигалка открывается под влиянием определенного веса пыли, собравшейся в циклоне. Для лучшего уплотнения циклона ставят две мигалки последовательно. Для улавливания щепок при тарельчатых питателях пыли применяют сетки.

Воздушное сопротивление циклона колеблется от 60 до 80 мм вод. ст. Коэффициент полезного действия циклона растет с увеличением входной скорости, увеличением концентрации пыли и уменьшением тонкости помола.

На фиг. 188 показана типичная установка двух мельниц на один котел при системе с промежуточным бункером пыли. Железобетонный бункер пыли установлен между бункерами сырого топлива.

На фиг. 189 показана схема с промежуточным бункером при установке одной мельницы на котел. Мельницы располагаются вдоль оси бункерного коридора.

Фиг. 189. Компановка оборудования пылеприготовления с промежуточным бункером при установке одной мельницы на котел (без сушильной трубы).

53. Пылеприготовление при влажных топливах. Взрывобезопасность системы пылеприготовления

Многие топлива перед пуском их в мельницы требуют предварительной сушки. В новейших советских системах пылеприготовления предварительная сушка таких топлив осуществляется во взвешенном состоянии в сушильных трубах, которые устанавливаются непосредственно у мельниц. Дополнительная сушка происходит в мельнице. Введением сушки во взвешенном состоянии удалось осуществить индивидуальное пылеприготовление с промежуточным бункером для любого топлива.

Для углей с влажностью:

$$W_p \leq W_2 + 10\%$$

достаточна сушка только в барабане мельницы.

Для углей с влажностью

$$W_p > W_2 + 10\%$$

необходима дополнительно установка сушильных труб.

Необходимость сушки топлива перед размолом определяется двумя обстоятельствами:

1. При сильно увлажненном топливе размола его затруднен вследствие замазывания мельницы, что приводит к снижению производительности мельницы.

2. Пыль с повышенной влажностью теряет свою текучесть, загрязняя бункер пыли, шнек, трубопроводы; работа питателей пыли сильно нарушается.

Полная сушка топлива в трубе и мельнице в системах с промежуточным бункером производится до гигроскопической влажности. Чем тоньше помол, тем тщательнее должно быть подсушено топливо. При каменных углях и антрацитах уже при небольшом превышении влажности над гигроскопической пыль слеживается и затрудняется ее вытекание из бункера. В этом случае топливо необходимо высушить немного ниже гигроскопической влажности. При бурых углях и особенно при грубом помоле сушку топлива можно не доводить на 2—5% до гигроскопической.

Количество влаги, подлежащее выпариванию из угля, можно подсчитать, исходя из того, что количество сухой массы в топливе остается одинаковым до и после сушки.

Если обозначить через W_1 влажность сырого топлива, а через W_2 влажность подсушенного топлива, то процентное содержание сухой массы S в сыром топливе будет $S_1 = 100 - W_1\%$, а в подсушенном топливе $S_2 = 100 - W_2\%$.

Если начальный вес угля был равен G_1 , а вес подсушенного угля G_2 , то ввиду неизменяемости

количества сухой массы имеем

$$G_1 S_1 = G_2 S_2$$

или

$$G_1 (100 - W_1) = G_2 (100 - W_2).$$

Следовательно, количество подсушенного угля, полученного из определенного количества сырого угля, равно

$$G_2 = G_1 \frac{100 - W_1}{100 - W_2}. \quad (446)$$

Разность между весом сырого угля и весом подсушенного угля равна весу испаряемой влаги ΔW , откуда

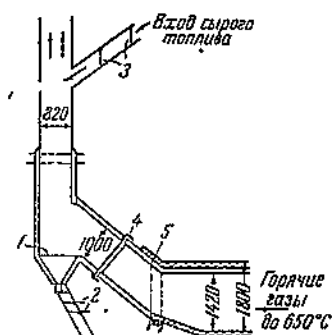
$$\Delta W = G_1 - G_2 = G_1 \frac{W_1 - W_2}{100 - W_2}. \quad (447)$$

Принцип сушки во взвешенном состоянии заключается в том, что куски сырого угля размером 6—10 мм подаются в поток вертикально поднимающихся горячих газов, подхватываются ими, транспортируются вверх по трубе и одновременно подсушиваются. Скорость газов, поступающих в трубу, обычно колеблется в пределах от 25 до 35 м/сек в зависимости от начального размера кусков и температуры газов. Сушка в основном происходит на небольшой длине трубы в пределах 2—4 м от места подачи топлива. Температура сушильного агента на этом участке падает с 550—600° до 230°. В остальной же части трубы температура снижается с 230° до 150—140°. Установка труб высотой более 6—8 м поэтому нецелесообразна. Трубы обычно выполняются цилиндрической формы. Конусность трубы увеличивает ее износ и повышает сопротивление. Общее понижение влажности в трубе возможно в пределах 10—12%. Сушка в трубе до гигроскопической влажности нецелесообразна. При углубленной сушке трубы работают неэкономично. Если сушильные трубы соединены с мельницей, необходимо значительную часть сушки производить в мельнице. Затрата энергии на сушку будет при этом меньше.

На сушку в трубе влияет ряд обстоятельств. Чем мельче топливо и чем выше температура газов, тем лучше и быстрее идет сушка; чем выше концентрация топлива в газах, тем оно хуже сушится.

Для подмосковного угля целесообразный размер кусков 0—8, 0—12 мм при $t_g = 550—650^\circ \text{C}$; $\mu \approx 1,5 \text{ кг топлива/кг газа}$. Чем выше μ , тем больше должна быть начальная температура газов.

Топливо подается в трубу через наклонную точку. Чтобы избежать выпадения частиц топлива вниз трубы, необходимо погашать энергию падающих кусочков. Для этого угол схода материала в трубу следует брать не более 20—25° к горизонту. Подача газов в трубу должна осуществляться ниже заброса топлива на 1,5—2 м во избежание выпадения топлива из воздушного потока.



Фиг. 190. Схема подвода газа и топлива к сушильной трубе.

1—колчеданный мешок; 2 и 3—мигалки; 4—сальник; 5—подвеска.

дан, железные части и т. п. Снизу труба защищена от подсоса воздуха двумя мигалками 2. Для избежания присоса у места ввода топлива обязательна установка мигалок 3 на рукавах, подающих топливо к трубе. В современных системах поток газов, проходящих через трубу, весь проходит через мельницу. Таким образом производительность трубы по воздуху должна соответствовать производительности мельницы.

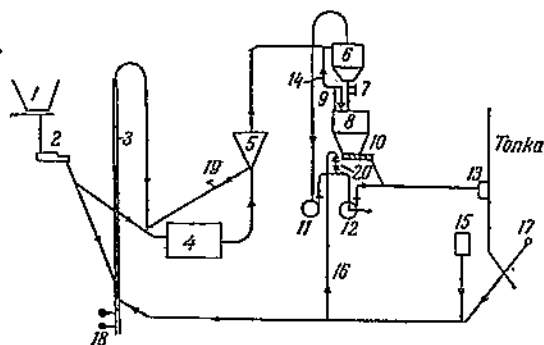
На фиг. 191 показана схема пылеприготовления с сушильной трубой. Топливо может быть подано из бункера 1 через питатель и весы 2 в мельницу 4 или в трубу 3. Подача топлива в мельницу во избежание взрыва оставшейся пыли осуществляется в момент запуска системы. Поднятое вверх топливо по нисходящей части сушильной трубы опускается в приемный патрубок мельницы. В дальнейшем схема и движение потоков те же, как и при пылеприготовлении с промежуточным бункером. Для работы схемы требуется высоконапорный вентилятор. Возможно применение двух вентиляторов последовательно.

На фиг. 192 дана компоновка элементов пылеприготовления в случае применения сушильной трубы. Наличие сушильной трубы не отражается на размещении пылеприготовительного оборудования. Для понижения расходов на пневматический транспорт желательно располагать трубу ближе к месту забора газов.

Описанные выше схемы пылеприготовления наиболее часто применяются в новых советских установках. Кроме таких схем в более старых установках встречаются центральные системы пылеприготовления, где сушка и размол топлива производится в отдельных от котельной установках с подачей готовой пыли в бункер котельной¹.

При работе и эксплуатации пылеприготовительных систем весьма серьезным является вопрос

¹ Описание этих схем, а также описание более редко применяемых у нас мельниц имеется в книге В. П. Ромадина „Пылеприготовление и пылесжигание“.



Фиг. 191. Схема пылеприготовления с сушильной трубой и двумя вентиляторами.

1—бункер сырого угля; 2—весы-питатель; 3—сушильная труба; 4—мельница; 5—сепаратор; 6—миклон; 7—мигалки; 8—бункер пыли; 9—соединительный шпек; 10—питатель пыли; 11—вентилятор мельницы; 12—вентилятор первичного воздуха; 13—горелки; 14—отсос влаги из бункера и шнека; 15—короб горячего воздуха; 16—горячий воздух к вентилятору первичного воздуха; 17—отбор газов из топки; 18—мигалки под сушильной трубой; 19—мигалки на возврате; 20—шиберы на горячем воздухе.

борьбы со взрывами в системе пылеприготовления. Наиболее опасны с этой точки зрения установки, работающие на топливах с большим выходом летучих. Основными требованиями к конструкции и к эксплуатации пылеугольных систем с точки зрения взрывобезопасности являются следующие:

1. В системе пылеприготовления не должно быть места, где могла бы отлагаться и длительно лежать угольная пыль, особенно при обтекании ее горячим воздухом.

2. Должно быть обеспечено достаточное количество предохранительных взрывных клапанов в системе.

3. Нельзя допускать разрыхления лежащей плотно пыли (где возможно тление) при одновременной внезапной подаче воздуха.

В СССР разработаны специальные правила проектирования, монтажа и эксплуатации пылеугольных установок на электростанциях, где предусмотрены все мероприятия по борьбе с взрывами пыли в системах пылеприготовления.

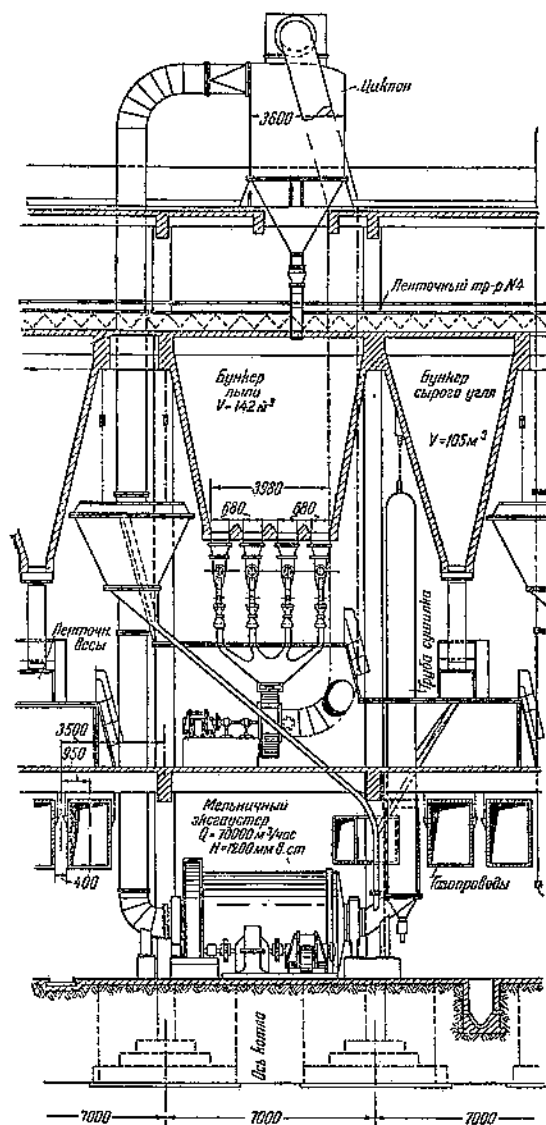
54. Подача пыли к топке

В индивидуальной системе пылеприготовления пыль подается непосредственно из эксгаустера к горелкам.

Количество мельниц на котел обычно меньше, чем количество горелок (фиг. 193). Процесс горения зависит от правильности распределения топлива и воздуха по отдельным горелкам и от равномерности пылевоздушной смеси. В индивидуальной системе пылеприготовления распределение пылевоздушной смеси по горелкам является одной из важнейших и трудных задач.

Для этого применяют так называемые делители. Обычно они работают удовлетворительно лишь при разделении потока на две части. Двухпоточный делитель представляет фасонную вилкообразную деталь, рассекающую поток на две половины. Для точного распределения пыли в ту или другую сторону применяется специальный нож, который устанавливается в делителе в положении, обеспечивающем наилучшую работу (фиг. 193).

Фиг. 192. Компановка оборудования пылеприготовления с сушильной трубой и промежуточным бункером пыли.

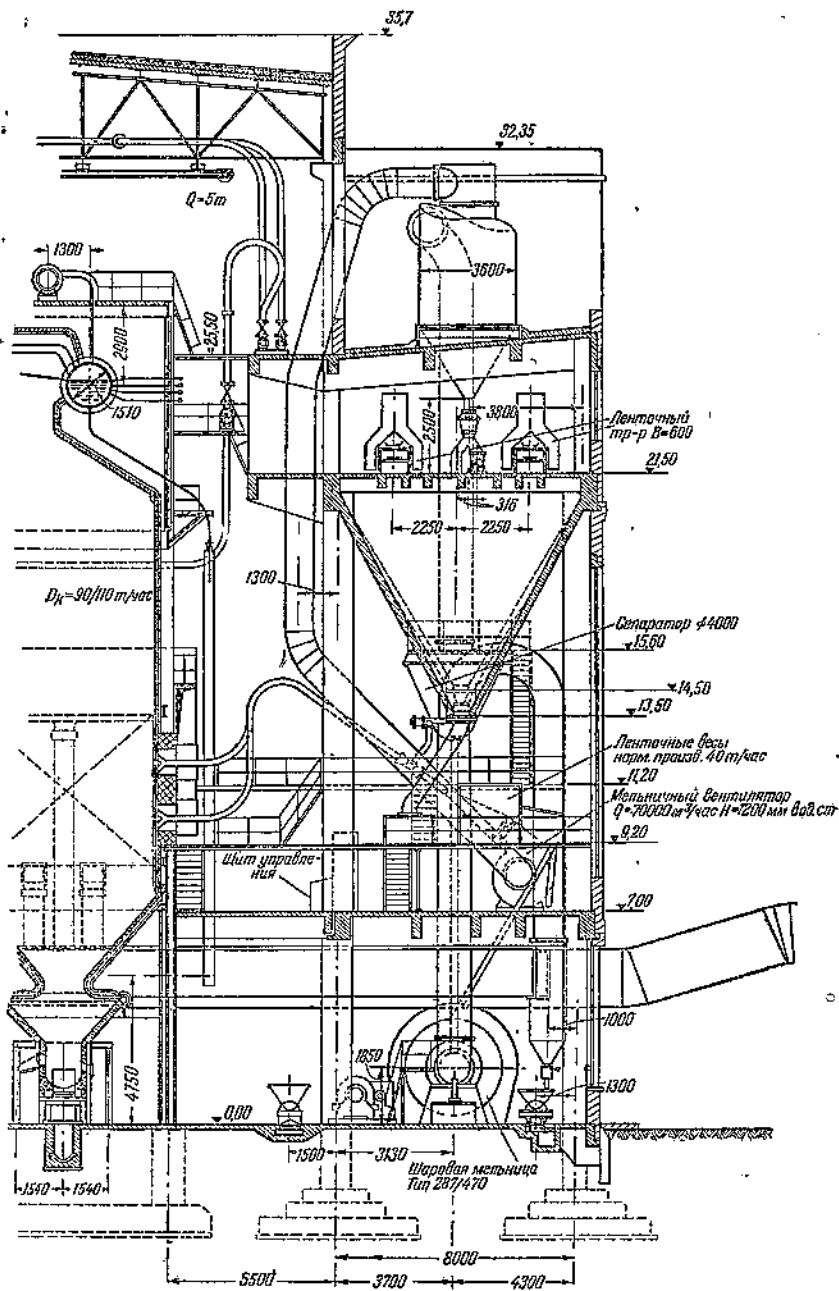


Иногда применяются слоистые делители (фиг. 194), при которых разветвление производится специальными перегородками 1.

Делитель работает удовлетворительно лишь тогда, когда пылевоздушная смесь перед входом в него достаточно равномерна, особенно в плоскости, перпендикулярной к распределительному ножу. Наличие изгибов перед делителем создает неравномерность в потоке вследствие влияния центробежной силы: эта неравномерность в дальнейшем еще более ухудшается. В случае необходимости распределения потока на несколько горелок применяется последовательное деление, каждый раз на два потока (фиг. 193).

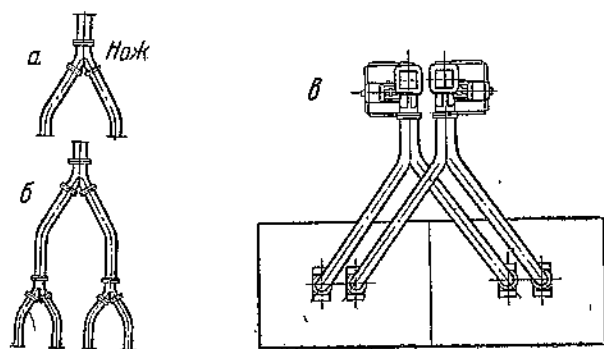
Делители дешевы и надежны в эксплуатации. Износ металла у них незначителен.

При движении по трубопроводу пылевоздушная смесь на закруглениях расслаивается вследствие влияния центробежной силы. На внешней стороне закру-



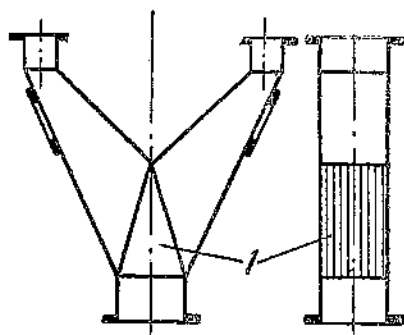
гления концентрация пыли больше, поэтому подающие трубопроводы необходимо выполнять по возможности без закруглений, особенно малого радиуса. Когда это невозможно, равномерность потока перед горелкой достигается созданием поворотов под углом в 180°. На фиг. 195 показана схема мельницы Фуллера, обслуживающей котельный агрегат по индивидуальной схеме. Пыль из мельницы поднимается по крутому пылепроводу 6 высоко вверх и, ударяясь в верхнюю плиту, опускается по вертикальному пылепроводу 7 к горелкам 4. Подобная подача пыли дает возможность придвинуть мельничную установку к котлу и избежать расслоения пылевоздушного потока.

Подвод пыли к горелкам в системе пылеприготовления с промежуточным бункером пыли осуществляется с помощью питателей, подающих пыль из бункеров в пылепроводы. От работы питателя в значительной степени зависит работа топочной камеры.

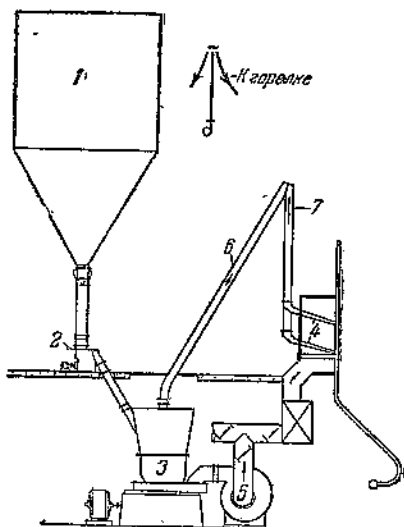


Фиг. 193. Схема подвода пыли к горелкам при индивидуальном пылеприготовлении.

а—схема подвода пыли от одного вентилятора к двум горелкам; б—то же, от одного вентилятора к четырем горелкам; в—то же, от двух вентиляторов к четырем горелкам.



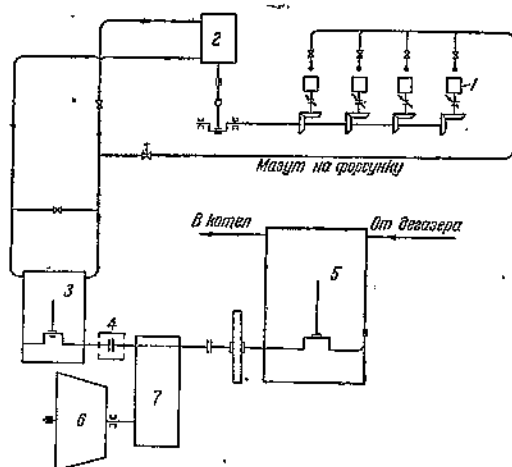
Фиг. 194. Слоновый делитель.



Фиг. 195. Схема индивидуального пылеприготовления американского типа.

1—бункер сырого угля; 2—питатель; 3—мельница; 4—горелки; 5—вентилятор горячего воздуха к мельнице; 6 и 7—пылепроводы.

Хороший питатель должен: 1) равномерно подавать пыль независимо от высоты слоя пыли в бункере и ее влажности, 2) быстро, правильно и в нужных пределах регулировать подачу пыли в зависимости от изменения нагрузки котельного агрегата. Регулировочная характеристика питателя, показывающая изменение его производительности в зависимости от числа оборотов,



Фиг. 196. Схема привода питателей прямоточного котла.

1—угольные питатели; 2—гидромотор; 3—мазутный насос; 4—регулятор подачи насоса; 5—водяной питательный насос; 6—турбина; 7—редуктор.

должна быть прямолинейной, так как регулировка производительности питателя достигается изменением числа оборотов. Иная регулировка, например, с помощью шиберов, ненадежна и неудовлетворительна.

На наших установках больше всего распространены шнековые и тарельчатые питатели. Питатель за определенное число оборотов может подать определенный объем пыли. Насыпной же вес пыли зависит от ее тонкости и влажности, качества топлива и от давления столба пыли, лежащего над питателем, вследствие чего и производительность питателя зависит от всех этих обстоятельств.

Питатели устанавливаются обычно по числу горелок; иногда один питатель работает на две горелки. Привод у питателя может быть либо индивидуальным, либо групповым, когда несколько питателей приводятся в движение от одного мотора. При индивидуальном приводе облегчается регулировка нагрузки отдельных горелок. При групповом приводе каждый питатель можно регулировать с помощью заслонки над самим питателем. При автоматизации горения групповой привод у питателей выгоднее, так как он облегчает работу автоматов.

Схема работы питателей для советских прямоточных котлов показана на фиг. 196. Питатели приводятся во вращение от единого поршневого гидромотора 2. Гидромотор получает для своего вращения мазут от насоса 3, сидящего на вспомогательном валу главного питательного поршневого насоса 5, чем осуществляется синхронность подачи в котел топлива и воды. Необходимо, чтобы производительность питателя была пропорциональна числу оборотов и качество топлива было неизменным по химическому составу и по размеру. В случае изменения качества топлива необходимо производить дополнительную подрегулировку с помощью перепускных вентилей.

На фиг. 197 показана конструкция шнекового питателя. Пыль на шнек подается из бункера 1 и передвигается шнеком 2 к выходному отверстию 3. На выходе из шнека устанавливается вертушка, разбрасывающая топливо и улучшающая равномерность перемешивания пыли и воздуха. От бункера шнек отделяется заслонкой 4.

Нарушение работы питателя часто вызывается прекращением вытекания пыли из бункера к питателю. Образование сводов, общая неравномерность движения пыли являются часто основными причинами перебоев

в работе питателей. Для некоторого уменьшения опасности образования сводов над шнеком устанавливают иногда валик, снабженный разрыхляющими пожарами (ворошитель).

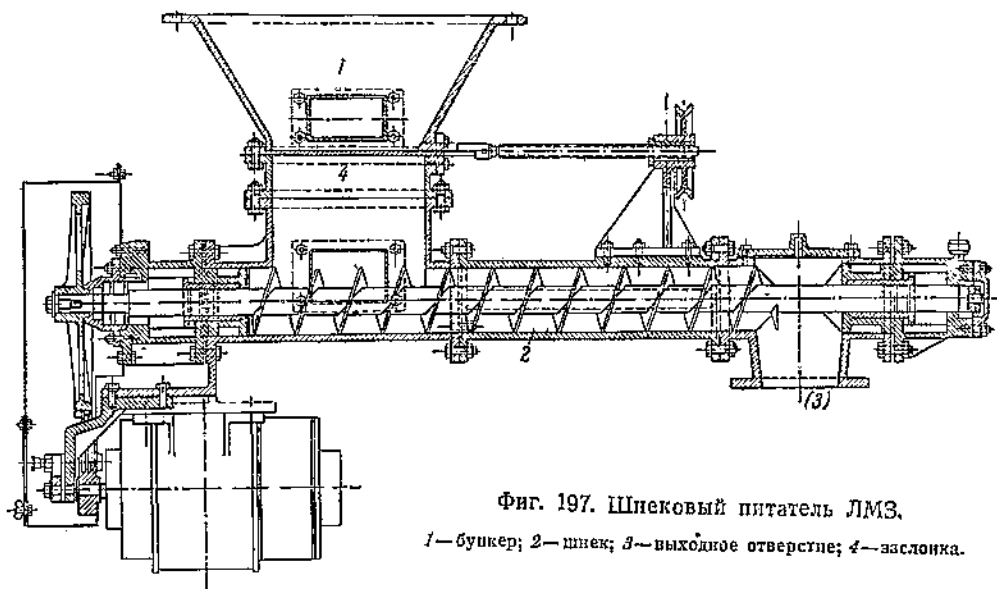
При работе шнековых питателей иногда замечается менее равномерная их работа при заполненном бункере вследствие зависания пыли в бункерах. При внезапном срыве свода питатель начинает выдавать не пропорционально большое количество топлива, что вызывает недожог пыли: горелка начинает пылить, котел дымить. В таких случаях приходится снижать число оборотов шнека, пока работа горелки не восстановится.

Равномерность подачи топлива зависит также от тонкости помола пыли и ее влажности. При сухой и крупной пыли питатель работает ровней и надежней. Если насыпной вес пыли увеличивается, производительность шнека возрастает. Подача пыли регулируется изменением числа оборотов мотора и количеством подаваемого воздуха с помощью дросселей, устанавливаемых перед питателем. Управление тем и другим производится с площадки котелгара.

Достоинством шнекового питателя является малая чувствительность его к попаданию посторонних предметов, а недостатком — самопроизвольное протекание пыли, особенно сухой и тонкой, по каналам шнека, что ухудшает равномерность подачи топлива.

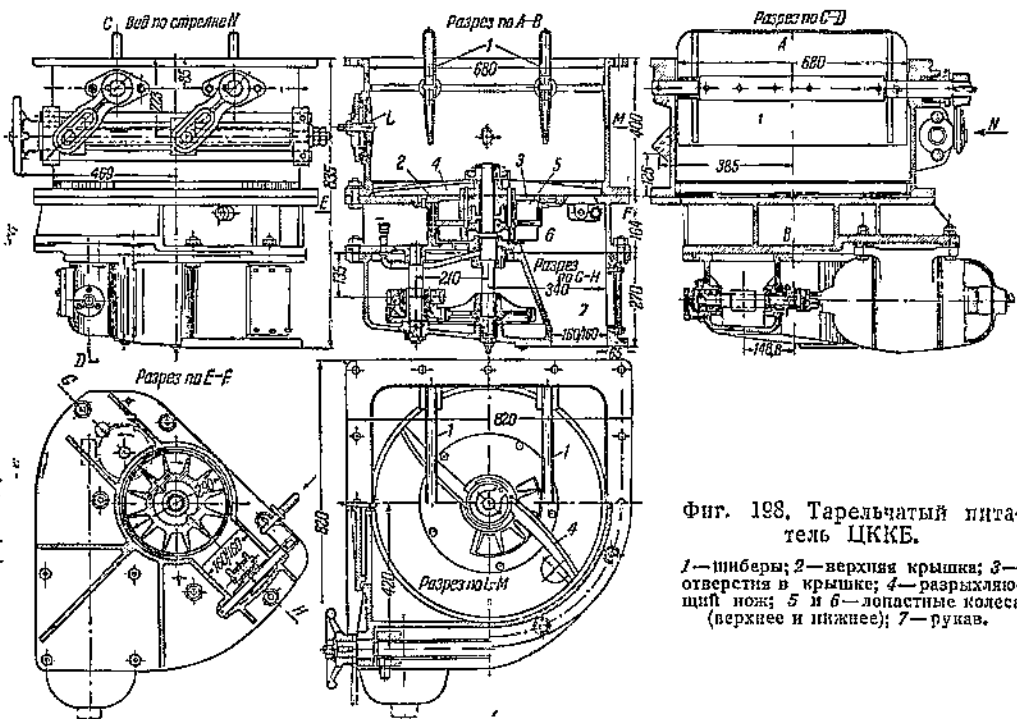
Расход энергии на привод питателей в зависимости от конструкции колеблется от 0,15 до 0,5 квтч/т, в среднем составляя 0,3—0,4 квтч/т.

В пылеугольных установках широкое распространение получили также тарельчатые питатели. На фиг. 198 показана конструкция питателя ЦККБ по типу Бейли. Питатель устанавливается под бункером пыли, от которого отделяется с помощью специальных шиберов 1. Пыль из бункера попадает на верхнюю крышку 2 питателя, имеющую ряд отверстий 3. Над этой крышкой вращается разрыхляющий нож 4, который обеспечивает равномерную загрузку нижележащих лопастных



Фиг. 197. Шнековый питатель ЛМЗ.

1 — бункер; 2 — шнек; 3 — выходное отверстие; 4 — заслонка.



Фиг. 198. Тарельчатый питатель ЦККБ.

1 — шиберы; 2 — верхняя крышка; 3 — отверстия в крышке; 4 — разрыхляющий нож; 5 и 6 — лопастные колеса (верхнее и нижнее); 7 — рукав.

колес. Пыль через отверстия верхней крышки поступает на лопастное колесо 5, заполняет пространство между зубьями и передвигается зубьями колеса на 180°, где пыль сыпается через ряд других отверстий на второе колесо 6. Вторым колесом пыль подобным же образом переносится к сбрасывающему отверстию, откуда сыпается в рукав 7, смешиваясь с воздухом.

Тарельчатый питатель сравнительно со шнековым допускает меньшее самопроизвольное вытекание пыли. Образование сводов непосредственно у питателя менее вероятно благодаря лучшим условиям работы разрыхляющего ножа. Производительность питателя до известного предела пропорциональна числу оборотов тарелок. Тонкость помола и влажность изменяют про-

изводительность тарельчатого питателя, как и шнекового питателя. Недостатком питателя является повышенная чувствительность его к попаданию щепы и прочих волокнистых материалов. Для предупреждения попадания щепы в бункер для пыли устанавливаются улавливающие сетки под циклонами.

Регулирование работы питателя осуществляется изменением числа оборотов приводного мотора. Равномерность нагрузки отдельных питателей может быть проверена по температуре воздуха за питателем, если перед ним воздух имеет высокую температуру. Увеличение нагрузки питателя обычно приводит к понижению температуры.

Во время работы тарельчатых питателей иногда происходит обрыв подачи пыли вследствие зависания пыли в бункере, что можно объяснить подпором воздушного давления в бункере. Хотя подпор этот ничтожен, при наличии его задержка в протекании пыли более вероятна. Явление обрыва подачи пыли ликвидируется путем резкого дросселирования первичного воздуха. Подпор снижается, свод рушится, и работа питателя восстанавливается.

55. Основы теплового расчета пылеприготовления

Определение диаметра трубы. Начальная скорость газов должна надежно обеспечивать подъем наиболее крупных частиц. Она определяется из уравнения равновесия сил тяжести и подъемной силы воздушного потока:

$$G_u = \frac{c w_{кр}^2 \gamma_g F}{2g},$$

где G_u кг — вес частиц;

c — коэффициент лобового сопротивления — для шара эта величина равна 0,48;

$w_{кр}$ м/сек — скорость газа;

F м² — сечение частиц;

γ_g — удельный вес газа.

Если принять форму частицы шаровой, то $F = \frac{\pi d^2}{4}$;

$G_u = \frac{\pi d^3}{6} \gamma_B$, где γ_B — удельный вес материала пылинки (кг/м³), d — диаметр частицы (м).

Подставляя эти величины и решая уравнение относительно $w_{кр}$ при $c = 0,48$, находим при запасе примерно 100%

$$w_{кр} = 5,7 \sqrt{\frac{d \gamma_B}{\gamma_g}}.$$

Минимально допустимая скорость газа зависит от размера частиц, удельного веса топлива и удельного веса газа, т. е. от его температуры, которая может достигать до 700° С. При дроблении топлива молотковыми дробилками диаметр частицы равен 10—12 мм. Удельный вес антрацита при обычной для него влажности составляет 1,5, подмосковного и челябинского углей 1,3.

Объем газов, поступающих в трубу, зависит от количества топлива, подлежащего сушке, и допустимой концентрации топлива в газах μ кг топлива/кг газа:

$$V_g = \frac{B}{\mu \gamma_g} \text{ м/сек.}$$

Значение μ допускается в пределах 0,6—1,5.

По секундному объему газов, пропускаемых через

трубу, и их скорости $w_{кр}$ определяется диаметр и сечение трубы:

$$F_{кр} = \frac{V_g}{w_{кр}} \text{ м}^2; D_{кр} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{V_g}{w_{кр}}} = 0,798 \sqrt{\frac{V_g}{w_{кр}}} \text{ м.} \quad (448)$$

Тепловой баланс трубы и мельницы. В системах пылеприготовления, в которых сушильная труба установлена перед мельницей, тепловой баланс для трубы и мельницы составляется общий.

Уравнение теплового баланса такой сушильно-мельничной системы, отнесенного к 1 кг сырого топлива, имеет следующий вид:

$$q'_g + q'_B + q'_{np} + q'_w = q''_g + q''_B + q''_{np} + q''_{H_2O} + q_5, \quad (449)$$

где q'_g — тепло, внесенное в трубу с газом;

q'_B — тепло, внесенное в трубу с топливом;

q'_{np} — тепло, вносимое присасываемым воздухом;

q'_w — тепло, внесенное энергией шаров;

q''_g — тепло, уносимое газами;

q''_B — тепло, уносимое топливом;

q''_{np} — тепло, уносимое присосанным воздухом;

q''_{H_2O} — тепло, уносимое с водяными парами, полученными в результате сушки;

q_5 — потери тепла в окружающую среду.

Размерность всех величин — ккал/кг сырого топлива. Количество тепла, вносимого газами на 1 кг топлива, если концентрация топлива принята равной μ , составляет

$$q'_g = \frac{c'_g t'_g}{\mu} \text{ ккал/кг,}$$

где t'_g °С — температура газов, поступающих в трубу;

c'_g ккал/кг °С — теплоемкость газов.

Для чистого воздуха можно грубо считать:

$$q'_g = \frac{0,24 t'_g}{\mu} \text{ ккал/кг сырого угля.}$$

Тепло, вносимое с топливом: его твердой частью и влагой

$$q'_B = \frac{100 - W_1}{100} \cdot c_B t'_B + \frac{W_1 t'_B}{100} \text{ ккал/кг сырого угля,}$$

Таблица 57

Теплоемкость сухой массы типичных топлив

Уголь	Теплоемкость сухой массы c_B в ккал/кг °С
Подмосковный	0,26
Челябинский	0,25
Кузнецкий, прокопьевский	0,24
Кизеловский	0,25
АШ донецкий	0,21
Антрацит брединский	0,21

где $W_1\%$ — первоначальная влажность топлива;
 $t_B^\circ\text{C}$ — первоначальная температура топлива;
 $c_B \text{ ккал/кг } ^\circ\text{C}$ — теплоемкость твердой части топлива (табл. 57).

Тепло с присосанным воздухом зависит от температуры окружающей среды и от величины присоса. В расчетах обычно принимается присос в установках без сушильной трубы в 20%, при сушильной трубе в 30% от количества газов, подаваемых в трубу. Исходя из этого, количество тепла, вносимого с присосанным воздухом, можно найти из выражения

$$q'_{np} = (0,2 \div 0,3) \frac{c_L t'_{np}}{\mu} \text{ ккал/кг сырого топлива,}$$

где $c_L \text{ ккал/кг } ^\circ\text{C}$ — теплоемкость воздуха (0,24);
 $t'_{np} ^\circ\text{C}$ — температура присасываемого воздуха.

При работе шаровой мельницы часть энергии падения шаров превращается в тепловую энергию, которая используется в процессе сушки. Это количество тепла зависит от удельного расхода энергии и может быть определено из выражения:

$$q''_{ш} = \frac{0,8 \cdot \Delta - 860}{1000} \text{ ккал/кг сырого угля,}$$

где $\Delta \text{ квт/т}$ — расход энергии на тонну помола;
0,8 — доля энергии, превращаемая в тепло, идущее на нагрев топлива и газов;
остальные 20% тепла теряются вне барабана мельницы, в подшипниках, редукторах и т. п.

Тепло, уносимое газами из системы:

$$q''_g = \frac{c''_g t''_g}{\mu} \text{ ккал/кг сырого угля,}$$

где $t''_g ^\circ\text{C}$ — температура газов по выходе из системы, обычно равная 70—100°;
 $c''_g \text{ ккал/кг } ^\circ\text{C}$ — теплоемкость газов по выходе из трубы.

Тепло, уносимое топливом из трубы, подсчитывается по формуле, аналогичной формуле для сырого топлива. Но так как весь баланс относится к 1 кг сырого топлива, формула получается несколько усложненной:

$$q''_B = \left[\frac{100 - W_1}{100} c_B t''_B + \frac{W_2}{100} t''_B \right] \frac{100 - W_1}{100 - W_2} \text{ ккал/кг,}$$

где $W_2\%$ — конечная влажность топлива;
 $t''_B ^\circ\text{C}$ — температура топлива по выходе из трубы.

Температура топлива при $t''_g = 70^\circ\text{C}$ не поднимается выше 50—60° C.

Тепло, уносимое с присосанным воздухом, определяется по аналогичному выражению:

$$q''_{np} = \frac{(0,2 \div 0,3) t''_{np} c_L}{\mu} \text{ ккал/кг.}$$

Тепло, уносимое с водяными парами, полученными в результате сушки, подсчитывается по следующему выражению:

$$q_{H_2O} = \frac{W_1 - W_2}{100 - W_2} \left[595 + 0,47 t''_g \right] \text{ ккал/кг,}$$

где $\frac{W_1 - W_2}{100 - W_2}\%$ — количество водяных паров, испаренных на 1 кг сырого угля;
595 ккал/кг — теплота испарения воды при 0° C;

28*

0,47 ккал/кг — теплоемкость водяных паров, которая принимается постоянной.

Потери тепла в окружающую среду зависят от количества вносимой в систему влаги, начальной температуры сушильного агента, степени разветвленности системы и качества изоляции. Для грубых расчетов на основании практических данных можно считать, что потери топлива в окружающую среду в системе с сушильными трубами находятся в пределах 5—7% от начального количества тепла, вводимого в систему в случае применения сушильных труб.

Подставляя в уравнение теплового баланса (449) числовые значения, определяют из него либо начальную температуру газов, либо концентрацию топлива, так как всеми остальными величинами в балансе необходимо задаваться.

Пример расчета сушильно-мельничной системы. Задание. Рассчитать сушильно-мельничную систему на пропуск 25 т/час подмосковного угля при максимальном размере кусков 15 мм. Начальная влажность топлива 33%, конечная — 15%.

Требуется определить допустимую концентрацию топлива, если $t'_g = 600^\circ\text{C}$; $t''_g = 70^\circ\text{C}$.

Расход энергии на помол 12 квт/т.

Определяем отдельные составляющие теплового баланса.

А. ПРИХОД ТЕПЛА

а) Тепло, вводимое в трубу с горячими газами, считая на 1 кг сырого угля:

$$q'_g = \frac{0,24 \cdot 600}{\mu} = \frac{144}{\mu} \text{ ккал/кг.}$$

Для грубого расчета теплоемкость сухих газов берется постоянной и равной 0,24 ккал/кг °C.

б) Тепло, вводимое в трубу с присосом воздуха:

$$q'_{np} = \frac{0,3}{\mu} \cdot 0,24 \cdot 30 = \frac{2,16}{\mu} \text{ ккал/кг.}$$

Температура воздуха, как и обычно, принята 30° C, содержание влаги в воздухе не учитывается.

в) Тепло, вносимое с топливом, при начальной температуре топлива 10° C:

$$q'_B = \frac{(100 - 33) \cdot 0,26 \cdot 10}{100} + \frac{33 \cdot 10}{100} = 5,04 \text{ ккал/кг,}$$

где 0,26 ккал/кг °C — теплоемкость сухой массы топлива.

г) Тепло, вносимое в систему энергией шаров:

$$q''_{ш} = \frac{0,8 \cdot 12 \cdot 860}{1000} = 8,25 \text{ ккал/кг.}$$

Таким образом общее количество тепла, вносимое в систему, составляет:

$$\frac{144}{\mu} + \frac{2,16}{\mu} + 5,04 + 8,25 = \frac{146,16}{\mu} + 13,29 \text{ ккал/кг.}$$

Б. РАСХОД ТЕПЛА

д) Тепло, уносимое сухими газами из трубы:

$$q''_g = 0,24 \frac{70}{\mu} = \frac{16,8}{\mu} \text{ ккал/кг.}$$

е) Тепло, уносимое с присосанным воздухом:

$$q''_{np} = 0,24 \frac{0,30}{\mu} \cdot 70 = \frac{5,04}{\mu} \text{ ккал/кг.}$$

ж) Тепло, уносимое топливом при температуре топлива 60°С:

$$q_{\text{в}}'' = \left[\frac{100-15}{100} \cdot 0,26 \cdot 60 + \frac{15}{100} \cdot 60 \right] \frac{100-33}{100-15} = (13,25 + 9) \frac{67}{85} = 17,55 \text{ ккал/кг.}$$

з) Тепло, уносимое водяными парами:

$$q_{\text{н.о}}'' = \frac{18}{85} (595 + 0,47 \cdot 70) = 0,212 \cdot 627,9 = 132,8 \text{ ккал/кг.}$$

и) Потери в окружающую среду принимаются в 10% от тепла, поступающего в систему, что и учитывается коэффициентом 0,90 в общем балансе тепла.

Общий баланс тепла сушильно-мельничной системы:

$$0,90 \left(\frac{146,16}{\mu} + 13,29 \right) = \frac{16,8}{\mu} + \frac{5,04}{\mu} + 17,55 + 132,8,$$

отсюда находим:

$$\mu = 0,91.$$

Определение диаметра сушильной трубы

1. Количество сухих газов:

$$G_g = \frac{25\,000}{\mu} = \frac{25\,000}{0,91} = 27\,500 \text{ кг/час.}$$

При температуре $t_g' = 600^\circ\text{С}$ их удельный вес составляет

$$\gamma_g = \frac{1,31 \cdot 273}{600 + 273} = 0,41 \text{ кг/м}^3,$$

где 1,31 — удельный вес газа при нормальных условиях с учетом известной примеси CO_2 .

Объем газов, пропускаемых через трубу:

$$V_g = \frac{25\,000}{3\,600 \cdot 0,41 \cdot 0,91} = 18,6 \text{ м}^3/\text{сек.}$$

2. Исходя из размера частиц 15 мм, находим необходимую скорость газа. Удельный вес топлива берем равным 1 250 кг/м³:

$$w_{\text{кр}} = 5,70 \sqrt{\frac{0,015 \cdot 1\,250}{0,410}} = 5,70 \cdot 6,41 = 36,5 \text{ м/сек.}$$

3. По полученной скорости газов и их расходу определяем диаметр сушильной трубы:

$$D_{\text{тр}} = 0,798 \sqrt{\frac{18,6}{36,5}} = 0,798 \sqrt{0,51} = 0,57 \text{ м.}$$

Определение мощности мельничного эксгаустера вентилятора

1. Количество газов у вентилятора складывается из количества сухих газов и водяных паров, получающихся вследствие испарения влаги топлива.

а) Сухие газы:

$$G_{\text{с.г}} = 27\,500 \cdot 1,3 = 35\,750 \text{ кг/час,}$$

где 1,3 — коэффициент присоса.

Удельный вес газов при $t_g'' = 70^\circ\text{С}$

$$\gamma_g = \frac{1,31 \cdot 273}{70 + 273} = 1,042 \text{ кг/м}^3.$$

Объем сухих газов

$$V_{\text{с.г}} = \frac{35\,750}{1,042} = 34\,300 \text{ м}^3/\text{час.}$$

б) Водяные пары:

$$G_{\text{н.о}} = 25\,000 \cdot \frac{33-15}{100-15} = 6\,230 \text{ кг/час.}$$

Объем водяных паров

$$V_{\text{н.о}} = \frac{6\,230}{0,805} \cdot \frac{273+70}{273} = 9\,720 \text{ м}^3/\text{час.}$$

в) Общий объемный расход газов у вентилятора:

$$V_g = 34\,300 + 9\,720 = 44\,020 \text{ м}^3/\text{час.}$$

2. Сопротивление системы определяется специальным расчетом гидравлических сопротивлений. Сопротивления различных частей системы обычно имеют примерно следующие величины:

Разрежение перед трубой . . .	30 мм вод. ст.
Сопротивление трубы . . .	125 " " "
Сопротивление мельницы . . .	175 " " "
Сопротивление сепаратора с трубопроводами . . .	120 " " "
Сопротивление трубопроводов от сепаратора к циклоу . . .	30 " " "
Сопротивление циклона . . .	50 " " "
Сопротивление трубопроводов от циклона до эксгаустера . . .	30 " " "
Напор на эксгаустер . . .	250 " " "

Полное сопротивление системы при этом составляет 810 мм вод. ст.

3. Мощность мотора эксгаустера на валу

$$N_{\text{м}} = \frac{V_g \cdot H}{1,35 \cdot 75 \cdot 3\,600 \cdot \eta_g} = \frac{44\,020 \cdot 810}{367\,000 \cdot 0,5} = 194 \text{ квт.}$$

С запасом в 10% $N_{\text{м}} = 210 \text{ квт.}$

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ПРОЦЕСС ГОРЕНИЯ, РАБОТА И ДЕТАЛИ ПЫЛЕУГОЛЬНЫХ ТОПОК

56. Процесс горения в пылеугольной топке

Угольная пыль содержит частицы самых различных размеров, начиная с мельчайших пылинок до частиц величиной 0,2 мм и больше, составляющих остаток на сите № 30. Ввиду этого время сгорания частиц пыли неодинаково. Объем

топочной камеры должен быть таким, чтобы имела возможность сжигать наиболее крупные частицы. Помимо связи скорости горения с размером частиц имеется зависимость процесса горения от качества самого топлива. Чем больше в топливе летучих, тем быстрее идет процесс горения.

Поскольку частица топлива почти неподвижна

относительно воздуха, подача кислорода к частице происходит, главным образом, за счет диффузии газа. Для успешности горения топлива необходимо тщательное перемешивание пыли и воздуха еще при подаче их в топочную камеру через горелку. Исправление в самом процессе горения неправильного начального распределения воздуха и аэро-смеси затруднительно вследствие малой относительной скорости воздуха и частиц топлива.

Процесс горения пыли может быть разбит на две стадии: подогрев смеси воздуха и пыли до температуры воспламенения (с испарением влаги из топлива) и собственно процесс горения летучих и кокса.

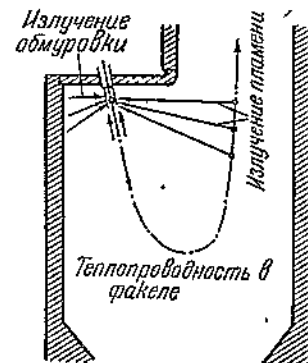
Процесс воспламенения играет существенную роль в устойчивости горящего факела и вообще в процессе горения пыли. Для лучшего использования камеры длина пути воспламенения должна быть минимальной. Эта длина тем меньше, чем ниже температура воспламенения пыли, чем выше температура горячего воздуха в первичной смеси, чем выше концентрация топлива или, иначе, чем меньше количество первичного воздуха.

Температура воспламенения факела есть функция количества и состава летучих в топливе. Чем больше летучих в топливе, тем легче осуществляется процесс загорания. Подвод к аэро-смеси тепла, необходимого для воспламенения вводимой в топку угольной пыли, осуществляется как путем соприкосновения, так и путем излучения (фиг. 199). Соприкосновением передается тепло к вновь введенной в топку холодной части потока от той части его, в которой происходит процесс горения. Излучением тепло передается от соседних слоев пламени и от нагретых топочных стен. Вновь вступающий в камеру поток воздуха и угольной пыли нагревается, также благодаря смешению с горячими газами, которые увлекаются потоком из топочной камеры.

В старых пылеугольных топках без надлежащего подогрева воздуха для обеспечения воспламенения возле горелок устраивалась зажигательная воронка, а часть стен оставалась без охлаждения. Таким путем увеличивалось излучение от топочных стен на поток. При сжигании пыли тощего угля, содержащего меньше 10% летучих или антрацита, также приходится для надежности воспламенения не экранировать часть стен топочной камеры или закрывать кирпичом имеющиеся экраны поверхности (шамотный пояс). В современных же крупных пылеугольных топках, в особенности при углях с выходом летучих больше 20%, применяется полное экранирование на всех стенках. Трудности, возникающие при воспламенении, устраняются лишь при помощи высокого подогрева воздуха (300°С и выше), благодаря чему сильно снижается затрата тепла на воспламенение. Это видно из табл. 58.

В соответствии с уменьшением количества тепла, идущего на разогрев пылевоздушной смеси, ме-

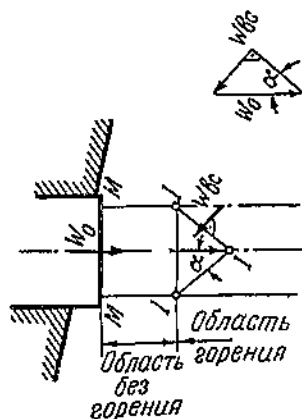
няется и время, затрачиваемое на процесс воспламенения. С изменением времени, необходимого для воспламенения топлива, изменяется и длина факела. Чем быстрее воспламенение, тем лучше используется и объем топочной камеры. Тепло подогрева воздуха является главным фактором, удлиняющим или укорачивающим время воспламенения при постоянной температуре воспламенения. В лабораторных опытах с высоко подогретым воздухом при отсутствии светящегося факела выяснено, что при температуре воздуха 900°С загорание начинается почти моментально для всех видов топлива. При температуре 700°С антрацитовая пыль загорается через 0,4 сек., пыль тощего угля — через 0,2 сек. При температуре 600°С процесс загорания антрацитовой пыли наступает через 1,6 сек.; пыли тощего угля — через 0,8 сек. Опытами с подогретым воздухом было установлено, что время загорания не зависит от тонкости помола. В топках, где процесс подогрева пыли идет за счет лучистой энергии, воспламенение происходит тем быстрее чем тоньше помол.



Фиг. 199. Разогрев угольной пыли в топочной камере путем соприкосновения и излучения.

Таблица 58
Количество тепла для нагрева аэро-смеси до температуры воспламенения

Составляющие общего коли- чества тепла	Количество тепла, необходимое для нагрева аэро-смеси до температуры воспламенения, в ккал/кг		
	без подогре- ва воздуха	с подогревом воздуха	
	$t_L = 20^\circ\text{C}$	$t_L = 300^\circ\text{C}$	$t_L = 400^\circ\text{C}$
Нагрев угля .	123	123	123
Испарение влаги . . .	16	16	16
Нагрев воз- духа	1 540	540	180
Всего .	1 679 ккал/кг	679 ккал/кг	319 ккал/кг
По отношению к количеству тепла воспла- менения без подогрева воздуха . .	100%	40,5%	19,0%



Фиг. 200. Воспламенение угольной пыли путем одного лишь соприкосновения.

т. е. для топлив с малым выходом летучих, имеющих, следовательно, высокую температуру воспламенения, целесообразно применение высокоподогретого воздуха до 300° и больше при сокращенном количестве первичного воздуха, доходящем до $15-20\%$.

Но даже при наличии высокого подогрева воздуха в пылеугольной топке всегда существует некоторая минимальная нагрузка котла, ниже которой не может быть обеспечено воспламенение. Этот предел лежит между 25 и 40% нормальной нагрузки, а для пыли АШ поднимается до $50-70\%$ в зависимости от степени экранирования топки.

При нагрузках ниже минимальной не удастся получить ни воспламенения, ни устойчивого горения¹.

Это является существенным и очень важным недостатком пылеугольных топок.

Нуссельт исследовал аналитически процесс воспламенения угольной пыли в пылеугольной топке, предположив сначала, что необходимое для этого тепло доставляется лишь излучением. Затем он допускал, что это тепло получено из потока через одну лишь теплопроводность, направленную против движения. При первом предположении расчет показал, что для малых частиц, начиная с некоторого размера их радиуса, воспламенение при помощи одного излучения вообще невозможно. Минимальный размер радиуса частицы $r_{\min}$, при котором возможно еще воспламенение от излучения, получается при одной и той же температуре в топке тем большим, чем выше температура воспламенения угля t_{ac} . При неизменной же температуре воспламенения t_{ac} величина $r_{\min}$ уменьшается при увеличении температуры в топочной камере. Минимум времени воспламенения имеют частицы размером $50-100\mu$.

При втором предположении Нуссельт определил скорость воспламенения w_{ac} . Если из горелки пылевоздушная смесь выходит в топочную камеру (фиг. 200), то воспламенение произойдет на некотором расстоянии от устья горелки М-М. Поверхность, на которой будет

Чем выше концентрация топлива, тем быстрее наступает воспламенение топлива, так как не затрачивается лишнего тепла на подогрев больших масс воздуха. Точно так же, чем суше пыль, идущая в горелки, тем меньше поглощается тепла на подсушку топлива и подогрев водяных паров, тем легче и скорей закигается пылевое облако.

Отсюда следует, что для АШ, тощих углей,

происходить воспламенение, имеет форму конуса I-I-I, показанного на фиг. 200; ее называют поверхностью воспламенения.

Угол раствора конуса поверхности воспламенения определяется из выражения

$$\sin \alpha = \frac{w_{ac}}{w_0}, \quad (450)$$

где w_0 — выходная скорость из горелки.

По Нуссельту скорость воспламенения w_{ac} обратно пропорциональна радиусу r угольной частицы, так что чем меньше r , тем больше w_{ac} . Эта скорость зависит и от температуры воспламенения t_{ac} ; так, при изменении t_{ac} от 200 до 400°C скорость воспламенения w_{ac} уменьшается примерно на 25% .

Характер горения пыли зависит в основном от состава топлива. Летучие, содержащиеся в топливе, в значительной степени облегчают не только процесс зажигания, но и процесс горения. Летучие, энергично выделяющиеся из пыли при ее подогреве, облегчают дальнейшее сжигание остаточного кокса, так как каждая пылинка делается более пористой, чем увеличивается доступ для кислорода к остающемуся углероду кокса. Таким образом содержание летучих в топливе ускоряет процесс горения вследствие одновременного горения летучих и кокса, сокращения времени загорания, увеличения пористости и поверхности кокса благодаря выходу летучих, улучшения перемешивания пыли с воздухом.

Процесс горения и степень совершенства выгорания топлива в промышленной топке зависят от: 1) тонкости помола, ибо время горения тем меньше, чем меньше начальный размер зерен; 2) качества смешения пыли и воздуха, так как чем лучше перемешивание, тем лучше горение; 3) температуры топочной камеры — чем выше температура в топке, тем устойчивее и интенсивнее протекает процесс горения.

Относительная скорость обдувания даже для сравнительно крупных пылинок невелика и не превышает $0,5-1 \text{ м/сек}$. В этой области влияние обтекания воздуха на скорость горения частицы невелико. Можно считать, что в среднем горение частиц в пылевом факеле почти подобно горению в неподвижной среде. При сгорании углерода только в СО и малых относительных скоростях движения воздуха и пылинки окись углерода не будет вынесена из зоны горения и соединяется с кислородом в непосредственной близости от частицы (фиг. 201). В качестве окончательного продукта горения получается CO_2 . Появление СО возможно в зонах высоких температур за счет восстановительных реакций. В конце процесса наличие СО в угольном факеле нехарактерно, поэтому потери q_3 для пылесжигающей топки в нормальных условиях близки к нулю.

Содержание золы в топливе действует замедляющим образом на процессы горения, и потеря с недожогом при большой зольности топлива и

¹ Длительно пользоваться растопочными нефтяными форсунками, устанавливаемыми обычно в пылеугольных агрегатах, для постоянной работы при низких нагрузках невыгодно.

прочих равных условиях больше, чем для топлив маловольных.

Нуссельт вывел следующую формулу для времени выгорания отдельной частицы угольной пыли в неподвижной среде:

$$\tau = 144 \frac{\gamma_B r_0^2 V_0}{D_0 \cdot T_{cp}} \text{ секунд,} \quad (451)$$

где r_0 — начальный радиус частицы в м;

D_0 — коэффициент диффузии для нормального состояния газа, т. е. 760 мм рт. ст. и 15°C;

T_{cp} °К — средняя температура процесса сгорания; по Нуссельту

$$T_{cp} = \frac{T_1 - T_0}{\ln \frac{T_1}{T_0}},$$

где T_1 °К — температура пламени;

T_0 °К — начальная температура воздуха.

По указанию Нуссельта эта величина времени сгорания должна быть поправлена на влияние коэффициента избытка воздуха. Действительное время горения

$$\tau_a = \tau \cdot f(\alpha), \quad (452)$$

где $f(\alpha)$ по Нуссельту может быть найдена по кривой фиг. 202.

Результаты подсчета времени сгорания частиц разного размера по формулам (451) и (452) при $t_B = 20^\circ\text{C}$; $t_g = 1500^\circ\text{C}$; $\gamma_B = 1350 \text{ кг/м}^3$; $V_0 = 9 \text{ мм}^3/\text{кг}$; $D_0 = 0,0695 \text{ м}^2/\text{нас}$ приведены в табл. 59.

Следовательно, согласно Нуссельту время сгорания частицы в 100 м при $\alpha = 1,3$ составляет 2,5 сек.

По Блинову время полного сгорания частицы углерода

$$\tau = Ar_0^{1,6} + Br_0 \text{ секунд,} \quad (453)$$

где

$$A = \frac{\beta p}{C_0} = \frac{1}{1,07 \omega_0^{0,4} \cdot D_0^{0,5}},$$

$$B = \frac{\beta p}{C_0 K_1}.$$

В последних коэффициентах введены следующие обозначения:

β — постоянный множитель, определяющий отношение веса O_2 к весу C в продуктах реакции, равный в среднем 2;

$C_0 \text{ кг/м}^3$ — начальная концентрация кислорода в газе;

K_1 — константа скорости реакции; величина эта сильно возрастает с повышением температуры угольных частиц.

На основании опытов различных исследователей можно принять

$$\tau = (40 - 46) d_p^n, \quad (454)$$

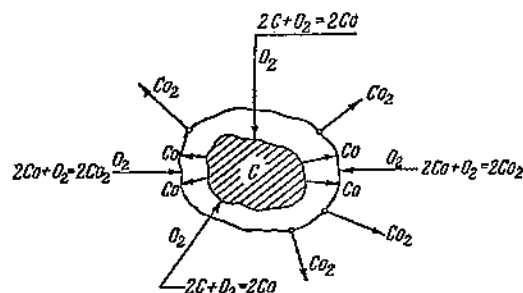
где n , меняющееся от 1,6 до 2,0, может быть принято равным 2,0.

Это выражение может служить некоторым грубым мерилем для оценки времени горения отдельных пылинки топлива. Время горения, как видно, растет прямо

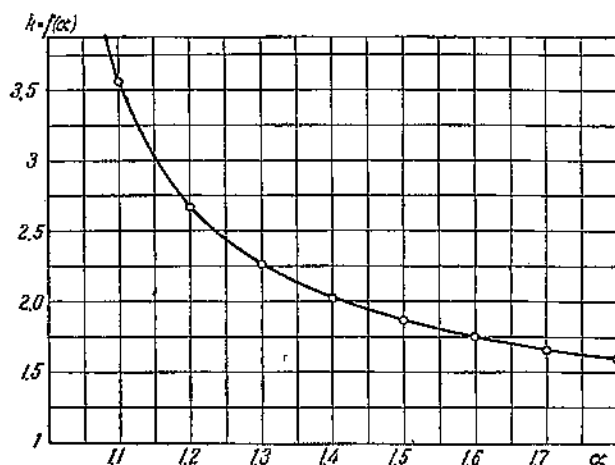
Таблица 59

Время сгорания частиц различных величин по Нуссельту

r_0 в м	1000	500	100	50	20	10	5	1
τ в секундах	110,4	27,8	1,104	0,20	0,055	0,011	0,0028	0,0001



Фиг. 201. Схема горения углеродной частицы в пыле-сжигающей камере.



Фиг. 202. Влияние избытка воздуха на время горения.

пропорционально квадрату размера пылинки. Для углей с большим выходом летучих время горения сокращается.

Грубо влияние летучих можно оценить по выражению

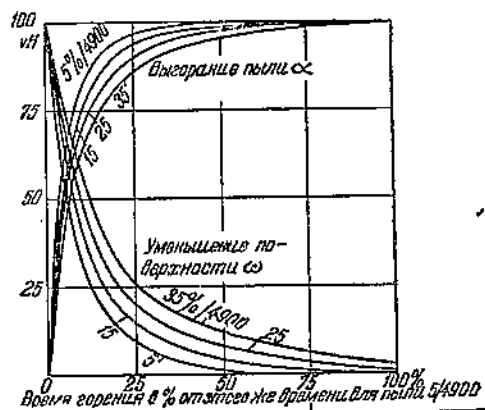
$$\tau_a = \frac{\tau \cdot 100}{100 - L_2},$$

где $L_2 \%$ — выход летучих на горючую массу.

Зависимость τ от d_p ясно указывает влияние тонкости помола на время сгорания. Пыль более тонкая, обеспечивая более высокое тепловое напряжение топки, требует меньшее время горения.

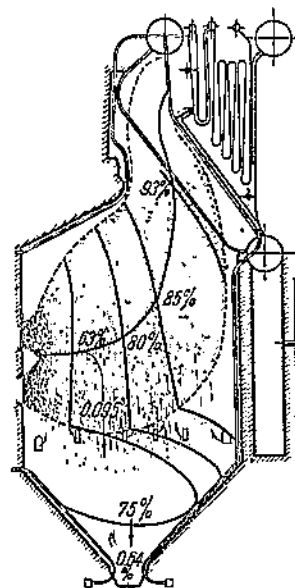
Время горения, согласно исследованиям Хоттеля, обратно пропорционально корню квадратному из температуры поверхности частицы. Эта же температура тем выше, чем выше температура топки. Таким образом повышение температуры в топке понижает время горения.

Основным условием, определяющим время выжигания угольной пылинки при прочих равных условиях, является избыток воздуха и воздушный режим топки в целом. Теоретические подсчеты и эксплуатационный опыт указывают, что при $\alpha = 1,2 - 1,3$ выгорание топлива получается наилучшим. Скорость горения пылевого облака будет максимальной в первый момент, когда полностью сгорают мелкие фракции. После выгорания мелких частиц процесс замедляется и полное дожигание углерода из крупных фракций требует значи-

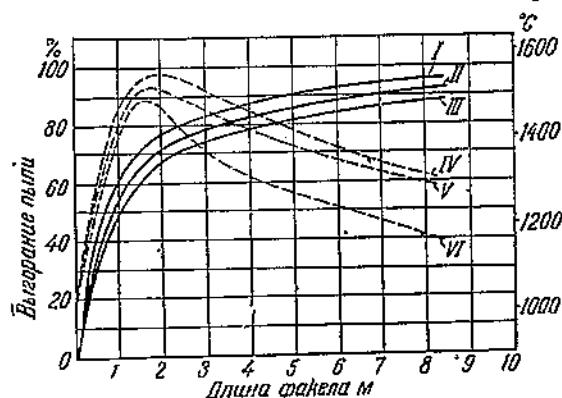


Фиг. 203. Выгорание угольной пыли различной тонкости помола (по Розину).

α — сгоревший вес частицы в процентах от первоначального; ω — уменьшение поверхности частицы в процентах от первоначальной.



Фиг. 204. Кривые выгорания пыли АШ по длине факела при нагрузке 63 т/час.



Фиг. 205. Кривые выгорания пыли и изменения температуры по длине факела.

I — степень выгорания при $D=36,6$ т/час; II — то же, при $D=63,2$ т/час; III — то же, при $D=70,8$ т/час; IV — температура факела при $D=70,8$ т/час; V — то же, при $D=63,2$ т/час; VI — то же, при $D=36,6$ т/час.

тельного времени, а следовательно, и большого объема топки. Чем грубее помол, тем замедленней происходит реакция в условиях пылевой камеры, факел растягивается, температуры в топке в общем снижаются. Поэтому при угрублении помола температура перед первым пучком может оказаться выше, чем температура при более тонком помоле, что может служить источником шлакования первого хода котла и верхней части топки, часто не защищенной экраном.

На фиг. 203 изображено (по Розину) протекание процесса горения угольного облака, оцениваемого изменением веса сгоревшего угля и соответствующим уменьшением поверхности его в зависимости от времени. Из кривых видно, что для тонко

размолотой пыли, характеризующейся остатком 50% на сите № 70, в течение 25% времени, потребного для полного сгорания, сгорает 97% пыли, а за оставшиеся 75% этого времени догорают остальные 3% пыли. Это время и, следовательно, значительная часть объема топочной камеры нужны для того, чтобы увеличить к. п. д. установки на 3%. Таким образом иногда выгодно иметь некоторую потерю от неполного горения за счет значительного сокращения объема топочной камеры.

Процесс выгорания пылеугольного облака в топочной камере иллюстрируется результатами опытов на полностью экранированном котле по сжиганию АШ.

На фиг. 204 показана конфигурация факела и топочной камеры и дана кривая выгорания топлива по длине факела в процентах от начального веса. Как видно, на глубине примерно 2 м выгорает 63% топлива. Остаток в количестве 30% требует длины в 7—8 м. На фиг. 205 показаны кривые выгорания в зависимости от длины факела и нагрузки топочной камеры. Из них следует, что чем выше нагрузка, тем степень выгорания делается меньше, что следует объяснить большими скоростями движения, а следовательно, меньшим временем пребывания пыли в топочной камере. На той же фигуре показано протекание температуры по длине факела. Как видно, при всех нагрузках температура резко поднимается на первых 2 м длины и затем спадает по мере продвижения кверху топки. Чем выше нагрузка котла, тем конечная температура в топке, естественно, получается более высокой. Рост температуры на первых 2 м длины факела объясняется быстрым освобождением химической энергии. Так как здесь выделение тепла от химической реакции протекает быстрее, чем отдача тепла окружающим поверхностям, то в первый период идет и быстрое, как показано на фигуре, нарастание температуры дымовых газов. По мере замедления процесса наступает равновесие между количеством тепла, освобождаемого из топлива, и количеством тепла, отдаваемого холодным поверхностям. Рост температуры прекращается, хотя процесс горения еще далеко не закончен. Этот момент отвечает максимальной температуре топочного пространства.

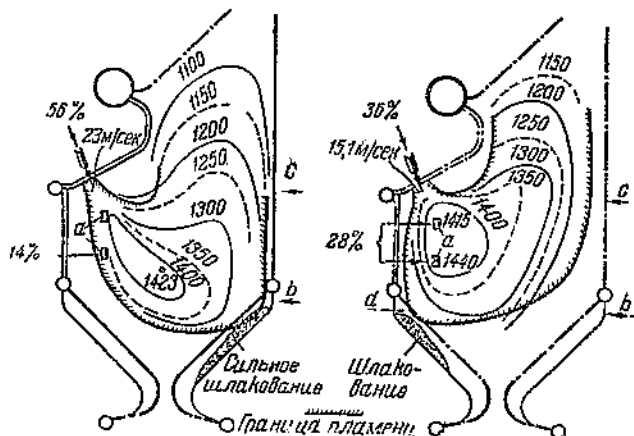
Процесс горения может продолжаться до входа в первый пучок котла и для некоторых частиц полностью не заканчивается.

Из рассмотренного следует, что максимальная температура топки в значительной степени отличается от теоретической температуры горения. Происходит это, во-первых, потому, что на нагрев затрачивается тепло только части топлива, во-вторых, потому, что с одновременным процессом освобождения химической энергии топлива идет интенсивный процесс поглощения выделяемого тепла. Чем тоньше помол, тем большая часть топлива участвует в образовании максимальной температуры и тем выше абсолютная ее величина. Обычно эта температура в экранированных топках составляет 75—85% от теоретической температуры горения.

После достижения максимальной температуры теплоотдача на котельную поверхность идет с максимальным эффектом, дополнительное же количество тепловой энергии, выделяемое за счет горения, постоянно понижается. В силу этого температура в топочной камере начинает падать.

Таким образом температуры в разных точках камеры по длине факела различны и значения этих температур отвечают, с одной стороны, разным стадиям горения топлива, с другой, положению факела в топке. При наблюдении с боков топки можно установить точки одинаковой температуры и построить изотермы. Расположение изотерм в топке до некоторой степени дает представление о правильности расположения факела в топочной камере. При правильной работе топки без жидкого шлакоудаления максимальные температуры должны сосредоточиваться посредине топочной камеры или вернее в центре холодных поверхностей, а в топках с жидким шлакоудалением — у поверхности шлаковой ванны. Правильное положение факела дает максимальное использование экранов и, следовательно, максимальную производительность котельного агрегата. Неправильное положение изотерм, например, сосредоточенность точек максимальных температур вблизи от стены, указывает на неверный воздушный режим. Изменяя скорости воздуха, возможно исправить положение факела. Конкретное положение изотерм в топке зависит от конфигурации топки и, главным образом, от типа горелок. На фиг. 206 показаны изотермы U-образного факела.

На фиг. 206 и 207 показано, как в зависимости от изменения процента первичного воздуха изменяется положение факела в топочной камере и соответственным образом перераспределяются температуры в топке. Как видно, при первичном воздухе в количестве 56% (начальная скорость пылевого потока 23 м/сек) факел отжимается к задней стенке и правая часть шлаковой воронки, склонна к шлакованию. Наоборот, при снижении первичного воздуха до 36% (скорость пылевого потока 15,1 м/сек) факел подтягивается ближе к передней стенке и шлакуется левая часть хо-



Фиг. 206 и 207. Влияние изменения количества первичного и вторичного воздуха на положение факела в топке.

лодной воронки. Очевидно, что наилучшие условия горения в рассматриваемой топке лежат между двумя этими крайними пределами.

57. Характеристика работы пылеугольной топки

Средний объем газов, получающихся при сжигании 1 кг топлива, равен

$$V_g \frac{T_g}{273} \cdot \frac{760}{p}.$$

Если предположить, что сгорание заканчивается через τ секунд и что относительная скорость газов и пылинок невелика или равна нулю, то тепловое напряжение факела определяется из выражения

$$\frac{Q}{V_g} = \frac{Q_p \cdot 273}{V_g T_g} \frac{p \cdot 3600}{760 \cdot \tau} \text{ ккал/м}^3 \text{ час.} \quad (455)$$

Количество газов V_g зависит от теплотворной способности топлива, его влажности и от избытка воздуха и может быть в общем виде представлено формулой

$$V_g = k_1 Q_p + k_2, \quad (456)$$

где величины k_1 и k_2 зависят от избытка воздуха и влажности топлива. Если принять это во внимание, получается окончательное выражение для определения теплового напряжения факела:

$$\frac{Q}{V_g} = \frac{Q_p \cdot 273 \cdot p \cdot 3600}{760 \cdot (k_1 Q_p + k_2) T_g \tau} \text{ ккал/м}^3 \text{ час.} \quad (457)$$

Из приведенной формулы следует, что тепловое напряжение факела, т. е. $\frac{Q}{V_g}$, отнесенное к объему газов, в которых идет и полностью заканчивается процесс горения, прямо пропорцио-

нально абсолютному давлению газов в камере (p). Этим отчасти может быть объяснено увеличенное тепловое напряжение в топках котельных агрегатов типа Велокс, работающих при повышенном давлении в топке. Понижение температуры в топке, как видно, повышает тепловое напряжение, т. е. при прочих равных условиях в камерах, хорошо охлаждаемых, тепловое напряжение всегда больше, чем в камерах слабо экранированных. В действительности эта зависимость несколько сложнее, так как время горения в свою очередь зависит от температуры и оно тем меньше, чем выше температура окружающей среды. Поэтому повышение теплового напряжения факела с понижением температуры имеет место лишь до определенных пределов.

Теплотворная способность топлива оказывает на тепловое напряжение факела относительно небольшое влияние, так как объем газов растет примерно пропорционально Q_p . Увеличение избытка воздуха уменьшает тепловое напряжение факела, поскольку увеличивается объем газов, но это справедливо лишь в некоторых определенных пределах колебания α_m , так как α_m определяет величину τ .

Наибольшее значение для теплового напряжения имеет время сгорания пылинки, которое зависит в основном от ее размера и избытка воздуха, поэтому тепловое напряжение факела при данном α_m определяется, главным образом, тонкостью помола и выходом летучих топлива.

Если принять, например, что $\alpha_m = 1,2$; $Q_p = 6000 \text{ ккал/кг}$, $k_1 = 1,33$; $k_2 = 1,65$, $t_g = 1200^\circ\text{C}$, то тепловое напряжение факела может быть получено из выражения:

$$\frac{Q}{V_{\phi}} = \frac{0,414 \cdot 10^3 \cdot p}{\tau} \text{ ккал/м}^3 \text{ час.} \quad (458)$$

В практических условиях тепловое напряжение факела по формуле (458) следует ожидать в пределах 1000—500 000 $\text{ккал/м}^3 \text{ час}$ даже при сжигании пыли с малым выходом летучих. В действительности тепловое напряжение объема топки находится, например, для АИШ, в пределах 125 000—150 000 $\text{ккал/м}^3 \text{ час}$. Подобное расхождение теоретических и практических цифр объясняется, между прочим, и тем, что факел занимает лишь часть объема топки, поэтому для повышения теплового напряжения топочного объема нужно прежде всего стремиться к лучшему заполнению объема топки факелом. Это связано с работой пылеугольных горелок. Хорошее заполнение возможно при многосечевых горелках и, главным образом, в тех случаях, когда стены топки не боятся удара лавины (топки с жидким шлакоудалением). В таких конструкциях мертвых углов в камере почти нет и тепловое напряжение топочного объема доходит почти до теоретических величин.

Воздушный режим топки, надежное зажигание, правильное положение факела по отношению к охлаждающим поверхностям топки оказывают влияние на процесс горения, а следовательно, и на тепловое напряжение топки.

Степень охлаждения топочной камеры определяет быстроту охлаждения газов. Если горение в факеле заканчивается при высоких температурах, то тепловое напряжение топки зависит от того, как велик объем, в котором фактически горения уже нет, а идет лишь процесс охлаждения газов. Топки с хорошим охлаждением, например, топки с двухсветными экранами, должны давать наиболее высокие цифры тепловых напряжений.

Практически допускаемые в пылеугольных топках расчетные тепловые напряжения топочных камер в большинстве случаев зависят не только от условий горения в них, но и от размеров самих агрегатов.

Увеличение объема топки, необходимое с точки зрения протекания процесса горения, прямо пропорционально мощности агрегата при прочих равных условиях. Поверхность же стен топки растет медленнее, чем ее объем, так как чем больше топка, тем меньше поверхность стен на единицу объема. При значительном увеличении объема топки с увеличением мощности котла поверхность топочных стен может оказаться недостаточной для размещения на них даже сплошных экранов. При больших тепловых нагрузках мощных котлов температура газов, покидающих топку, может оказаться слишком высока и возможно шлакование поверхности нагрева. Чтобы этого избежать, обычно уменьшают тепловые напряжения топочного объема с целью увеличить количество холодных поверхностей стен топки. В связи с этим в агрегатах большой мощности при неблагоприятной характеристике золь величина $\frac{Q}{V_m}$ топки снижается до 110 000—130 000 $\text{ккал/м}^3 \text{ час}$, особенно при легкоплавкой золе топлива. Применение двухсветных экранов внутри топки практически позволяет уменьшить объем топки и повысить $\frac{Q}{V_m}$.

Таким образом $\frac{Q}{V_m}$ не может быть задано однозначно для каждого топлива. Наиболее выгодное значение теплонапряжения топки зависит для одного и того же топлива от тонкости помола, избытка воздуха, степени экранирования топки.

Тепловая работа топки. Основная потеря при сжигании пылевидного топлива в камерной топке заключается в механическом недожоге, т. е. в потере с уносом и с недожогом в шлаке. Поскольку в топке осаждается 10—15% золь, потеря с горючими в шлаке невелика.

Потеря от механической неполноты сгорания определяется содержанием летучих в топливе, тонкостью помола, теплонапряжением топочного

пространства, правильностью воздушного режима и распределением топлива по горелкам. Для топлив с большим выходом летучих допустим более грубый помол, поскольку процесс горения частички такого угля идет относительно быстрее.

Для антрацитового штыба потеря с механическим недожогом составляет от 4 до 10—12%.

На фиг. 208 показана зависимость между тонкостью помола и потерей от недожога для АШ при разных $\frac{Q}{V_m}$, основанная на средних эксплуатационных данных.

Для топлив с большим выходом летучих потеря с недожогом обычно находится в пределах 0,5—1,5%.

Потеря с уносом растет по мере повышения теплового напряжения топочной камеры из-за уменьшения времени сгорания. Однако ниже известного предела величины $\frac{Q}{V_m}$ потери с недожогом начинают расти из-за ухудшения условий горения, связанного с падением температур в топке. Наиболее выгодное тепловое напряжение топочного объема зависит от типа камеры и степени ее экранирования. Топки с малым экранированием при неизменном $\frac{Q}{V_m}$ дают меньшие потери с недожогом ввиду ускорения подсушки и возгонки топлива.

Механический недожог может быть обусловлен недостатком воздуха или неправильным его распределением. Для топлив с малым выходом летучих коэффициент избытка воздуха в топочной камере должен быть не менее 1,25, для прочих углей ~ 1,2.

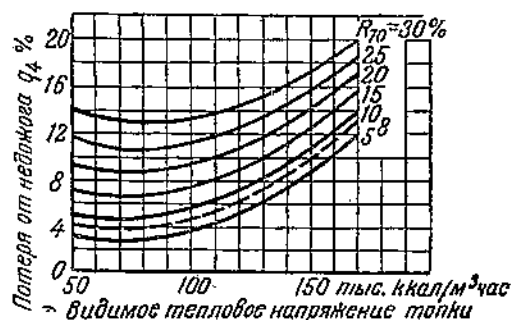
Потеря от химического недожога возможна либо при большом недостатке воздуха (для углей с большим выходом летучих), либо при нарушении распределения воздуха по горелкам. Обычно потеря от химического недожога не превышает 0,5—1,0%.

При топках с жидким шлакоудалением, а также во всех случаях при углях с повышенной зольностью необходимо учитывать физическое тепло, теряемое с жидким шлаком или с горячей золой.

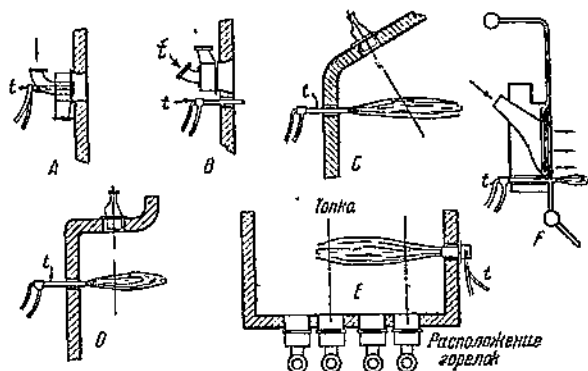
Расчетные данные по камерным топкам приведены в табл. 60.

Пуск топки. Для зажигания пылеугольного факела топка снабжается нефтяными форсунками. В зависимости от типа пылевых горелок нефтяные форсунки вводят в центр пылеугольной горелки (фиг. 209, А) или устанавливают в непосредственной близости от нее (В—Е). Розжиг мазутной форсунки осуществляется от горячей тряпки, смоченной нефтью. Для ускорения процесса розжига нефтяных форсунок в последнее время с успехом применяют электрические запалы.

При розжиге пылеугольного факела воспламенение протекает тем легче, чем выше концентрация топлива в первичном воздухе.



Фиг. 208. Потери от недожога в зависимости от тонкости помола (АШ).



Фиг. 209. Типовое расположение нефтяных зажигательных форсунок при различных горелках.

Время розжига и мощность нефтяных форсунок зависят от сорта топлива. Для топлив с малым выходом летучих производительность нефтяных форсунок для достижения устойчивого горения пыли должна обеспечивать не менее 50% производительности котельного агрегата, при большом выходе летучих достаточно 25—30%. Для экономии мазута целесообразней создавать мощный нефтяной факел, сокращая до минимума время разогрева топки.

Если при розжиге топки произошло затухание факела и часть топлива оказалась в топке несгоревшей, необходимо тщательно провентилировать весь котельный агрегат во избежание взрыва пыли в газоходах котла.

Процесс разогрева котла от холодного состояния, продолжающийся нормально 30—45 мин., с точки зрения работы самой топочной камеры мог бы быть значительно ускорен. Однако быстрый подъем нагрузки от холодного состояния часто вредит самому котельному агрегату, из-за чего процесс разогрева растягивается на 1—2 часа, а на некоторых агрегатах до 6—8 час.

Помимо жидкого топлива для розжига возможно использование газа. Процесс розжига в этом случае практически ничем не отличается от розжига топки с помощью мазутного факела. При розжиге рекомендуется топливо давать только с первичным воздухом. Этим повышается общая концен-

Тепловая работа камерных топок
(Расчетные данные)

Группа топлива	Род топлива	L_d о/о	R_{70} о/о	a_m	t_a оС	$\frac{BQ_p^H}{V_m}$ ккал/м³ час	q_3 о/о	q_4 о/о	Примечание
I	АШ, АРШ — донецкий	4	8	1,25	≥ 300	110 000	0	4—6	При $R_{70} = 4—6\%$ $\frac{BQ_p^H}{V_m}$ до 130 000
	Антрацит похавский	3,5							
	" брединский	4,0							
	" домбаровский	4,5							
	" егоршинский	7,5							
II	Тощий донецкий	12	12	1,25	≥ 300	120 000	0	3—4	При $R_{70} = 8—10\%$ $\frac{BQ_p^H}{V_m}$ до 180 000
	Аралчический	10							
III	Авжаросудженский	15	15	1,2	≥ 300	120 000	0	3—4	При $R_{70} = 8—10\%$ $\frac{BQ_p^H}{V_m}$ до 180 000
	Кемеровский	18							
	Прокопьевский	18							
IV	Киселевский	18	20	1,2	> 250	140 000	0,5	2,5—3	
	Норильский	23							
	Карагандинский	25							
	Отходы сухого обогащения	25							
	Сучанские	30							
V	Отходы мокрого обогащения	30	25	1,2	250	200 000	0,5	2—3	
	Воркутские угли	30							
VI	Сучанские	32	25	1,2	260	225 000	0,5—1	1,5—2	
	Огсевы газовых углей	39							
	Киселевский уголь	40							
VII	Бурые угли:	45	30	1,2	> 200	225 000	0,5—1	0,5—1	При сжигании в камерных топках с обычным пылеприготовлением
	а) подмосковный								
	б) селяжаровский								
	в) челябинский								
	г) богословский								
VIIa	Бурые угли:	45	50	1,2	≥ 300	175	1—1,5	1—1,5	При сжигании в шахтных мельничных установках
	а) подмосковный								
	б) селяжаровский								
	в) челябинский								
	г) богословский								
	д) канский								
	е) райчихинский								
	ж) альшевский								
	з) денгеровский								
	Бурые угли:								
	а) кизилсайские								
	б) сулюктинские								
	в) мангильские								
	г) шурабские								
VIII	Сланцы	70	50	1,20	> 300	175	1—1,5	2—3	Пылевидное сжигание
IX	Украинские бурые угли	57	50	1,20	> 300	200	1—1,5	1—1,5	Мелющие вентиляторы
X	Фрезерный торф	70	50	1,2	> 300	225	1—1,5	1—2	Топки ВТИ-Мосэнерго

трация топлива и облегчается процесс зажигания факела. При розжиге пыль подается в топку после того, как топочная камера достаточно разогрета и имеется полная уверенность в получении устойчивого факела. По мере ввода в работу пылеугольных горелок и подъема нагрузки мазут или газ выключается.

Эксплуатация топки. Пылеугольная топка очень эластична в работе и позволяет в кратчайшее время как поднимать, так и сбрасывать нагрузку без заметного изменения параметров пара.

Изменение нагрузки топки осуществляется воздействием на питатели пыли и подачу вторичного воздуха. Возможно также выключение из работы части горелок. Однако понижение нагрузки путем общего изменения расхода топлива более целесообразно, так как при этом лучше сохраняются сами пылеугольные горелки и лучше протекает процесс горения. В частности, при пониженных нагрузках работа на большем количестве горелок иногда является более устойчивой. Понижение нагрузки возможно лишь до определенного предела, ограниченного степенью экранирования топки и качеством топлива. Для тощих углей при большой степени охлаждения топочной камеры минимальная нагрузка без дополнительного сжигания мазута составляет около 50—70% от нормальной. Для углей с большим выходом летучих при полностью экранированной топке предел нагрузки лежит около 40—50% от нормальной.

Явление шлакования поверхностей нагрева и стен обмуровки прежде всего связано со свойствами золы. Зола с низкой температурой плавления и затвердевания создает при неудачной конструкции топки тяжелые эксплуатационные условия.

При проектировании топки основными показателями в этом случае являются характерные точки, определяющие изменение состояния золы под влиянием высоких температур.

Характеристика плавкости золы по методу Бунте-Баума дает возможность оценить качество шлака с точки зрения шлаковки отдельных элементов котла. В этом смысле полагая кривая фиг. 17 указывает на наличие большой вязкости в широком интервале температур, а кривая с резким падением, наоборот, указывает на узкий интервал температур, соответствующих большой вязкости шлака. Первая кривая указывает на неблагоприятные условия шлаковки, а вторая — на благоприятные. При топках с жидким шлакоудалением необходимо учитывать, что температура размягчения шлака примерно на 50°С выше температуры его застывания, а температура плавления шлака ниже температуры плавления золы в среднем на 50—80°С.

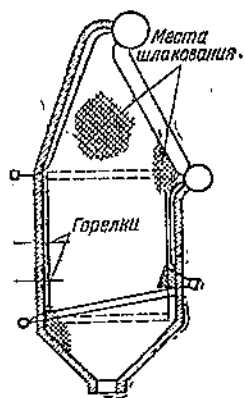
Зашлакование поверхностей нагрева, являющееся очень тяжелой неполадкой топок паровых котлов, заключается в том, что стены топки, зольник и первые ряды трубок котельного агрегата покрываются слоем шлака. Это вызывает повышение



Рис. 210. Шлакование верхней шамотной части топки.

температуры перегретого пара, так как повышается температура газов на выходе из топки. При зашлаковании труб котельного агрегата понижается производительность котла и растет расход энергии на дымосос вследствие непрерывно повышающегося газового сопротивления котла. Общее ухудшение работы топки и первого хода котла вызывает повышение температуры уходящих газов. Таким образом шлакование приносит большой вред котельному агрегату и при значительном распространении приводит к остановке котла часто даже в аварийном порядке. Зола топлива, проходя в топке через зону высоких температур, плавится. При попадании такой расплавленной золы на холодные поверхности она затвердевает. Если стены топочной камеры полностью покрыты холодными поверхностями, то обычно такие поверхности не шлакуются. Зола в этом случае затвердевает на известном расстоянии от экранных поверхностей и к вертикальным экранным трубкам не пристает. Однако если в топке имеются поверхности с температурой выше температуры застывания шлака, то шлак по ним стекает и застывает там, где температура поверхности ниже температуры застывания шлака. Здесь частицы шлака прилипают к поверхности топки (фиг. 210). Такие налипшие на поверхности шлаковые наросты, увеличиваясь в размерах, могут далее закрыть частью и экранные трубы. Упавшая под влиянием собственного веса или сбивая глыба шлака, имеющая иногда вес в несколько сот килограммов, может причинить значительный вред при своем падении. Особенно это опасно при наличии гранулятора, трубы которого могут прогнуться и даже выйти из мест вальцовки. Основным местом начала шлакования стен топки являются огнеупорные поверхности.

Иначе протекает шлакование труб первого хода котельного агрегата. Здесь играют роль высокая температура газов перед первым ходом и скорости, с которыми расплавленные частички шлака ударяются о трубы. Шлак, хотя и неплотно, может пристать к трубе. Такой шлаковый налет вначале остается рыхлым и легко может быть удален с труб, если процесс зашлакования труб не запу-



Фиг. 211. Эскиз топки КизелГРЭС. Источники шлакования; верхний незаэкранированный треугольник, гранулятор топки.



Фиг. 212. Общая картина шлакования разрезанного бокового экрана.

щен. Шлакование труб котла, имеющих малый наклон к горизонту, может начаться также за счет золы, осаждающейся на тыльной части труб. Со временем эти трубы начинают хуже охлаждать газы, температура их повышается, начинается осаждение расплавленной летучей золы и происходит дальнейший рост золовых и шлаковых отложений. Постепенно трубы покрываются кольцом шлака и расстояние между соседними трубами затягивается шлаковой пленкой. После этого шлакование первого хода котла протекает очень быстро. При трубах с крутым наклоном такое протекание процесса менее вероятно вследствие того, что зола с круто поставленных труб сползает под влиянием собственного веса. Трубы котла в этом случае шлакуются меньше.

Причинами шлакования являются либо конструктивные дефекты топочной камеры, либо неправильная эксплуатация топки. Основными дефектами топки в этом отношении оказываются чаще всего недостаточное количество экранных поверхностей и их неудачное распределение. На фиг. 211 показан эскиз топки Кизеловской ГРЭС, в которой при весьма неблагоприятных свойствах кизеловского угля с точки зрения шлакования верхний треугольник топки оставлен открытым. Недопустимы также шамотные поверхности в задней стенке на стыке гранулятора и заднего экрана и установка на верхнем своде при работе на кизеловском угле открытого экрана с шагом более 2 д. Под влиянием высоких температур и ударного действия шлаковых капель свод быстро покрывается шлаковыми наростами. Шлакование особо заметно между трубами, местами затягиваются шлаком и сами трубы.

Для углей с низкой температурой плавления золы и особенно содержащих примеси колчедана, понижающего температуру плавления золы, необходимо полное закрытие стен экранными поверхностями, лучше всего гладкотрубными. Однако установка труб с шагом, большим 2 д, не может служить защитой стен. Жидкий шлак прилипает к горячим огнеупорным поверхностям между трубами и в конце концов закрывает и самые трубы (фиг. 212).

Шлакование может быть вызвано очень близким расположением устья горелки от стены или гранулятора. При турбулентных горелках иногда получается скошенный поток пылевоздушной струи по сечению горелки. Поэтому при одностороннем вращении во всех горелках факел в топке может быть сбит в одну сторону, давая значительный тепловой перекося в топке и ускоряя шлакование в перегруженной половине топки.

В котельном агрегате для защиты от шлакования первого ряда труб обычно применяется разрядка или фестонопиривание нескольких первых рядов труб котельного пучка. Желательно ставить эти трубки с крутым наклоном.

Основные конструктивные мероприятия для предупреждения шлакования заключаются в следующем.

1. Охлаждение топочной камеры экранами должно быть таким, чтобы температура газов перед первым пучком не повышалась выше температуры начала размягчения золы¹. Но даже и при этом необходимо фестонопиривание первых рядов котельного пучка или установка специальных фестонных экранов в верхней части топочной камеры. При больших топочных объемах охлаждение газов за счет настенных экранов часто оказывается недостаточным. В этом случае возможно применение двухсветных экранов (фиг. 246). При размещении экранных поверхностей на стенках топки недопустимы слишком большие расстояния между трубками. Наилучший эффект с точки зрения борьбы со шлакованием топочных стен дают трубки, установленные почти вплоты (шаг 1,1—1,2 д), либо экраны типа Муррей. Применение футерованных плиток Бейли при углях с низкой температурой плавления шлака недопустимо. Охлаждение зольника должно быть осуществлено в виде холодной воронки. Для сильно шлакующихся углей оставление незаэкранированных огнеупорных поверхностей недопустимо.

2. При установке турбулентных горелок ось горелки должна отстоять от боковой стены на расстоянии 1,75—2 м. Вращение факела турбулентных горелок должно быть направлено в разные стороны во избежание перекося факела в топке. При щелевых горелках расстояние до стены от крайней щели должно быть не менее 1,2—1,5 м. Скорости выхода первичного и вторичного воздуха должны быть такие, чтобы не было удара факела в заднюю стенку топочной камеры.

3. Топочная камера должна снабжаться обдувочными аппаратами, с помощью которых систематически сбиваются первые наросты шлака на экранных трубках. Вместе с тем должно предусматриваться достаточное количество отверстий, через которые облегчался бы доступ к особо опасным местам камеры.

Очень часто источниками шлакования являются ошибки эксплуатации.

Неправильное распределение пыли по горелкам создает тепловые перекося в топке и ставит в тяжелое положение соответствующую часть топочной камеры. Неправильный выбор выходных скоростей (слишком малы) горелки часто обуславливает шлакование фронтальной стенки. Излишне большие выходные скорости горелки создают благоприятные условия для шлакования задней стенки. Низкое расположение факела создает возможность повышенных температур и усиленного шлакования в зольнике. Иногда источником шлакования топки является неправильный режим пылеприготовления. Так, при грубом помоле процесс го-

¹ Точнее, она должна быть ниже температуры конца застывания шлака.

рения затягивается к первому ходу котла, вследствие чего охлаждение газов оказывается недостаточным, и начинается образование шлаковых наростов в верхних частях топки. Наличие окиси углерода в конце топки создает там полувосстановительную среду, в которой температура плавления шлака снижается.

Борьба со шлакованием в эксплуатационных условиях ведется установлением правильного воздушного режима и соответствующей нагрузки котла. При определенной степени экранирования понижение температур в топке возможно за счет понижения нагрузки или за счет повышенных избытков воздуха. Эти два метода являются наиболее действительным средством в борьбе со шлакованием котла в эксплуатационных условиях, но они неэкономичны. Понижение нагрузки на котле может ограничивать отдачу энергии со станции. Повышение избытков воздуха увеличивает потерю с уходящими газами.

Эксплуатационный персонал котельной должен постоянно заботиться об ограничении процесса зашлакования путем систематической обдувки экранных котельных поверхностей. Задача в данном случае осложняется тем, что надежных обдувочных аппаратов на установках обычно не имеется. Поэтому на котлах следует предусматривать необходимое количество лючков для ручной очистки и обдувки труб. Обдувку можно производить паром давлением до 17 атм или воздухом 4—6 атм. Воздух или пар подается на засоренные поверхности с помощью газовой трубы и металлического шланга. Применение пара при ручной обдувке более опасно для персонала. На фиг. 213 показана пика, с помощью которой производится обивка шлака. В некоторых случаях в такие пики дается через резиновый шланг вода, с помощью которой охлаждается трубка, а вытекающая вода способствует растрескиванию шлака.

На Каширской станции в целях предупреждения больших скоплений шлака на плитках Бейли применяется метод сброса нагрузки с котла на 25—30 мин. В работе в этом случае остается одна из восьми пылевых горелок при двух мазутных. Вследствие резкого изменения температурных условий связь шлакового слоя с экранными поверхностями ослабевает и шлак под влиянием собственного веса спадает в зольник. Удаление шлака с шамотных поверхностей практически возможно только путем обивки его.

Процесс шлакования идет вначале медленно, после же зашлакования известной части поверхностей он значительно ускоряется. В связи с этим эксплуатационному персоналу необходимо следить за тем, чтобы шлакование топочной камеры не переходило известного критического предела, т. е. пока первоначальные наросты золь и шлака не оплавятся, иначе борьба с этим явлением делается уже затруднительной и требует остановки котельного агрегата для чистки котла и камеры.

Если топка зашлакована, очень опасным может оказаться случайное повышение в ней температуры из-за чрезмерного повышения нагрузки, уменьшения влажности топлива, уменьшения избытка воздуха или неудовлетворительной работы горелок. При таком повышении температуры застывший на стенках шлак начинает плавиться и стекать в нижние части топки, образуя так называемые козлы, могущие совершенно нарушить работу топки. Поэтому обслуживание зашлакованной топки требует большого внимания и осторожности, чтобы не допустить этого опасного общего и местного повышения температур.

58. Пылеугольные горелки и их работа

Работа пылеугольных топок в очень большой степени зависит от работы горелок, задача которых заключается в подаче пыли и воздуха в топочную камеру и их смешении.



Фиг. 213. Пика для обивки шлака.

Пыль, захваченная потоком первичного воздуха, направляется по трубопроводу к горелкам, через которые она, смешиваясь с вторичным воздухом, попадает в топочную камеру.

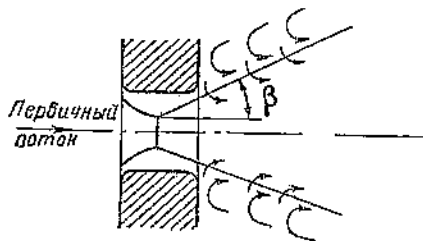
Эксплуатационная надежность работы топок связана отчасти с надежностью пылепроводов, по которым пыль передается от питателя к горелкам. Пылепроводы работают в тяжелых условиях и быстро изнашиваются. Для надежности следует применять цельнотянутые трубы с толщиной стенки не меньше 5—7 мм. Во фланцевых соединениях и поперечных швах сварных труб вследствие завихрения потока происходит быстрое истирание металла. Скорость пылевоздушной смеси при подаче к горелкам не должна быть ниже 20—25 м/сек во избежание отложений пыли на горизонтальных участках трубопровода для уменьшения опасности взрыва пыли в системе. Горизонтальные участки на пылепроводах нежелательны.

Доля первичного воздуха зависит: от рода топлива, температуры воздуха, нагрузки котла, системы пылеприготовления. Чем выше Q_p^* , тем меньше доля первичного воздуха, так как на единицу веса топлива требуется примерно постоянное количество воздуха для транспорта. Чем выше температура воздуха, тем меньше доля первичного воздуха при одних и тех же скоростях, допустимых в пылепроводах. Чем ниже нагрузка, тем больше обычно доля первичного воздуха, так как при изменении нагрузки абсолютное количество первичного воздуха не меняется по условиям аэротранспорта. Иногда при малой нагрузке приходится сбрасывать часть первичного воздуха прямо в топку помимо горелок и питателей пыли. В индивидуальных системах процент первичного воздуха целиком определяется работой мельничной системы, где он связывается с концентрацией пыли, которая обычно находится в пределах 0,5—0,6 кг топлива на 1 кг воздуха.

При этом получается следующая зависимость количества первичного воздуха V_1 от теплотворной способности топлива:

Q_p^*	2000	4000	5000	6000	ккал/кг
V_1	30—40	20—25	15—20	10—15%	

Количество первичного воздуха для АШ может составлять 10—15%, для сланцев при тех же



Фиг. 214. Процесс развертывания конуса факела.

Для трубы $\beta = 14^\circ$, для турбулентной горелки $\beta \geq 45^\circ$.

условиях транспорта пыли приходится доводить его до 50—60%.

Чем выше концентрация топлива в первичном воздухе, тем быстрее и надежнее идет загорание пыли углей с малым выходом летучих. Для углей с большим выходом летучих это не имеет большого значения.

С точки зрения процесса горения все же желательно, чтобы при увеличении количества летучих в топливе доля первичного воздуха соответственно повышалась. Как видно, это правило соблюдается до некоторой степени автоматически, так как при понижении теплотворной способности приходится иметь дело с бурными углями или сланцами, допускающими большой процент первичного воздуха.

Хорошая горелка должна обеспечить равномерное перемешивание всей пыли и воздуха, подаваемых в топку, максимальное заполнение объема топки факелом и поддаваться широкому регулированию по производительности и по положению факела в топке.

Первое условие обеспечивает хорошее сжигание пыли, второе — максимальное тепловое напряжение топки, третье — гибкость работы агрегата при различных режимах.

Для работы пылеугольной горелки наиболее важны следующие обстоятельства: хорошее перемешивание первичного и вторичного воздуха¹, длина пути, необходимого для такого перемешивания, и дальность факела. Поток аэропыли, выходя из простой трубы, расширяется в виде конуса, имеющего угол раскрытия примерно 20—28°, и захватывает окружающий газ. Вследствие этого по мере удаления от устья потока количество вовлеченного в движение газа делается все больше и больше. Живая сила потока и скорость падают как по оси потока, так и от его центра к периферии.

При вихревых движениях струи угол раскрытия составляет 90° и больше, вследствие чего затухание скорости в этом случае идет значительно быстрее.

¹ Для углей с малым выходом летучих после момента воспламенения.

Развертывание конуса сопровождается вихревым движением на его периферии (фиг. 214). Этим явлением, очевидно, объясняется обычное шлакование верхней и нижней амбразуры горелки (шлак над и под горелкой), которые тем заметней, чем шире развертывание факела.

При вдувании холодного воздуха в топку, в среду горячих газов, под влиянием большого удельного веса воздуха струя воздуха должна была бы направляться вниз, если бы не было влияния тяги. Процесс усложняется также и тем, что по мере продвижения пылевоздушной смеси в топке воздух прогревается за счет горения топлива. Все это делает аэродинамические явления топки весьма сложными.

Длина пути перемешивания первичного и вторичного воздуха тем больше, чем меньше доля первого.

При U-образном факеле длина пути, на котором присасывается 100% количество газа, очень велика. Процесс насыщения факела вторичным воздухом в этих случаях происходит плохо, так как вторичный воздух обычно подается лишь с фронта, а одностороннее подмешивание воздуха требует почти двойной длины пути. При диаметре горелки 200 мм для U-образного факела длина пути перемешивания находится в пределах 7—7,5 м. Развитие пламени в таком факеле требует большого объема и, следовательно, не позволяет получить высокого теплового напряжения топочного объема. В современных горелках подача и смешивание вторичного воздуха с первичным производится или в самой горелке или по выходе потока в топку. При этом перемешивание значительно улучшается. При щелевых горелках, по данным ЦКТИ, полное перемешивание имеет место на глубине 9H, где H — шаг щели, т. е. практически на глубине 1—1,5 м от устья горелки. Процесс перемешивания значительно ускоряется, если при помощи специальных устройств первичным и вторичным струям дается такое направление, при котором процесс смешивания идет не только за счет вихреобразования на границе потока, но и за счет направления одного потока под углом к другому (пересечение струй первичного и вторичного воздуха).

В круглых горелках перемешивание улучшается и за счет установки различных устройств для завихривания. Завихривание потоков может быть получено либо касательным направлением воздуха, либо установкой особых спиралей, завихривающих поток. Чем энергичнее идет завихривание первичного и вторичного воздуха, тем больше расширение выходящего из горелки конуса. Это вызывает быстрое затухание скорости по оси факела и укорачивание факела, несмотря на большую первичную выходную скорость при большой производительности горелки, и позволяет устанавливать горелки на фронте топки.

Перемешивание улучшается при тонких потоках. Многощелевые горелки, имеющие слоистое строение потока, дают поэтому хорошее перемешивание. Такие же хорошие результаты могут быть получены и при перемешивании узких кольцевых струй, так как аэродинамика процесса в них не отличается от обычных прямоугольных потоков.

Уменьшение дальности как для круглых, так и для щелевых горелок путем искусственного пересечения направлений движения первичного и вторичного потока осуществляется применением особых рассекателей.

Затухание скорости по оси горелки идет тем быстрее, чем меньше ее диаметр, поэтому с повышением диаметра горелки устанавливают меньшие начальные скорости выхода аэропыли из нее. Практически это приводит к тому, что производительность круглой горелки растет с увеличением диаметра не прямо пропорционально сечению горелки (т. е. квадрату диаметра), а прямо пропорционально ее диаметру.

Влияние качества топлива на выходную скорость аэропыли невелико сравнительно с влиянием размера горелки.

При одинаковых диаметрах горелки для углей с большим выходом летучих требуется иметь большие начальные скорости воздуха, чем для углей с малым выходом летучих. Это связано с запаздыванием зажигания топлива при малом выходе летучих, что приводит к растянутому факелу при больших начальных скоростях выхода. При углях с большим выходом летучих зажигание происходит очень быстро, и во избежание пережога самой горелки следует иметь относительно большую начальную скорость выхода первичной смеси из горелки. При этом корень факела уходит глубже в топку, дальше от устья горелки. Повышенные скорости дают возможность лучше избежать шлакования верха и низа горелки.

Потеря напора в горелке по первичному воздуху может быть определена из выражения

$$\Delta s_L = \xi \frac{w_L^2}{2g} \gamma_L (1 + \mu), \quad (459)$$

где ξ — коэффициент сопротивления; для щелевых горелок $\xi = 1,1-1,2$, для турбулентных $\xi = 1,3-1,4$;

w_L м/сек — выходная скорость воздуха.

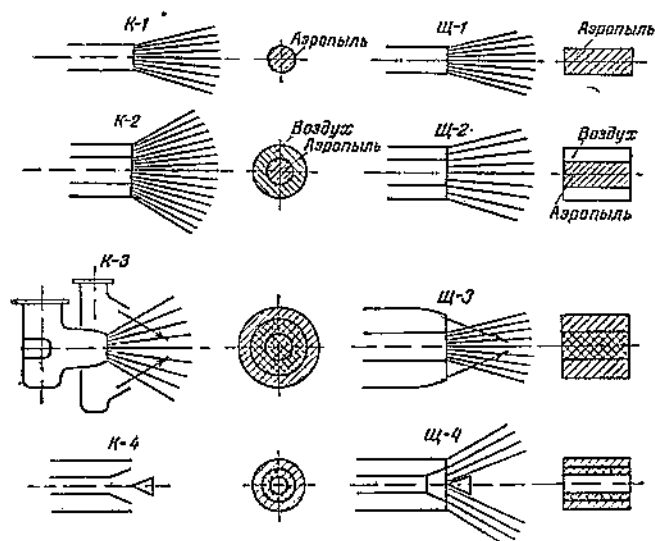
Обычная концентрация пыли μ в первичном воздухе перед горелкой равна примерно 0,5 кг топлива на 1 кг воздуха. Как видно из формулы, сопротивление горелки быстро возрастает при увеличении выходной скорости w_L . Так, для воздуха с температурой 80°С ($\gamma_L = 1$) при концентрации $\mu = 0,5$ потеря напора при $w_L = 20$ м/сек составляет около 40 мм вод. ст.; при $w_L = 30$ м/сек эта потеря подымается до 80 мм вод. ст.; при 40 м/сек — до 150 мм вод. ст.

Для вторичного воздуха потеря напора определяется по той же формуле при $\mu = 0$ и $\xi \approx 0,5$.

Горелка является одной из важнейших деталей пылевой топки. Экономичность использования топлива, тепловое напряжение топочной камеры, эксплуатационная надежность топки часто зависят от того, насколько правильна конструкция и расположение горелок, а также режим их работы. Конструктивные формы горелок могут быть разбиты на два основных класса: горелки щелевые и горелки круглые (фиг. 215). В качестве простейшей горелки могут служить либо обыкновенная труба, либо щель (фиг. 215, К-1, Ш-1). Вторичный воздух в этом случае подается помимо горелки. В более сложной конструкции вторичный воздух подается через вторую параллельно стоящую щель или через концентрическую трубу (труба в трубе, фиг. 215, К-2, Ш-2). Подобные горелки работают более удовлетворительно, но они дальности.

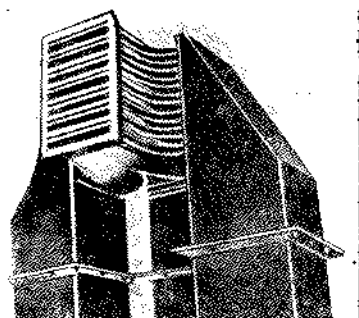
Щелевые горелки с пересечением первичного потока вторичным и круглые с завихриванием и пересечением первичного потока со вторичным употребляются обычно в качестве фронтных (фиг. 215, К-3, Ш-3). Наиболее распространенным типом горелок в последнее время являются горелки с рассекателями, направляющими поток первичного воздуха ко вторичному (фиг. 215, К-4, Ш-4). Щелевые горелки с рассекателями обычно применяются в виде многощелевых, в которых в качестве рассекателя часто служат экраны, защищенные в этом случае специальными чугунными деталями. В круглых горелках в качестве рассекателя имеется специально установленный конус. Установка рассекателя позволяет при больших начальных скоростях, т. е. при большой производительности горелки, иметь сильно развернутый факел, т. е. короткопламенную горелку.

Щелевые горелки и их конструктивное выполнение. На фиг. 216 показана щелевая горелка Лопульки, представляющая собой расширяющуюся книзу щель, через которую вдвигается пылевоздушная смесь. Аэропыль подводится по круглому трубопроводу 1. Далее в самой горелке круглое сечение переходит в удлиненное щелевидное 2. Вторичный воздух поступает в горелку в небольших количествах по каналам 3. Такие горелки изготавливаются небольшой производительности, до 1 т/час. В целях улучшения перемешивания пыли и воздуха на выходе из горелки нижняя часть сопла делается волнообразной, что улучшает процесс перемешивания. Скорость на выходе из горелки обычно не меньше 15—17 м/сек. При этих горелках вторичный воздух обычно подается через отверстия передней стенки при U-образном факеле. Односторонний подсос в факел воздуха для горения растягивает путь, необходимый для полного догорания топлива, и оправдывает себя лишь для трудно зажигаемых топлив. В по-



Фиг. 215. Схемы горелок.

К—круглые горелки; Щ—щелевые горелки.

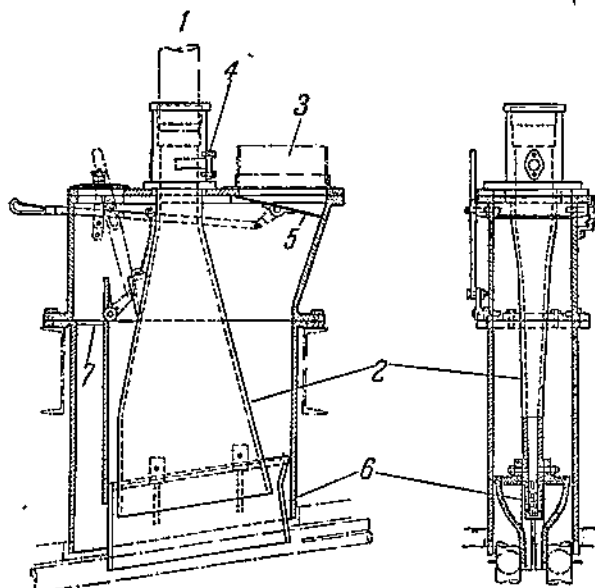


Фиг. 218. Модель щелевой горелки ЦКТИ.

следнем случае прогрев первичного воздуха и зажигание смеси идут быстро вследствие малого количества этого воздуха, а также вследствие того, что факел одной своей стороной обращен к горячим газам.

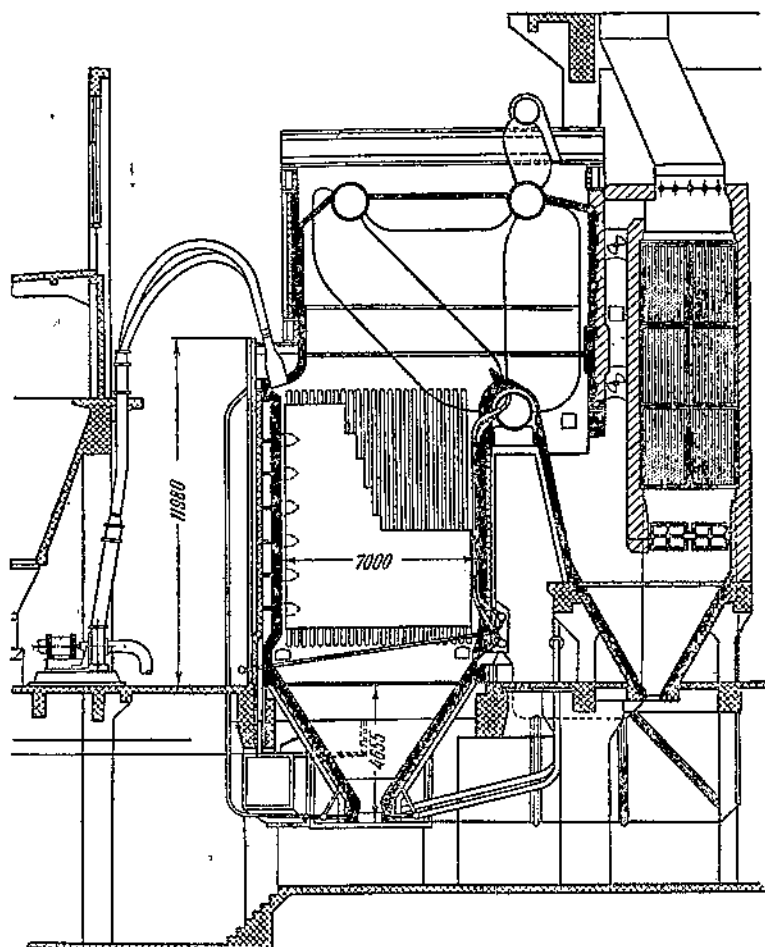
На фиг. 217 показана топка котла Зуевской ГРЭС, сжигающая пыль АШ и имеющая щелевые горелки этого типа. Тепловое напряжение камеры при подобных горелках находится в пределах 100 000—120 000 ккал/м³ час.

Для получения более быстрого перемешивания при щелевых горелках применяется подача вторичного воздуха непосредственно рядом со струей первичного (форма Щ-2). Ускорение перемешивания первичного и вторичного воздуха улучшает горение и укорачивает факел. Горелки этого типа дальнобойны и могут применяться лишь при встречном расположении горелок

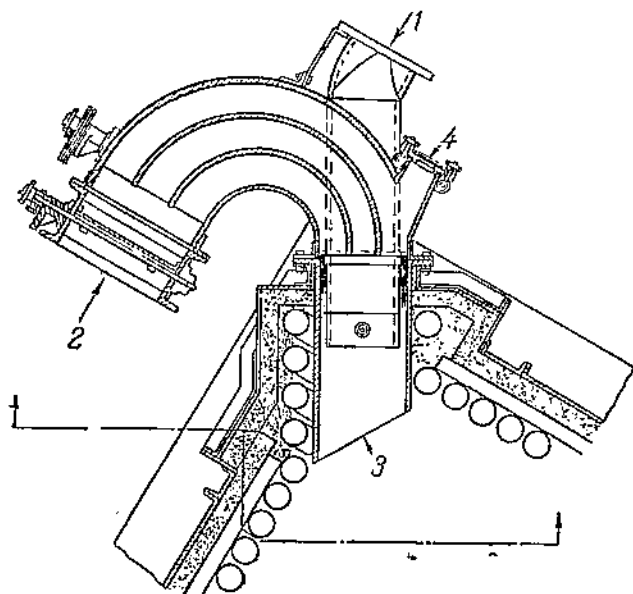


Фиг. 216. Щелевая горелка Лопульки для топки с U-образным факелом.

1—круглый трубопровод; 2—щель; 3—вход вторичного воздуха; 4—вспомогательный аспиратор; 5—заслонка; 6—инжектор вторичного воздуха; 7—глядка и добавочное отверстие для воздуха.



Фиг. 217. Котельный агрегат ЗуГРЭС.



Фиг. 219. Установка щелевой горелки в углу топки.

1—вход топлива; 2—заслонка для дутья; 3—устье горелки; 4—гляделька.

или при расположении их по углам топки для углей с большим выходом летучих.

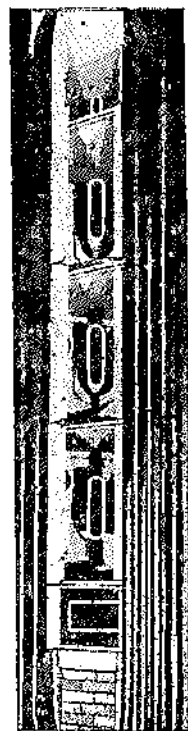
На фиг. 218 показана подобная щелевая горелка конструкции ЦКТИ. Горелка набирается из стандартных чугунных литых элементов; каждый элемент содержит в себе щель для первичной аэро-смеси и щель вторичного воздуха. Для более равномерного распределения вторичного воздуха по ширине щели устанавливается ряд направляющих лопаток.

При заданном расходе процесс перемешивания улучшается с ростом скорости. Если высота первичной щели одинакова с высотой вторичной щели, наилучшие условия для перемешивания получаются при равенстве скоростей. Если же высота вторичной щели больше, то оптимальные условия получаются при скоростях вторичного воздуха больших, чем скорость первичного воздуха. По данным ЦКТИ скорость первичного воздуха для бурого угля ~ 40 м/сек, для антрацитов и тощих углей 15 м/сек. Соответственно скорости вторичного воздуха рекомендуются 48 м/сек и 36 м/сек. В стандартной конструкции высота щели 45 мм для первичного воздуха и 90 мм для вторичного. Вследствие плохих условий зажигания горелки данной конструкции не могут быть рекомендованы для пыли тощих углей и АШ.

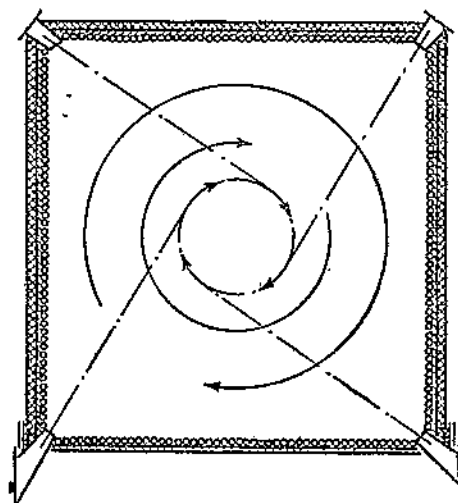
На фиг. 219 показана щелевая горелка, установленная в углу топки, так называемая угловая горелка. Горелка удачно комбинируется с экранными трубами, давая возможность получить сплошное экранирование камеры. На фиг. 220 показан вид на угловые щелевые горелки из топочной камеры. Горелки выполнены в виде вертикальных щелей и

расположены по три в углу. Вторичный воздух поступает в топку, охватывая сплошным кольцом поток первичного воздуха. При угловых горелках установка нефтяной зажигательной форсунки предусматривается под или над горелками.

Установка горелок по четырем углам показана на фиг. 221. Направление пыле-воздушного потока таково, — что в центре топки образуется цилиндр вращающихся газов. Этим стремятся достигнуть наилучшего перемешивания внутри самой топочной камеры. Горелки подобного типа позволяют получить достаточно хорошее заполнение камеры факелом и добиться высокого теплового напряжения. Обычно они применяются для углей с большим выходом летучих, допускающих полное экранирование топочной камеры. Для интенсивного перемешивания внутри топки выходную скорость первичного и вторичного воздуха берут в пределах 30—40 м/сек. При подаче вторичного воздуха кольцом вокруг пер-

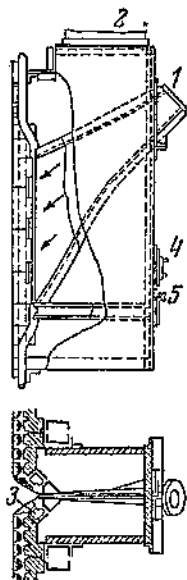


Фиг. 220. Общий вид установки угловых горелок.



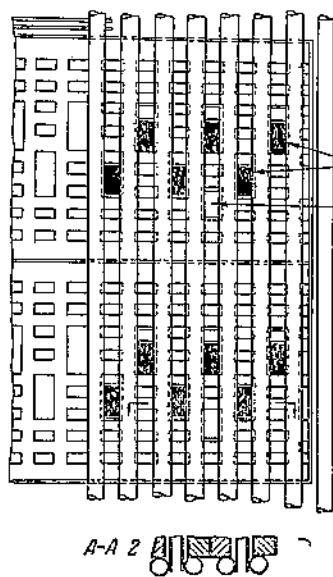
Фиг. 221. План топки с угловыми горелками.

вичного процесс перемешивания первичного и вторичного воздуха идет достаточно интенсивно и заканчивается на сравнительно небольшой длине.

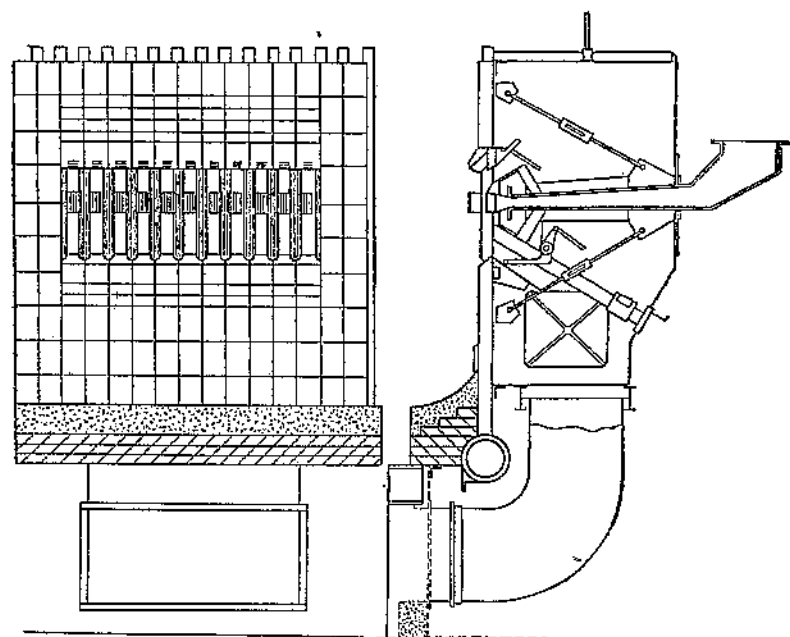
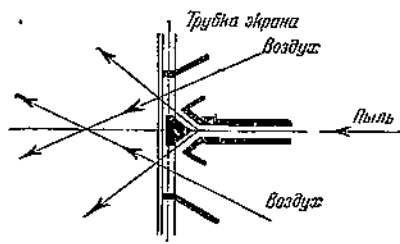


Фиг. 222. Горелка Калюмет.

1—вход пыли; 2—вторичный воздух; 3—вход вторичного воздуха в топку; 4—гладилка; 5—место для нефтяной форсунки.



Фиг. 223. Горелка Фостер.



Фиг. 224. Многочелювная горелка с поперечным расположением щели по отношению к экранным трубам.

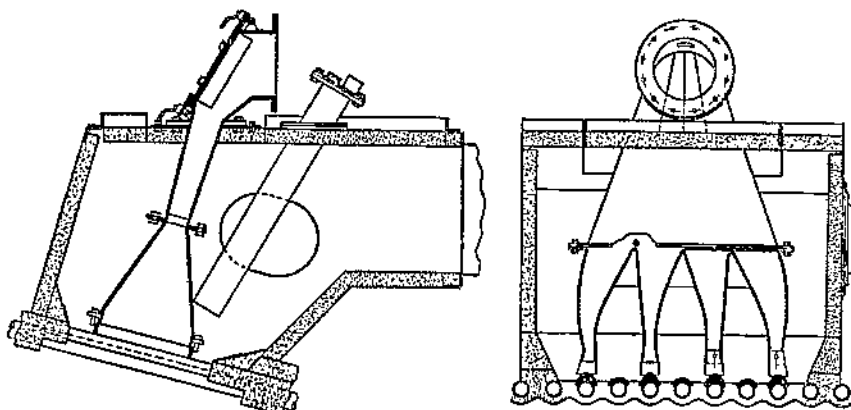
Наличие вихря в центре топки требует увеличения напора вентилятора.

Применение повышенной скорости первичного и вторичного воздуха при угловых горелках не всегда целесообразно. В случае запаздывания зажигания, например, при тощих углях, факел сильно оттягивается к центру, вследствие чего использование объема камеры понижается. Поэтому и для угловых или встречных горелок применимо общее правило уменьшения начальной скорости с уменьшением количества летучих в угле или с угрублением помола.

В последнее время получили широкое распространение горелки с пересечением струй первичного и вторичного воздуха (тип Ш-3).

К этому типу относится горелка Калюмет, с узкой щелью 50—70 мм, поставленной в промежутке между экранными трубами (фиг. 222). Высота щели достигает 1500—1600 мм. Вторичный воздух подается по бокам щели под определенным углом к потоку первичного воздуха. Для улучшения подвода вторичного воздуха трубки экрана при горелках Калюмет несколько изгибают. Изменяя скорость первичного и вто-

ричного воздуха, можно отрегулировать дальность факела и установить надлежущим образом положение пламени в топке. Недостатком горелки подобного типа является возможность расслоения пыли и воздуха при входе в топку за счет кругового поворота. Для лучшего распределения пылевоздушного потока в теле горелки устанавливается ряд направляющих перегородок.

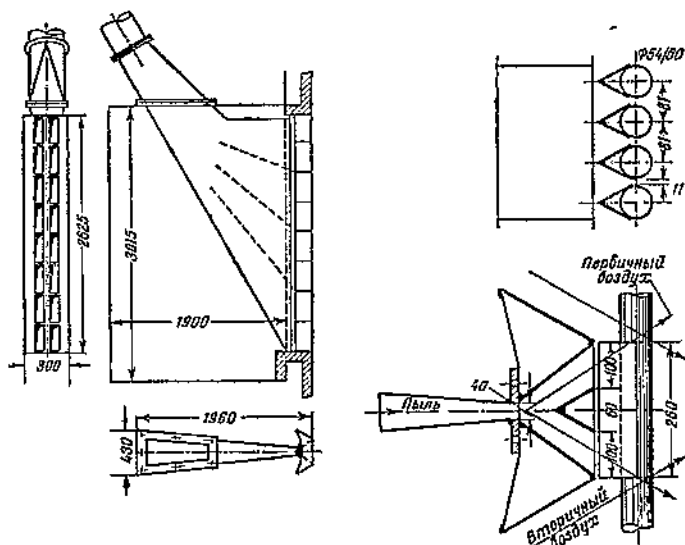


Фиг. 225—226. Многощелевая горелка с продольным расположением щелей (продольный и поперечный разрезы).

Рассекатели укреплены на боках горелки и оперты на трубы экрана; отбойная плита имеет ряд направляющих.

На фиг. 223 показана щелевая горелка несколько более сложной конструкции. Щели первичного воздуха, показанные на чертеже зачерченными, при выходе в камеру располагаются в шахматном порядке. Вторичный воздух входит в топку под некоторым углом к первичному. Вторичный воздух получает направление при помощи наклонных перегородок. Количество вторичного воздуха регулируется заслонками. Смещение первичного и вторичного воздуха происходит в топке. Почти по центру факела введены мазутные зажигательные форсунки. Характерен в горелке крутой перелом в направлении первичного потока.

На фиг. 224 показана многощелевая горелка американского типа с поперечным расположением щели. Характерной особенностью этих горелок является перпендикулярное расположение длинной оси пылевой щели по отношению к оси труб экрана. Пылевоздушный поток разделяется на ряд мелких струй, поступающих в топку через промежутки между трубами. В свою очередь каждая струйка, поступая в топку, разбивается на две, отбрасываемые раскателем вверх и вниз. Поток вторичного воздуха проходит в топку между трубами, пересекая под определенным углом пылевоздушную смесь. Количество вторичного воздуха регулируется заслонками. Описанные горелки очень компактны по высоте, поэтому часто располагаются в два ряда. При топках с жидким шлакоудалением горелка обычно имеет наклон к поду в пределах $10-15^\circ$. По конструктивному оформлению горелка является сочетанием типов III-3 и III-4.



Фиг. 227. Горелка БПК для прямоточного котла.

В последнее время, особенно в топках с жидким шлакоудалением, чаще стали применять другой тип горелок с продольным расположением пылевоздушных шлейфов.

Пылевоздушная смесь разбивается рядом длинных щелей высотой 500—700 мм. Длинная ось щелей параллельна оси экранных труб и лежит непосредственно над ними. Экранная труба служит, таким образом, рассекателем. Для защиты труб от износа они закрываются чугунной крышкой, прикрепленной на своих концах к соплам горелки. Вторичный воздух входит через промежутки между соплами пылевоздушной смеси. Отклоненная рассекателем пылевоздушная смесь энергично перемешивается со вторичным воздухом,

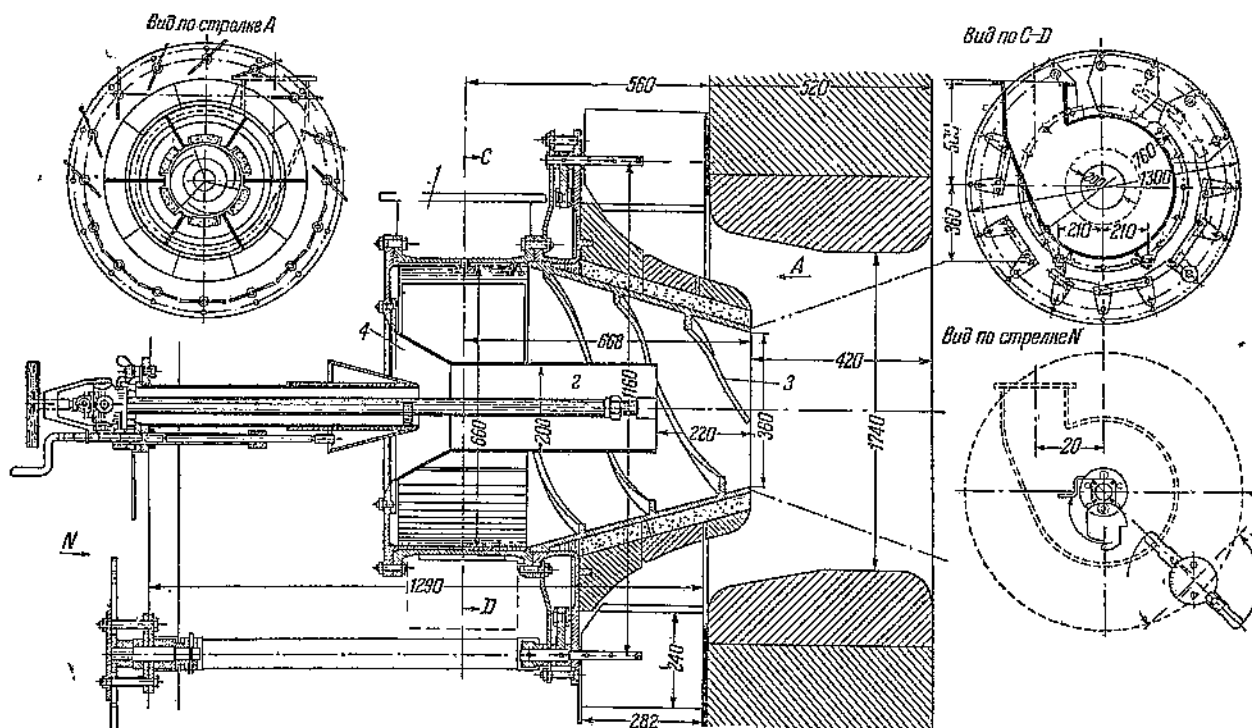
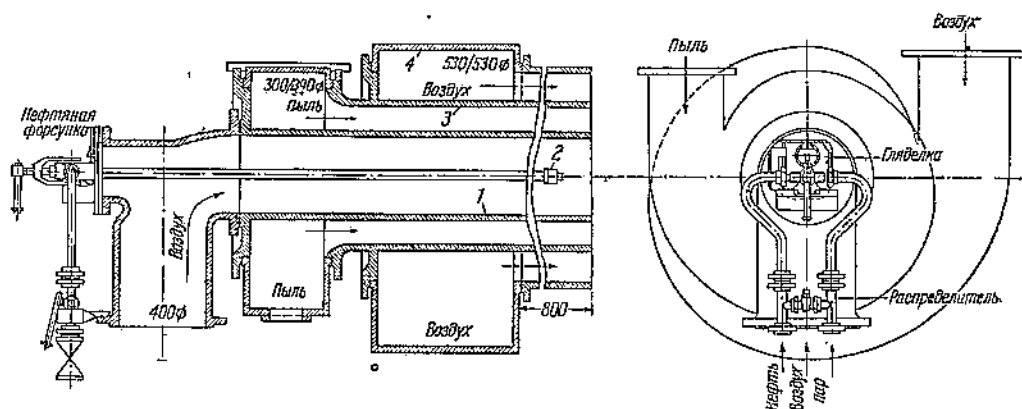
свободно проходящим через зазоры между трубами. Шаг сопел взят двойным по сравнению с шагом экранных труб, что делается всегда при тесном расположении труб.

В рассмотренных горелках первичный поток пылевоздушной смеси, ударяясь об отбойную плитку, круто поворачивает в горелку. Этим избегается расслоение пыли. Всякий поворот, который обычно нельзя выполнить с большим радиусом закругления, неминуемо давал бы ухудшение распределения пыли в воздушном потоке. Плитка быстро изнашивается и поэтому делается съемной. Для лучшего распределения потока по горелке на плите устанавливается ряд направляющих ребер (фиг. 225—226), которые видны на чертеже.

Очень часто этот же тип горелки применяется при размещении щели неэвического воздуха между трубами. Этим несколько повышается дальность факела.

Фиг. 228—229. Горелка Бабкок (продольный разрез и наружный вид).

1 — внутренний цилиндр; 2 — мазутная форсунка; 3 — средний цилиндр; 4 — наружный цилиндр.



Фиг. 230. Турбулентная горелка ЦККБ.

1—вход воздуха; 2—нефтяная форсунка; 3—направляющие; 4—внутренний цилиндр.

На фиг. 227 показана щелевая горелка для советского прямоточного котла. Топка прямоточных котлов имеет горелки со встречным расположением, установленные по бокам котла. Горелка представляет собой щель 40 мм ширины и 2625 мм высоты. У входа в топочную камеру пылевоздушный поток, выходящий из первичной щели, разделяется с помощью специальных рассекающих на два потока. В топку аэросмесь поступает между трубами котла через зазоры шириной 100 мм и высотой 11 мм. Для лучшего распределения факела по высоте горелки на подходе к первичной щели в горелке установлены три перегородки, разбивающие поток на четыре слоя. Вторичный воздух входит в топку из короба горячего воздуха, пересекая первичный воздух. Пылевоздушный поток направлен непосредственно на трубы. Во избежание износа они покрываются чугунными накладками, которые в то же время являются рассекающими первичного потока. Накладки крепятся на трубах с помощью особых хомутов. Из точки горелка видна в виде ряда горизонтальных щелей 100 мм длины и 11 мм высоты.

Испытания рассматриваемой горелки на тощем угле показали, что загорание имеет место непосредственно у трубной решетки котла. Температура факела на расстоянии 200—400 мм равна 800—900°С. Горелка дает короткий факел вследствие малого размера щелей. Выходная скорость первичного воздуха в опытах колебалась от 20 до 35 м/сек. Скорость вторичного воздуха — от 10 до 17 м/сек.

В проектируемых установках прямоточных котлов горелки не имеют индивидуальных регулирующих шибров по вторичному воздуху. Это регулирование для всех горелок осуществляется одновременно с изменением режима у дутьевого вентилятора, чем, по мнению авторов, облегчается уход за горелками и упрощается управление системой в целом.

Круглые горелки. Круглые горелки можно разделить на четыре конструктивных типа (см. фиг. 215).

Горелка в виде простой трубы (типа К1) при-

меняются очень редко. Такая конструкция встречается в качестве горелки для сброса в топку пылевоздушной смеси, полученной в сушильной системе.

Второй тип круглой горелки (труба в трубе — тип К2) выражен в горелке Бабкок (фиг. 228, 229). Горелка состоит из трех цилиндров. Через внутренний цилиндр 1 горелки дается воздух, чаще же всего этот цилиндр не работает и используется в качестве кожуха для установки мазутной форсунки 2. Во второй цилиндр 3, охватывающий первый по касательной к нему, направляется пылевоздушная первичная смесь. Вращаясь, аэросмесь передвигается по цилиндру и в виде вихревого потока выходит в топку. В третий цилиндр, охватывающий кольцом второй, подается вторичный воздух. Первичный воздух имеет направление вращения против часовой стрелки. Вторичный, наоборот, направлен по часовой стрелке. Предполагается, что этим обеспечивается улучшенное перемешивание первичного и вторичного воздуха и соответственно укорачивается факел. По принципу работы горелка, осуществляющая подачу пыли кольцом в кольцо вторичного воздуха, не отличается от щелевых горелок, у которых щель первичного воздуха чередуется со щелью вторичного.

К третьей группе круглых горелок (тип К3) относятся турбулентные горелки, в которых первичный и вторичный воздух подаются в топку завихренными за счет тангенциального подвода их в первичный цилиндр и под действием специальных направляющих, около которых первичный воздух получает дополнительный импульс для вихревого вращения.

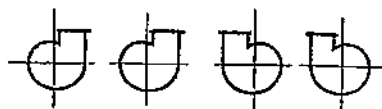
На фиг. 230 показана горелка типа ЦККБ. Поток пылевоздушной смеси подается по касательной к пустотелому цилиндру. Завихряясь далее около спиральных направляющих, пылевоздушная смесь поступает в топку, пересекаемая потоком 3 вторичного воздуха. Цилиндр первичного воздуха защищен от лучистого тепла огнеупорными кирпичами. Внутренний полый цилиндр 4 использован для установки зажигательной нефтяной форсунки 2. Регулирование количества вторичного воздуха осуществляется специальными заслонками, управляемыми одновременно по всей окружности через механическую передачу. При помощи этих заслонок вторичный воздух приводится во вращение, совпадающее по направлению с вращением первичного воздуха.

В подобных горелках происходит расслоение пыли и воздуха вследствие движения пылевоздушной смеси по узкому цилиндру со значительными скоростями вращения. Пыль, как более тяжелая, несколько оттесняется к периферии первичного цилиндра. Таким образом при входе в топочную камеру получается кольцо пылевоздушной смеси, окруженное кольцом вторичного воздуха. По принципу подачи пыли в топку горелка данного



Фиг. 231. Характер движения пылепотока при тангенциальном подводе первичного воздуха.

а — схема движения пыли; б — распределение скоростей первичного потока [на выходе из горелки].



Фиг. 232. Рациональное расположение горелок с тангенциальным подводом на фронтах топков.

типа аналогична щелевым горелкам, в которых подача первичного и вторичного воздуха осуществляется под углом друг к другу.

Направление пылевоздушного потока по касательной нередко приводит к неравномерному поступлению потока первичного воздуха в топку. Воздух при этом сбивается в одну сторону. В таком случае тангенциальный подвод вредит процессу горения.

Факел в топке при турбулентных горелках нельзя назвать вихревым. Пыль, поданная по касательной, отражаясь от стенки цилиндра, выходит из горелки прямолинейно. Картина неудовлетворительного движения пылевоздушного потока в горелке с тангенциальным подводом показана на фиг. 231. Основная масса пылевоздушного потока протекает по одной стороне сечения горелки. Скорость на выходе из горелки получается чрезвычайно неравномерной. Чаще всего поток почти полностью сбивается в сторону ввода пыли. Выходная скорость на этой стороне часто в 5—7 раз больше, чем скорости на другой стороне.

Этот недостаток устраняется путем изменения скорости или установки отклоняющих лопаток.

Турбулентные горелки часто создают при одностороннем вращении всех горелок некоторый перекос горения в топке. Во избежание этого турбулентные горелки следует располагать на правой и левой стороне фронта топки с обратным вращением. Для того чтобы при этом центр нагрузки совпадал с центром топки, расположение подвода пыли должно обеспечить направление максимальных скоростей по центру. В частности более правильным будет расположение, показанное на фиг. 232.

Турбулентные горелки ЦККБ, Розенкранца и др. требуют для получения лучших результатов горения настройки, заключающейся, главным образом, в том, чтобы создать наиболее равномерный выход первичного потока.

щелевыми горелками. При круглых горелках в случае установки экранных труб на стенах, несущих горелки, приходится устраивать специальные выгибы в трубах или ставить промежуточные коллекторы для того, чтобы получить нужные отверстия для выхода пылевоздушной смеси (фиг. 235).

60. Типы пылеугольных топок. Топочные экраны

Типы камерных топок для сжигания топлива в виде пыли различаются по положению факела, типу экранных поверхностей и степени экранирования и по способу золоудаления.

По положению факела в топке различают топки с U-образным и с L-образным пламенем. В последнем случае горелки располагаются на одной стене топочной камеры. Наконец, имеются топки с угловыми горелками и топки со встречным пламенем при размещении горелок по двум противоположным сторонам котла.

В зависимости от типа экранных поверхностей и степени экранирования имеются топки с открытыми гладкотрубными экранами, с экранами типа Бейли, типа Муррей, с шиповыми экранами, с двухсветными экранами и т. п. Ранее применяли также топки с воздушным охлаждением стен.

По способу золоудаления различаются топки с удалением шлака в твердом виде и топки с жидким шлакоудалением.

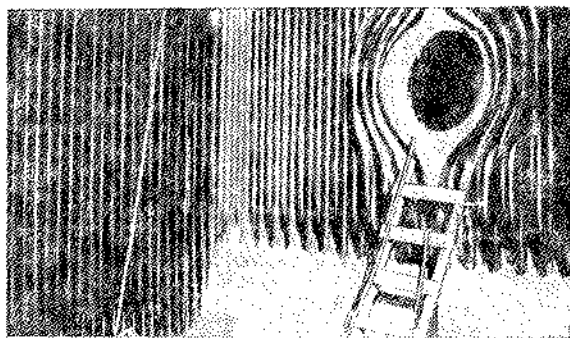
К особой группе следует отнести двухкамерные топки, у которых первая камера является камерой сжигания при очень высоких температурах; во второй камере идет процесс догорания и охлаждения газов. Первая камера обычно работает с жидким шлакоудалением, имея футерованные стены. Вторая работает с удалением шлака в твердом гранулированном виде, имея обычно открытые гладкотрубные экраны.

Область применения того или иного способа шлакоудаления зависит от качества топлива и свойств его золы. Топлива с низкой температурой плавления золы наиболее целесообразно сжигать в топках с жидким шлакоудалением и, возможно, в топках двухкамерного типа. Если почему-либо эта конструкция не применима, то наиболее желательна топка, полностью экранированная гладкотрубным экраном, с холодной воронкой и удалением шлака в гранулированном виде.

Двухкамерные топки являются наиболее универсальными, давая возможность с успехом использовать в них как низкосортное топливо с низкой температурой плавления шлака, так и высокосортное топливо с высокой температурой плавления шлака.

Жидкое шлакоудаление имеет целый ряд существенных преимуществ и поэтому все больше внедряется за последнее время в наши энергетические установки.

Уже указывалось, что топки с U-образным факелом допускают малое тепловое напряжение —



Фиг. 235. Выгиб трубы при установке круглых горелок на фронте.

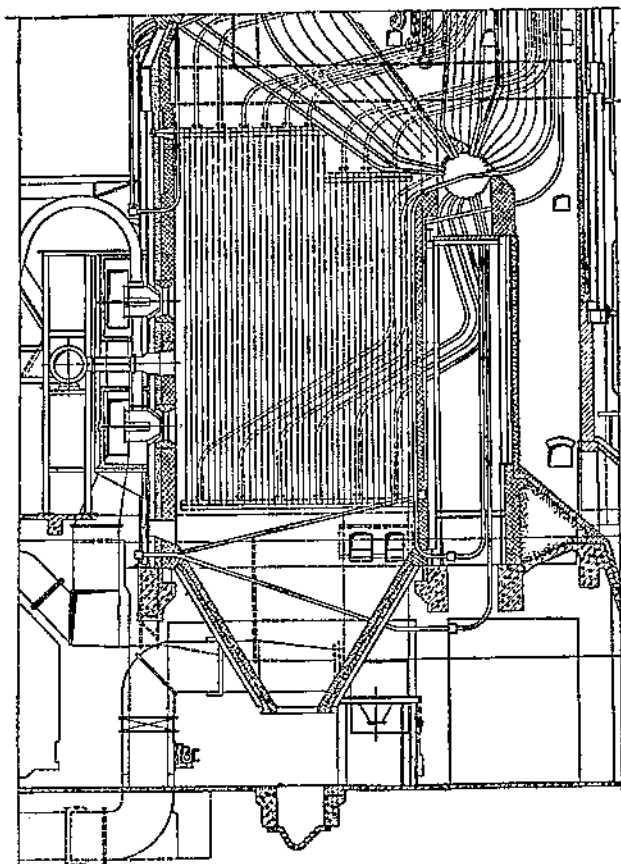
(100—120) · 10³ ккал/м² час и могут быть несколько оправданы лишь при сжигании топлив с малым выходом летучих (типа АШ).

Сжигание в камерных топках топлив с малым выходом летучих при большом экранировании топки вызывает затруднения с воспламенением. Поэтому для обеспечения устойчивости горения и для облегчения воспламенения обычно либо оставляется незаэкранированной одна из стен, чаще всего передняя, либо на экранах укрепляется шамотный пояс. Эти шамотные зажигательные пояса обеспечивают зажигание и устойчивость горения пыли.

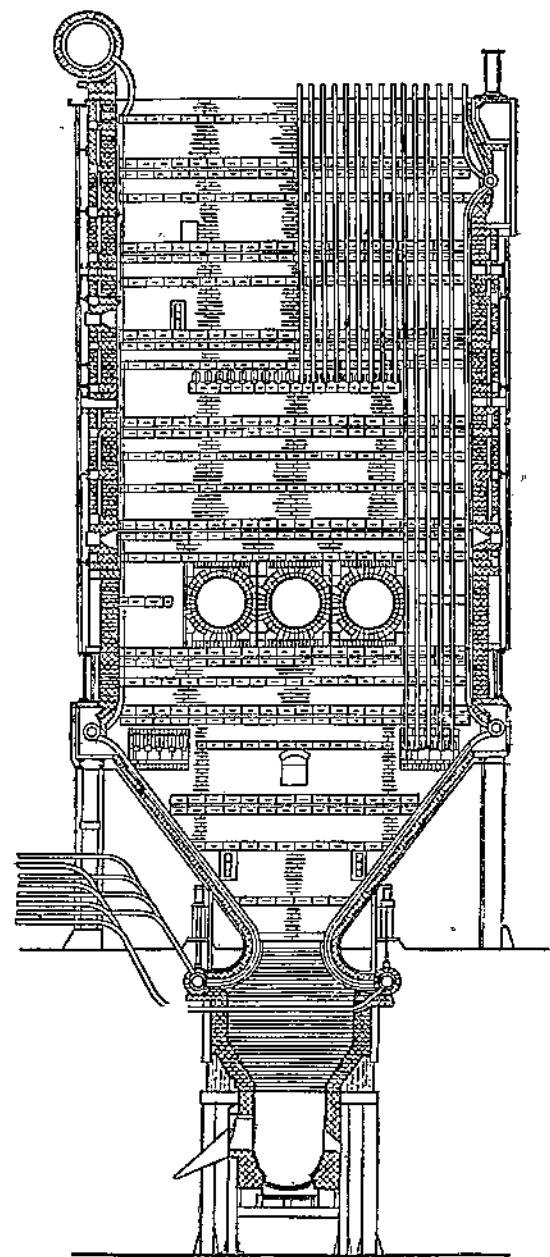
На фиг. 217 (Зуевская ГРЭС) показана конфигурация подобного зажигательного пояса при U-образном факеле. В топках с U-образным факелом действие зажигательного пояса усиливается действием фронтальной, обычно незаэкранированной стены. Хотя эта стена и охлаждается вторичным воздухом, проходящим через отверстия в обмуровке, но кладка ее под влиянием излучения факела довольно быстро разрушается. Поэтому в новейших конструкциях передние стены также обычно экранируются и воздух проводится с фронта через отверстия между трубами. Для углей с малым выходом летучих в этом случае устанавливаются шамотные пояса на экранах.

Топки с L-образным факелом обычно снабжаются турбулентными горелками (фиг. 236). Эти топки одинаково успешно применяются для топлив как с малым, так и с большим выходом летучих. Для первых зажигательный пояс не обязателен. Турбулентные горелки дают большой разброс факела, что часто является источником шлакования верхней и нижней части окна горелки, если в этих местах нет экранов. При фронтальных горелках для устойчивости горения и облегчения процесса зажигания обычно на боковых и передних экранах по всей ширине топки устанавливают зажигательные пояса высотой 2,5—3 м. При встречном расположении горелок на боковых стенках зажигательными поясами должны быть закрыты передняя и задняя стены (фиг. 237).

Горелки с L-образным факелом дают лучшее заполнение топки пламенем по сравнению с U-образ-



Фиг. 236. Топка котлов Сталиногорской ГРЭС.



Фиг. 237. Топка ТКЗ для сжигания АШ.

ным факелом и позволяют получить тепловое напряжение в топочной камере до $250\,000 \text{ ккал/м}^3 \text{ час}$ при сжигании углей с большим выходом летучих.

При сжигании АШ тепловое напряжение $\frac{Q}{V_m}$ должно быть при нормальной нагрузке котла не более $130\,000 \text{ ккал/м}^3$. Двухрядное расположение горелок мало удовлетворительно. Для верхних горелок длина пути мала, вследствие чего получаются большие потери с уносом при углях с малым выходом летучих. При углях с большим выходом летучих в этом случае создается опасность образования высоких температур у первого хода котла и шлакования его.

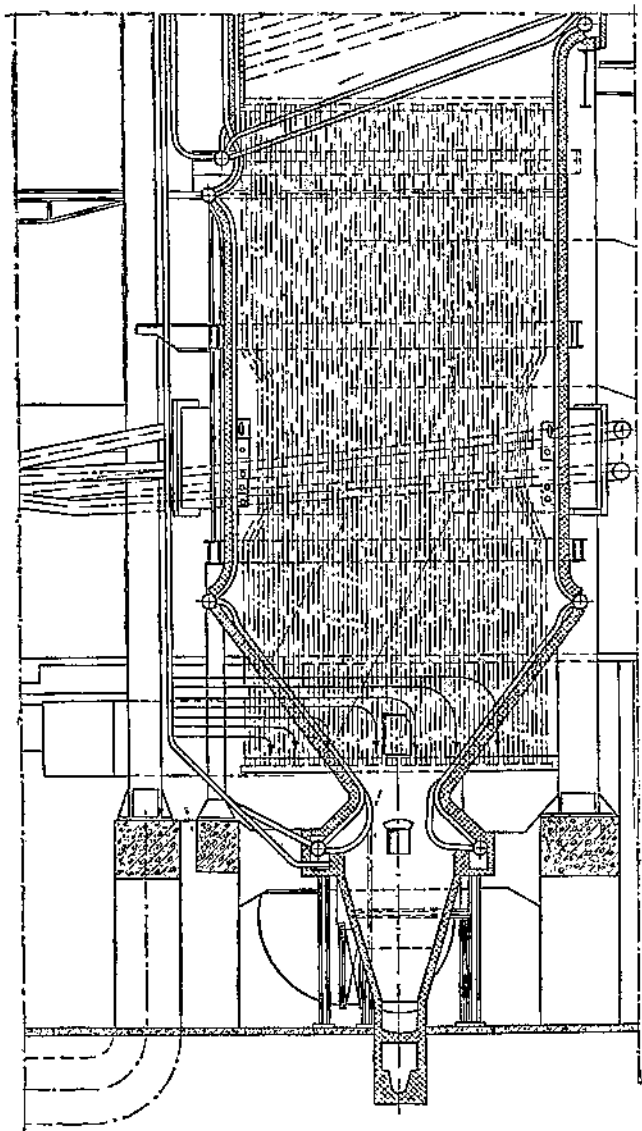
Поэтому для снижения горелок, не уменьшая их количества, применяют встречное их расположение на боках топки. Это улучшает перемешивание потоков воздуха и пыли, направленных навстречу друг другу (фиг. 237). Вопрос о дальнобойности факела в данном случае не играет решающей роли, так как энергия факела взаимно гасится вследствие встречных потоков. Двухстороннее расположение горелок может быть применено с успехом для всех топлив.

Топки с угловыми горелками находят наибольшее применение при сжигании топлива с высоким содержанием летучих. Топки обычно максимально

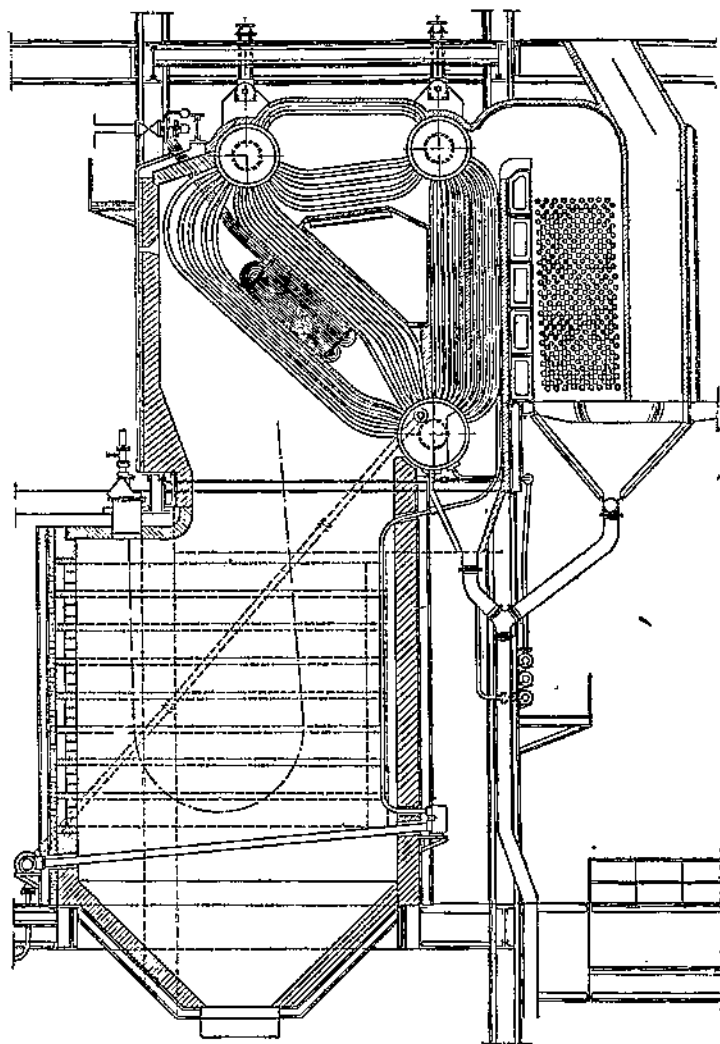
экранированы. Направление факела из горелок таково, что внутри топки образуется вращающийся цилиндр (фиг. 221). При правильном выборе скоростей воздуха получается хорошее заполнение камеры факелом. Из-за этого нецелесообразно иметь излишне большие скорости и сосредоточивать факел строго в центре топки. Это уменьшает заполняемость топки пламенем, а следовательно, уменьшает время пребывания газов в топке и охлаждение факела.

На фиг. 238 показана камера с угловыми горелками для подмосковного угля котлов Сталиногорской ГРЭС.

Топочные экраны. Стены большинства современных как слоевых, так и пылесжигающих топок



Фиг. 238. Топка с угловыми горелками.



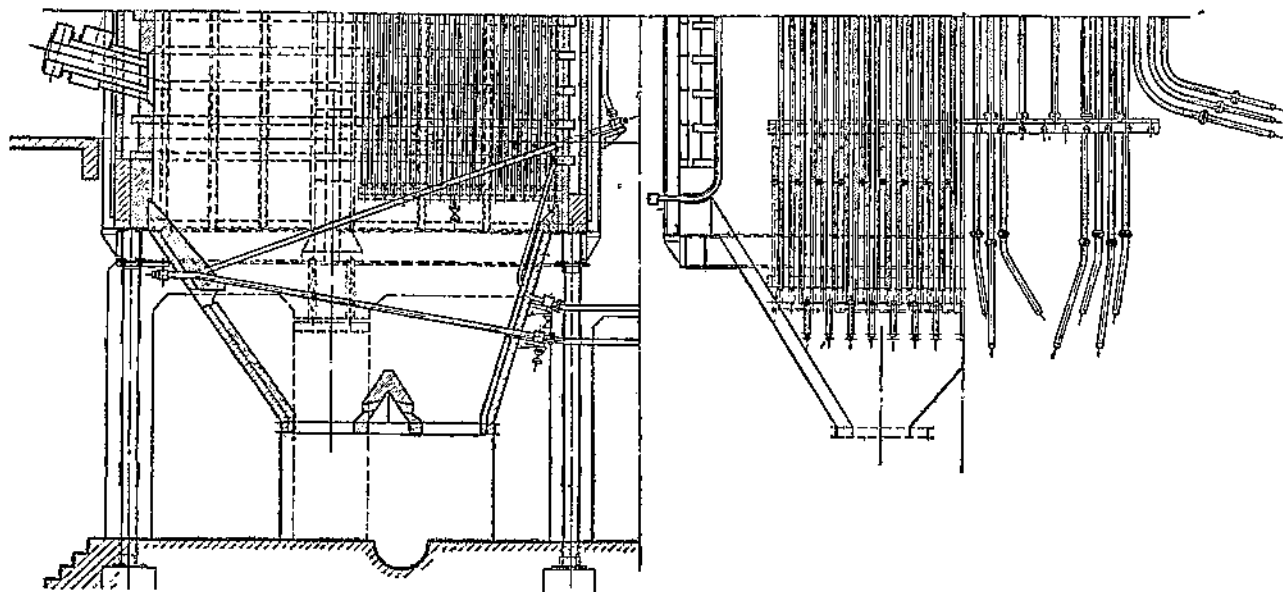
Фиг. 239. Старая конструкция топочной камеры с воздушным охлаждением боковых стен, с установкой гранулятора и экранированием только задней стены.

обязательно покрываются охлаждающими поверхностями. Первые пылевые топки, не имея такого охлаждения, значительно страдали от шлакования и разбедания стен. Несколько в меньшей степени от этого страдали слоевые топки. Шлакование побудило искать способ снижения износа кладки, особенно в пылеугольных топках. Первые конструкции таких стен выполнялись с охлаждающими воздушными каналами. Это решение оказалось неудовлетворительным, так как охлаждение за счет воздуха было недостаточно эффективным, избыток воздуха в топке получался большим, аварии с обмуровкой топки встречались довольно часто. Подобное положение заставило перейти на защиту стен трубами, охлаждаемыми водой.

Трубные поверхности на стенах топки, включенные в систему циркуляции котла и дающие пар, получили название водяных экранов

и являются в настоящее время органической неотъемлемой частью котельных агрегатов. Первоначально экранами защищали зольник, а затем и заднюю стену. На фиг. 239 показана конструкция топки с воздушным охлаждением боковых стен, с установкой нижнего экрана, гранулятора и экрана на задней стенке.

Стремление улучшить охлаждение привело в конце концов к тому, что стены топочной камеры в настоящее время полностью закрывают экранами, почти совершенно не оставляя шамотных поверхностей в топке. Защита стен экранными трубами является хорошим предохранительным средством против шлакования и разрушения обмуровки. В конструкциях экранов Бейли или Муррея обмуровку можно полностью заменить изоляцией или применить обмуровку сильно облегченного типа. Экранирование дало возмож-



Фиг. 240—241. Конструкция гранулятора (продольный и поперечный разрезы).

ность значительно повысить мощность топок, позволяя работать с высокими температурами при малых избытках воздуха. Установка экранных котельных поверхностей в топочной камере значительно увеличила производительность агрегата за счет эффективной тепловой работы экранов и в дальнейшем развитии привела к тому, что в современном котельном агрегате сильно развитые экранные поверхности в топке производят в котле до 50—60% пара и неразрывно, органически, связаны с самой конструкцией котлов.

Во избежание шлакования золовой воронки ранее предусматривалась специальная экранирующая поверхность, отгораживающая объем золовой воронки от объема топочной камеры. Такой экран носит название шлакового экрана или гранулятора (фиг. 239). Он состоит обычно из одного или двух рядов труб, поставленных в шахматном порядке и включенных в циркуляцию котла. Встречаются также грануляторы V-образной конструкции (фиг. 240—241).

Шаг труб в грануляторе обычно равен 300—400 мм. Трубы гранулятора устанавливают наклонно вверх по движению пароводяной эмульсии под углом не менее 10—15°. Такой наклон необходим для избежания застоя в трубах паровых пузырьков, особенно при прогибе гранулятора вниз, и возможного перегрева металла. Расплавленные кусочки шлака, попадая в объем между холодными трубами, гранулируются, и золовая воронка таким образом предохраняется от шлакования.

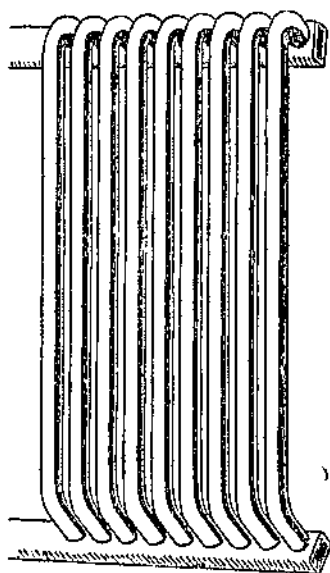
Как показала практика, грануляторы имеют целый ряд существенных недостатков, вследствие чего в новых конструкциях топок они уже не применяются. Недостатком гранулятора является его незначительная охлаждающая способность.

Трубы гранулятора вследствие их слабого наклона быстро загрязняются сверху золой и могут сами стать источником шлакования. При турбулентных горелках, особенно при форсировании котла, факел нередко залетает под гранулятор, создавая в золовой воронке высокие температуры, что приводит к шлакованию гранулятора и стенок воронки. Гранулятор ограничивает объем топки, отделяя золовую воронку от топочной камеры. Главным недостатком гранулятора является то, что он часто служит источником крупнейших аварий, связанных обычно со шлакованием верхних стен топки. Более надежно полное устранение грануляторов и замена их так называемыми холодными воронками. Холодной воронкой называется золовая воронка, покрытая сплошь охлаждающими экранами (фиг. 237). Трубы охлаждающих экранов холодных воронок примыкают к стенкам золовых бункеров, вследствие чего освобождается значительный объем для заполнения его факелом, а также уменьшается опасность разрыва труб из-за падающих кусков шлака.

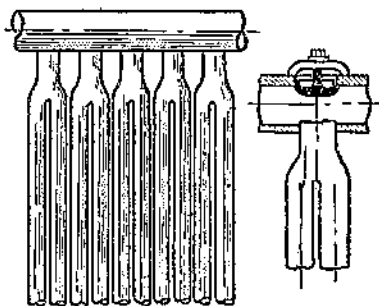
Уклон стенок холодной воронки должен быть не менее 50—55°, для того чтобы на стенках труб не задерживались выпадающие в воронку зола и гранулированный шлак. Тогда стенки воронки остаются всегда чистыми и сохраняют способность охлаждать шлак и золу, чего нет в грануляторах, постепенно покрывающихся налетом золы и шлака и теряющих свою охлаждающую способность. Выход для золы и шлака из воронки должен иметь ширину не менее 1 000—1 200 мм для свободного удаления из воронки случайных крупных глыб шлака.

Самой простой и широко распространенной является конструкция гладкотрубного экрана,

показанная на фиг. 242. Он состоит из ряда труб, установленных в непосредственной близости от обмуровки. Трубки экрана завальцовываются снизу и сверху в специальные коллекторы и включаются в систему циркуляции котла. Коллектор экрана представляет собой обычно толстостенную трубу четырехугольного или круглого сечения. Коллекторы снабжаются отверстиями с лючками, через которые вальцуются трубы. Для подвода циркуляционной воды или отвода пароводяной смеси к коллектору присоединяют несколько труб. Спуск воды производится через штуцеры небольшого диаметра (до 40—50 мм) на нижних коллекторах. При закрытии кладки экранными трубами, поставленными впритык, необходимо употреблять либо два рядом стоящих коллектора, либо вводить трубы в коллектор круглой формы в разных плоскостях. Иногда для целей экономии коллекторов за границей применяют трубы с развилками (фиг. 243).



Фиг. 242. Схема гладкотрубного экрана.



Фиг. 243. Введение в коллектор экранных труб с развилками.

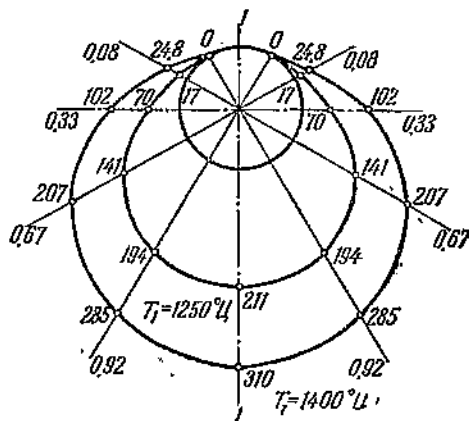
В котлах высокого давления часто применяется приварка труб к коллекторам.

В ряде новых конструкций котлов конструктивная связь экранов с котлами делается более тесной, чем в показанных выше конструкциях. Это достигается тем, что верхние концы экранных труб завальцовываются в барабаны котлов. Иногда даже нижние концы труб экранов выходят непосредственно из котельных барабанов.

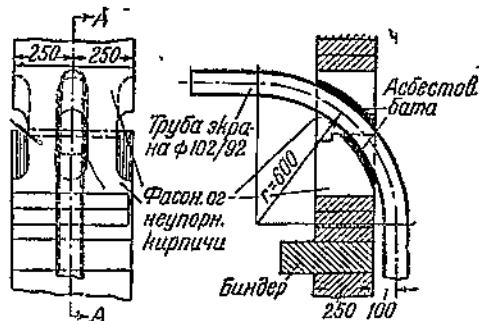
Наконец, в современных так называемых экранных котлах вся испарительная часть котельного агрегата состоит только из экранов и конструкция котла и топочной камеры представляет собой единое целое.

Таким образом топочные экраны, появившись вначале как средство защиты шамотных стен топок от износа, в своем развитии привели в значительной мере к исчезновению старых типов топочных обмуровок, а затем и к коренному изменению котельных конструкций.

Тепловое напряжение отдельных точек труб гладкотрубного экрана неравномерно и зависит от характера передачи им лучистой теплоты. На



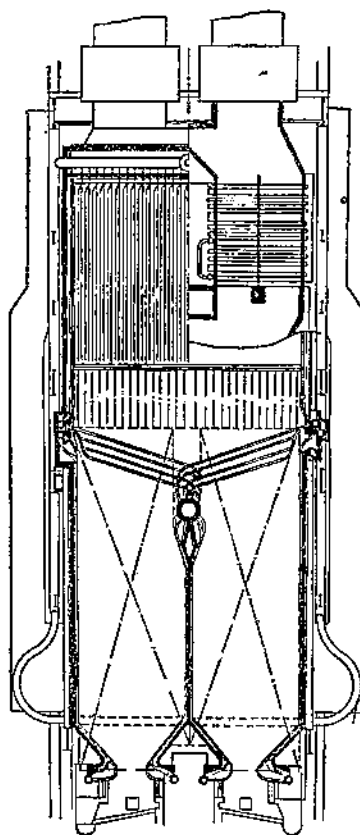
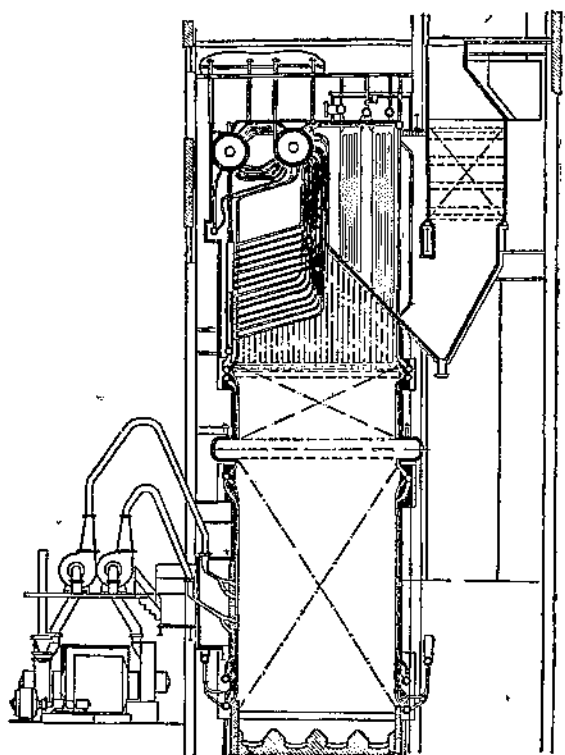
Фиг. 244. Теплонапряжение различных точек на одной стороне освещенной трубы (без учета растечки тепла по стенке трубки).



Фиг. 245. Деталь обмуровки в месте прохождения экранных труб.

фиг. 244 показано теоретическое распределение теплового потока по окружности трубы без учета отражения тепла от обмуровки и перехода тепла по телу самой трубы (растечки тепла). Характер отложения накипи на трубах подтверждает данные предположения. Отложения накипи у всех типов экранов имеются не только на освещенной части поверхности трубы, но и на обратной стороне, что объясняется влиянием обратного отражения от обмуровки и растеканием тепла по стенке трубы.

При конструировании и монтаже экранных поверхностей необходимо предусматривать возможность теплового расширения труб. Отсутствие такой возможности иногда приводит к деформации труб и появлению кольцевых трещин в местах вальцовки. Верхний коллектор часто укрепляют неподвижно, нижний же коллектор устанавливают свободно или на пружинах, которые воспринимают основную тепловую деформацию труб. Необходимо обращать внимание на возможность свободного перемещения трубы при проходе через кладку. На фиг. 245 показан проход экранной



Фиг. 246. Котел с двухсторонним экраном (котел станции Виндзор). $D = 350$ м/час; $p = 105$ ата, $t_{нс} = 495^\circ \text{C}$. Горелка Фостер-Уилер.

трубы через огнеупорный кирпич. Самое отверстие для трубы после растопки забивается асбестовым шнуром. Это дает возможность трубе расширяться без дополнительного напряжения, возникающего в результате тепловых деформаций.

Во избежание коробления экранных труб они часто закрепляются с помощью специальных державок к каркасу топки. При очень высоких топках приходится экранные трубы сваривать встык, так как цельнотянутые трубы обычно можно получить длиной не больше 12—16 м. При проектировании топочной камеры необходимо иметь в виду возможность завода труб в гнутом состоянии в топку и выемку их из топки. В связи с этим иногда ставят промежуточные экранные коллекторы, увеличивающие к тому же устойчивость экранных труб и позволяющие иногда с меньшим трудом проводить чистку экранных труб от накипи механическими шарошками с гибким валом. Впрочем, при современных методах ведения водного режима котлов часто можно обходиться без такой механической чистки.

При больших мощностях котельного агрегата и высоких тепловых нагрузках объема топочного пространства охлаждение топки боковыми экранами часто бывает недостаточным. Поэтому иногда применяют деление топочной камеры на две топки

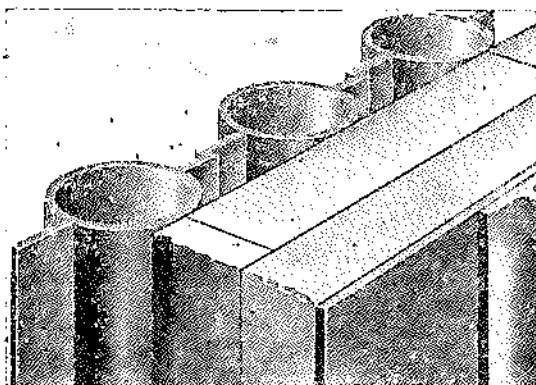
с помощью так называемых двухсветных экранов (фиг. 246).

Установка двухсветных экранов позволяет получить помимо наружных поверхностей топки дополнительные поверхности для охлаждения топочных газов и, следовательно, повысить тепловое напряжение топки при достаточном охлаждении газов в конце топки, что необходимо для борьбы со шлакованием. На фиг. 246 трубы двухсветного экрана завальцованы в помещенный в топочной камере изолированный коллектор. Пароотводящие трубы из верхнего коллектора двухсветного экрана в свою очередь образуют фестонные поверхности нагрева перед первым ходом котла. В двухсветном экране трубы одинаково восприни-

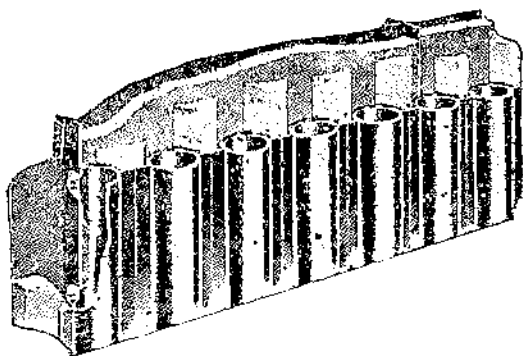
мают тепло с двух сторон и использование металла труб получается примерно вдвое больше по сравнению с работой боковых экранов при расположении труб впрыток или малом $\frac{s}{d}$.

При установке гладкотрубного экрана и значительных расстояниях между трубами температура обмуровки за трубами получается высокой и необходимо иметь тяжелую кладку. При трубах впрыток при $\frac{s}{d} = 1,2$ температура обмуровки значительно понижается и сама обмуровка может быть облегченной конструкции или даже сведена к простой изоляции.

Чтобы закрыть полностью шамотные поверхности холодным металлом, применяют экран, состоящий из труб с наваренными на них ребрами-пластинками высотой 30—40 мм. Такая конструкция (экран Муррея) полностью закрывает обмуровку и в то же время позволяет использовать коллекторы обычной конструкции, поскольку шаг между трубками находится в пределах 1,5—1,75 d . Ребра на трубах обычно имеют толщину от 5 до 8 мм и привариваются к трубе с помощью электросварки. Трубки с приваренными ребрами устанавливаются одна рядом с другой, так что ребра перекрывают друг друга (фиг. 247), либо (чаще)



Фиг. 247. Плавниковый экран типа Муррей.



Фиг. 248. Плавниковый экран типа Муррей.

ставятся вплотную одна к другой (фиг. 248). Между ними оставляется зазор около 5 мм. Тепловой поток, воспринимаемый ребрами экрана Муррея, передается потом через стенки трубок котловой воде. Температура краев ребра в зависимости от величины теплового потока и от высоты ребер может достигать значительных величин. Если эта температура оказывается слишком высокой, металл начинает гореть и сам экран разрушается. В связи с этим необходимо высоту ребер, делать не больше 30—40 мм и тщательно выполнять сварку самого ребра с трубой. При толщине ребра 6—8 мм и высоте его 30—40 мм даже при максимальных температурах факела температура края ребра не должна превосходить 500—550°С.

При значительных тепловых напряжениях создается заметная разность температур между внутренней и наружной кромками ребра. В то время как наружная кромка ребра имеет температуру 500—550°С, внутренняя имеет температуру, близкую к температуре воды, — 240—250°С. Вследствие заметных разностей температур внутреннего и наружного краев ребра они удлиняются неравномерно и в ребре получают значительные термические напряжения, которые действуют разрушающим образом как на само ребро, так и на место

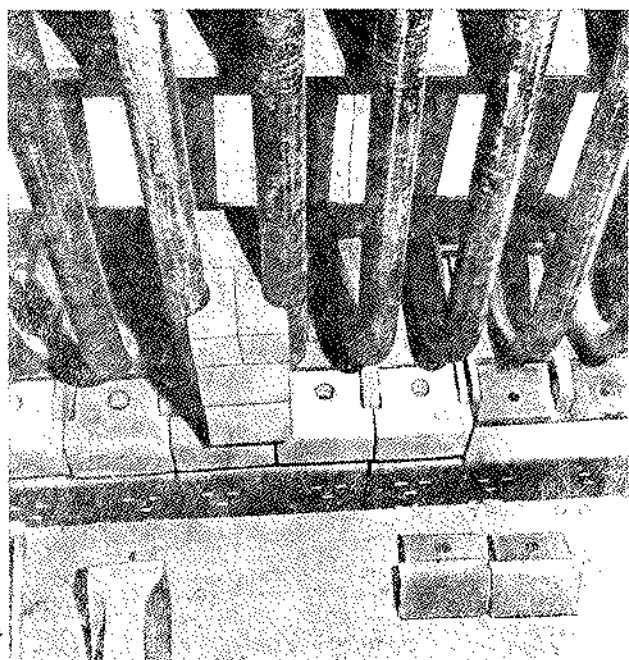


Фиг. 249. Картина разрушения ребер на экране Муррея.

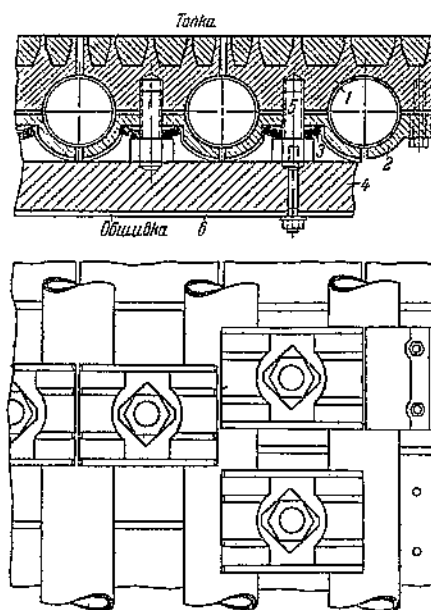
сварки, где тогда образуются свищи (фиг. 249). Передача тепла от ребра к трубе происходит не в месте соприкосновения ребра с трубой, а через сварочные швы.

Гладкотрубный экран и экран Муррея являются наиболее эффективными поверхностями с точки зрения теплопоглощения. Введение топок с жидким шлакоудалением, а также имеющаяся в некоторых топочных камерах необходимость в отдельных неэкранированных поверхностях для улучшения зажигания и устойчивости факела привели к появлению закрытых экранов различных конструкций. Закрытые экраны можно разбить на три группы: экраны с простым кирпичным закрытием, экраны с металлическими плитками с изоляцией или без нее, экраны с наваренными шипами с изолирующей массой. Всякое закрытие экранных труб значительно понижает тепловосприятие экранов вследствие возрастания теплового сопротивления. В зависимости от нагрузки топки и от типа экрана наружная температура поверхности закрытых экранов значительно повышается, чем и объясняется улучшение воспламенения и большая устойчивость факела при наличии таких поверхностей.

Наиболее простая конструкция закрытия трубок — это закладка фасонного кирпича между трубками. Масса такого кирпича состоит из плит

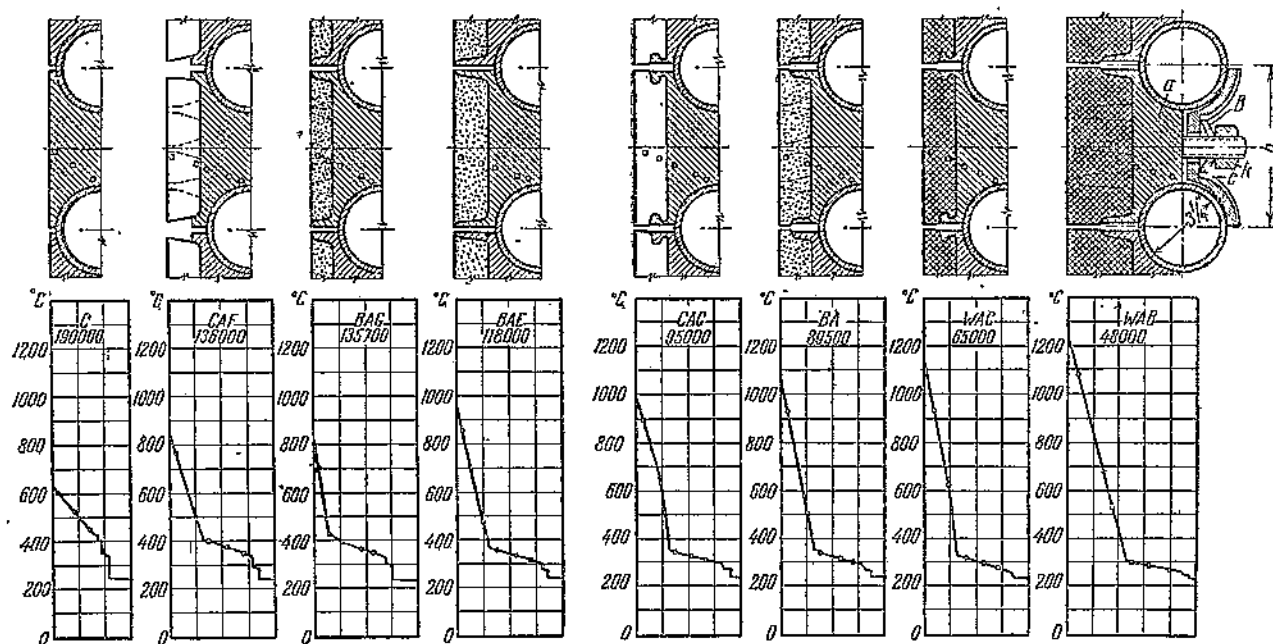


Фиг. 250. Закладка шамотом (вид из толки).



Фиг. 251. Экран типа Бейли.

1—огневые плитки; 2—прихваты; 3—шайбы;
4—изоляция; 5—шпильки.



Фиг. 252. Температурные поля плиток Бейли; падение температуры в изоляции, чугуне, зазоре, трубке и паровой пленке.

квадратной формы с вырезами толщиной в 2,5". Кирпич предварительно вставляют ребром между трубками, затем путем поворачивания укладывают плашмя в виде сплошной топочной стены. Между кирпичом и трубой в соответствующих местах вырезаются небольшие фаски. Через определен-

ные промежутки кладут кирпич из двух половин (фиг. 250). Щели замазывают хорошо проводящим материалом. Такая конструкция неудобна, потому что затрудняет переобмуровку в каком-нибудь месте, так как приходится разбирать большую часть стены, чтобы заложить новые кирпичи.

Имеются и другие более удобные для ремонта конструкции шамотных поясов, но все они пока недостаточно надежны и долговечны.

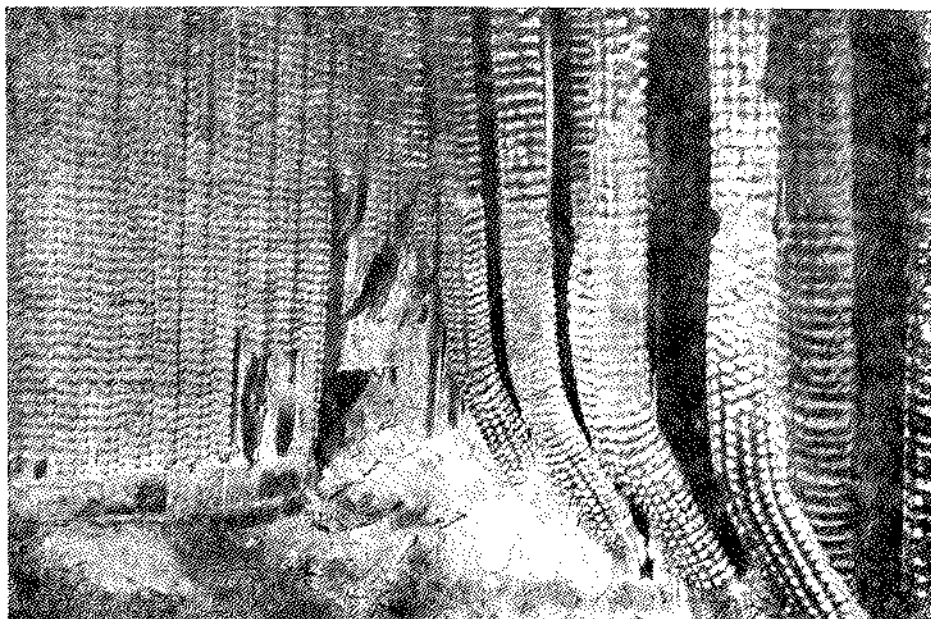
Экраны с футерованными плитками (плитки Бейли) получили широкое распространение в США и оказались особенно эффективными в первых топках с жидким шлакоудалением.

Они состоят в основном из чугунных литых плиток 1 (фиг. 251), охватывающих трубы со стороны топки. Плитки 1 посредством прихватов 2, шайб 3 и винтов 5 прижаты плотно к трубке. Снаружи помещена изоляция 4 и обшивка 6. При монтаже плиток вначале укрепляют пояс установочных плиток, чем фиксируется расстояние между трубками. Затем устанавливают обычные плиты. Зазор между плиткой и трубой заполняют специальной хорошо проводящей мастикой. Плитки требуют тщательного выполнения, причем желательно применение калиброванных труб. Во избежание ослабления затяжки стенки при разогреве плиток применяют пружинящие шайбы 2, создающие постоянный нажим; болты 5 необходимо подтягивать в горячем состоянии. После затяжки болтов заднюю стенку покрывают изоляцией 6. Для наблюдения за толщой часть плиток не устанавливаются. Плитки делают из одного чугуна, либо дополнительно покрывают со стороны топки хорошо проводящим огнеупорным материалом, в состав которого входит карборунд. Слой огнеупорного материала бывает толщиной от 40 до 80 мм.

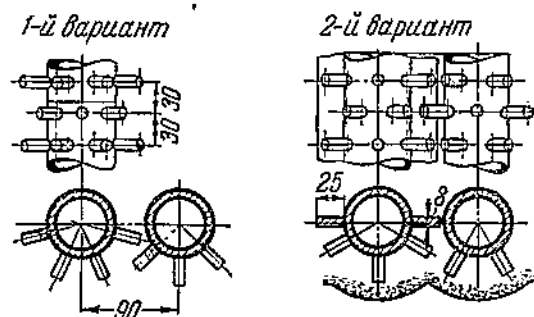
Средняя теплопроводность плитки (изоляция плюс чугун) колеблется в пределах от 5 до 35 $\text{ккал/м}^2 \text{ час}^\circ \text{С}$. Если плитки изготовляются с набивкой, отливку чугунной части производят непосредственно в набивочную массу, а для лучшей связи массы с чугуном иногда массу набивают в отлитые плитки. С той же целью плитка имеет чугунное обрамление и особые шипы на самом теле плитки, что укрепляет конструкцию и улучшает ее теплопроводность. Некоторые плитки имеют в чугунной части форму ласточкина хвоста, в котором закрепляется огнеупорная масса. Изоляцию в таком случае укладывают на чугун. Изолирующий материал обычно берут такой, который цементируется при высоких температурах.

Фиг. 252 дает представление о распределении температуры в плитках и о тепловом напряжении, достигаемом в среднем той или другой конструкцией. Как видно из фигуры, покрытие чугунными плитками дает возможность получить 190 000 $\text{ккал/м}^2 \text{ час}$, причем температура в плитке падает примерно на 222°; температура поверхности плиток, обращенной в сторону топки, достигает около 600°С. Перепад температуры в изоляционном слое между плиткой и трубкой составляет около 56°С.

Теплопоглощение относится к средней температуре в топке около 1200°С. При повышении температуры в топке теплопоглощение экрана значительно повышается. Покрытие из чисто чугунных плиток может дать тепловое напряжение до 325 000 $\text{ккал/м}^2 \text{ час}$.



Фиг. 253а. Шиповые экраны после 1 000 час. работы.



Фиг. 253. Трубка с наваренными шипами на ней.

Температура поверхности плитки в этом случае достигает 900°С.

Коэффициент эффективности экрана с футерованными плитками зависит от его конструкции, величины и состава изолирующего слоя. Для чугунных плиток коэффициент эффективности составляет 0,85—0,88 при температуре пламени 1300—1400°. Как и для всех закрытых экранов, коэффициент эффективности этого экрана уменьшается с увеличением температуры в топке за счет ухудшения теплопроводности и повышения температуры плит. Коэффициент эффективности плиток с изоляцией равен 0,2—0,3. Плитки с изолирующей массой являются часто источником шлакования топки. Поэтому при сжигании легко воспламеняющихся топлив эти плитки заменяются чисто чугунными плитками, значительно менее шлакоустойчивыми, или заменяются экранами без закрытия.

Экраны с футерованными плитками дороги, требуют специальной технологии производства и дорогих калиброванных котельных труб, поэтому в СССР эти экраны мало распространены.

В последнее время начали применять конструкции экранов с изоляцией, представляющие собой гладкотрубные экраны, частично открытые, частично же обмазанные огнеупорным составом.

Как видно на фиг. 253, экран этот имеет трубки с приваренными шипами, с помощью которых удерживается

изоляция как со стороны внешней стенки, так и со стороны топки. Регулирование тепловосприятия экрана возможно высотой слоя изоляции и количеством шпиров. Наварка шпиров ведется электросваркой впритык. Этот тип экрана в последнее время широко распространен в топках с жидким шлакоудалением.

На фиг. 253а показаны справа разделительный, слева боковой шпировые экраны топки котла № 6 ТЭЦ ВТИ после 1 000 час. работы топки при жидком шлакоудале-

нии. Перед началом работы шпирь экрана были полностью зафутерованы огнеупорным бетоном. Во время работы с жидким шлаком при 1 600—1 650°С футеровка экрана была постепенно разъедена, шпирь обнажился и стали покрываться слоем шлака. На фиг. 253а представлен экран с зашлакованными шпирями. Толщина шлаковой корки 2—3 мм. Разъедание огнеупорного бетона произошло не по всей поверхности экранов: в верхней части топки бетон сохранился.

ГЛАВА ПЯТАЯ

ДРУГИЕ СПОСОБЫ КАМЕРНОГО СЖИГАНИЯ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ. СЖИГАНИЕ ЖИДКИХ И ГАЗООБРАЗНЫХ ТОПЛИВ

61. Топки с жидким шлакоудалением

Удаление золы из топочной камеры возможно или в виде гранулированного твердого шлака или в расплавленном состоянии. Удаление шлака в твердом виде нередко ограничивает возможности сжигания топлив с низкой температурой плавления золы, так как шлакование топки при переходе известных пределов нагрузки неизбежно даже при полном ее экранировании.

Поэтому иногда в топочной камере создаются условия, необходимые для поддержания высоких температур даже при колеблющейся нагрузке котла. Вследствие этого происходит плавление всей массы золы, выпадающей из топлива. Превращенный в жидкое состояние и выпавший на под топки шлак затем выпускается сплошной струей через летку, разбивается струей воды, гранулируется и гидравлическим способом удаляется. В некоторых агрегатах зола, уловленная в золоуловителях и золовых бункерах, возвращается в топку, там плавится и также удаляется из топки в жидком виде. Все это значительно упрощает золоудаление станции.

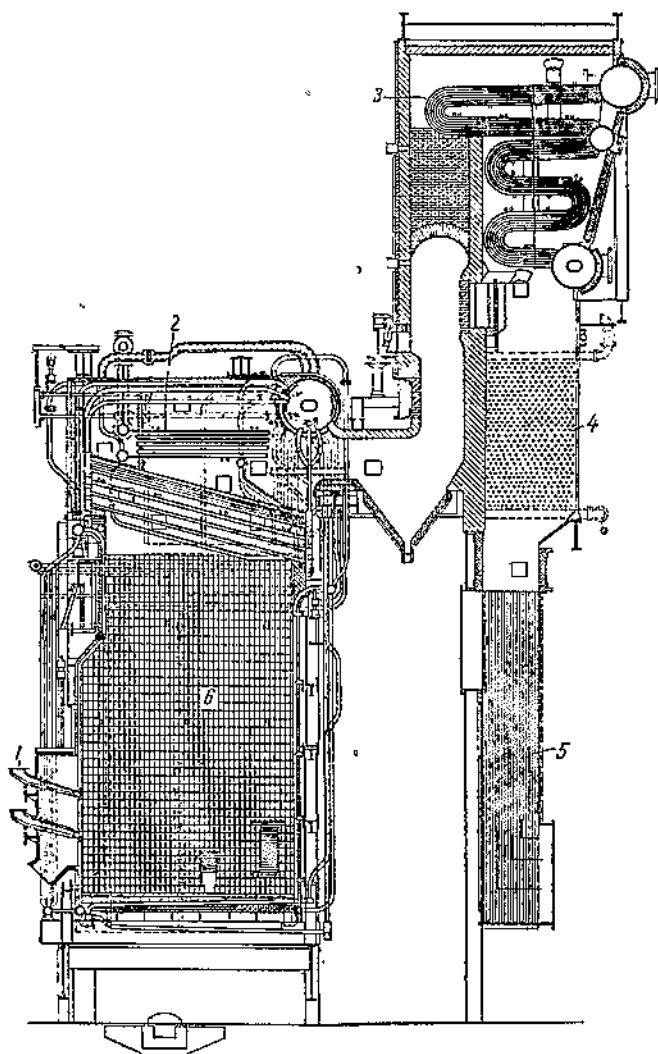
Обычной формой топки при применении жидкого шлакоудаления является топка с укороченным U-образным факелом. Зона высоких температур сосредоточивается около ванны жидкого шлака. При фронтном расположении горелок факел направлен с некоторым наклоном к поду (фиг. 254). Горелки располагают не выше 1—1,5 м над подом. Этим достигается повышение температуры в нижней части топки и лучшее выделение золы в жидкую ванну. Путь для газов в топке удлиняется, что улучшает их дальнейшее охлаждение.

На фиг. 255 представлена одна из первых конструкций топки подобного вида с U-образным факелом. Как видно, общая длина факела невелика, что затрудняет охлаждение газов в топке и требует особого внимания к температуре при выходе из топки. Для создания высоких температур в нижней части топки нижняя часть экранных труб обычно закрывалась футерованными плитками Бейли. Плохая теплопроводность таких плиток давала возможность получить в нижней части

топки высокие температуры и тем самым обеспечить надежный выпуск шлака даже при пониженных нагрузках котла. В топках без жидкого шлакоудаления при значительном охлаждении топки регулирование котла ограничивается устойчивостью факела при пониженных нагрузках, а в топках с жидким шлакоудалением это регулирование частично ограничивается возможностью спуска жидкого шлака при пониженных нагрузках. Обычно в непереохлажденных топках спуск жидкого шлака возможен при нагрузке 50—60% от нормальной. В переохлажденной топке в случае тугоплавких шлаков жидкое шлакоудаление при обычной конструкции топки затруднительно, а часто и невозможно при нагрузке даже в 80% от нормальной.

Во избежание шлакования первых рядов труб котла необходимо интенсивное охлаждение газов в верхней части топки. Для этого верхние экранные поверхности покрываются чугунными плитками Бейли, либо остаются открытыми. Тип топки, показанный на фиг. 255, плохо зарекомендовал себя с точки зрения шлакования.

Для понижения температуры топочной камеры в верхней части и для повышения в нижней части топки в более поздних конструкциях топочных камер применялось деление камеры на верхнюю и нижнюю часть путем вставки специального промежуточного, так называемого капаящего, экрана, состоящего из труб, покрытых огнеупорной массой со свободным проходом для газов (фиг. 256). Этим нижняя часть топки предохраняется от переохлаждения; вместе с тем работа верхней части топки должна протекать более благоприятно, а шлакование первых рядов трубок котла и топки в целом уменьшается. Частицы жидкого шлака, капаящие с трубок защитного экрана на низ топки, улучшают осаждение золы в топке. Однако наличие в топке горизонтального фестона, обращенного одной стороной к горячей части топки, другой к холодной, может приводить к зашлакованию самого фестона. Твердая зола, выпадая в верхней холодной части топки и задерживаясь на горизонтальных трубах фестона, служила источником образо-



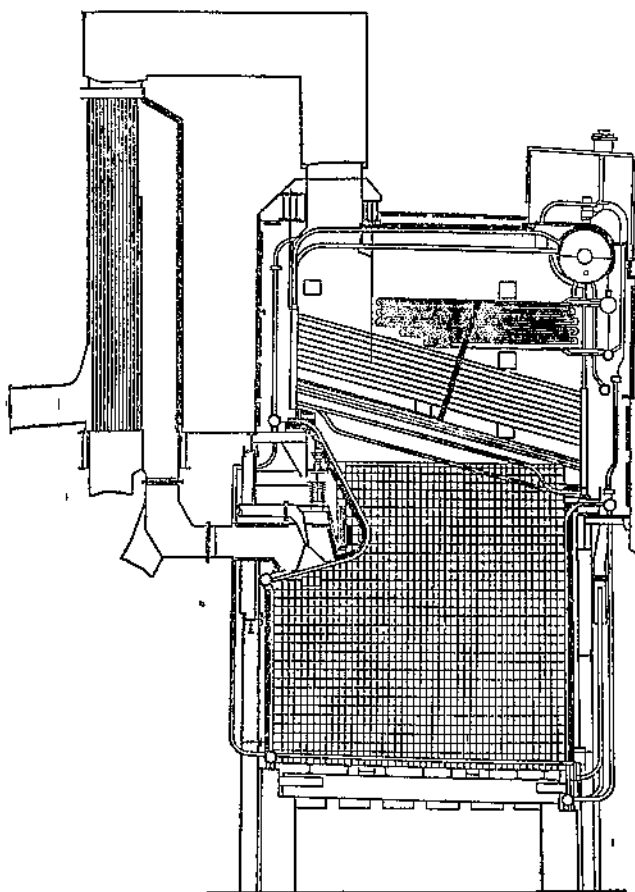
Фиг. 254. Топка с жидким шлакоудалением с многощелевыми поперечнотрубными горелками и фронтальным расположением их (котел станции Пауэртон, стены топки закрыты плитками Бейли).

1—поперечнотрубные горелки; 2—первичный пароперегреватель; 3—вторичный пароперегреватель; 4—экономайзер; 5—воздухоподогреватель; 6—плитки Бейли.

вания крупных наростов на трубах, закрывающих фестон. Это явление, несмотря на удовлетворительное распределение тепловых напряжений, делает эксплуатацию такой топки ненадежной.

Поэтому в более новых конструкциях 1936—1938 гг. горизонтальный фестонированный экран был заменен вертикальным экраном. Этим экран лучше предохраняется от зашлакования, так как задержка золы на трубах экрана в этом случае не имеет места.

На фиг. 257 показан разрез одной из первых топков этого рода для котла станции Спрингдейл. Топка состоит из двух камер, из которых первая является камерой сгорания, вторая — камерой догорания и охлаждения. Для получения высоких температур в первой камере она полностью за-

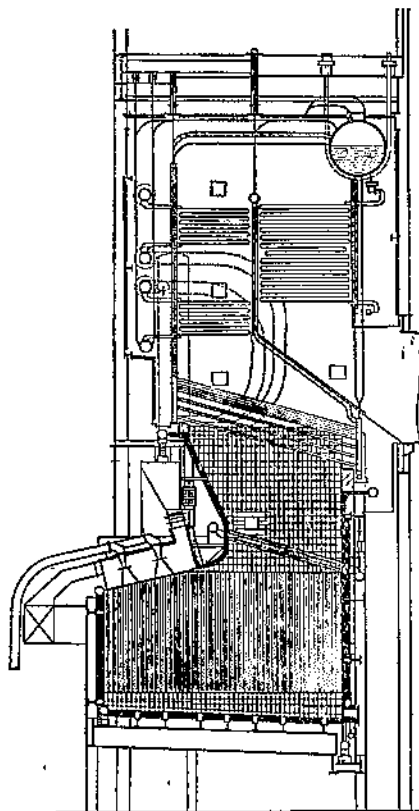


Фиг. 255. Топка с жидким шлакоудалением с U-образным факелом. $D = 150 \text{ т/час}$, $p = 31,5 \text{ атм}$, $t_{\text{не}} = 406^\circ \text{С}$;

$$\frac{Q}{V_m} = 310 \cdot 10^3 \text{ ккал/м}^3 \text{ час.}$$

крыта изолированными шиповыми экранами. От второй камеры она отделяется зафутерованными экранными трубками, которые в верхней части наглухо отделяют одну часть топки от другой. В нижней же части экрана сделан выход для газов через ряд раздвинутых труб. Экраны второй части топки максимально открыты для лучшего охлаждения газов в конце топки. Первые ряды котла разрезаются. В качестве горелок приняты многощелевые межтрубные горелки. Факел направляют на под, чтобы создать в нижней части топки максимальную температуру. Спуск жидкого шлака происходит в холодную воронку. Зола из второй части топки выпадает в твердом виде в тот же самый зольник. Разделение топки на две части позволяет значительно улучшить процесс горения и увеличить тепловое напряжение топочной камеры.

Для топков с жидким шлакоудалением важно наличие высоких температур около пода. В обычной однокамерной топке при понижении нагрузки температура значительно падает и имеется тенденция к застыванию ванны и к образованию

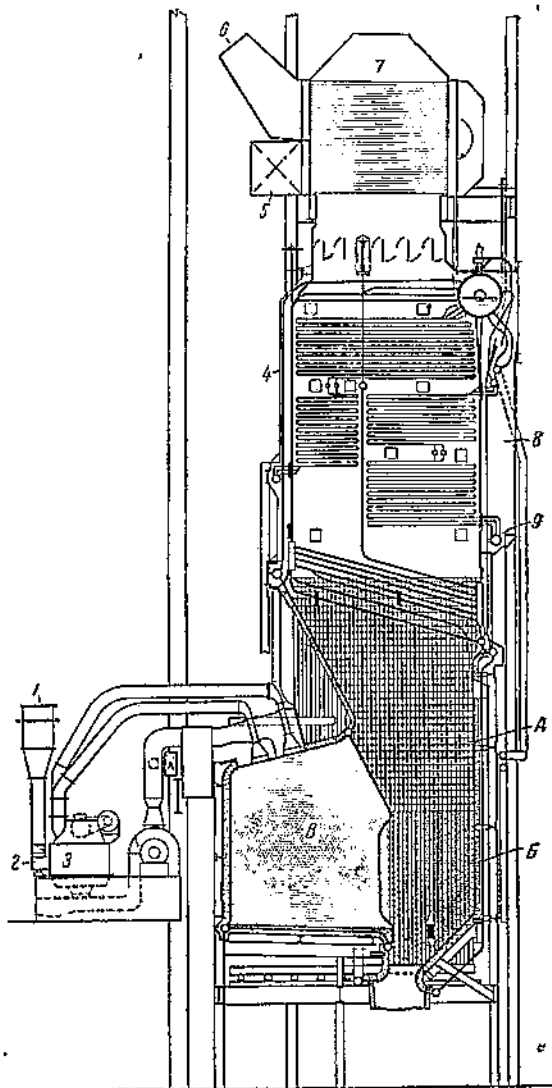


Фиг. 256. Топка с жидким шлакоудалением и U-образным факелом с футерованными горизонтальными фестонами.

в топке „козла“. Для углей температура газов у зеркала жидкого шлака должна быть не менее $1550-1600^{\circ}\text{C}$. Достаточная текучесть шлака получается при перегреве его на $40-50^{\circ}\text{C}$ выше жидкоплавкого состояния t_0 . Температура факела у ванны шлака должна быть на $100-200^{\circ}\text{C}$ выше температуры ванны, следовательно, на $150-250^{\circ}\text{C}$ выше t_0 .

При более низких температурах наблюдается застывание шлака по краям летки и испытываются затруднения со спуском шлака. Затруднения возможны при нагрузке агрегата около $60-70\%$. В этом случае заплывает летка и ее приходится пробивать. Застывший шлак возможно расплавить мазутным факелом, направленным в под, или подъемом нагрузки котла. В случае применения двухкамерных топок спуск шлака производят при нагрузке примерно в 60% .

Изменение температуры в топке связано с типом экрана, примененного для охлаждения стен камеры. Открытые экранные поверхности дают значительное снижение максимальных температур топочного объема при падении нагрузки на котле. Футерованный экран обеспечивает более медленное падение температур. В двухкамерных топках изменение температуры в первой камере может

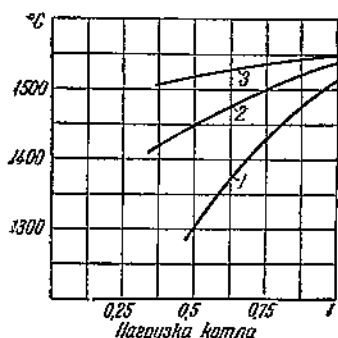


Фиг. 257. Двухкамерная топка станции Спрингдейл. Первая камера заэкранирована шиповым экраном, вторая камера — частично плитками Бейли. Среднее теплонеприятие для обеих камер $400 \cdot 10^3 \text{ ккал/м}^3 \text{ час}$.

1—подача угля; 2—питатель; 3—мельница; 4—экономайзер; 5—выход горячего воздуха; 6—выход холодного воздуха; 7—воздухоподогреватель; 8—пароперегреватель; 9—выход перегретого пара. А—плитки Бейли; Б—экраны Бейли, частичное покрытие труб; В—то же, полное покрытие шиповым экраном.

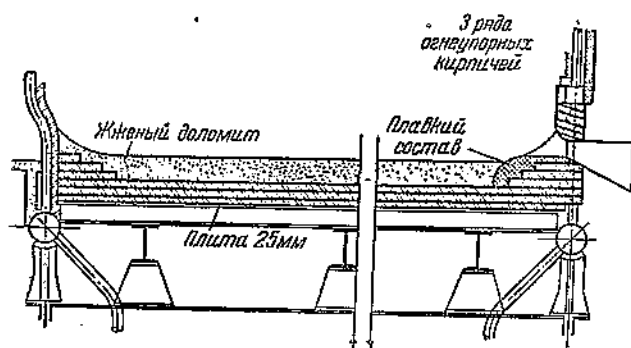
быть еще меньше. На фиг. 258 показано протекание температур у пода в зависимости от нагрузки котла в открытой топке (кривая 1) в первой камере, зафутерованной плитками Бейли с карборундовой изоляцией (кривая 2), и в той же камере при установке шиповых экранов (кривая 3). Падение температуры для третьего случая невелико, и топка, таким образом, меньше всего чувствительна к падению нагрузки.

Выбор толщины шамотной изоляции экранов первичной камеры должен быть произведен так, чтобы температура поверхности стенки при нор-



Фиг. 258. Падение температуры газов у пода в зависимости от типа топки и экрана.

1 — открытая топка с чугунными плитками Бейли; 2 — первая камера топки с плитками Бейли с карборундовой изоляцией; 3 — то же, с шпоровым экраном и шамотной футеровкой.



Фиг. 259. Доломитовый под топки котла станции Стетлайн.

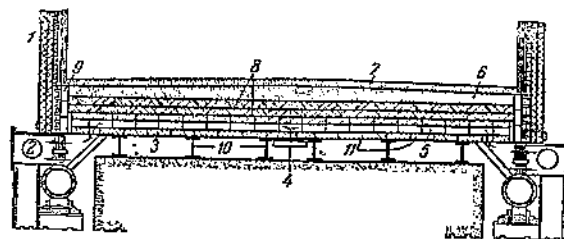
мальной нагрузке топки была выше температуры жидкоплавкого состояния шлака. При этом жидкий шлак течет по накалившейся стенке, не создавая никаких наростов на ней.

Стены топки, покрытые изолирующим слоем шлака, не боятся прямого соприкосновения с факелом. Это дает возможность располагать горелки в непосредственной близости от топочных стен, чем достигается хорошее заполнение топки факелом при наименьшем тепловом напряжении камеры, отвечающем тепловому напряжению факела. Кроме того, наличие высоких температур в непосредственной близости от горелки сокращает до минимума предварительную стадию горения топлива: прогрев и подсушку топлива и воздуха. Все это и обуславливает высокое тепловое напряжение камер с жидким шлакоудалением.

Последние конструкции двухкамерных топок дают возможность получить при высококалорийном топливе с большим содержанием летучих тепловое напряжение в пределах до $(400-500) \cdot 10^3$ ккал/м³ час на обе камеры и $(600-800) \cdot 10^3$ ккал/м³ час — на первую камеру.

Наиболее ответственными частями топки с жидким шлакоудалением являются под, на котором получается жидкий шлак, и летка, через которую он спускается.

На фиг. 259 показана одна из конструкций пода. На железных балках уложены плиты из листового железа толщиной 6 мм, на плиты положены три ряда шамотного кирпича. По краям слой шамота приподнят, образуя ванну. Выше шамотного кирпича положен слой



Фиг. 260. Под топки с жидким шлакоудалением фирмы Фостер-Уилер.

1 — задняя стена водяного экрана; 2 — канал к дутьевому вентилятору; 3 — огнеупорный кирпич; 4 — выпуск воздуха; 5 — воздушные каналы; 6 — хромовая руда; 7 — дробленый шлак; 8 — взаимно перекрещивающиеся плиты с косым срезом; 9 — блоки, прикрепленные болтами к экранным трубам; 10 — балки; 11 — листы.



Фиг. 261. Схема работы кирпичной плиты с косыми срезами

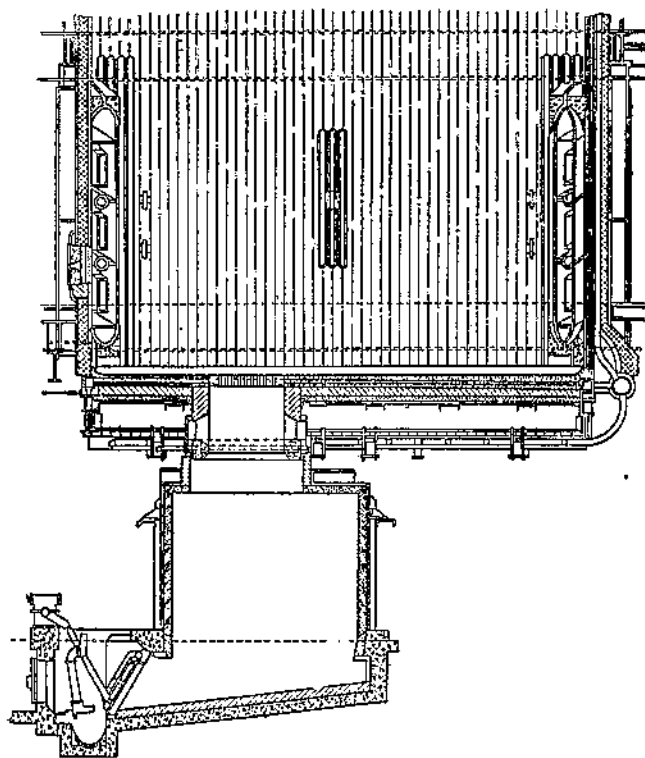
доломита толщиной 15 см. Уровень шлака держится глубиной в 250—300 мм, иногда достигая 400 мм. Расплавленный шлак при высоких температурах имеет малую вязкость. Он текуч и легко проникает через трещины пода. После некоторого периода эксплуатации доломит обычно расплавляется или изнашивается под действием жидкого шлака. Шлак при этом спускается в область огнеупорной кладки, заполняя пространство между боковыми стенами и огнеупорным дном. Пока шлак остается жидким, никаких неприятностей в эксплуатации топки не наблюдается, но при остановке котла жидкий шлак, остающийся на поду и попавший в зазоры между кирпичами, застывает, образуя твердую массу. При охлаждении шлак сжимается и дает большие трещины. В следующий период пуска эти глубокие трещины заполняются вновь расплавленным шлаком. Следующее охлаждение пода еще более усиливает процесс роста пода, и создается давление на боковые стенки.

Стены топки медленно, но систематически раздвигаются, причем сдвиг на 25 мм наступает через 5—8 недель эксплуатации топки. В советской практике явление роста пода не обнаружено.

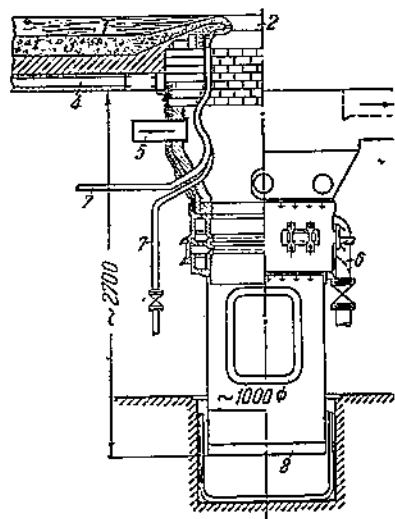
В более новых конструкциях предусматривается воздушное или водяное его охлаждение. Высоту слоя шлака обычно держат во избежание большого давления не выше 100—150 мм, производя спуск шлака непрерывно, что позволяет ограничивать высоту жидкого слоя. На фиг. 260 показана конструкция пода с воздушным охлаждением. Под топки поставлен на железные балки 10, на которых лежат стальные листы 11. На листы положен слой огнеупорного кирпича 3, имеющего воздушное охлаждение. На этом слое положены плиты с косыми срезами 8, на которых затем лежит слой хромовой руды 6 и слой шлака 7.

Плиты с косыми срезами предохраняют под от горизонтального расширения. При проникновении шлака в зону косых плит получается выщипывание пода, а не давление на боковые стены (фиг. 261).

Наилучшим образом зарекомендовал себя под, охлаждаемый водой (фиг. 257, 262). Опорная часть его включает ряд экранных труб, введенных в циркуляцию котла. На них укладывается слой шамотного кирпича, поверх которого насыпают хромовую руду на толщину



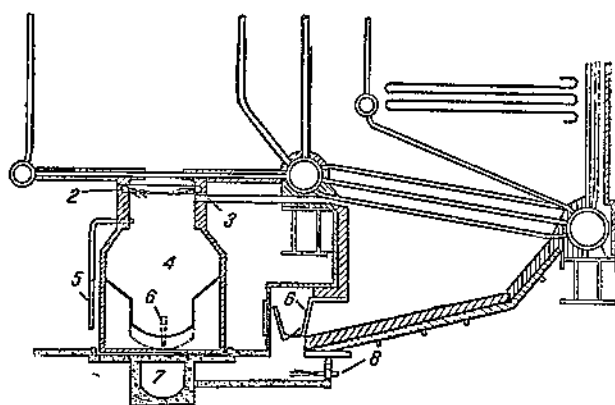
Фиг. 262. Общий вид топки при центральной летке с непрерывным шлакоудалением (станция Уотерсайд).



Фиг. 263. Разрез шлаковой летки при непрерывном шлакоудалении.

1—шлаковая ванна; 2—сток шлака; 3—футеровка; 4—воздушное охлаждение пода; 5—отсос топочных газов; 6—подвод охлаждающей воды для охлаждения стоков шлака; 7—подвод впрыскиваемой воды; 8—водяной затвор.

мые обычно с боков топki. Это требует накопления шлака на поду топki и спуска его при достаточно высоких температурах топочной камеры. Процесс удаления шлака в этом случае не представляет особых затруднений.



Фиг. 264. Общая схема удаления жидкого шлака с центральной леткой при двухкамерной топке.

1—топка; 2—водяные сопла; 3—перепуск газа из летки; 4—водяная ванна для сброса шлака; 5—слив воды; 6—сильные сопла; 7—центральный канал для спуска золы; 8—понижительные сопла.

Летка часто устроена примитивно и представляет отверстие, закладываемое кирпичом в несколько рядов по высоте. Для спуска шлака предварительно выбивают верхний кирпич. По мере снижения уровня снимают следующие кирпичи. Выпускаемый шлак разбивается струей воды, превращаясь в легко транспортируемую мелкозернистую массу.

В более совершенных конструкциях (фиг. 259) летка представляет собой литую чугунную деталь, устанавливаемую между трубами экрана. Нижняя часть летки имеет наклон в 12—15°. Высота летки определяется высотой слоя шлака, накапливаемого в ванне. Растроб летки перед пуском топki забивают шамотом.

В начальной стадии выпуска шлаков могут быть затруднения в связи с недостаточными температурами внешних слоев шлака. Начавшееся вытекание шлака идет далее устойчиво и без особых затруднений до конца. После выпуска шлака летка снова закрывается.

Спуск ванны подобным методом предусматривается обычно раз в сутки. Это зависит от количества золы в топливе и мощности котельного агрегата. При многозольном топливе необходим более частый спуск шлака. При подах с водяным охлаждением получить большую высоту жидкого шлака затруднительно, так как шлак при превышении определенной высоты слоя начинает в нижних своих частях застывать. Поэтому для периода от спуска до спуска обуславливается производительностью котла, зольностью топлива, количеством золы, выпадающей в ванну, и допустимой высотой слоя шлака в ванне. При неохлаждаемых подах высота слоя возможна в пределах 350—400 мм. Для конструкций с охлаждаемым подом высота слоя устанавливается в 150—200 мм. Количество золы, улавливаемой в топке с жидким шлакоудалением, составляет до 40—50% от всей золы топлива против 15—25% при удалении шлака из топki в твердом виде. Удельный вес шлака равняется 2,4—2,6 т/м³. Этим объясняется наблюдающееся иногда всплывание кирпичей в жидком шлаке. Из-за этого нежелательно устраивать под из шамотных кирпичей. Явление всплывания кирпича может быстро вызвать разрушение пода. При спуске шлака через боковые летки необходима высокая температура шлака, обеспечивающая малую его вязкость. При самом процессе спуска шлака во избежание застывания шлаковой струи нельзя допускать большого присоса воздуха в топку через летку. Спуск шлаковой ванны следует производить при повышенной нагрузке котла и уменьшенном разрежении в топке. В ряде конструкций боковых леток предусматривается отсос газов через летку для прогрева ее во время спуска шлака.

Недостаточно хорошее гранулирование шлака при периодическом спуске, значительный расход воды, неавтоматичность всего процесса и трудность регулирования спуска привели к установке леток с непрерывным действием. Такого типа летки обычно устанавливаются посредством топки и представляют собой отверстие размером около 500×500 мм, через края которого шлак непрерывным потоком спускается в шахту, из которой он смывается водяной струей (фиг. 262).

В этом случае благодаря тонкой пленке спускающегося шлака он без затруднений гранулируется и транспортируется гидравлическим способом. На фиг. 263 показаны детали подобной летки. Во избежание перегорания боковых кромок отверстия последнее снабжается водяным охлаждением в виде змеевика, уложенного вокруг отверстия. Жидкий шлак застывает около холодного кольца и предохраняет таким образом кромку детали летки от разжигания. Для предотвращения прикосновения холодного воздуха в отверстие летки и поддержания температуры иногда через летку отсасываются газы из топки. Величина отсоса должна быть минимальной. Однако, как показала практика работы с такими летками, спуск шлака надежно протекает и без отсоса газов.

При непрерывном спуске шлака он стекает через борт летки в виде тонких нитей, которые очень быстро застывают либо под влиянием холодного воздуха, либо под влиянием воды. Нити шлака черного цвета, стекловидной структуры; охлажденные они очень легко ломаются. Толщина нитей 1—2 мм. Больших тяжелых кусков шлака при таком методе спуска обычно не получается. Это в значительной степени облегчает удаление шлака из котельной, так как при этом не требуется никаких дробильных устройств и шлакоудаление осуществляется просто гидравлическим способом.

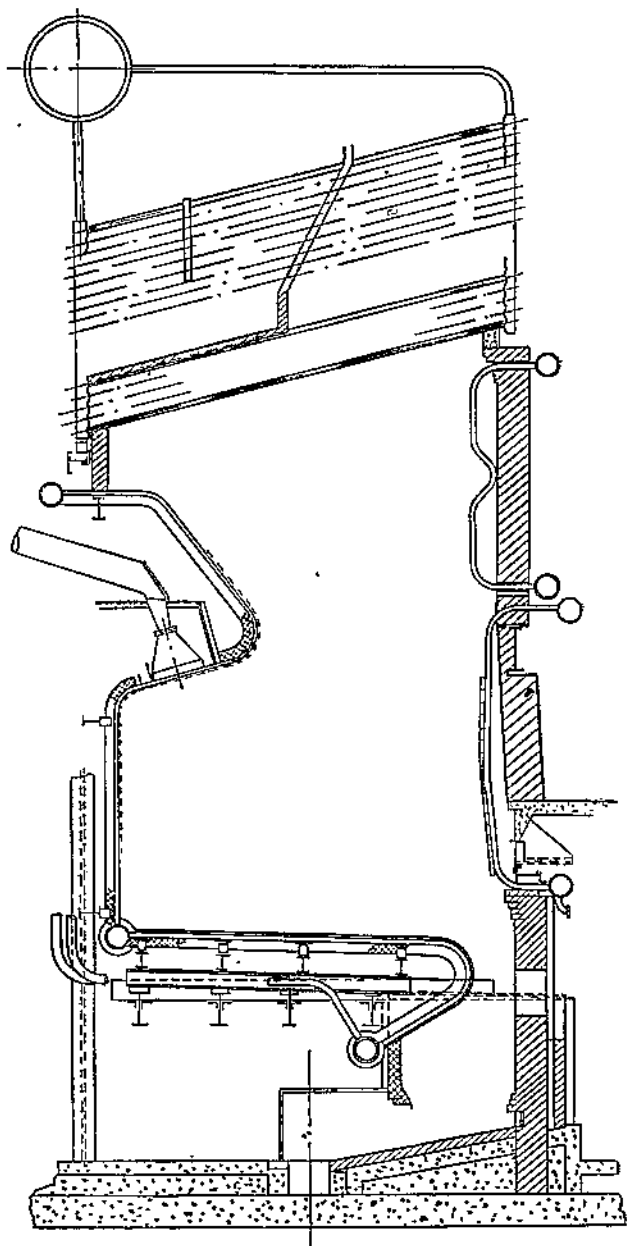
На фиг. 264 показана общая схема спуска шлака и удаления его из котла у двухкамерной топки при центральной летке.

Как видно, спускающийся из топки через центральную летку шлак гранулируется с помощью водяных сопел 2. Гранулированный шлак попадает в водяную ванну 4, откуда по мере накопления смывается в центральный шлаковый канал 7. Размыв кучи шлаковых нитей осуществляется с помощью водяных сопел 6. Зола из второй части камеры, собирающаяся в золовом бункере, удаляется отдельными водяными соплами.

Устройство центральной летки при охлажденных экранными трубами подах вызывает все же ряд затруднений в связи со значительными размерами самой летки. Кроме того, при сильно зольных топливах количество леток во избежание получения толстой струи шлака приходится увеличивать. Поэтому в новейших конструкциях топок с жидким шлакоудалением шлак спускается через сплошную щель в задней части топочной камеры или в двухкамерных топках перепускается через порог из первой камеры во вторую, откуда и выбрасывается в гранулированном виде.

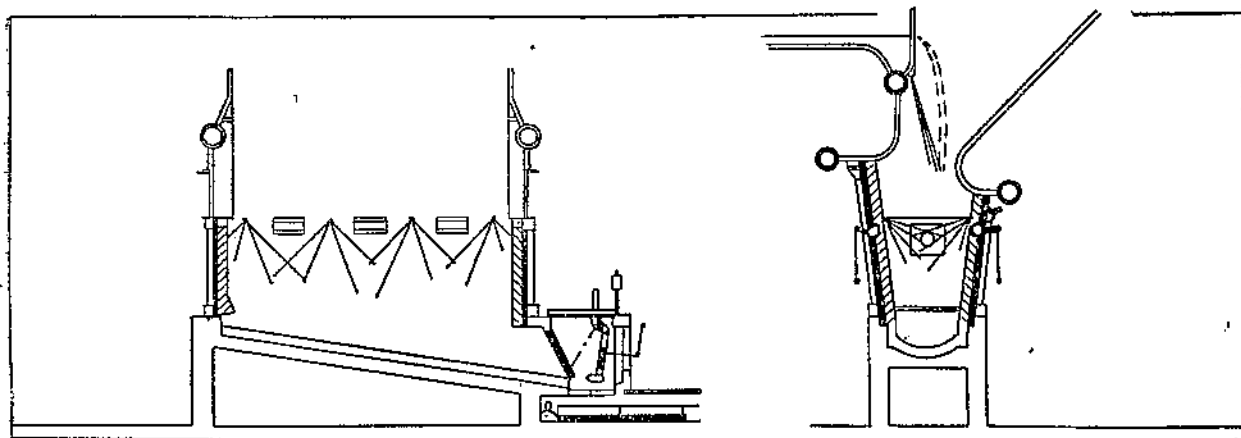
На фиг. 265 показана схема подобного топочного устройства с охлажденными экранными трубами подом и со спуском шлака через щель в конце топки. На фиг. 266а показана схема удаления шлака в двухкамерной топке. Шлак переливается через порог раздельного экрана и гранулируется струями воды. Окончательное удаление шлака производится с помощью обычных водяных сопел гидравлического золоудаления. Гранулированный шлак накапливается предварительно в шлаковой воронке, после чего открывается нижняя дверка этой воронки и с помощью сильной струи воды шлак вымывается из воронки.

Чем больше поверхность слива шлака при жидком шлакоудалении, тем тоньше получаются струи шлака, тем легче они охлаждаются и транспортируются водой. В связи с этим конструкции со спуском шлака по всей длине фронта топки выгоднее, чем со спуском шлака через отдельно стоящие летки.



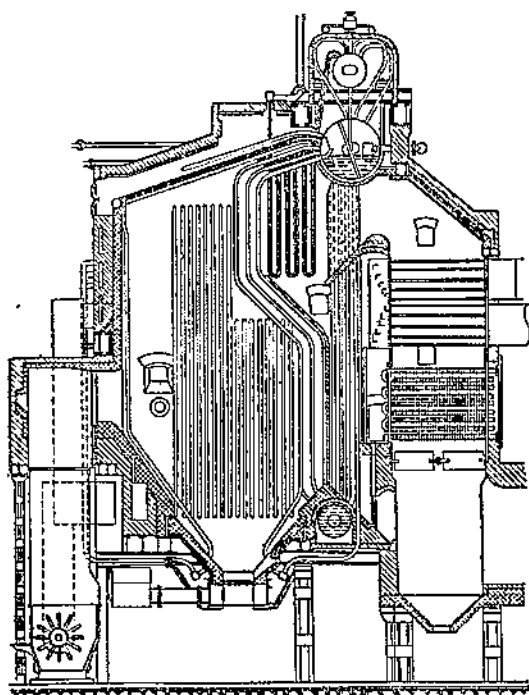
фиг. 265. Схема топки с жидким шлакоудалением при спуске жидкого шлака через щель в задней части топки.

Несмотря на ряд трудностей, с которыми связано применение топок с жидким шлакоудалением, эти топки имеют целый ряд преимуществ. Двухкамерные топки с температурами $1500—1600^{\circ}$ в первой камере допускают жидкое шлакоудаление при топливах практически с любой температурой плавления шлака. Для советских установок, обычно потребляющих угли с низкой температурой плавления шлака, это имеет особо большое значение. Двухкамерные топки значительно расширяют возможности использования низкосортных топлив. Повышенная скорость горения за счет сокращения стадии подсушки и воспламенения



Фиг. 265а. Схема спуска жидкого шлака у двухкамерной топки при сливе шлака во вторую камеру.

Шлак переливается через порог разделительного экрана и собирается в шлаковую шахту, откуда сжатыми соплами спускается в канал гидроудаления.



Фиг. 266. Котел фирмы Штейнмюллер с шахтно-мельничной топкой.

позволяет применять с большим успехом более грубый помол топлива, чем увеличивается экономичность установки в целом. Факел топки держится более устойчиво, что особенно важно для топлива с малым выходом летучих. Присосы через низ топки полностью ликвидируются. Недожог снижается до минимума; в самом шлаке недожога обычно нет. Это дает возможность сжигать с высоким экономическим эффектом тонкие угли и антрациты при сравнительно грубом помоле.

В ванне жидкого шлака улавливается значительная часть золы, чем облегчается процесс золоулавливания за котельной установкой. Удаление шлака проще и дешевле, чем на обычных

установках, но несколько увеличивается потеря с физическим теплом шлака. Спуск в топку летучей золы дает возможность всю массу золы удалять единообразным способом.

Введение жидкого шлакоудаления, а особенно применение двухкамерных топок, позволило сильно повысить тепловое напряжение топочных камер, что дает возможность значительно сократить объем котельного агрегата и тем самым удешевить его. Эксплуатация топок с жидким шлакоудалением проста и не требует ни особых механизмов, ни особой квалификации обслуживающего персонала. Условия работы лучше и чище. Использование жидкого шлака в качестве сырья для производства литых материалов позволит еще более повысить рентабельность установки.

Эти преимущества топок с жидким шлакоудалением объясняют широкое распространение их в американской практике. В последнее время ряд советских котлов также переведен на работу с жидким шлакоудалением.

62. Конструкции топок с упрощенным пылеприготовлением. Сжигание фрезерного торфа

Недостатки пылесжигания, заключающиеся, главным образом, в высокой его стоимости, больших расходах энергии на размол, ухудшении санитарных условий и повышенной опасности взрывов пыли, побудили искать более простые способы сжигания топлива в камерных топках.

Наиболее простое пылеприготовительное устройство осуществлено в шахтно-мельничных топках.

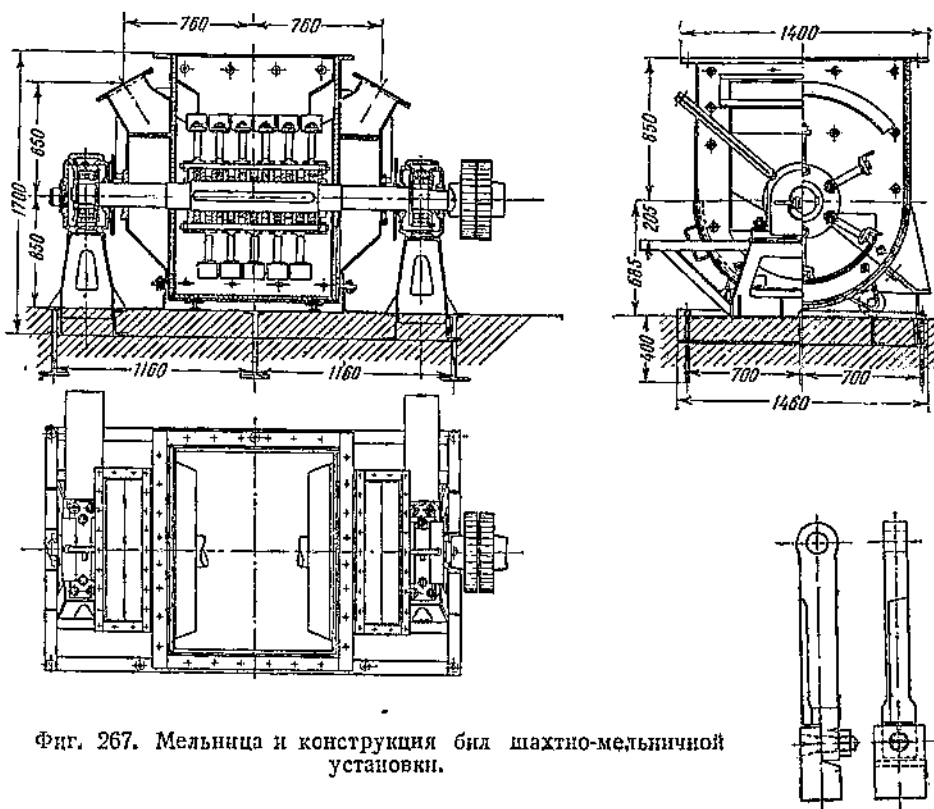
Шахтно-мельничная топка обычно представляет собой шахту, примыкающую непосредственно к топочной камере, через которую проходит снизу вверх горячий воздух и газ, уносящие в топку мелко раздробленное топливо. В нижней части шахты помещается ротор мельницы, верхняя же часть шахты служит воздушным сепаратором. Из шахты измельченное топливо выбрасывается через отверстие во фронтальной стенке в топку (фиг. 266).

Ротор мельницы аналогичен ротору молотковой дробилки (фиг. 267). Направление вращения ротора таково, что падающий уголь отбрасывается книзу, а пыль кверху. Обычно на вал насаживается ряд дисков, через которые пропускаются стержни с подвешенными на них молотками. Державки молотков ротора снабжаются съёмными билами, укрепленными болтами или иным способом на державках. Хорошо зарекомендовали себя била из рельсов. Молотки целесообразно размещать по винтовой линии, с тем чтобы создать подсос воздуха к центру мельницы (фиг. 268). В мельницах Ковровского завода типа ШМТ-5 с шестью рядами молотков рекомендуется иметь 22 била (4-3-4-4-3-4).

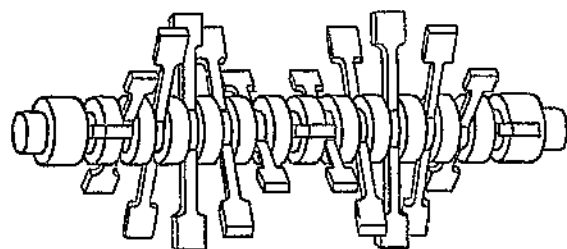
Размол топлива производится ударами бил о куски топлива. Окружная скорость на концах молотков достигает 50—60 м/сек. Ротор помещается в кожухе. Зазор между кожухом и молотками составляет от 40 до 100 мм, что уменьшает возможность повреждений от попадания посторонних металлических частей в ротор. При дроблении твердых топлив этот зазор снижается до 20—30 мм.

Необходимо следить, чтобы при подводе воздуха к мельнице пыль не могла оседать в воздушных рукавах, что может привести к самовозгоранию пыли и к взрывам.

В шахту подаются куски топлива размером до 20 мм. Более тонкое начальное измельчение желательно, так как способствует понижению расхода энергии. Целесообразна установка перед шахтой магнитных сепараторов и колечданных удволителей. Процесс сепарации полученной пыли происходит в шахте. Регулирование помола возможно за счет изменения количества воздуха, проходящего через шахту. Высота шахты от оси ротора до центра выходного отверстия должна быть не меньше 4 м. Количество и температура воздуха, пропускаемого через шахту, должны быть такими, чтобы при максимальной нагрузке котла не получалась недопустимо грубая или влажная пыль. Скорость в верхней части шахты колеблется от 2 до 4 м/сек. Для возможности регулирования нагрузки топки 25—30% воздуха подается мимо шахты (фиг. 269). Этим достигается большее постоянство тонкости помола и



Фиг. 267. Мельница и конструкция бил шахтно-мельничной установки.



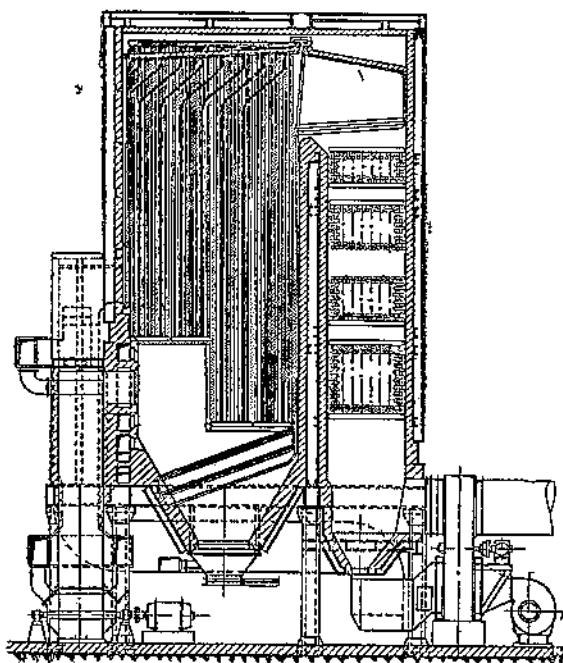
Фиг. 268. Винтообразное размещение бил у шахтной мельницы.

избытка воздуха при различных паропроизводительностях котла. При понижении нагрузки котла доля воздуха, пропускаемого через шахту для пневматического транспорта, может возрастать; в таком случае котельный агрегат работает с повышенным процентом первичного воздуха.

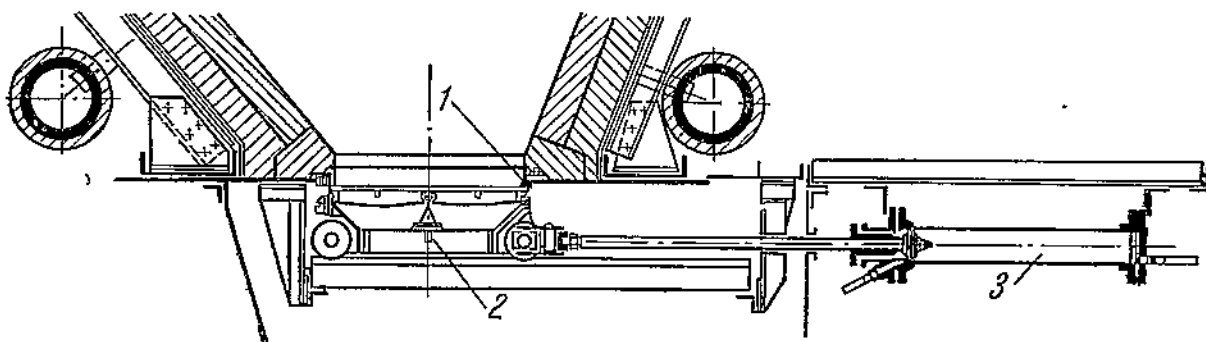
Для подсушки топлива в мельницу дается горячий воздух или смесь воздуха и газов. Обычно подсушка заканчивается почти целиком в полости мельницы.

Начальная температура воздуха зависит от типа топлива. Для бурых углей с влажностью 50% температура газов допускается до 500° С, но не ниже 350° С. Для топлив с малой влажностью достаточно 150—200° С. При сухих топливах установка может работать и с холодным воздухом.

Температура в конце шахты при влажных топливах равна 60—70° С. Сушка бурых углей допустима до 5—10% сверх гигроскопической



Фиг. 269. Топка Кремера под котлом Бенсона. Вторичный воздух подводится частично по центру горелки, частично около горелки.



Фиг. 270. Выдвижная дожигательная решетка фирмы Борзиг.
1—бункерная рама; 2—выдвижная панель; 3—гидравлический цилиндр.

влаги ($W_2 + 5\%$). Неудовлетворительная сушка понижает производительность мельницы, повышая этим удельный расход энергии на размол.

Воздух подается аксиально с торцов мельницы или тангенциально к окружности ротора. В первом случае воздух частично подсасывается за счет разрежения, создаваемого ротором мельницы. Обычно же используется избыточное давление горячего воздуха или применяется специальный вентилятор, подающий смесь горячих газов и воздуха. Сопротивление самой мельницы при полной ее нагрузке колеблется в пределах 30—50 мм вод. ст. При нормальной работе в шахте поддерживается атмосферное давление или небольшое разрежение.

Пыль из мельницы выбрасывается в камеру сгорания воздушным потоком через отверстие,

чаще всего четырехугольное окно. Скорость выхода пылевоздушной смеси в топку составляет 2—5 м/сек. Во многих установках выходное окно разбито на ряд щелей, образованных защищенными от износа экранными трубками. Пыль, поступающая в камеру, сгорает во взвешенном состоянии. Крупные частички топлива размером 0,5—1 мм и больше выпадают вниз, где для дожигания этих частиц нередко устанавливается дожигательная решетка (фиг. 270). Дожигательные решетки рекомендуются иметь для сланцев и фрезерного торфа. Но и при других топливах хорошо работающая дожигательная решетка может значительно сократить расход энергии на размол за счет подачи более грубой пыли.

Глубина топочной камеры должна быть не меньше 4—5 м во избежание удара пламени в заднюю стенку и шлакования ее.

Растопка обычно осуществляется с помощью нефти или дров, зажигаемых на дожигательной решетке. Пуск котла из холодного состояния может занимать около 1 часа, а после 30-часового останова — около 30 мин. Производительность мельницы в нормальных пределах нагрузки регулируется питателем и изменением соотношения между первичным и вторичным воздухом. Расход

энергии на размол зависит от качества топлива, степени загрузки мельницы и от размеров ротора мельницы. Чем больше ротор мельницы, тем больше мощность ее холостого хода. Поэтому большие мельницы при малых нагрузках имеют повышенный удельный расход энергии. Обычно расход энергии при тонкости помола в пределах $R_{70} = 50\%$ составляет 8—16 квтч/т для бурых углей при отсутствии дожигательной решетки и до 12—18 квтч/т для каменных углей.

Недостатком шахтно-мельничной топки является быстрый износ бил мельницы. Обычно била могут работать от 500 до 1000 час. Износ бил зависит от топлива. Повышение зольности, засоренность угля песком ускоряют износ бил.

Потеря с недожогом при сжигании в этих топках бурых углей невелика и составляет 1,0—1,5%.

При каменных углях потеря с недожогом больше и доходит до 5—8%.

В условиях СССР шахтно-мельничные топki применимы для многих топлив (фрезерный торф, украинские, подмосковные, челябинские и другие бурные угли), но несколько менее пригодны для сланцев, каменных углей¹ и отходов углеобогащения (вследствие быстрого износа бил).

Производительность котла при шахтно-мельничных топках достигает 7—8 т пара на 1 м ширины фронта котла. При расположении шахт по бокам топki эти цифры могут быть повышены в 1,5—2 раза. В крупных котельных агрегатах (больше 60—75 т/час) возникают большие трудности с размещением мельниц.

Для мелких установок в пределах производительности 20—25 т/час шахтно-мельничные топki вполне подходят благодаря их простоте и дешевизне.

Стандартная производительность советских шахтно-мельниц равна 5, 8 и 12 т/час по бурому углю. Рекомендуемая мощность моторов мельниц 50—75—125 л.с.

Производительность мельниц для различных углей при соответствующей подаче горячего воздуха может быть определена по удельному расходу энергии.

По данным ВТИ удельный расход энергии для различных бурых углей и сланца при $R_{70} = 50\%$ может быть оценен следующими цифрами (в ккал/т):

Волжские сланцы	13
Челябинские угли	12,5
Канские "	12,5
Кизильские "	10
Райчихинские "	10
Подмосковные "	8,5
Украинские бурые	8,0

Простейшей системой пылеприготовления, тесно связанной с топкой, является также система КСГ (КСГ), использующая для помола топлива усиленный ротор вентилятора. Подобные установки применяются для влажных углей и имеют несколько иную схему, чем шахтно-мельничные топki. Схема такой установки показана на фиг. 271. Сырое топливо подается в шахту; в эту же шахту мельницей-вентилятором засасываются горячие газы из верхней части топki с температурой до 950°С. Подсушка бурого угля происходит с 54 до 15—20%. Подсушенное топливо попадает в ротор вентилятора, вращающийся с большим числом оборотов. Лопатки ротора одновременно размалывают топливо. Пыль проходит через сепаратор, регулирующий тонкость помола, и подается в топочную камеру через угловые горелки. Установка обычно состоит из четырех мельниц, размещаемых по углам топki. Каждая мельница обслуживает две горелки. Пример такой установки показан на фиг. 271а.

Размол топлива в системе КСГ производится крыльями мельницы-вентилятора благодаря ударам угля о ребра и броню (фиг. 272). Производительность таких мельниц достигает до 13 т/час бурого угля. Расход энергии на размол колеблется от 7,5 до 10 ккал на 1 т

сырого топлива. В установке необходим магнитный сепаратор, удаляющий случайно попавшие в топливо куски металла, могущие повлечь повреждение ротора. Ротор мельницы сделан из простого квадратного железа и изнашивается примерно через 700 час.

Смена ротора производится без особых затруднений: для этого отнимают патрубок у подводящей шахты. Мельница-вентилятор применима для дробления наиболее сырых и легко размалываемых топлив, например, фрезерного торфа. Для углей типа подмосковного, содержащих значительное количество колчедана, и для сланцев эта конструкция мало пригодна.

Фрезерный торф характеризуется повышенной и меняющейся влажностью (от 30 до 60%, в среднем 40—55%). По крупности фрезерный торф имеет различную структуру, меняющуюся по времени года. Летний торф мельче зимнего. В зимнем торфе много мерзлых кусков размером свыше 50 × 50 мм.

На фиг. 273 показан фракционный состав фрезерного торфа ГЭС им. Классона по данным ВТИ. Наличие значительного количества корней во фрезерном торфе требует обязательной установки дробилки перед топочным устройством.

Из-за переменной влажности Q^H колеблется от 1450 до 3000 ккал/кг. Содержание летучих на горючую массу достигает 70%. Подсушенный фрезерный торф легко загорается и хорошо горит. Поэтому фрезерный торф допускает применение камерного метода сжигания при чрезвычайно грубом размоле. Это подтверждается опытами сжигания фрезерного торфа в пылевом факеле на ГЭС им. Классона.

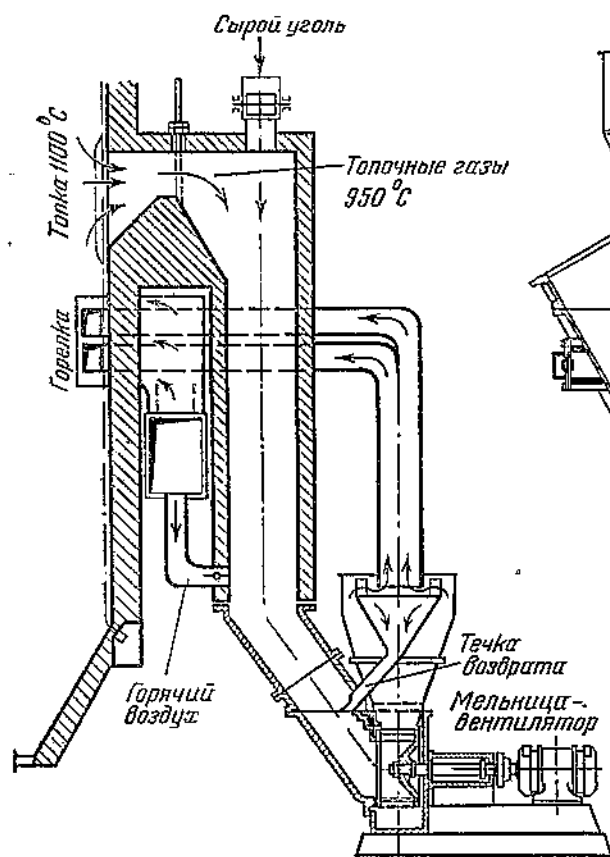
Схема установки одного из котлов этой станции дана на фиг. 274. Топливо из бункера 1 подается с помощью питателя-трясуна 2 на магнитный сепаратор 3, а затем на питатель-звездочку 4, откуда направляется в дробилку 5. После питателя в трубу одновременно подаются дымовые газы с температурой до 600°С, отбираемые из задней части топочной камеры. Вместе с дымовыми газами топливо проходит через дробилку, поступает в вентилятор 7, где измельчается и по трубе 6 выбрасывается через ряд горелок в топочную камеру. Факел имеет U-образную форму. Для дожигания крупных частичек внизу поставлена дожигательная решетка 8. Подготовка фрезерного торфа для размол в вентиляторе и сжигания его в факельной топке сводится к предварительному грубому дроблению. Конструкция дробилки показана на фиг. 275.

Дробилка хорошо справляется с дроблением зимнего и летнего торфа, но плохо разрушает корни. После дробилки остается около 20% корней размером свыше 50 × 50 мм. Основное дробление торфа происходит в топливном вентиляторе. Это видно из сравнения кривых, приведенных на фиг. 276. Остаток на сите с размером отверстий 0,5 мм падает с 60 до 45% в дробилке и с 45 до 10% в мельничном вентиляторе. Остаток на сите № 70 составляет около 50%.

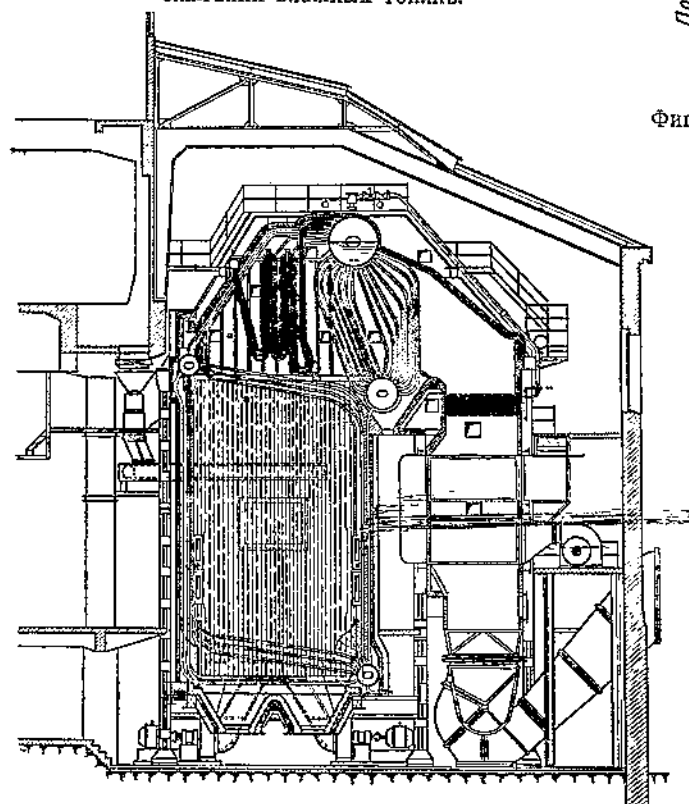
Торф при проходе через трубу-сушилку подсушивается. При начальной влажности 50%, концентрации топлива 0,6 кг/кг и температуре сушильного агента 550°С

¹ Техническим совещанием при Главкотлотурбопроме в октябре 1939 г. шахтно-мельничные топki для каменных углей совсем не рекомендованы. Вообще же применение их ограничено котлами производительностью не выше 75 т/час.

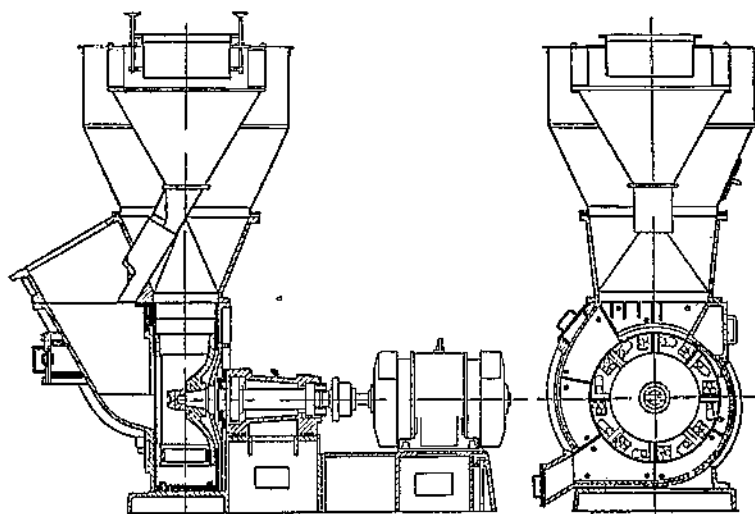
¹ В более поздних схемах подача горячего воздуха в дробилку не применяется.



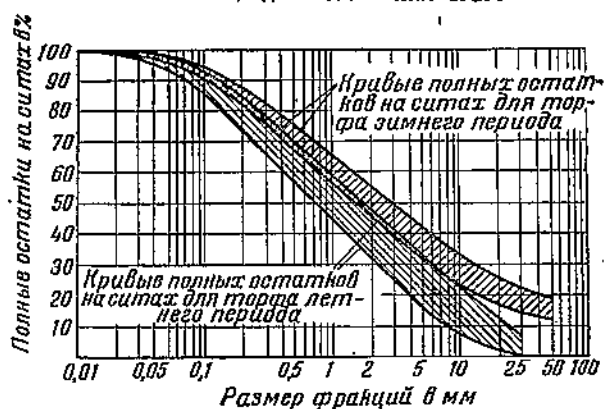
Фиг. 271. Схема мельничной установки типа КСГ для сжигания влажных топлив.



Фиг. 271а. Установка типа КСГ на станции Гиршфельд.



Фиг. 272. Мельница для топки типа КСГ.



Фиг. 273. Пределы колебаний крупности фрезерного торфа летнего и зимнего времени года.

конечная влажность снижается до 40%, что вполне обеспечивает зажигание топлива в камере. Средняя скорость аэроторфа 25–30 м/сек.

Падение температуры в трубе-сушилке происходит, главным образом, на первых двух метрах, где температура может упасть с 500–600°С до 160–180°С при общем падении температуры до 60–70°С.

Коэффициент полезного действия котельного агрегата 80–82% при $t_y = 180^\circ\text{C}$. Расход энергии на транспорт, сушку и размол можно обеспечить, по данным ВТИ, в пределах 5,5 ккал/т.

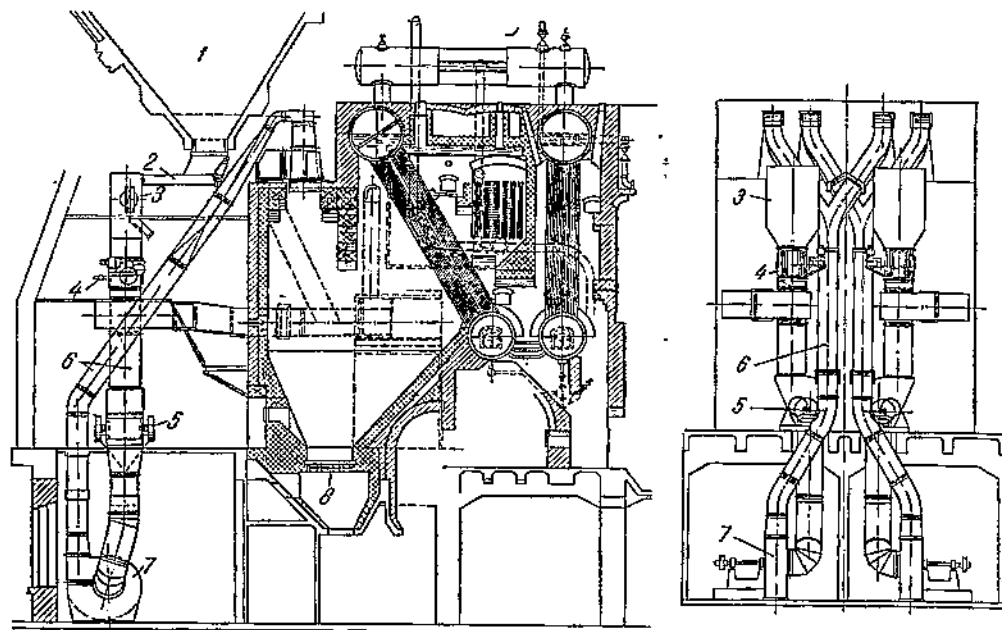
Напряжение топочного объема колеблется от 150 000 до 250 000 ккал/м³ час, составляя в среднем 180 000 ккал/м³. Площадь дожигательной решетки топки ВТИ-Мосэнерго может быть определена из диаграммы фиг. 277. При повышении влажности топлива выше 55% производительность котельного агрегата падала.

В этой топке необходимо улучшить работу топливного вентилятора, конструкцию горелок и конструкцию топочной камеры, что позволит применять фрезерный торф с более широким диапазоном влажности. Работы в этом направлении ведутся в Мосэнерго.

Камерное сжигание фрезерного торфа несколько раньше было предложено в топках системы Шершнева (фиг. 278), рекомендованных

Фиг. 274. Чертеж установки котла ЛЭС им. Классона. $H_k = 750 \text{ м}^2$, $H_n = 250 \text{ м}^2$, $p_k = 16 \text{ атм.}$

1—бункер, 2—питатель; 3—магнитный сепаратор; 4—питатель-звездочка; 5—дробилка; 6—труба; 7—вентилятор; 8—дожигательная решетка.



конференцией по сжиганию фрезерного торфа для установок с паропроизводительностью до 20 т/час. Особенность толки системы Шершнева заключается в создании внутреннего вихря с горизонтальной осью вращения в топочной камере. Вихрь, создаваемый в нижней части толки, поднимает крупные частицы, сгорающие во взвешенном состоянии; зола и шлак при этом выбрасываются из толки целиком в котельный агрегат. Фрезерный торф сжигается также в вихревых толках системы Макарьева, применяемых еще и для сжигания сланцев.

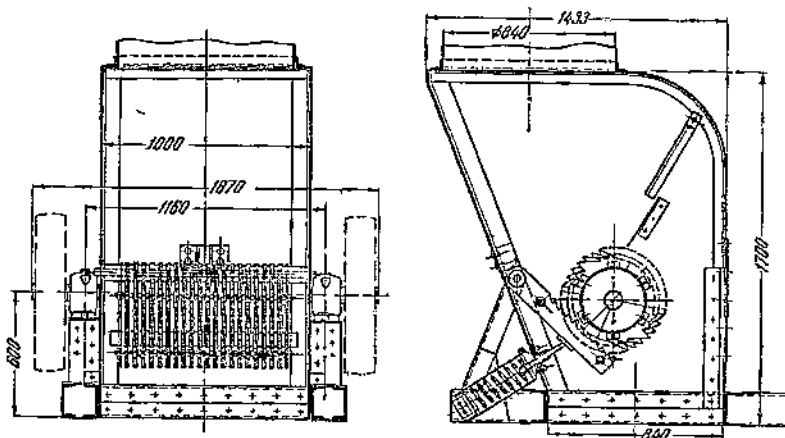
63. Сжигание сланцев. Взвешенное сжигание

Сланцы являются наиболее низко-сортным топливом: их теплотворная способность колеблется от 1300 до 2000 ккал/кг. Проблема сжигания наших сланцев, особенно волжских, до настоящего времени не получила достаточно удовлетворительного решения. Влажность сланца колеблется от 10 до 22%. Влажный сланец трудно поддается размолу и дроблению, подсушенный сланец расслаивается и легко размельчается. Крупность сланца в плитах доходит до $1000 \times 500 \times 250 \text{ мм}$. По данным Саратовской ТЭЦ 60% падает на куски свыше 250 мм; мелочи, меньшей 25 мм, — 80%. Качество сланца меняется по времени года. В зимнее время сланец

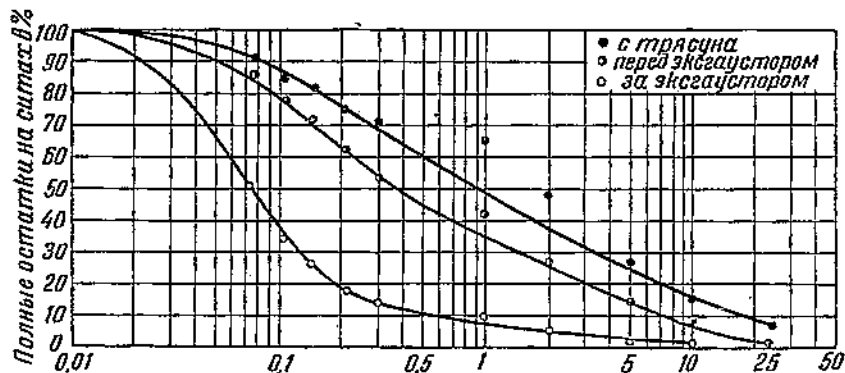
более влажен и Q_p^H его падает до 1200 ккал/кг. Средняя годовая влажность сланца на Саратовской ТЭЦ в 1937 г. была $W_p = 17,6\%$, зольность $A_p = 65\%$ и теплотвор-

ная способность $Q_p^H = 1360 \text{ ккал/кг}$. Влажность зимой $\sim 21\%$, летом $\sim 10,5\%$.

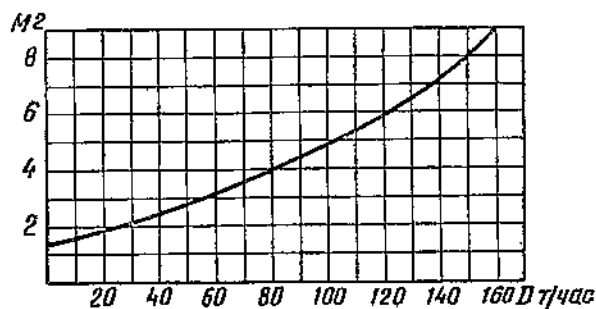
Попытки сжигать сланец в механических толках не увенчались успехом вследствие малых тепловых



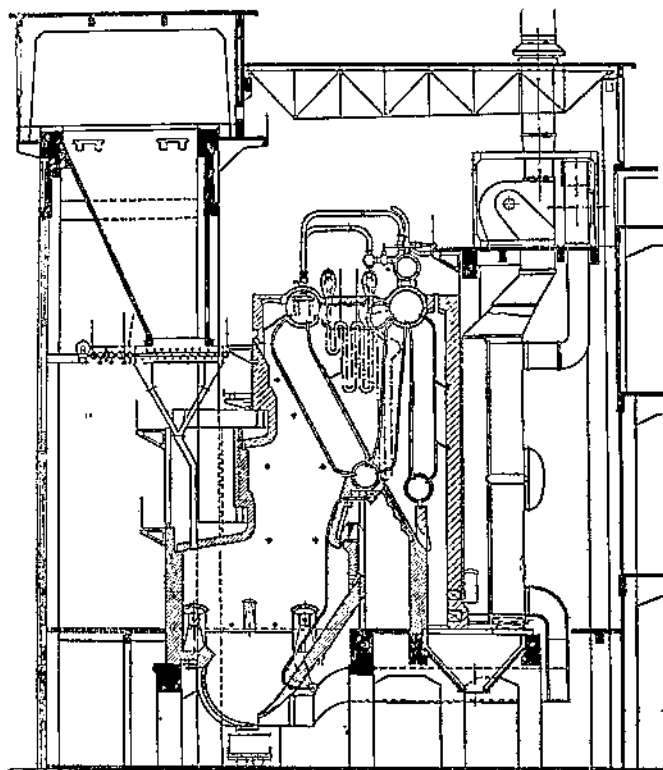
Фиг. 275. Конструкция дробилки для фрезерного торфа.



Фиг. 276. Полные остатки на ситах при просеве фрезерного торфа.



Фиг. 277. Площадь дожигательной решетки для сжигания фрезерного торфа в топках системы ВТИ Мосэнерго.



Фиг. 278. Топка системы Шершнева.

напряжений, получаемых на решетке, больших затруднений с золоудалением и значительной потери от недожога топлива.

В связи с этим в последнее время было предложено сжигание дробленых сланцев в вихревых топках системы Макарьева. Эти топки были проверены в промышленной эксплуатации на Саратовской ТЭЦ под четырехбарабанными вертикально-водотрубными котлами производительностью 30/40 т/час. Экранированная топка Макарьева состоит из двух секций, разделенных между собой стеной (фиг. 279). В каждой секции имеется движущийся беспрывальный транспортер, скорость которого изменяется от 20 до 150 м/час. На транспортер подается слой дробленого сланца высотой до 350 мм. Сланец, подаваемый транспортером, попадает под влияние двух вихрей, образуемых двумя группами сопел, поставленных по бокам топки. Топливо поднимается воздушным потоком и сгорает во взвешенном состоянии. В нижней части потока идет процесс

подсушки и газификации топлива; в верхней — горение всей массы топлива. Крупные частицы остаются на полотне и продолжают двигаться к задней стенке топки, откуда два других сопла откидывают частицы ближе к фронту, где они догорают.

В топке Макарьева можно сжигать топливо с большим выходом летучих, например, фрезерный торф, либо топливо, достаточно мелко раздробленное, например, сланцы. Крупные частицы, которые не успевают все же сгореть, выпадают на дожигательную решетку в задней части топки, 60% общего количества воздуха подается через основные сопла, которых на обоих полотнах всего 16 шт., 30% количества воздуха — через четыре отбойных сопла и 10% количества воздуха подается в дожигательную шахту. Скорость воздуха из основных сопел ~ 60 м/сек при 200—280° С. Регулирование топки возможно за счет скорости топочного транспортера, высоты слоя топлива, количества и скорости воздуха, подаваемого через вихревые сопла.

Работа топки Макарьева для сланцев на Саратовской ТЭЦ протекает ненадежно и мало экономично. Потеря с механическим недожогом достигает 16—18%. Ненадежность работы вызывается неполадками с топочным транспортером и расстройством регулирующих органов.

Большие избытки воздуха в топке, достигающие $\alpha_m = 1,5—1,7$, объясняются аэродинамическими условиями топки и необходимостью предохранения топки от шлакования.

Топки Макарьева для сжигания сланцев требуют значительно более мелкого дробления сланца, чем могут дать молотковые дробилки. При сжигании фрезерного торфа работа такой вихревой топки на 8-й ЛГЭС была значительно более надежна и удовлетворительна, однако экономичность ее невелика.

ВТИ рекомендует сжигание сланцев в виде пыли с грубым помолом (характеризуемым 50% остатка на сите № 70) в экранированных топках камерного типа с тепловым напряжением, равным примерно 175 000—200 000 ккал/м³ час при $\alpha_m = 1,25$ и потерях $q_3 = 10\%$, $q_4 = 2\%$.

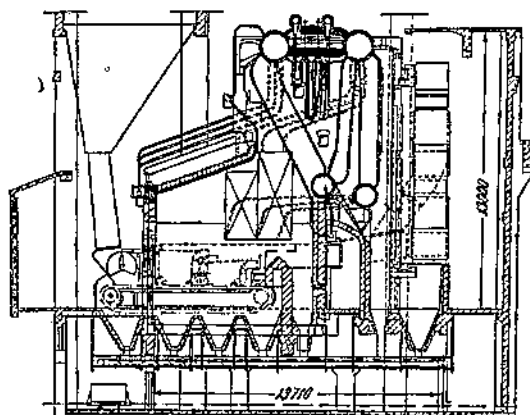
Схема пылеприготовления рекомендуется индивидуальная без сепаратора у мельниц. Сырое дробленое топливо подается с размером кусков 0—15 мм и в сушильной трубе подсушивается до 10% влажности; начальная температура сушильного агента 450—500° С. Общий расход энергии на дробление, сушку, помол и пневматический транспорт оценивается ~ 16—18 катч/т. Несмотря на повышенный расход энергии на помол, предполагается, что метод сжигания пылевидного сланца окажется более надежным и экономичным.

Потеря q_1 снижается до 2%. Потеря с уходящими газами и расход энергии на тягу уменьшаются, так как $\alpha_m = 1,25$ вместо 1,55 на топке Макарьева. Благодаря пониженному давлению воздуха перед горелкой по сравнению с давлением у сопла и уменьшению α_m снижается расход энергии на дутье.

Взвешенное сжигание. При сжигании топлива в виде пыли ускорение процесса горения получается за счет увеличения реагирующих поверхностей, что связано с расходом энергии на размол. Ускорение процесса горения возможно также за счет повышения концентрации кислорода, повышения давления в топке и повышения скорости обдувания частичек топлива воздухом. Сжигание топлива с повышенными концентрациями кислорода в воздухе в настоящее время экономически не оправдывается. Топки, работающие под высоким давлением, при зольных топливах не нашли пока конструктивного решения. Поэтому наиболее просто скорость горения может быть увеличена за счет повышения скорости обдувания.

Значительная интенсификация горения осуществляется в топках с чисто взвешенным сжиганием крупно дробленого материала. В таких топках создается мощный

Фиг. 279. Сланцевая топка системы Макарьева к котлу Саратовской ТЭЦ.



воздушный поток снизу вверх, в котором крупные частицы поддерживаются и горят во взвешенном состоянии.

Для создания такого режима скорость воздуха должна равняться критической скорости, т. е. той, при которой давление воздушной струи на частицу уравнивается ее весом. При температуре, например, 300° и размере частиц 15 мм эта относительная скорость составляет 27 м/сек. Имея повышенную скорость газового потока, можно в некоторой части отделить сжигание углерода от сжигания СО и летучих. Непрерывное движение частичек облегчает процесс освобождения их от золы и тем самым поддерживает достаточную интенсивность горения.

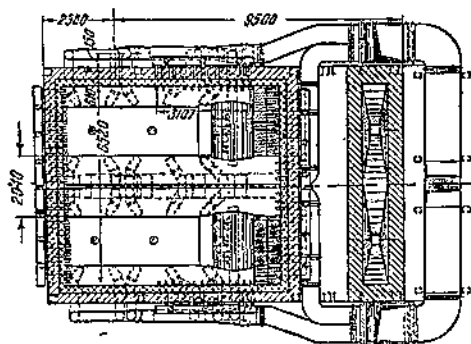
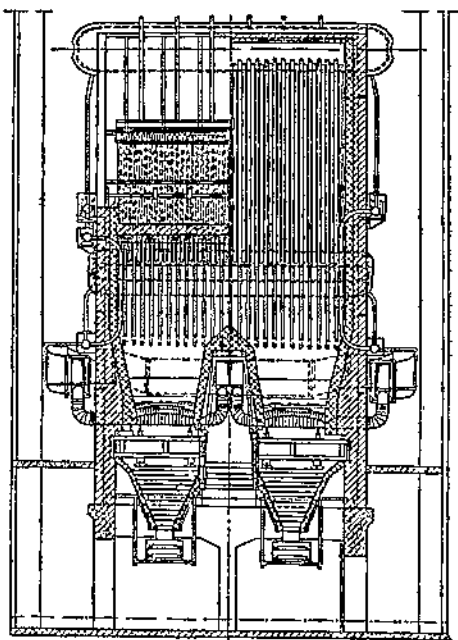
По мере выгорания кусочка его размеры и вес уменьшаются, и при той же скорости газов он был бы унесен вверх, не успевши догореть полностью. Для удлинения времени пребывания кусочка во взвешенном состоянии соответствующий участок топki делается часто в виде конуса или пирамиды, расширяющейся кверху. При движении вверх скорость газов постепенно уменьшается и частично выгоревший кусочек внизу задерживается в верхней части конуса, где скорость воздуха и газов меньше.

Добиваться полного выжигания во взвешенном потоке не следует, так как интенсивность горения в конце процесса понижается. Поэтому целесообразно объединение предтопки со взвешенным горением (например, при топке фонтанного типа), предназначенного для сжигания крупных фракций, с обычной пылеугольной камерой, в которой ведется дожигание выбрасываемых из топki горячих газов и мелких фракций из первой камеры. Лишь в такой комбинации — предтопка и камеры, — используя вторую камеру для осаждения золы, можно искать правильное и легкое решение задачи золоудаления из установки и правильно определить температурный режим предтопки.

За последнее время появился целый ряд топок для использования в качестве топлива крупно дробленого материала. Топки эти, главным образом, однокамерного типа, чем и объясняется неудача большинства предложенных топок со взвешенным сжиганием.

Попытку найти решение сжигания топлива во взвешенном состоянии можно видеть в топках системы Шершнева, описанных раньше. В топке затруднено золоудаление и не решена проблема шлакования топki.

Взвешенное сжигание осуществлено в топках системы Стратон (фиг. 280), где топливо подводится сбоку. Фонтан горящего топлива образуется действием воздушного потока, подаваемого снизу. Затруднения, связанные с удалением шлака из топki, также не дают удовлетворительного решения в топках указанного типа.



В топках Штуфа (фиг. 281) подача воздуха происходит снизу, подача топлива сверху. Топка Штуфа представляет собой усеченный конус с углом расходжения стенок в камере около 10—12°. Вследствие конусности топki скорости воздушного потока в различных точках неодинаковы. Внизу их величина наибольшая, и потому в нижней части камеры происходит процесс горения наиболее крупных частиц при максимальных скоростях обдувания. По мере выгорания частицы переносятся в более высокие зоны с меньшими скоростями. В верхних частях топki сгорают мелкие частицы. Удаление золы и шлака из топki предполагается в твердом виде через нижнюю часть топki, снабженную специальными конструкциями.

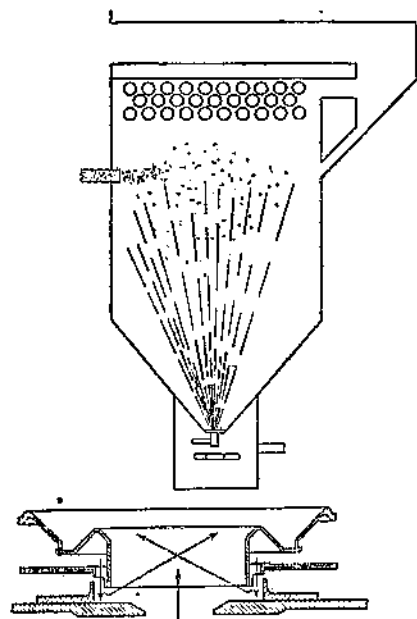
Сжигание топлива во взвешенном состоянии дает возможность использовать топливо с повышенными тепловыми напряжениями топочного объема.

Действительно, тепловое напряжение топочного объема в самом общем виде может быть выражено так:

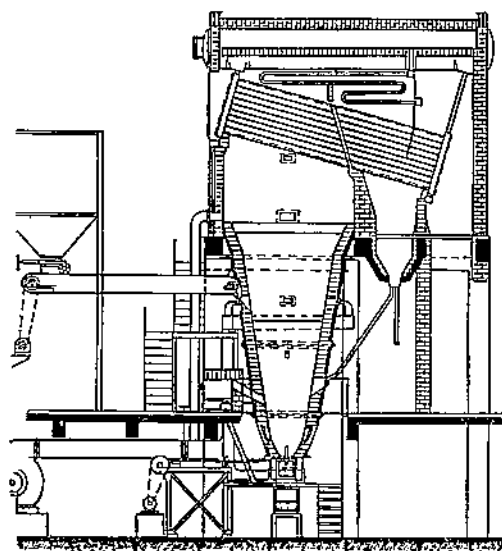
$$\frac{Q}{V_m} = Q_p k_s O_{ч.об} \text{ ккал/м}^3 \text{ час},$$

где

k_s — кг/м² час — количество сгоревшего топлива в кг, приходящееся в час на 1 м² поверхности топлива;



Фиг. 280. Аэрофонтанная топка системы Стратон.



Фиг. 281. Аэрофонтанная топка системы Штуфа для взвешенного сжигания.

$O, \text{м}^2/\text{кг}$ — удельная поверхность топлива;
 $\mu_{об}, \text{кг}/\text{м}^3$ — объемная концентрация, или количество килограммов топлива, горящего одновременно в 1 м^3 объема камеры.

При изменении величины куска d (тонкости помола) величина k_s для взвешенного сжигания меняется в сравнительно небольших пределах, падая в пять раз при увеличении d с 0,2 до 10 мм.

Величина O обратно пропорциональна диаметру куска.

Величина $\mu_{об}$ для чисто пылевых установок меняется в узких пределах, составляя в среднем $0,02 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Наоборот, при взвешенном сжигании крупных фракций величина $\mu_{об}$ может быть очень большой. В результате тепловое напряжение объема горения в топках со взвешенным сжиганием резко повышается и без особых затруднений может быть доведено до $2-3 \cdot 10^6 \text{ ккал}/\text{м}^3 \text{ час}$.

Возможность сжигать частички размером от 0 до 10 мм дает значительную экономию в расходе энергии, упрощает и удешевляет всю установку в целом. Теоретические исследования в области повышения скорости горения показывают, что принцип взвешенного сжигания заслуживает внимания, и поэтому современная техника ищет путей рациональной конструкции топки, осуществляющей эту идею. Однако до настоящего времени еще не решен вопрос о надежном удалении шлака из топки.

64. Сжигание жидких топлив

Потребление жидкого топлива в стационарных котельных СССР ограничено и все время неуклонно снижается. В настоящее время в основном сжигаются сернистые, парафинистые и вязкие мазуты, главным образом, крекинг-мазуты.

Мазут у нас применяется как растопочное топливо при сжигании пыли и как дополнительное при комбинированном сжигании естественного газа с жидким топливом (в нефтяных районах, например, в Баку).

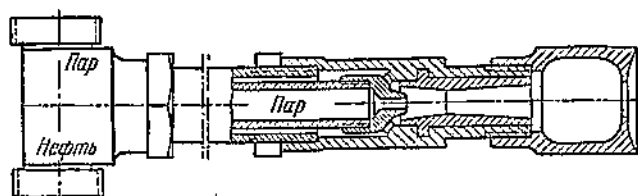
Сжигание жидких топлив производится только в камерных топках. Перед сжиганием топливо подвергается в форсунках распыливанию, состоящему в раздроблении его на мельчайшие капельки. В топочной камере идет горение на поверхности этих капелек; частично происходит испарение и в факеле горят пары различных горючих составных частей топлива и продукты пирогенетического распада их, в том числе и сажа.

Применение жидкого топлива требует ряда устройств для хранения, перекачки, распыления и сжигания топлива. Для этого служат подземные или над-

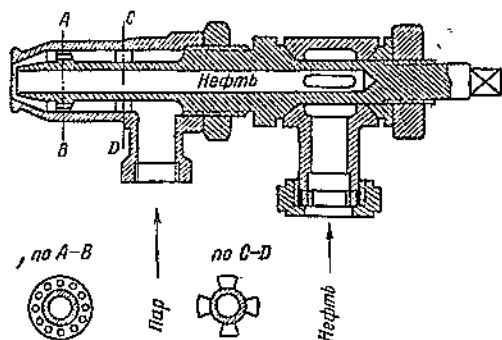
земные резервуары-нефтехранилища, нефтенасосы, нефтепроводы, расходные баки, фильтры, подогреватели, нефтяные форсунки, трубопроводы для подвода распыливающих топливо пара или воздуха, устройства для подвода и распределения воздуха, идущего на горение, и, наконец, топочная камера. К котельной установке непосредственно относятся только последние перечисленные устройства, начиная с форсунок, все же остальные устройства относятся к топливному хозяйству. В котельной иногда имеется небольшой запас жидкого топлива, находящегося в расходном баке. Расходный бак устанавливается обычно не менее чем на 2—3 м выше уровня форсунок.

Существует два способа распыливания. При первом из них используется кинетическая энергия струи жидкого топлива, вытекающей из очень мелких отверстий под давлением. Давление распыливания составляет от 5 до 15 атм. Процесс распыливания осуществляется специальными насадками или распылителями, расположенными в форсунке. Жидкое топливо вытекает через мелкие отверстия в них и в большинстве случаев получает вращательное движение; благодаря этому, а также под действием сопротивления среды, выходящие из отверстия пульверизатора струи распадаются в топочной камере на мельчайшие капельки. Эти капельки подхватываются воздухом и, воспламеняясь в нем, горят факелом. Работая по этому принципу форсунки носят наименование *механических*.

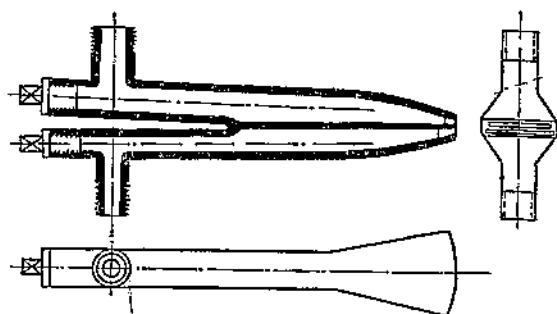
При втором способе для распыливания используется кинетическая энергия струи пара или сжатого воздуха; такие форсунки соответственно



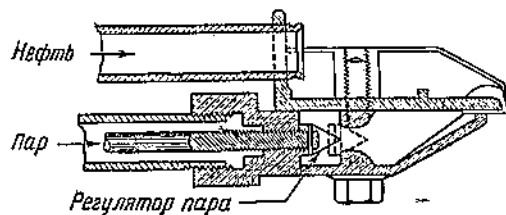
Фиг. 282. Паровая форсунка Главэнергопрома.



Фиг. 283. Паровая форсунка Шухова.



Фиг. 284. Паровая форсунка Геншке.



Фиг. 285. Паровая форсунка Бест.

носят название паровых или воздушных. Давление пара для распыливания колеблется от 2 до 15 *ати*. Воздушные форсунки делятся на форсунки высокого давления, для которых применяется примерно такое же давление, как и в паровых форсунках, и низкого давления, работающие при 100—400 *мм вод. ст.* Воздушные форсунки встречаются лишь в промышленных печах.

Паровые форсунки в зависимости от формы отверстий для истечения топлива и пара бывают круглые и щелевые. Смешение топлива и пара происходит внутри форсунки или снаружи.

Можно также испарять топливо и превращать его в газ перед сжиганием. Но этот способ громоздок и нашел лишь незначительное применение в мелких установках и отопительных котельных.

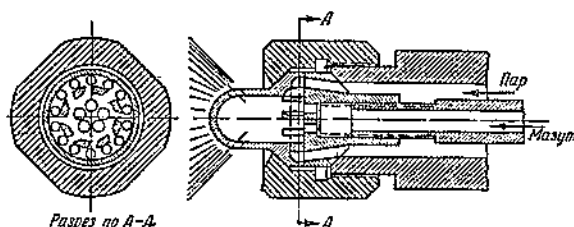
Паровое распыливание применяется в растопочных форсунках и в небольших установках. На котельных агрегатах большего размера, как правило, устанавливается механическое распыливание с подогревом топлива.

На фиг. 282 показан эскиз паровой форсунки. В ней при помощи сопла Лавалья достигается более сильное расширение пара в пределах самой форсунки.

Основные данные о ней приведены в табл. 61.

Кроме этой форсунки у нас еще известны круглые форсунки Шухова (фиг. 283), в которых паровая струя идет вне струи жидкого топлива.

Принцип устройства щелевой паровой форсунки Геншке виден на фиг. 284; на фиг. 285 показана плоская американская форсунка Бест. И в той и в другой форсунках пар подводится через нижнюю щель и подхватывает мазут, стекающий по лотку.



Фиг. 286. Паровая форсунка Пибоди.

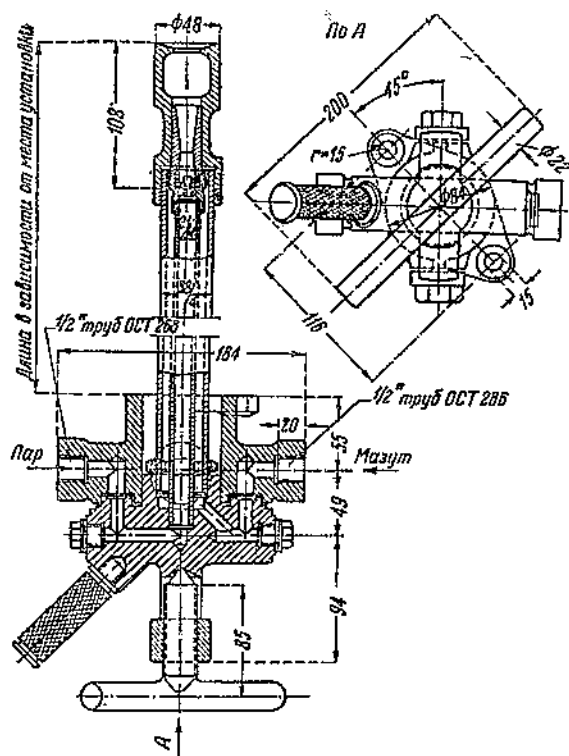
Для улучшения действия распыливающего пара ему иногда в пределах форсунки придают вращательное движение. Работаящая по этому типу американская форсунка Пибоди показана на фиг. 286. В ней вращение достигается при помощи вставок с каналами.

Улучшение работы паровой форсунки достигается возможно большим расширением пара в сопле Лавалья и подсосыванием жидкого топлива струей пара. Работаящая по этому принципу форсунка ЦККБ показана на фиг. 287. Расход форсункой пара при давлении 4—10 *ати* составляет 0,3—0,6 *кг* на 1 *кг* мазута. Длину факела обычно

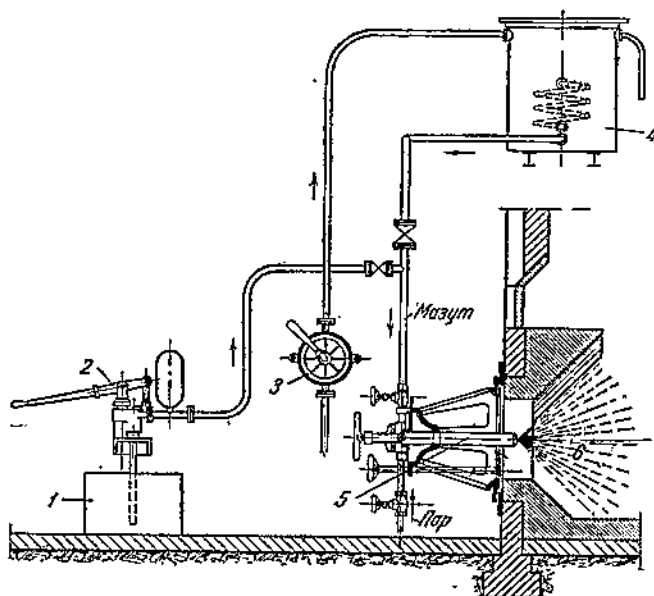
Таблица 61

Характеристика форсунок Главэнергопрома

Давление пара перед форсункой в <i>ати</i>	4	7	10
Производительность в <i>кг/час</i> форсунки №			
3	120	180	—
4	180	280	—
5	280	360	400



Фиг. 287. Паровая форсунка ЦККБ.



Фиг. 288. Схема расположения паровой форсунки у фронта топки.

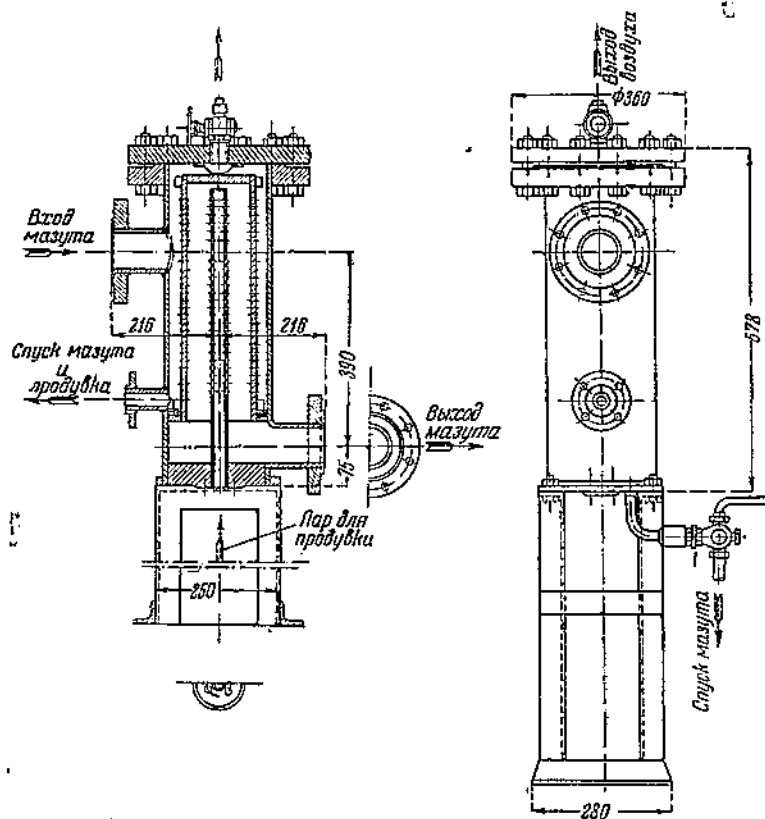
1—резервуар с легковоспламеняющимся топливом для растопки; 2—ручной поршневой насос; 3—крыльчатый насос; 4—мазутный бак; 5—форсунка; 6—топочная камера.

можно регулировать. Она колеблется от 3,0 до 3,5 м.

На фиг. 288 показана схема расположения у фронта топки паровой форсунки с паро- и нефтепроводами и вспомогательными устройствами: насосами, баками и змеевиком для подогрева.

Форсунки иногда необходимо отводить в сторону; для этого подводящие трубопроводы должны иметь в соответствующих местах шарниры. Нефтепроводы и паропроводы должны быть расположены так, чтобы можно было продувать нефтяные линии паром. Форсунка прикрепляется к чугунному регистру. На боковой поверхности регистра имеется ряд изогнутых направляющих крыльев для придания воздуху движения по винтовой линии и его регулирования. Регистры бывают прямые и наклонные, откидные и неоткидные.

Первичный воздух подводится через регистр, вторичный воздух—через каналы в обмуровке, направляясь для лучшего перемешивания в корень факела. В зависимости от открытия регистра угол факела составляет от 30 до 40°. Обычно одна форсунка приходится на каждые 1 000—1 200 мм ширины фронта топки. Единичная производительность крупных форсунок доходит до 1 т/час топлива.



Фиг. 289. Фильтр для мазута конструкции ЦККБ.

Напряжение объема топочной камеры без наддува обычно принимают около $300\,000\text{ ккал/м}^3\text{ час}$, но иногда доходят и до $500\,000\text{ ккал/м}^3\text{ час}$ и выше, в частности, в морских котлах. Разрежение в топке на уровне форсунки обычно составляет около $4\text{--}6\text{ мм вод. ст.}$

Перед пуском нефтяной топки необходимо протянуть через нее воздух, чтобы провентилировать все объемы и газоходы и удалить из них взрывчатые смеси горючих газов с воздухом, если таковые по какой-либо причине в них образовались.

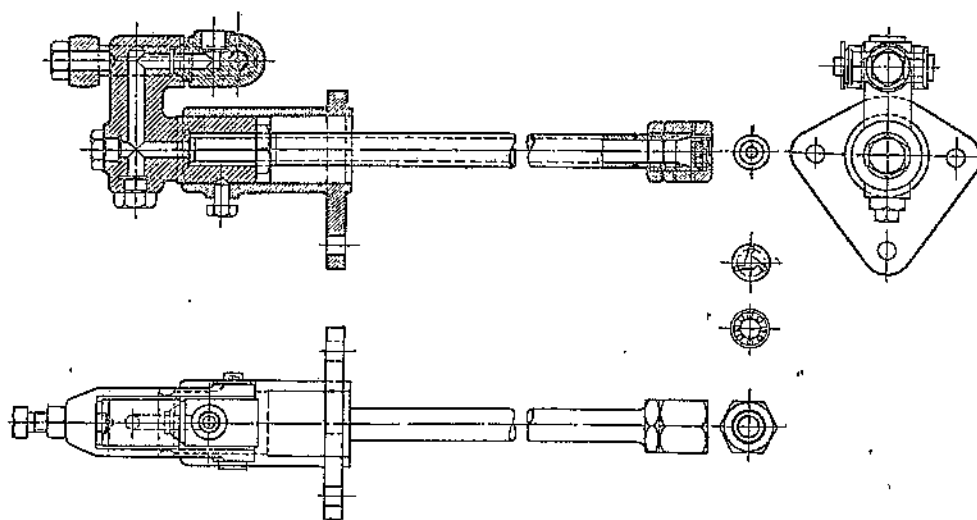
При пуске форсунки необходимо сначала пускать пар и затем топливо, при остановке следует закрыть подачу топлива, а затем пара.

При механических форсунках необходима установка фильтров для очистки мазута от примесей, могущих нарушить работу форсунки (фиг. 289). Обычно в комплект входят два фильтра на каждый подогреватель нефти, а также необходимые паропроводы и арматура к ним.

Фильтры разбиваются на две группы. Мазут проходит последовательно первую группу фильтров, подогревателя, вторую группу фильтров и затем направляется в напорную магистраль к форсункам. Необходимо предусмотреть переключение любого фильтра на любой подогреватель, а также их выключение для чистки. Производительность одного фильтра $3\text{--}35\text{ т/час}$. Для подачи мазута необходимы два насоса на давление до 15 атм.

Применяющаяся у нас конструкция форсунки для механического распыливания показана на фиг. 290. В этой форсунке имеются три части: стальной корпус, труба и распылитель. Распылитель состоит из шайб с отверстиями и распыляющего диска, устроенного так, что струя мазута выходит из него тангенциально и поэтому получает вращение. Снаружи распылитель закрыт гайкой. Производительность этих форсунок $250\text{--}500\text{ кг/час}$. Напор мазутной струи, у форсунки $6\text{--}8\text{ ат.}$

Иногда в механических форсунках усиливают вращательное движение струи вращающимися приспособлениями. Этим удастся увеличить производительность форсунки и ее регулируемость. Такая форсунка ротационного типа системы Заакке показана на фиг. 291. Жидкое топливо, подходящее к форсунке, без давления поступает в горизонтальную трубу 1, служащую валом воздушной турбины 7, и распыливается вращающимся распыли-



Фиг. 290. Механическая форсунка.

телем 8. Форсунка Заакке производительностью до $1\,500\text{ кг/час}$ предназначена для сжигания каменноугольного дегтя без подогрева. Процесс идет при $\alpha_m \approx 1,05$. Эта форсунка отличается широким пределом регулирования, достигающим до $1/10$ максимальной пропускной способности.

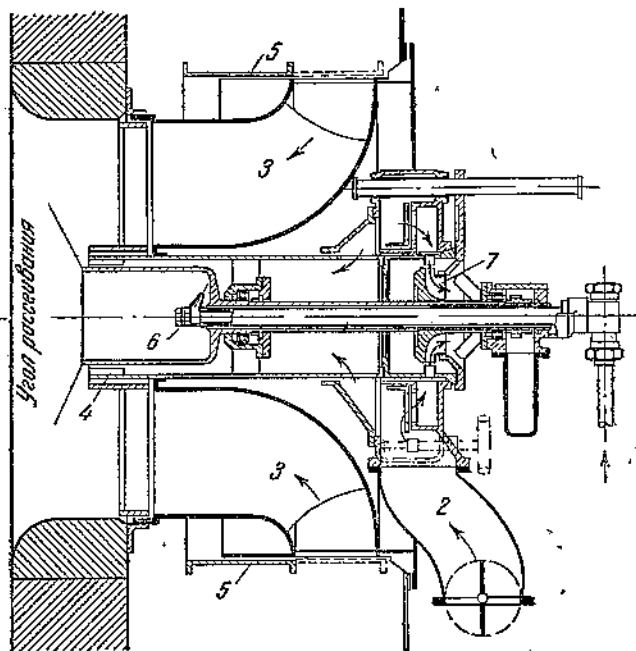
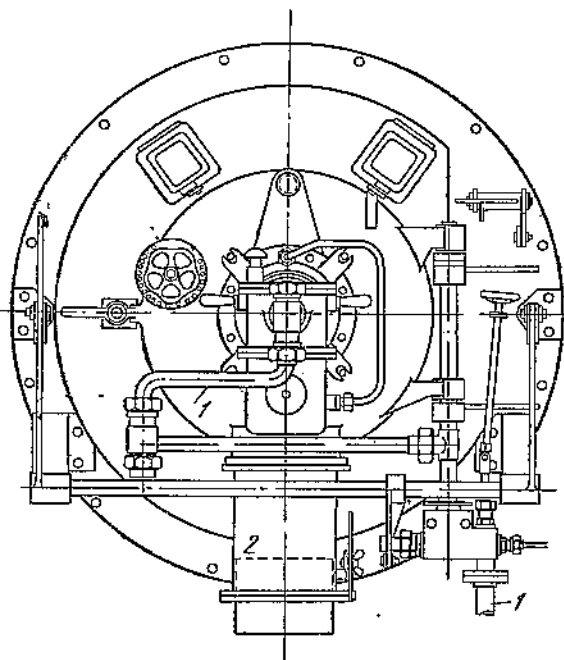
Представленная на фиг. 292 механическая форсунка широкого диапазона регулирования системы Калачева (БПК) работает по следующему принципу.

Через конусное соединение, ствол и отверстия А в головке форсунки 1 мазут проходит в кольцевую камеру В и далее через тангенциально расположенные в цилиндре 2 отверстия С поступает в камеру D. Вследствие тангенциального направления каналов С в камере D происходит завихрение потока мазута, который в распыленном состоянии выбрасывается через выходное отверстие Е распыляющей шайбы 3. Сечение тангенциальных каналов С уменьшается при завинчивании шпинделя 4.

Опыт показывает, что достаточно широкий диапазон регулирования нагрузки форсунки может быть достигнут путем изменения только проходного сечения тангенциальных каналов при постоянном диаметре отверстия распыляющей шайбы. Для плавности изменения проходного сечения тангенциальные каналы в завихряющем цилиндре 2 располагаются по винтовой линии.

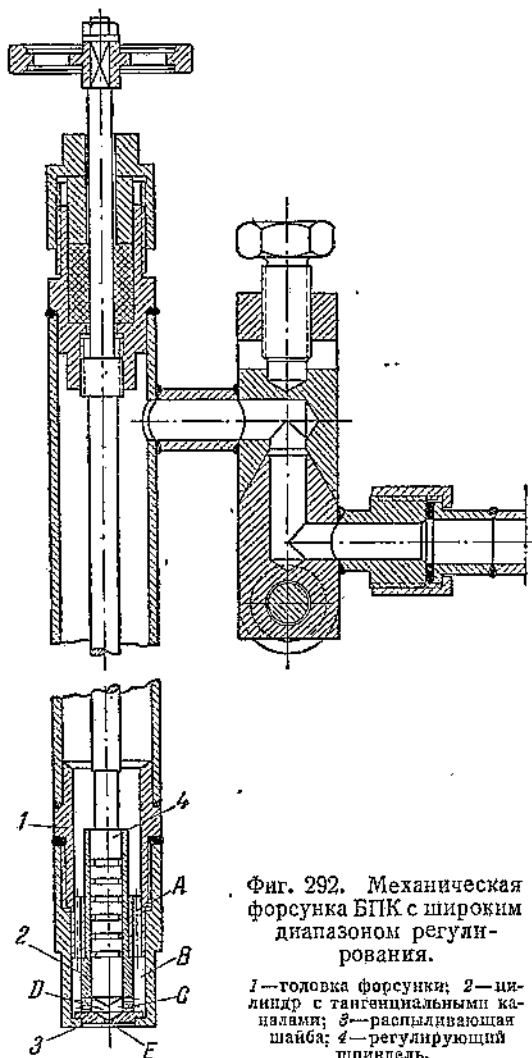
Суммарное проходное сечение тангенциальных каналов и диаметр отверстия распыляющей шайбы выбираются из расчета на максимальную производительность форсунки при заданном рабочем давлении мазута.

Испытания форсунки на действующих установках показали ее полную эксплуатационную пригодность как в смысле диапазона изменения нагрузки и удобства регулирования, так и в отношении качества распыливания.



Фиг. 291. Механическая форсунка ротационного типа.

1—мазут; 2—первичный воздух; 3—вторичный воздух; 4—запиратель первичного воздуха; 5—регулирующий шибер вторичного воздуха; 6—распылитель; 7—воздушная турбина.



Фиг. 292. Механическая форсунка БТК с широким диапазоном регулирования.

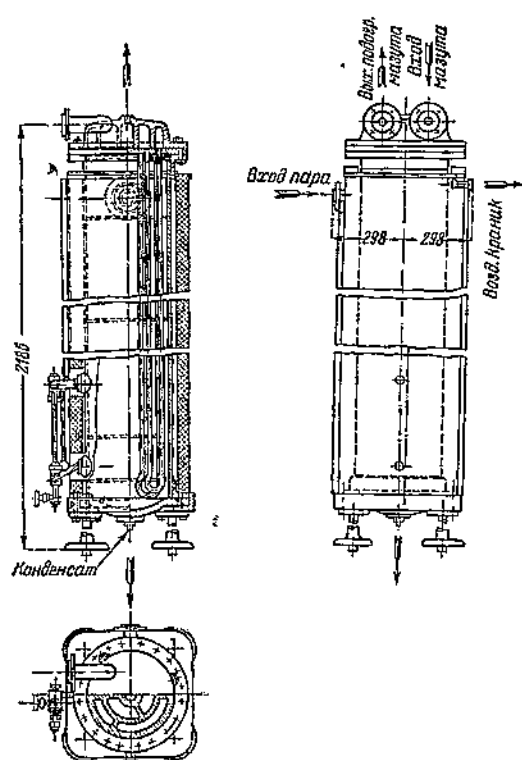
1—головка форсунки; 2—цилиндр с тангенциальными каналами; 3—распыливающая шайба; 4—регулирующий шпиль.

Чтобы мазут легко перемещался по трубопроводам, его необходимо подогревать. У нас сейчас применяются высоковязкие мазуты. Для уменьшения их вязкости необходим нагрев до 100°C . Тогда сжигание их не отличается от условий сжигания обычного мазута. На фиг. 293 показана одна из конструкций подогревателя жидкого топлива.

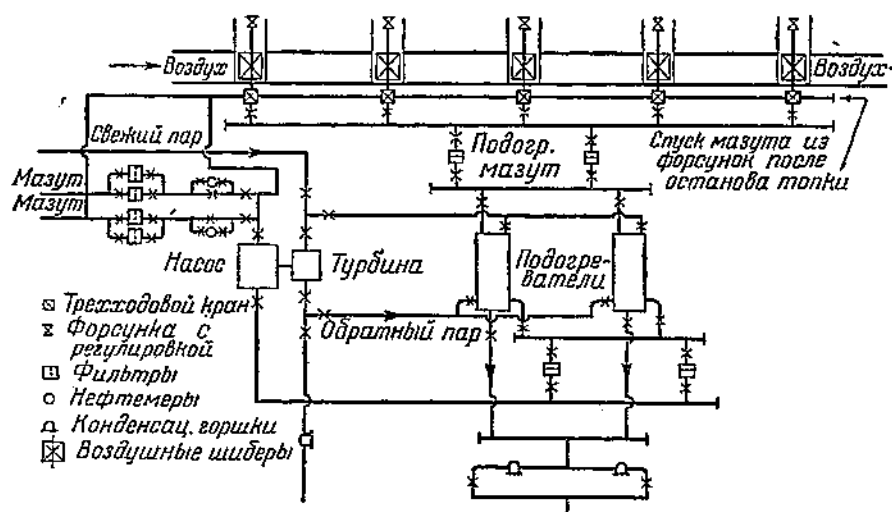
Два типа схем трубопроводов и вспомогательных устройств, служащих для подачи мазута при механическом распыливании, показаны на фиг. 294 и 295. При паровом распыливании все устройство дешевле и эксплуатация легче, но зато расход тепла на распыливание значительно больше.

В последние годы для сжигания в котельных поступает много мазута с повышенным содержанием серы и солей натрия. При сжигании в топках соли испаряются, а затем при температуре $\sim 850^{\circ}\text{C}$ снова сжижаются и затем затвердевают на поверхностях нагрева, разъедая кирпичную кладку. Сернистый газ в местах пропаривания вальцовочных соединений и т. п. разъедает металл. Отложения солей не могут быть удалены обдувкой воздухом или паром, но легко смываются струей воды, для чего агрегат приходится периодически останавливать.

Ввиду того что жидкое топливо является дефицитным, возникла мысль о применении так называемого коллоидального топлива, состоящего из жидкого топлива в смеси с тонкой угольной пылью в количестве 30—40% по весу. При длительном хранении уголь может оседать в нижней части резервуара. Наиболее устойчиво коллоидальное топливо тогда, когда размер пылинки приближается к размеру коллоидальных частиц. Устойчивость смеси зависит от тонкости пыли, вязкости жидкого топлива, свойств



Фиг. 293. Конструкция подогревателя мазута.

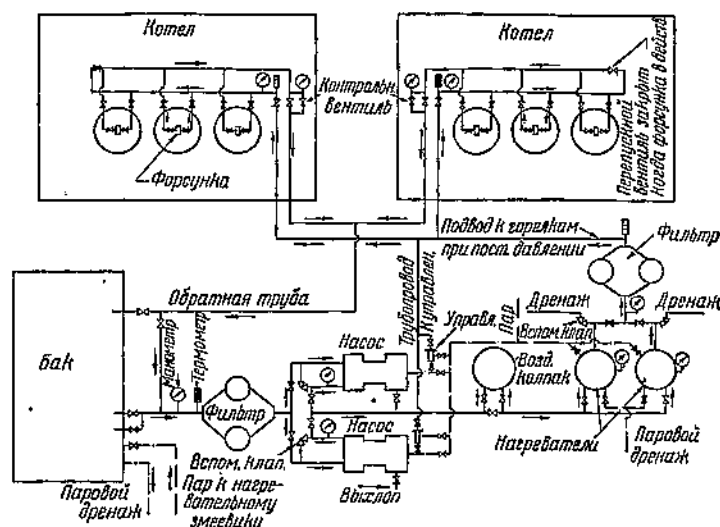


Фиг. 294. Схема трубопроводов и вспомогательных устройств для распыливания мазута (система Бабкок-Вильякс).

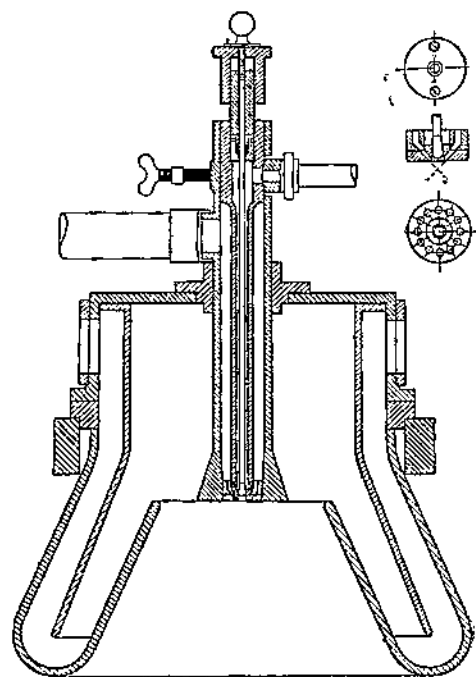
поверхности пылинки, свойств стабилизирующих примесей. Удельный вес коллоидального топлива больше единицы, поэтому его можно хранить под водой.

Сжигание такого топлива возможно при обычном оборудовании для жидкого топлива с учетом необходимости удаления из топки золы. На фиг. 296 показана форсунка Виндхем, применяющаяся иногда при коллоидальном топливе.

Топка для сжигания жидкого топлива отличается от пылеугольной, главным образом, отсут-

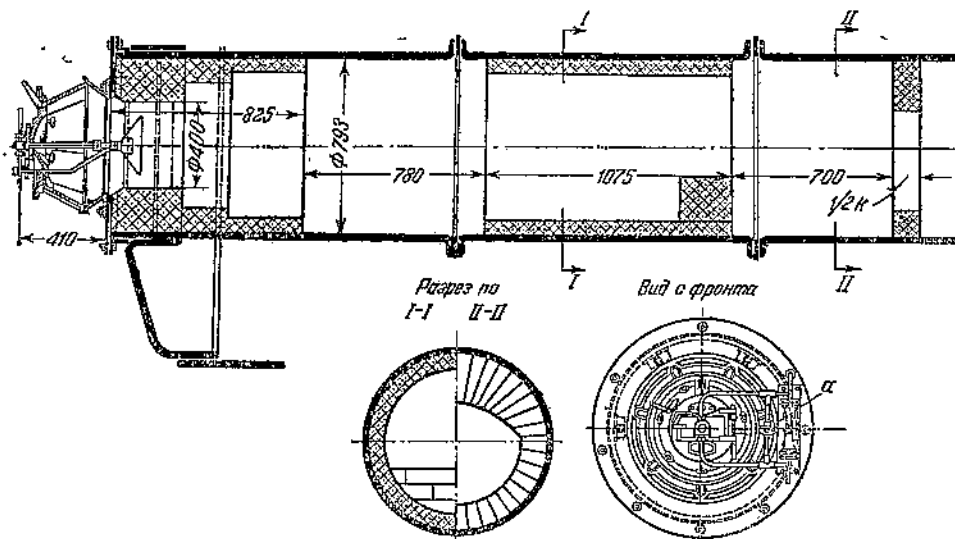


Фиг. 295. Схема трубопроводов и вспомогательных устройств для распыливания мазута (система Пибоди).

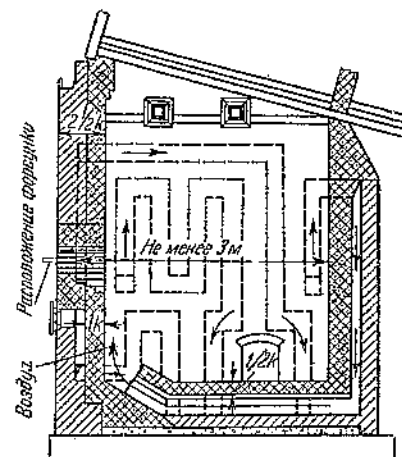


Фиг. 296. Форсунка Виндхем для коллоидного топлива.

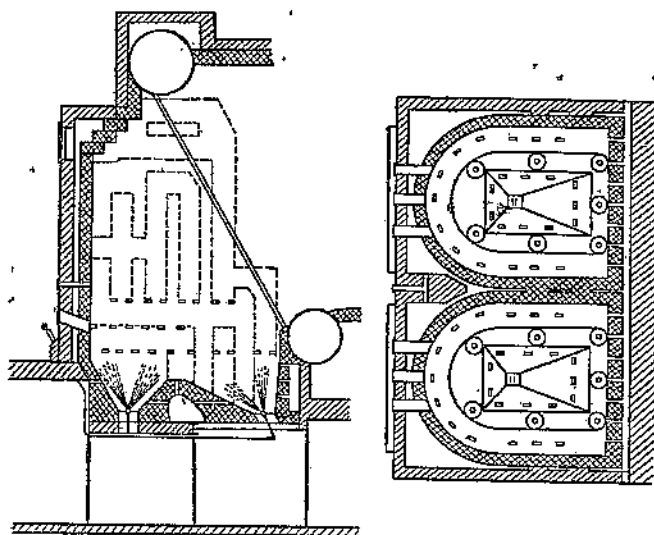
ствием устройств для шлакоудаления. Примеры топочных камер для жидкого топлива приведены ниже. На фиг. 297 и 298 показаны топки для мелких котлов — жаротрубного и водотрубного. На фиг. 299 показана топка для небольшого котла с подачей нефтяного факела снизу. Топочная камера для жидкого топлива, снабженная открытым экраном, показана на фиг. 300. Форсунки расположены двумя горизонтальными рядами. Для



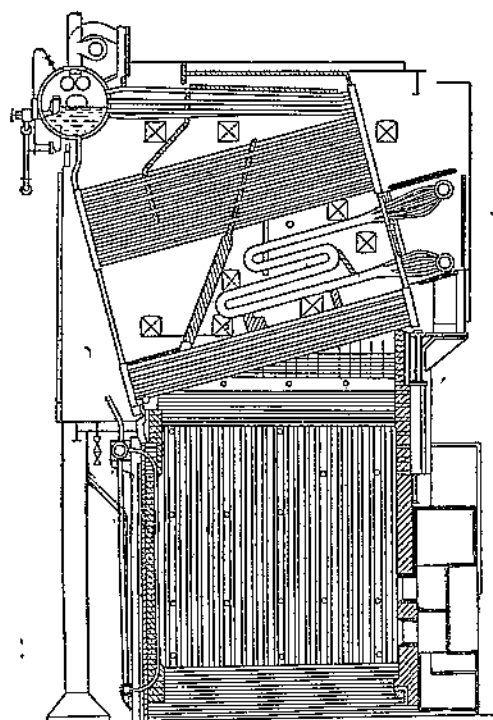
Фиг. 297. Топочная камера жидкого топлива для малого жаротрубного котла.



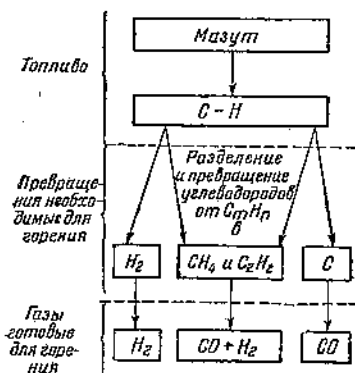
Фиг. 298. Топочная камера жидкого топлива для малого водотрубного котла.



Фиг. 299. Мазутная топка с вертикальным факелом, направленным снизу вверх (продольный разрез и план).



Фиг. 300. Экранированная мазутная топка Бакинской станции.



Фиг. 301. Подготовка жидкого топлива к горению и превращения его в связи с этим.

охлаждения пода топочной камеры иногда применяют внизу также экран, подобный грануляторам пылеугольных топок.

Распыленный мазут смешивается с воздухом и поступает в топку. Несмотря на подогрев мазута, капли попадают в топочную камеру, не достигнув температуры воспламенения, равной 300°C для мазута и 600°C для каменного угольного дегтя. Топливо и несколько подогретый воздух для горения приходится дополнительно подогревать в топочной камере, чтобы достигнуть температуры

воспламенения. Это нагревание осуществляется частично передачей тепла излучением от мазутного пламени и от нагретых стен топочной камеры или же от специальных шамотных стенок.

Часть тепла передается мазуту и воздуху теплопроводностью в струе от горящего впереди факела. Доля тепла, передаваемая теплопроводностью, по видимому, больше, чем в пылеугольных топках. При высоком подогреве воздуха для мазутных топок количество тепла, необходимое для воспламенения, значительно снижается.

По Ауфгейзеру при сжигании жидких топлив необходим ряд превращений топлива, подготовляющих его к горению. На фиг. 301 представлена схема этих превращений при допущении, что жидкое топливо состоит из одних только углеводородов. При этих превращениях высокомолекулярные углеводороды после испарения разлагаются на нефтяной газ и ничтожное количество углерода. Все превращения заканчиваются образованием CO и H_2 , т. е. составных частей водяного газа.

Превращение и подготовка к горению жидкого топлива проще и поэтому совершаются быстрее, чем в случае каменного угля. Для судовых котлов с отоплением жидкими топливами полное время горения составляет часто лишь $\frac{1}{8}$ сек., если температура топочной камеры $t_m = 1400^\circ \text{C}$, а коэффициент избытка воздуха $\alpha_m = 1,2$.

65. Сжигание газов. Сжигание доменного газа в пылеугольных топках

Газовые топки наиболее просты как по устройству, так и по уходу за ними. Эта простота обусловливается тем, что здесь отпадает процесс подготовки топлива к горению (в пределах самой котельной установки). Отпадают также и трудности, связанные с выделением и удалением золы и шлака. При конструировании газовой топки в основном остаются лишь задачи правильного и безопасного распределения газа по котлоагрегатам, хорошего смешения газа с воздухом и правильного устройства топочной камеры. Иногда возникает вопрос об очистке газа от пыли.

Применение газа для сжигания под котлами требует все же довольно сложных устройств, за пределами котельной — газодувок для подачи газа, газопроводов для передачи его на расстояния и газгольдеров для его хранения. В котельных установках сжигают, главным образом, газы, являющиеся побочными продуктами доменного и коксового производств — доменный и коксовый газ. Второй газ, как более ценный, под котлами сжигается реже. Более ограниченное применение находит естественный газ, встречающийся, главным образом, вблизи нефтеносных районов, и еще реже применяют генераторный газ, получаемый при помощи специально устанавливаемых для этой цели газогенераторов. В СССР проводятся большие работы по подземной газификации углей. Когда подземная газификация найдет широкое применение в нашей промышленности, газовые топки и спо-

собы сжигания газа получат еще большее значение.

Газовые горелки должны возможно лучше перемешивать топливо с воздухом, чаще всего путем создания турбулентного движения. Иногда газовые горелки устраивают так, что окончательное смешивание происходит лишь в топочной камере. В топках паровых котлов газ и воздух частично смешиваются в самой горелке, что ускоряет процесс горения и укорачивает пламя.

На фиг. 302 показана плоская газовая горелка производительностью до 30 000 $\text{л}^3/\text{час}$ доменного газа. В горелке имеются три основных части: а) приемный двухсторонний коллектор для газа и воздуха с клапаном для регулирования их количества, б) распределительная коробка, через которую газ и воздух проходят рядом перемежающихся струй, в) окно горелки, в котором образуется горючая смесь. При установке такой горелки во избежание взрывов особое внимание должно быть уделено уплотнению фланца, разъединяющего газовую и воздушную сторону приемного коллектора. Суммарные потери напора от входа в приемный коллектор до выхода в топочную камеру составляют примерно 70 мм вод. ст. с газовой и 85 мм вод. ст. с воздушной стороны.

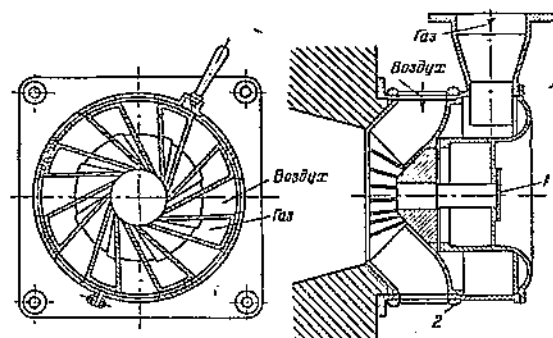
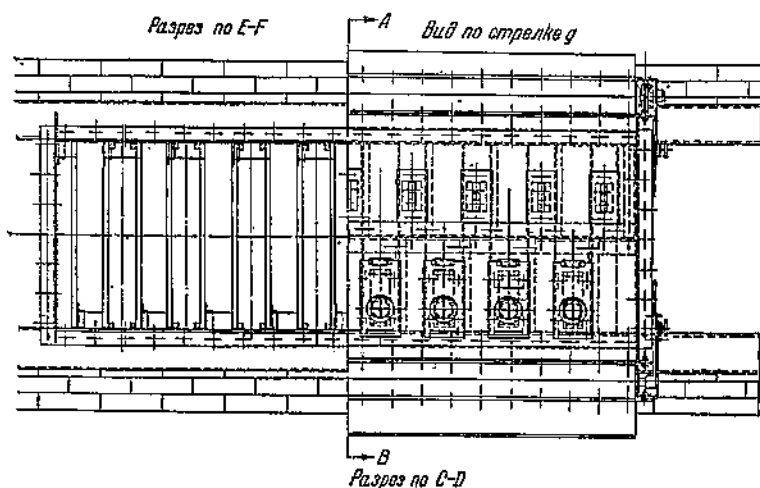
На фиг. 303 представлена горелка Моля, в которой необходимый для горения воздух всасывается благодаря разрежению в камере.

На фиг. 304 дана турбулентная горелка фирмы Оффенбау. В ней газ и воздух подводятся под давлением. В газовой горелке Бамаг (фиг. 305) после горелки расположена дымогарная труба с винтовой шамотной вставкой. Возникающее благодаря этому устройству вихревое движение газов способствует полному горению и хорошей передаче тепла.

Чтобы избежать взрывов в газовых топках применяется помимо закигательных стен, как в нефтяных топках, небольшая непрерывно горящая горелка в топке. На газопроводе устанавливаются предохранительные клапаны, закрывающиеся автоматически, как только прекратится ток газа. Принимаются еще меры к тому, чтобы горелка не могла быть пущена в ход, прежде чем она не будет продута воздухом.

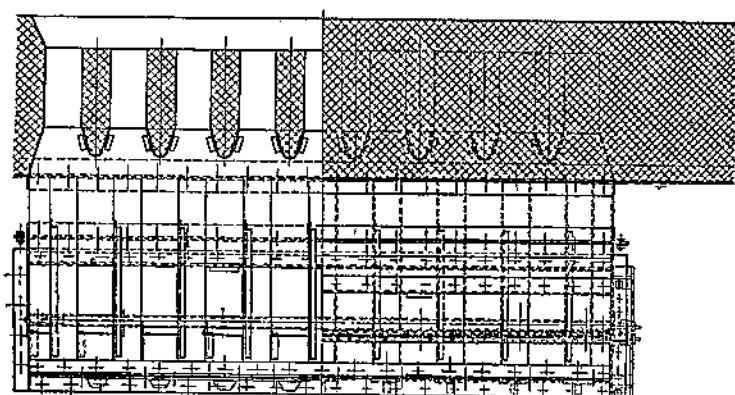
Так как объем газообразного топлива сравнительно велик по отношению к идущему на горение воздуху и, кроме того, отношение объема топлива к воздуху неодинаково для различных видов газа¹, то при конструировании горелки необходимо учитывать вид газового топлива. Изготовление горелок на большую производительность довольно затруднительно, поэтому для больших котлов предпочитают устанавливать ряд мелких горелок. Этим путем достигается также

¹ Для доменного газа это отношение равно примерно 1,4:1, для коксового газа — около 0,22:1.



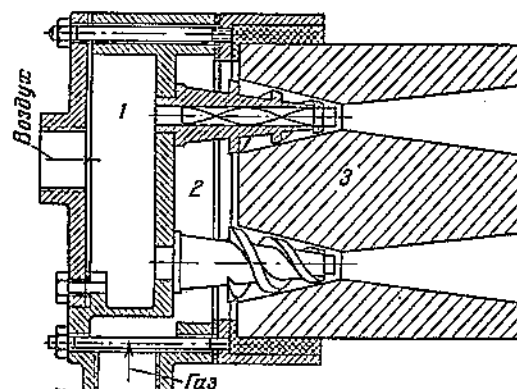
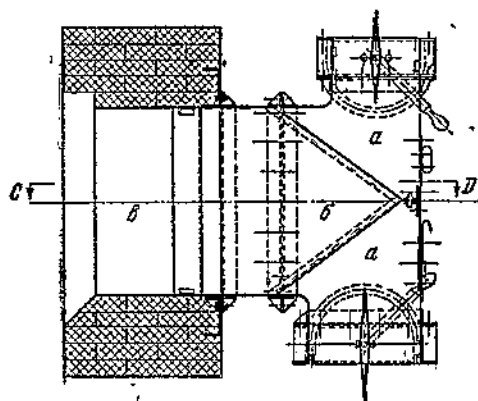
иг. 303. Газовая горелка Моля.

1 — отверстие для воспламенения; 2 — поворотная заслонка для регулирования воздуха.



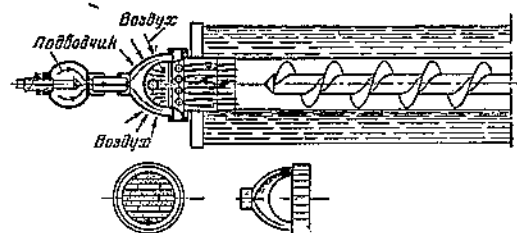
Разрез по A-B

Фиг. 302. Плоская газовая горелка.



Фиг. 304. Газовая горелка с подводом газа и воздуха под давлением.

1 — воздушная распределительная камера; 2 — газовая распределительная камера; 3 — огнеупорная вставка.



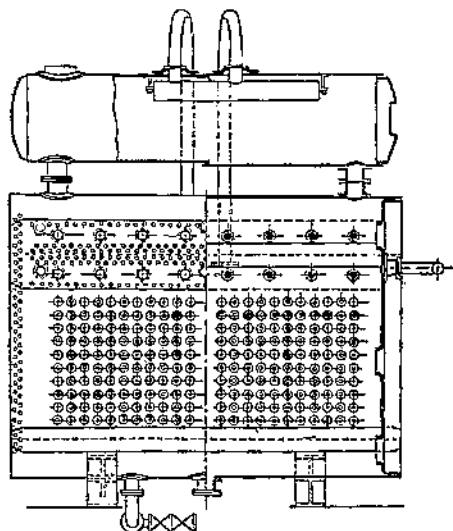
Фиг. 305. Газовая горелка с перемешиванием газа и воздуха по выходе из нее при помощи винтовой шамовой вставки.

лучшее регулирование, так как можно выключать часть горелок.

Тепловое напряжение объема газовой топки обычного устройства составляет нормально $0,3-0,5 \cdot 10^6$ ккал/м³час, но может быть доведено и до $3 \cdot 10^6$ ккал/м³час при атмосферном давлении в топке.

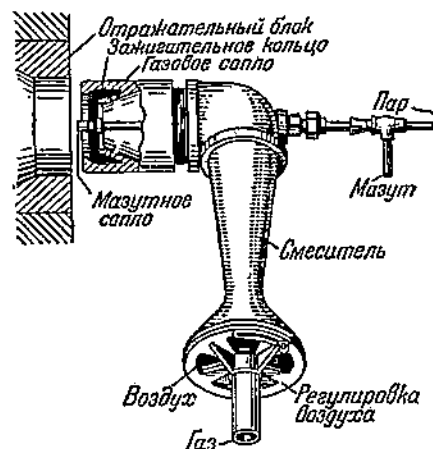
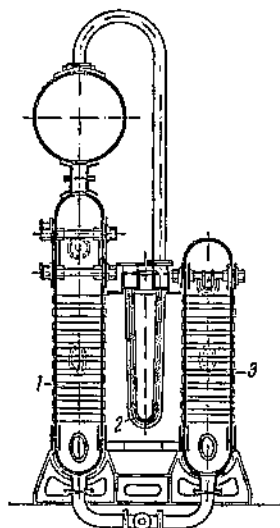
Скорость распространения воспламенения для газовых топлив невелика. Чтобы пламя не проникло в горелку, необходимо при проектирова-

нии предусмотреть скорость газовой смеси большую, чем скорость воспламенения. Это не представляет затруднений, так как легко получить на выходе горючей смеси из горелки скорости, в несколько раз превышающие скорость распространения воспламенения. Весьма важно, чтобы было обеспечено зажигание горючей смеси тем или иным способом, независимо от скорости газовой смеси в горелке. Большая скорость на выходе из горелки может вызывать затухание,



Фиг. 306. Котел системы Боне-Шнабель.

1—котел; 2—пароперегреватель; 3—водоподогреватель.



Фиг. 307. Смешанная газонефтяная горелка для естественной тяги.

так как воспламенение не зависит от скорости в самой горелке. Нормально скорость газа и воздуха по выходе из горелки колеблется в пределах 10—25 и до 30 м/сек. Для газа она несколько выше, чем для воздуха.

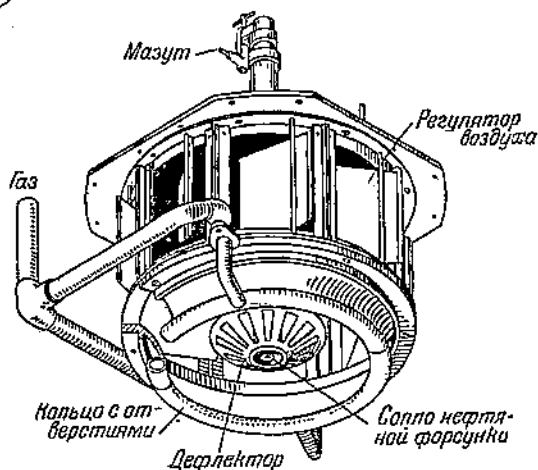
При неправильно построенной горелке или неправильном уходе за ней может возникнуть ряд затруднений. Так, неравномерное распределение смеси, вызванное неправильной конструкцией горелки или воздухопровода, приводит нередко к повреждению огнеупорных стен.

Недостаточное смешение воздуха и топлива вызывает очень длинный пламя, задержку горения, местные повышения температуры и снижение экономичности. Бедная горючая смесь вызывает пульсации в топочной камере; это приводит к повреждению стен, затрудняет работу дутьевых вентиляторов и дымососов, вызывает неравномерность работы котла.

Газовыми горелками был снабжен также котел беспламенного горения системы Боне-Шнабель. Подобный котел (по типу дымогарных) был построен впервые между 1911—1914 гг. Перед каждой дымогарной трубкой была помещена газовая горелка. Горелки устанавливались так, чтобы горение происходило внутри пористой шамотной массы, которая находилась в трубках (фиг. 306). Эти трубки отмечены на фиг. 306 кружками; трубки без горелок отмечены крестиками.

Иногда применяют комбинированные горелки для сжигания пыли, жидкого топлива и газа попарно. Они устроены так, чтобы эти топлива могли сжигаться в них как в отдельности, так и вместе.

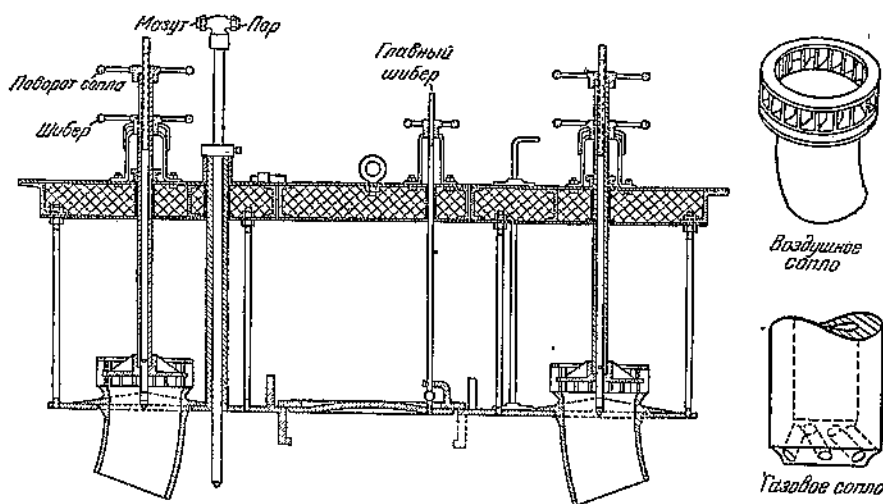
На фиг. 307 показана смешанная газо-нефтяная горелка для естественной тяги. Смеситель представляет собой насадку Вентури; он требует обычно давление газа от 350 мм вод. ст. до 2 атм. Газовое сопло снабжено зажигающим кольцом, обеспечивающим воспла-



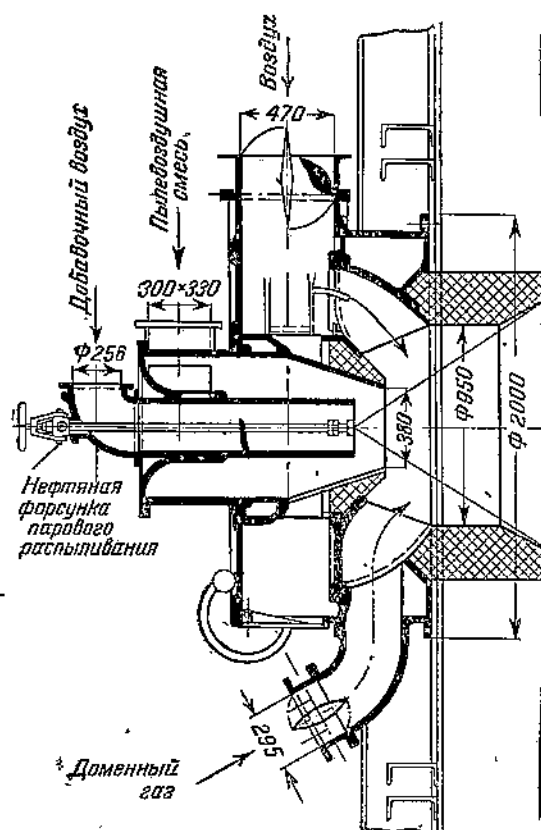
Фиг. 308. Комбинированная горелка для газа и нефти, работающая со вдуванием холодного или нагретого воздуха.

менение. Газ и воздух смешиваются благодаря эжектирующему действию газа. Если сжигают один лишь газ при наличии небольшого давления в топке, то производительность горелки падает до $\frac{2}{3}$ от полной величины. Нефтяные форсунки применяются здесь круглые и плоские с паровым распыливанием. Горелка эта годится также и для работы со вдуванием подогретого воздуха. Максимальная производительность ее примерно равна $3,5 \cdot 10^6$ ккал/час, но видимо возможны подобные горелки и большего размера. Преимуществами этого типа являются гибкость, хорошее смешение газа и воздуха без применения дутья, надежность воспламенения, пригодность для сжигания высокоокисленного газа и высокие напряжения топочной камеры.

На фиг. 308 показана комбинированная горелка для газа и нефти со вдуванием холодного или нагретого воздуха. Основной частью горелки является кольцо с дырками для подачи газа, состоящее из двух половинок; это кольцо изготавливается из легированной стали или чугуна; смесителей нет. Применяется также футеровка кольца. Нефтяная форсунка механическая. Воздух подается через регулирующий шибер, создающий турбулентное движение. Этот тип горелки может применяться и с паровой форсункой. Достоинством этой горелки является применение дутья, связанная с этим высокая производительность, возможность регулирования.



Фиг. 309. Смешанная газонефтяная горелка, работающая на нагретом до 600°С воздухе.



Фиг. 310. Комбинированная пыленефтегазовая горелка ЦКТИ.

возможность воздействовать на распределение тепла по топке. В центре горелки помещается главный шибер. Через него подается дополнительное количество воздуха и производится регулирование распределения тепла в камере.

В горелке помещаются три паровые нефтяные форсунки. Основное преимущество этой горелки состоит в высокой регулируемости распределения тепла в камере. Она может работать при низкой производительности с малым избытком воздуха.

Главным недостатком горелки является то, что концы газоподводящих труб в случае неочищенного газа загрязняются. Кроме того, для нее требуется газо- и воздухопровод высокого давления.

На фиг. 310 дана комбинированная пыленефтегазовая горелка ЦКТИ.

На фиг. 311 показана газовая топка для малого водотрубного котла. Топка снабжена выносным предтопком с дополнительной колосниковой решеткой для сжигания угля.

На фиг. 312 показана неэкранированная газовая топка к котлу большей производительности. Для защиты горелки от действия лучистой теплоты топка снабжена предтопком. На фиг. 313 показана экранированная топка для сжигания доменного газа. Иногда при газе, как и при сжигании пыли, применяют угловое расположение горелок.

Для воспламенения вытекающей из газовой горелки смеси газа и воздуха необходим подвод тепла. Требуемое количество тепла может быть уменьшено подогревом воздуха и газа.

В топках паровых котлов часто возможно ограничиться подогревом воздуха, но все же при малопечном доменном газе подогрев одного воздуха недостаточен из-за сравнительно большого отношения веса газа к весу участвующего в горении воздуха.

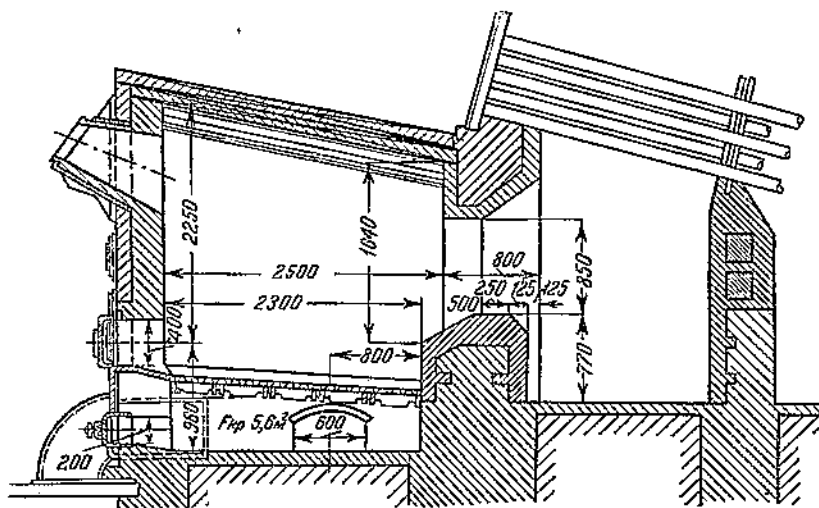
Подвод тепла для воспламенения осуществляется, главным образом, за счет теплопроводности газа и воздуха в струе. Смесь газа и воздуха, подаваемая через горелку, обладает ничтожной способностью поглощать лучистое тепло. Так, например, H_2 , O_2 и N_2 практически вовсе лишены способности к поглощению тепла, CO_2 и CO , хотя и поглощают лучистую энергию, но лишь в пределах узких полос, охватывающих малый интервал длин волн. Для обеспечения процесса воспламенения перед горелкой устанавливается зажигательная огнеупорная стенка, действие которой здесь слабее, чем в случае сжигания жидкого топлива.

Топлива, сжигаемые в газовых топках, как правило, состоят из смеси CO , CO_2 , H_2 , CH_4 , C_nH_n и N_2 . Уже подготовленными к горению составляющими являются CO и H_2 , в то время как CH_4 и особенно прочие углеводороды должны пройти некоторую предварительную стадию превращений.

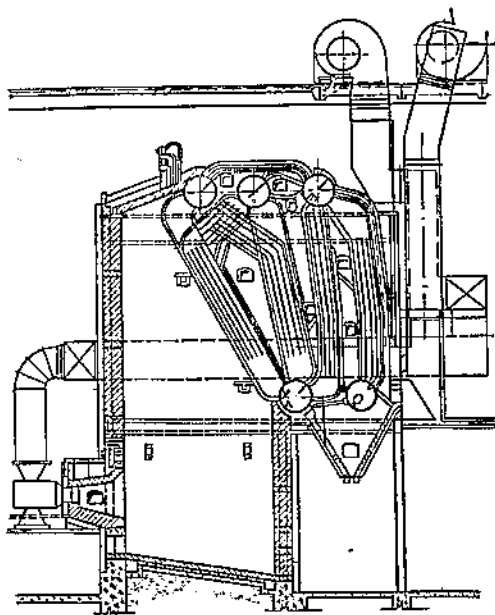
Когда через горелку проходят газы и первичный воздух, являющийся лишь частью всего необходимого для горения воздуха, горение в газовой топке происходит без светящегося пламени. Ауфгейзер объясняет это тем, что во внутренней зоне при участии кислорода первичного воздуха образуется водяной газ, причем температура поднимается до 1500°С; затем составные части водяного газа CO и H_2 сгорают во внешней зоне $DACB$ (фиг. 314) благодаря притягивающему из окружающей среды воздуху. При этом тем-

Производительность ее может достигать $12,5 \times 10^6$ ккал/час и даже больше.

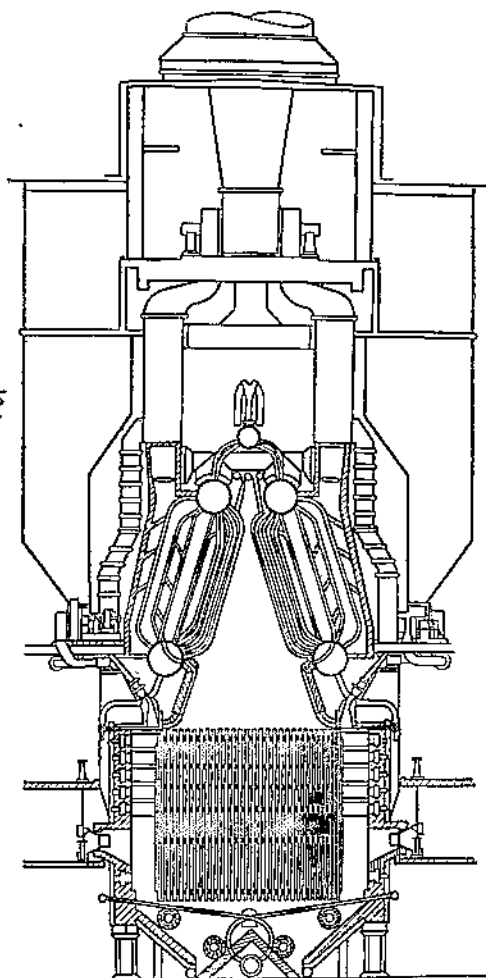
На фиг. 309 показана горелка для работы на воздухе, нагретом до 600°С, при производительности до $25 \cdot 10^6$ ккал/час при U-образном факеле. Для подачи газа служат цилиндрические насадки в виде согнутых коротких труб из легированной стали. Каждое воздушное сопло снабжено своим воздушным шибером. Газ поступает в середину каждого сопла. Сопла для воздуха могут поворачиваться на угол в 360°, что дает



Фиг. 311. Газовая топка для малого водотрубного котла.



Фиг. 312. Неэкранированная газовая топка к котлу большой производительности.



Фиг. 313. Полностью экранированная пылегазовая топка к котлу большой производительности.

пература достигает 1800°C . В топках паровых котлов, как правило, уже в горелке примешивают к газу весь воздух, потребный для его горения.

Так как в большинстве случаев скорость выхода из горелки w_2 бывает больше скорости распространения воспламенения $w_{\text{вс}}$, то воспламенение способной гореть газовой смеси начинается только на поверхности конуса АСВ (фиг. 314). Воспламенение и горение в потоке могут иметь место лишь после прохождения поверхности этого конуса. Подогревание газозвушной смеси до температуры воспламенения должно закончиться на пути до поверхности конуса. Изменение температуры внутри струи представлено на фиг. 315.

Таким образом превращения, которые претерпевают газообразные топлива, прежде чем они будут готовы к горению, начинаются перед поверхностью конуса, но продолжают и за поверхностью воспламенения.

Нуссельт показал, что скорость воспламенения зависит не только от концентрации горючих компонентов и содержания кислорода, но также в значительной мере от подогрева газовой смеси при выходе из горелки и от давления, при котором происходит горение. На фиг. 316 представлено по Нуссельту изменение скорости воспламенения для смеси водорода с воздухом в зависимости от содержания H_2 в смеси. Из кривой видно, что скорость воспламенения $w_{\text{вс}}$ принимает нулевые значения при концентрации H_2 , равной 0,1 и 0,8.

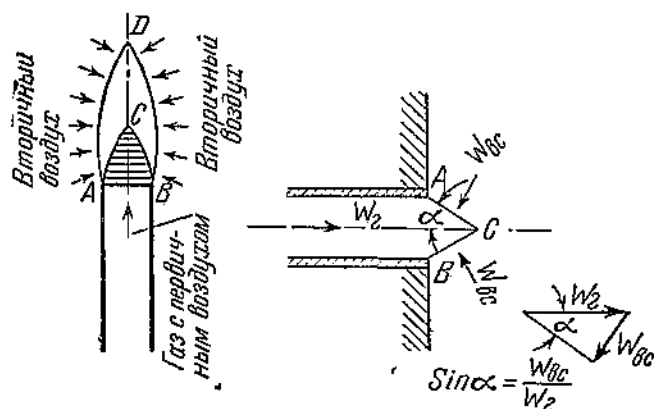
Таким образом ни смеси очень бедные горючими газами, ни очень богатые не могут быть доведены до воспламенения.

Подобное явление, при котором между двумя пределами воспламенения заключена лишь часть концентраций смеси, наблюдается и в случае смеси жидких топлив с воздухом.

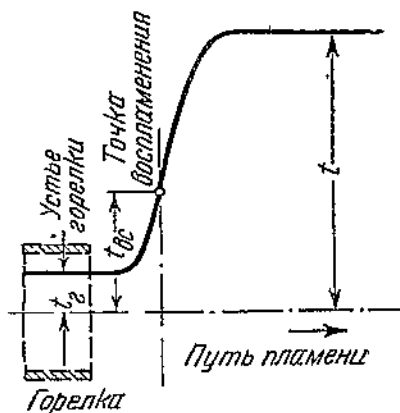
Насколько сильно влияет подогрев газозвушной смеси на скорость воспламенения, можно видеть на фиг. 317.

Скорости воспламенения газовых смесей, как правило, лежат выше, чем пылевоздушных смесей.

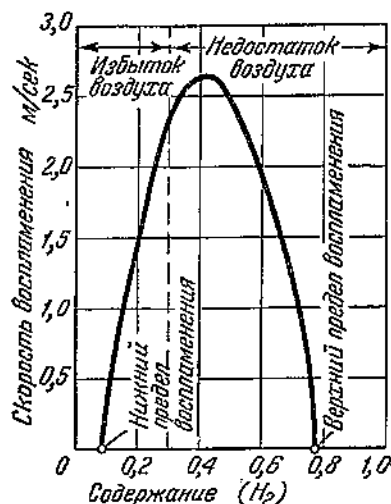
На большинстве установок СССР доменный газ сжигается в смеси с угольной пылью без



Фиг. 314. Воспламенение горючей газовой смеси.



Фиг. 315. Изменение температуры внутри струи газа по Нуссельту.



Фиг. 316. Зависимость скорости воспламенения горючей газовой смеси от ее состава.

стигает 450° С. Небольшая добавка угольной пыли дает возможность снизить температуру перегрева. При полном переключении котла на пыль температура снижается до 370—380° С.

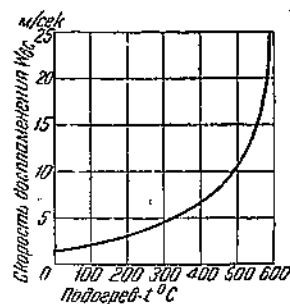
Доменный газ содержит большое количество балластных газов — CO_2 и N_2 , вследствие чего при работе котельного агрегата на доменном газе максимум теплоотдачи падает на конвективную часть котла. Поэтому расчет котельного агрегата на одинаковые условия работы на пыли и на доменном газе чрезвычайно затруднителен вследствие существенного различия физических свойств этих топлив.

При недостаточном размере топочной камеры и плохой работе горелок горение газа происходит в области пароперегревателя.

Многие из наших установок принуждены были в процессе эксплуатации исправлять ошибки фирм, поставивших оборудование. Основная ошибка в проектах топок с использованием доменного газа заключалась в неправильном расположении горелок для газа. Обычно первоначально намечалась установка газовых горелок над пылевыми (Липецкая ТЭЦ и др.) Длина факела для газа получалась в таком случае незначительной, что приводило к неполному использованию объема топочной камеры и к тяжелым температурным условиям работы самого котельного агрегата.

На фиг. 318 показано расположение угловых горелок доменного газа и пыли для ТЭЦ Кузнецкого завода. Горелки доменного газа поставлены над горелками пыли, что, как было указано, неправильно. Котел не мог работать с нагрузкой свыше 50—60 т/час (вместо 90—110 т/час) из-за повышенных температур в пароперегревателе и у дымооса.

На фиг. 319 показано видоизмененное положение газовых горелок (на Липецкой ТЭЦ). Часть газовых горелок поставлена снизу, другая часть над пылевыми горелками, но с направлением факела под углом 18° вниз для повышения длины газового факела.



Фиг. 317. Зависимость скорости воспламенения горючей смеси от температуры.

предварительного подогрева. Практика работы наших установок на доменном газе показывает на следующие особенности совместного сжигания доменного газа с пылью:

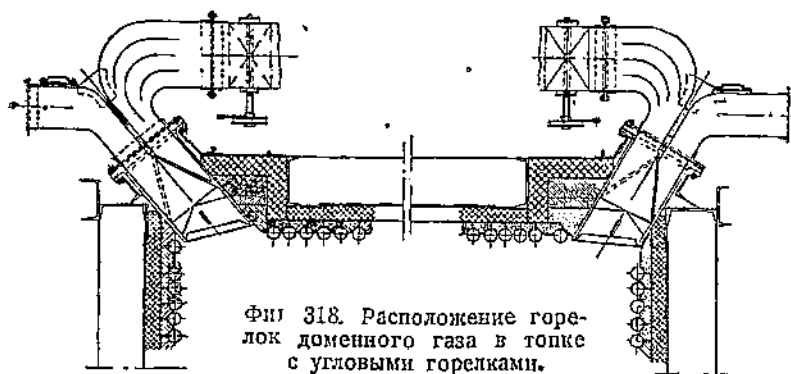
а) сжигание доменного газа может успешно проводиться как в сильно экранированных, так и в мало экранированных топках;

б) сжигание доменного газа возможно как при фронтных (Липецкая ТЭЦ, Запорожсталь, Макеевка и др.), так и при угловых тангенциальных горелках (ТЭЦ Тульская, Кузнецкая и др.);

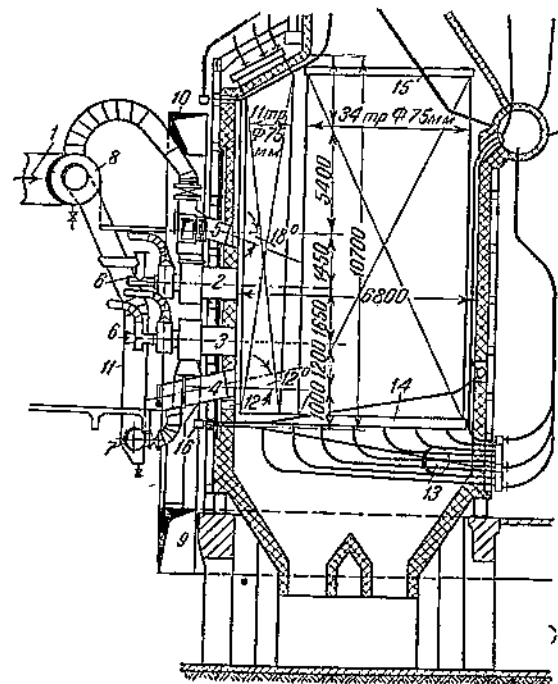
в) при сжигании доменного газа теплоотдача топки получается очень малой; температура перед первым пучком котла повышается, что влечет за собой увеличение перегрева пара.

Для увеличения теплоотдачи газового пламени рекомендуется его подсвечивание с помощью мазута или угольной пыли. Подсвечивание даже небольшим количеством дополнительного топлива резко повышает излучающую способность пламени и, следовательно, увеличивает количество тепла, отдаваемого непосредственно в топку.

По данным Липецкой ТЭЦ при нагрузке котла 60—67 т/час на газе перегрев пара до-

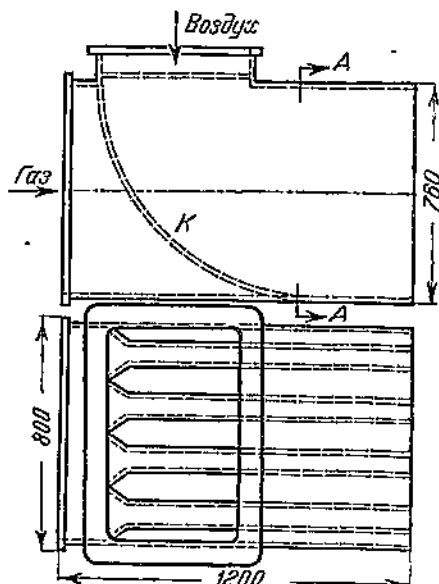


Фиг. 318. Расположение горелок доменного газа в топке с угловыми горелками.



Фиг. 319. Топочная камера после переделки подвода доменного газа.

1—вход газа; 2, 3—пылеугольные горелки; 4—газовые щелевые горелки нижнего ряда; 5—то же, верхнего ряда; 6—мазутные форсунки; 7—нижний и 8—верхний коллекторы доменного газа; 9—нижний и 10—верхний короба горячего воздуха; 11—подвод доменного газа к нижнему коллектору; 12—выход нагретого воздуха после охлаждения обмуровки топки; 13—место отбора топочных газов для подсушки угля; 14—нижний и 15—верхний коллекторы бокового экрана; 16—передний коллектор гранулятора.



Фиг. 321. Щелевая горелка для доменного газа.

Недостатком горелки Гако является затруднительность чистки. Загрязненность доменного газа часто доходит до 25 г/м^3 , что может отражаться на эксплуатации.

Горелка тяжела и дорога. Горелка такого типа имеет длинный факел и поэтому может быть установлена только в нижней части топки так, чтобы был обеспечен путь для факела в 7—8 м.

Хорошие результаты были получены с горелками щелевого типа (фиг. 321), представляющими ряд чередующихся щелей для газа и воздуха. Щели могут располагаться как вертикально, так и горизонтально. Перемешивание газа и воздуха обеспечивается разными скоростями выхода (на Липецкой ТЭЦ $w_g = 26 \text{ м/сек}$, $w_d = 20 \text{ м/сек}$), или специально установленными рассекателями. Установка рассекателей обеспечивает перемешивание, укорачивает факел и улучшает работу топочной камеры.

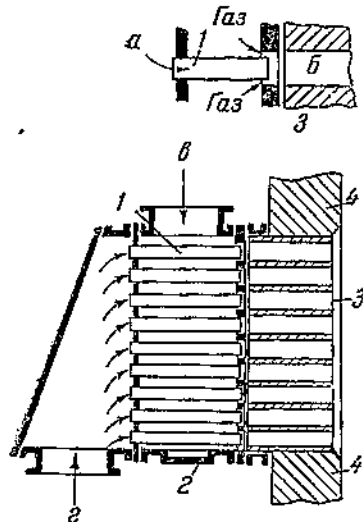
Подогрев доменного газа увеличивает прямую отдачу топки, главным образом, за счет увеличения температуры топки.

Таким образом:

а) горелки доменного газа необходимо устанавливать в топке возможно ниже под пылеугольными или поочередно с ними;

б) в горелках должно быть обеспечено наилучшее перемешивание воздуха и доменного газа—более совершенными конструкциями с этой точки зрения являются щелевые горелки;

в) для повышения к. п. д. установки целесообразно подогрев доменного газа.



Фиг. 320. Газовая горелка Гако.

1—трубы для воздуха; 2—люк для чистки; 3—огнеупорная решетка; 4—обмуровка топки; а—воздух; б—смесь газа и воздуха; в—вход газа; г—вход воздуха.

Большое значение имеет сама конструкция горелки. Для сжигания доменного газа обычно весь воздух подводится непосредственно в корень факела. Горелка должна обеспечивать наилучшее перемешивание газа и воздуха. Поэтому горелки обычно разбиваются на ряд мелких единиц. Полное перемешивание воздуха и газа обычно происходит в области топочной камеры или в дополнительных шамотных насадках при вводе газозвоздушной смеси в топку.

На фиг. 320 показана конструкция горелки Гако, в которую воздух вводится через ряд трубок. Газ же подается в межтрубные пространства и кольцом охватывает первичный воздух.

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Абсолютная температура 18
 Абсолютно белое тело 117
 — прозрачное — 117
 — серое — 117
 — черное — 117
 Азот топлива 36
 Активная часть колосниковой решетки 143
 Анализ газов 65
 Анионы — накипеобразователи 75
 Антрацитная ручная топка 156
 Арматура котла 15
 Атмосфера техническая 18
 — физическая 18
 Атомный вес ионов 74
 Аэробильные мельницы 203
- Балласт топлива 36
 Беспровальное полотно 177
 Бикарбонатная щелочность 74
 Била шахтно-мельничной установки 257
 Биты 166
 Битмовый шлаковый подпор 174
 Бурые угли 31
- Валентность ионов 74
 Валковая дробилка 193, 194
 Весовая теплоемкость 25
 Взаимный коэффициент излучения 136
 Взвешенные вещества (в воде) 73
 Взвешенное сжигание 262
 Взрывоопасность системы пылеприготовления 213
 Видимая испарительность топлива 93
 Видимое тепловое напряжение колосниковой решетки 143
 — — — объема топочной камеры 143
 — — — слоя топлива 147
 Влажный пар 17
 Водный режим паровых котлов 80
 Водоподготовка 17, 84, 85
 Водород топлива 36
 Водяное пространство 13
 Водяной газ 82
 — экономайзер 14
 Воздухоподогреватель 17, 107
 Воздух вторичный 141
 — первичный 141
 Воздушное дутье в антрацитовых топках 157
 Воспламенение газовой смеси 276
 — угольной пыли 222
 Восстановительная зона 148
 Восстановительный процесс в слое топлива 146
 Время сгорания частиц пыли 223
 Вспенивание воды в котле 81
- Выгорание пыли 224
 — топлива на цепной решетке 167
 Вязкость 27
 — водяного пара 28
 — газов 28
- Газовая постоянная 24
 Газовое окно 153
 Газовые топки 271
 Газообразное топливо 32
 Газоходы котла 15
 Гарнитура котла 15
 Генераторный газ 32
 Геологические запасы ископаемых углей 34
 Горелка газовая Гако 277
 — — Моля 271
 — — плоская 272
 — — Капомет 236
 — комбинированная 273
 — нефтяная 273
 — Фостера 236
 — Фостер-Уилер 246
 — ЦКТИ 274
 Горелки Бабкок 238
 — БПК 237
 — круглые 232, 238
 — многощелевые 235
 — Оргрэс 240
 — турбулентные ЦККБ 238, 239
 — щелевые 232, 233
 Горение водорода 60
 — в пылеугольной топке 220
 — газового топлива 69
 — кокса 145
 Горение смесей твердых и жидких топлив 69
 — топлива в топке 144
 — углерода 145
 — частицы пыли 223
 Гранулятор 244
- Давление смеси 26
 Движение газов в топочной камере 171
 Двухкамерная топка 252
 Двухцветный экран 246
 Действительное тепловое напряжение 143
 Динамическая вязкость 104
 Динамическое равновесие 73
 Дисковый питатель 208
 Дожигательная колосниковая решетка 146
 — решетка фирмы Борзинг 258
 Дробилка валковая 195
 — для фрезторфа 261
 — молотковая 195
- Дробильное устройство для подмо-
 сковного угля 196
 Дробление двухступенчатое 193
 — одноступенчатое 195
 Дрова 53
 Деаэрация воды 84
- Естественная влажность топлива 77
 — вода 72
 — циркуляция 14
- Жесткость воды 74
 Жидкий шлак 256
 Жидкое топливо 32, 54
- Загрузочное отверстие 153
 Зажигание пылеугольного факела 227
 Зажигательный пояс 241
 Закон Кирхгофа 119
 — Ламберта 118
 — Стефана-Больцмана 118, 136
 Запасы топлив СССР 33
 Зеркало испарения 13
 Зола 37, 69
 Зольность 37
 Зона восстановительная 148
 — горения кокса 148, 153
 — образования шлаков 148
 — подогрева топлива 148
 — разложения топлива 148
 — свежезаброшенного топлива 153
 Зонное дутье 151, 167
- Известкование 84
 Излучение газов 130
 — косвенное 117
 — нагретых тел 94
 — паров 130
 — пламени 136
 — селекционное 117
 — твердых тел 117
 Интенсивность горения топлива 146
 — излучения пламени 136
 Испарение влаги топлива 144
 Истинная зольность 69
- Калориметрическая бомба 39
 Каменные угли 31
 Камерно-слоевые топки 142
 Камерные топки 141
 Каркас котлоагрегата 15
 Каскадная топка 148, 187, 188
 Катнонирование 83, 84
 Кинематическая вязкость 28
 Кислород топлива 36
 Клапан-мигалка 211
 Классификация допечных антрацитов 43

- Классификация донецких каменных углей 50
 — кузнецких каменных углей 45
 — углей по Грюнеру 40, 41
 — — разных месторождений 47, 49
 — энергетических топлив СССР 40, 30
 Кокс 30
 Коллектор экрана 245
 Коллоидальное топливо 32, 268
 Колосники 146
 — Бессерта 166
 — наклонно-переталкивающей топки 183
 — ретортные 185
 Колосниковая решетка 146
 — — неподвижная 152
 Конвективный пароперегреватель 14
 Конус факела 232
 Концентрация солей в паре 77
 Коагуляция 39
 Королек сплывшийся 39
 Коррозия 78
 Котел отопительный 12
 Котельная установка 11, 13
 Котельный агрегат 13
 Коэффициент абсолютной вязкости 28
 — диффузии 223
 — загрязнения 140
 — избытка воздуха 61
 — излучения 119
 — — взаимный 95
 — лобового сопротивления 218
 — облученности 95, 122
 — — для лучков 137
 — омывания 185
 — охлаждения 140
 — полезного действия котла 87, 93
 — теплопередачи 97, 98
 — — от газов к стенке 101
 — теплоотдачи 98, 113, 114
 — эффективности топки 138
 Крепление колосников решетки 177
 Критерии подобия 100, 101
 Критическая скорость 205
 — точка 24
 Критические обороты мельницы 205
 Критическое давление 24
 Ламинарное движение 103
 Летучие 30, 38
 Лотковая решетка 185
 Лучевоспринимающая поверхность 95
 Лучистый поток 120, 124
 — теплообмен 120
 Мазут 32
 Мельница для размола топлива 200
 — Кеннеди 201
 — шахтно-мельничной установки 257
 Мельницы аэробильные ЦККБ 203, 204
 — быстроходные 203
 — среднеходные 204
 — тихоходные 203
 Мельничный сепаратор 202
 Механическая неполнота сгорания 90
 Мингалки 211
 Микрофотография угольной пыли 196
 Молотковая дробилка 195
 Мощность топочного устройства 143
 Накиль 75
 Насыщенный водяной пар 16, 17
 Насыщенный пар ртути 16
 Нейтрализация воды 84
 Немецкий градус 74
 Непрерывная продувка 81
 Нормы котловой воды 81, 82
 Нормальный водяной пар 24
 Обезмасливание воды 84
 Обессоливание 84, 85
 Обмуровка котла 15, 245
 Объемная теплоемкость 25
 Однороторная молотковая дробилка 195
 Одноступенчатая дробильная установка 195
 Окисление топлива 144
 Окисляемость воды 74
 Омывание плоской стенки 109
 — поперечное 103
 — продольное 101
 — труб под углом 109
 Определение избытка воздуха 67
 Острое дутье 170
 Откидные колосники 178
 Очаговые остатки 186
 Паровой котел 13
 Паровое дутье 157
 — пространство 13
 Паровозный стокер 158
 Пароперегреватель 14
 Паропроницаемость 24
 Парциальное давление 26
 Пассивная часть решетки 168
 Первичный воздух 141
 Питатель примоточного котла 216
 — пыли 215
 — сырого угля 208
 — шнековый 216
 Питательная вода 71
 Питательные приспособления 17
 Плавниковый экран Мурреля 247
 Плитки Бейля 248
 Плиточные колосники 183
 Плоская поверхность нагрева 99
 Плотность газа 28
 Поверхность зеркальная 117
 — конвективная 14
 — матовая 117
 — нагрева радиационная 13
 Поглощательная способность 119
 Пограничный слой 103
 Под топки с жидким шлакоудалением 253
 Позонное воздушное дутье 173
 Полезно использованное тепло 87
 Подумеханические топки 161
 Полусферическая радиация 118
 Помол угля 199
 Помольные характеристики 198
 Поперечное омывание 103
 Поперечный ток 96
 Порог колосниковой решетки 153
 Потеря в окружающую среду 87
 — от механической неполноты сгорания 87
 Потеря на неустановившийся режим 87, 92
 — тепла от химической неполноты сгорания 87, 91
 — физического тепла 87, 91
 Предварительное дробление топлива 192
 Принудительная циркуляция 14
 Присосы в различных элементах котельной установки 92
 Прогревание свежего топлива 145
 Продольное омывание 101
 Продувка 81, 83
 Продукты горения 59
 Промежуточный бункер 209, 210
 Просев пыли 197
 Противоток 96
 Процесс накинеобразования 75
 Прямоток 96
 Пылевой циклон 210
 Пылевоздушная смесь 198
 Пылеприготовительная схема с промежуточным бункером 209
 Пылеприготовление при влажных топливах 213
 Пылеугольные горелки 232
 — топки 225
 Работа слоя топлива на колосниковой решетке 146
 Рабочая влажность топлива 37
 Рабочее тело 17
 Радиация 94
 — полусферическая 118
 Радиационная поверхность 95
 Радиационный пароперегреватель 14
 Разбивка поверхностей нагрева при продольном и поперечном омывании 114
 Разложение топлива 145
 Размягчение золы 38
 Разогрев угольной пыли в топочной камере 221
 Расчет барабанных мельниц 205
 Реакции горения 59
 Регенеративный способ теплопередачи 95
 Регулирование пресса горения на колосниковой решетке 155
 Рекуперативный способ теплопередачи 94
 Рециркуляция топочных газов 168
 Решетка Борзига 182
 — Ганомана 177
 — Тейлора 185, 186
 Решетки переталкивающие 182
 Ротор аэробильной мельницы 203
 Ручная топка 156
 — — для подмосковного угля 138
 Свободная конвекция 115
 Сгорание неполное 63
 — полное 63
 Селекционное излучение 117
 Сепаратор магнитный 204
 Сепарирующие устройства 13, 203
 Сера топлива 36, 57
 Сжигание взвешенное 261
 — газов 211
 — жидких топлив 264
 — сланцев 261
 — фрезерного торфа 256, 260
 Системы пылеприготовления 207
 Сита Американского бюро 198
 — германские 198
 — Тейлора 193
 Склад топлива 15
 Скорость воспламенения газовой смеси 276
 Сланцы 53, 261
 Слоевое сжигание 141
 Слонный делитель 215, 216
 Слой топлива 149

- Содержание горючих в очаговых остатках 186
 Содо-известковое умягчение 84
 Сопротивление слоя топлива 149
 Состав газов над слоем топлива 169
 Состав дымовых газов 62, 68
 — топлива 35
 Спуск жидкого шлака 256
 Средний по поверхности коэффициент облученности 119
 Средняя длина луча 130, 131
 — условная температура факела 136
 Станционная котельная установка 13
 Степень охлаждения стен топочной камеры 152
 — черноты 119
 Степень экранирования топочной камеры 136, 139
 Стокер паровозный 158
 Ступенчатые колосники 161
 Сухой остаток воды 73
 Сухопарник 13
 Сушильная труба 215
 Сушка топлива во взвешенном состоянии 213
- Тарельчатый питатель ЦККБ 217
 Твердое топливо 31
 Температура воспламенения горючего вещества 144
 — воспламенения факела 221
 — жидкоплавкого состояния 38
 — начала деформации 38
 — размягчения 38
 — уходящих газов 92
 Температуропроводность 101
 Теоретически необходимое количество топлива 61
 Теория подобия 100
 Тепловая изоляция мельницы 201
 Тепловая работа камерных топок 228
 — — механических топок 190
 — — топки 226
 — — ручных и полумеханических топок 172
 Тепло для нагрева аэросмеси 221
 Тепловое напряжение колосниковой решетки 143, 149
 — — объема топочной камеры 143
 Тепловое подобие 101
 Тепловой баланс котельной 87
 — — трубы и мельницы 218
 — — расчет пылеприготовления 218
 Тепловосприятие футерованных плит 138
 Теплоемкость весовая 25
 — газа объемная 25
 — жидкости и пара 18
 — перегретого пара 23
 Теплонапряжение слоя 141
 — факела 226, 147
 Теплопередача регенеративная 94
 — рекуперативная 94
 — соприкосновением 94
 — через стенку 98
- Теплопроводность 27, 104
 Теплоплотность 58
 Теплосодержание 27
 — жидкости и пара 18
 Теплота излучения водяных паров 132
 — — углекислоты 132
 Теплотворная способность горючих газов 40
 — — топлива 30, 39
 Термическое разложение ионов 76
 Технический анализ топлива 35
 Толщина слоя топлива 148
 Тонкость помола 199, 200
 Топка двухкамерная 252
 — для сжигания дров 160
 — Кремера 258
 — Макарьева 262
 — системы Мартина 187
 — с жидким шлакоудалением 250, 251, 252
 — с наклонными неподвижными решетками 161, 162
 — с нижней подачей топлива 148
 — Стратона 264
 — с угловыми горелками 235, 243
 — шахтно-мельничная 256
 — Шершнева 261, 262
 — Штуфа 263
 Топки внутренние 142
 — газовые 271
 — для слоевого сжигания 141
 — камерные 142
 — мазутные 270
 — наклонно-переталкивающие 182
 — нижние 142
 — переталкивающие 182
 — с нижней подачей Доби 186
 Топливо 30
 Топочное отверстие 143
 Топочные устройства 14
 — экраны 241, 242
 Торф 31, 53
 Тройной газ 32
 Труба-сушилка 215
- Углерод топлива 36
 Угловая плотность 118
 Угольная пыль 30
 Удельная интенсивность излучения 118
 — — теплота воспламенения 145
 Удельный объем воды и перегретого пара 19
 Универсальная газовая постоянная 24
 Условное топливо 30
- Факельное сжигание 141
 Фестонированный экран 251
 Фильтр для мазута 266
 Финская топка 165
 Форсунка Виндхем для коллоидального топлива 269
 — высокого давления 265
- Форсунка низкого давления 265
 — паровая Бест 265
 — — Генике 265
 — — Главэнергопрома 265
 — — Пибоди 265
 — — ЦККБ 268
 — — Шухова 265
 — роторного типа 268
 Форсунки механические 264
 Фосфатирование 16, 83
 Фрезерный торф 259, 260
 Фрикционная мельница ЦКТИ 205
- Характеристика процесса горения в котельных топках 144
 Характеристическое уравнение 24
 Химическая коррозия 78
 Холодная воронка 244
- Центральная система пылеприготовления 215
 Цепная беспровальная решетка 180
 — колосниковая — 166
 — решетка Дюрра 181
 — решетка с зонным дутьем для сжигания угля 179
 — топка для сжигания антрацита 177
 Циклон пылевой 210
 Циркуляция 14
- Черное тело 117
 Чешуйчатая решетка 177
- Шамотный пояс 221
 Шаровая барабанная мельница 207
 — мельница ЦККБ 202
 Шахтная топка для дров 164
 — — — торфа 165
 Шахтно-мельничная топка 256
 Шахтно-цепная топка системы Макарьева 176
 Шпильная валковая дробилка 193
 Шлаковая летка 254
 — подушка 146, 163
 — решетка 163
 Шлакование 229, 230
 Шлаковый подпор 170
 Шлаковый экран 244
 Шнековый питатель 216
 Шуровочное отверстие 153
- Щелевые горелки 233
 Щелочение воды 84
- Эквивалентный диаметр 103
 Экономайзеры 107
 Экраны водяные 248
 — типа Бейли 248
 — топочные 241
 Экстаузер 204
 Элементарный лучистый поток 118
 Эффективная поверхность 120, 124
 — степень охлаждения топки 140
 — толщина газового слоя 130, 131
- Яркость 118

ЭТ-25-5-2.

Пр. ТКК № 30 от 25/XII 1940 г.

Цена 15 р. 75 к.

Редакторы: В. А. Рубец и Т. Т. Усенко.

Техредактор А. Д. Чаров.

Сдано в производство 6/VIII 1940 г.

Тираж 10000.

Изд. № 76. Учетный № 7576.

Подписано к печати 21/XII 1940 г.

Печ. лист. 35 + 2 вкл.

Кол. знаков в 1 п. л. 99560.

Формат бумаги 84 × 108 1/16.

Уч.-авт. лист. 43,56.

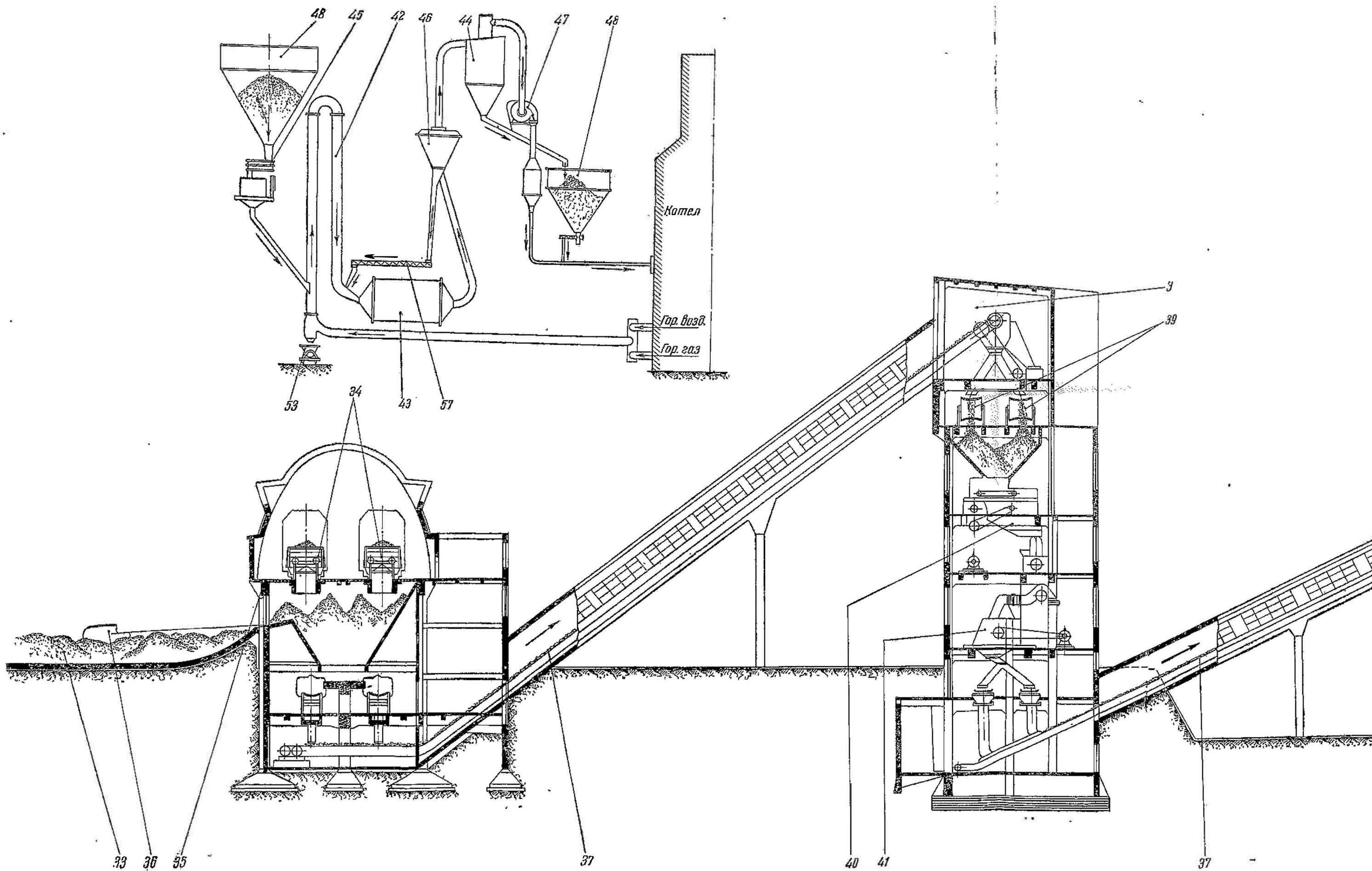
Заказ. № 4472. Л 69882.

4-я типография ОГИЗа РСФСР треста "Полиграфкнига" имени Евг. Соколовой.
 Ленинград, проспект Красных Командиров, 29.



Опечатки и исправления

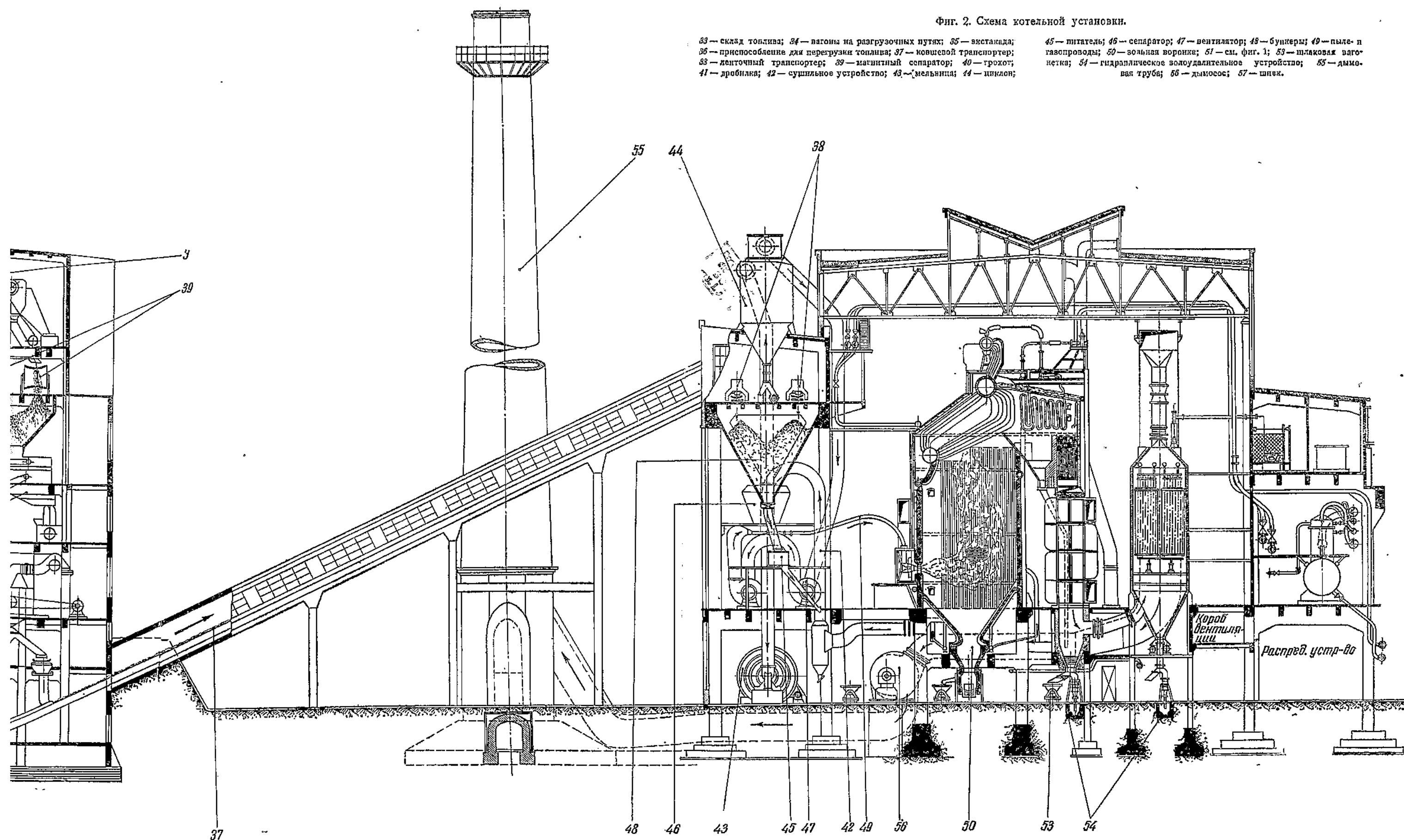
Стр.	Столбец	Строка	Напечатано	Должно быть	По чьей вине
49	4 слева	3 сл.	6 300—6 740	6 300—7 400	изд.
65		ф-ла (114)	$K_p (0,09H_p +$	$K_p (0,09H_2 +$	корр.
73	левый	30 сл.	(увеличении [AK])	(уменьшении [AK])	изд.
76	правый	8 сл.	0,5°	0,3°	авт.
91	"		После формулы (246) про- пущено:	$V_a = \alpha_y \cdot V_0$, где V_0' — теоретический объем воздуха с учетом влияния механиче- ского недожога в $нм^3/кг$ топлива	"
138	"	ф-ла (405)	$Q_W = Q_\phi^W (r - t_W)$	$Q_W = W_\phi^W (r - t_W)$	ред.
139		ф-ла (408, а, б)	$V_g c_g \left(1 - \frac{q_4}{100}\right)$	$V_g c_g$	"
140	"	ф-ла (416)	$H^p = V_m \cdot \gamma_p$	$H^p = V_m \cdot \gamma$	авт.
163	"	5 сл.	данных, и находятся	данных при величине A_c	"
172	табл. 46	7 и 8 графы снизу	2 + 3,5	2 ÷ 3,5	"
199	левый	ф-ла (428)	$n = n_0 \approx a R_{70}$	$n = n_0 - a R_{70}$	"
223	правый	23 сл.	$\tau = \frac{\tau \cdot 100}{100 - M_2}$	$\tau = \frac{\tau (100 - M_2)}{100}$	"
228	табл. 60	1—5 сл.	175, 200, 225	175 000, 200 000, 225 000	ред.



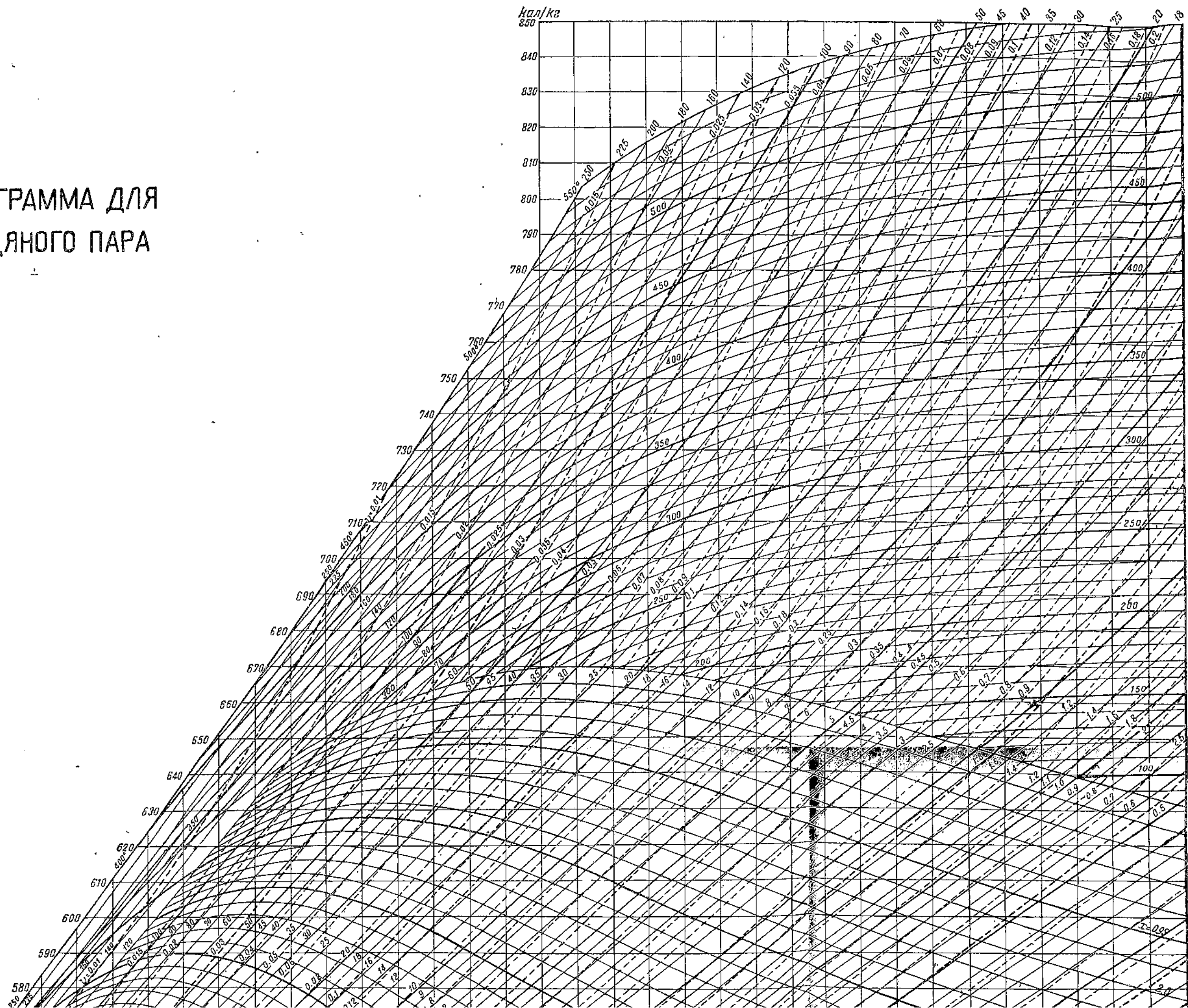
Фиг. 2. Схема котельной установки.

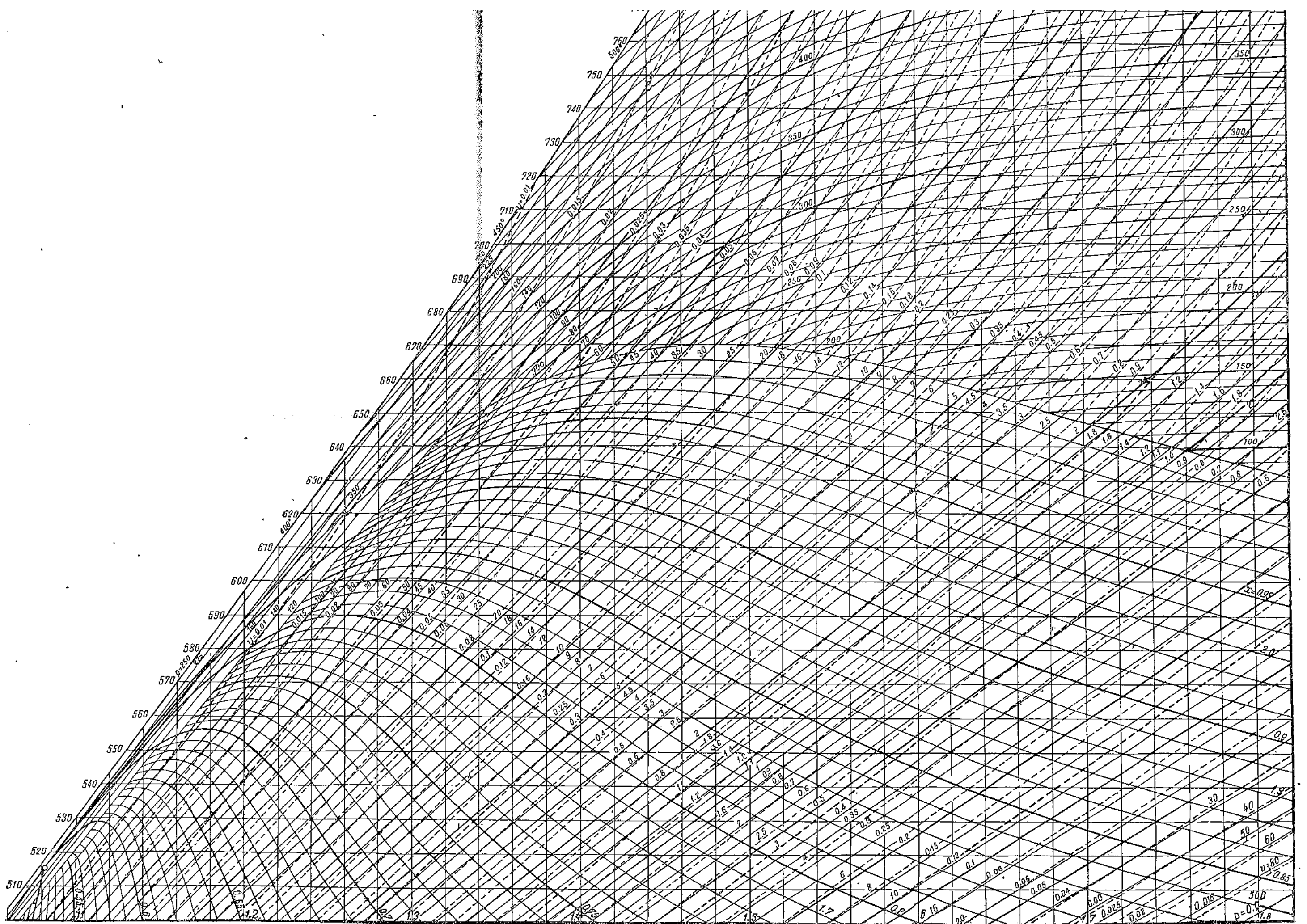
33 — склад топлива; 34 — вагоны на разгрузочных путях; 35 — выстакада;
36 — приспособление для перегрузки топлива; 37 — ковшевой транспортер;
38 — ленточный транспортер; 39 — магнитный сепаратор; 40 — грохот;
41 — дробилка; 42 — сушильное устройство; 43 — мельница; 44 — циклон;

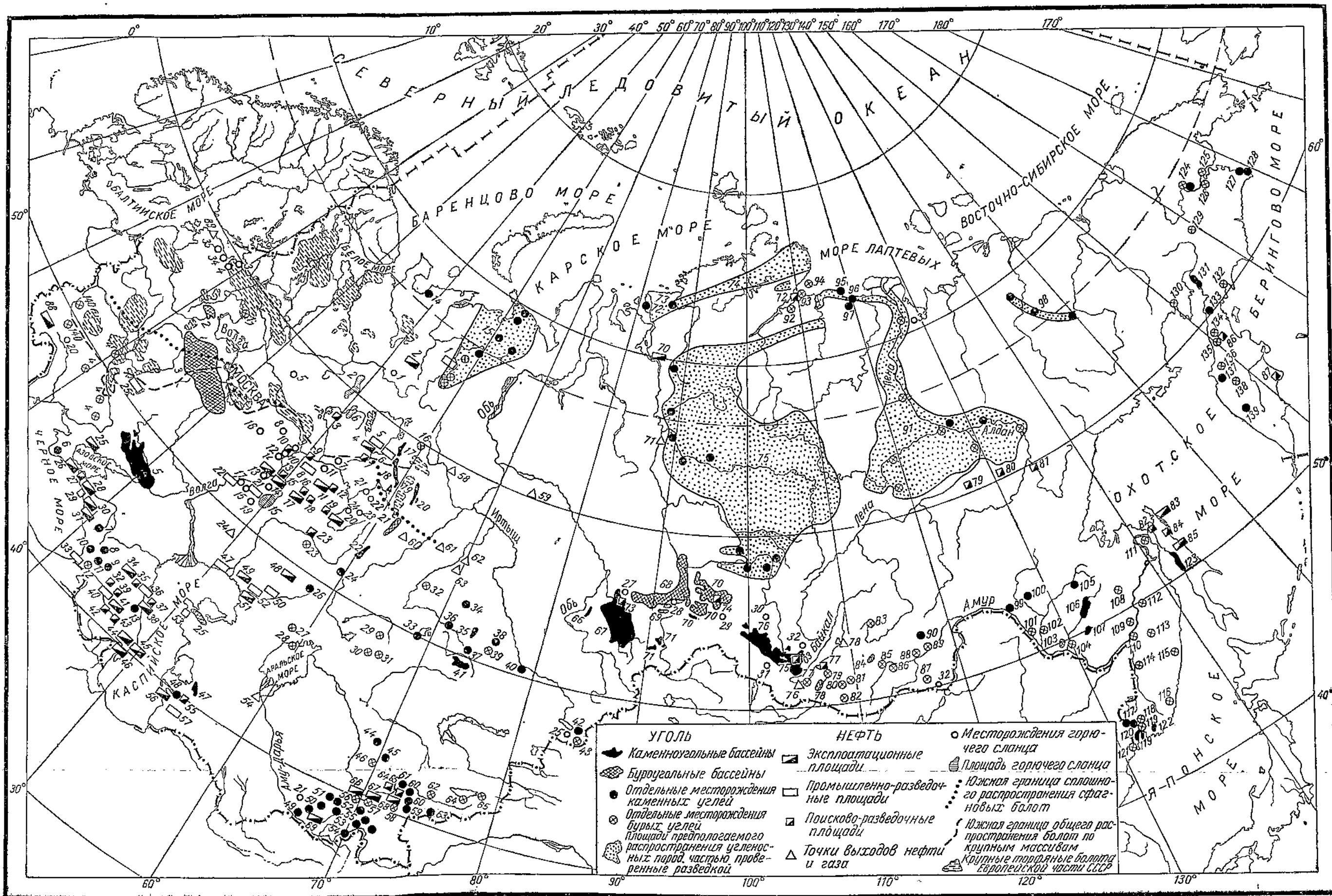
45 — питатель; 46 — сепаратор; 47 — вентилятор; 48 — бункеры; 49 — пыле- и
газопроводы; 50 — зольная воронка; 51 — см. фиг. 1; 52 — шлаковая ваго-
нетка; 53 — гидравлическое золоудалительное устройство; 54 — дымо-
вая труба; 55 — дымосос; 56 — шнек.



is-ДИАГРАММА ДЛЯ
ВОДЯНОГО ПАРА

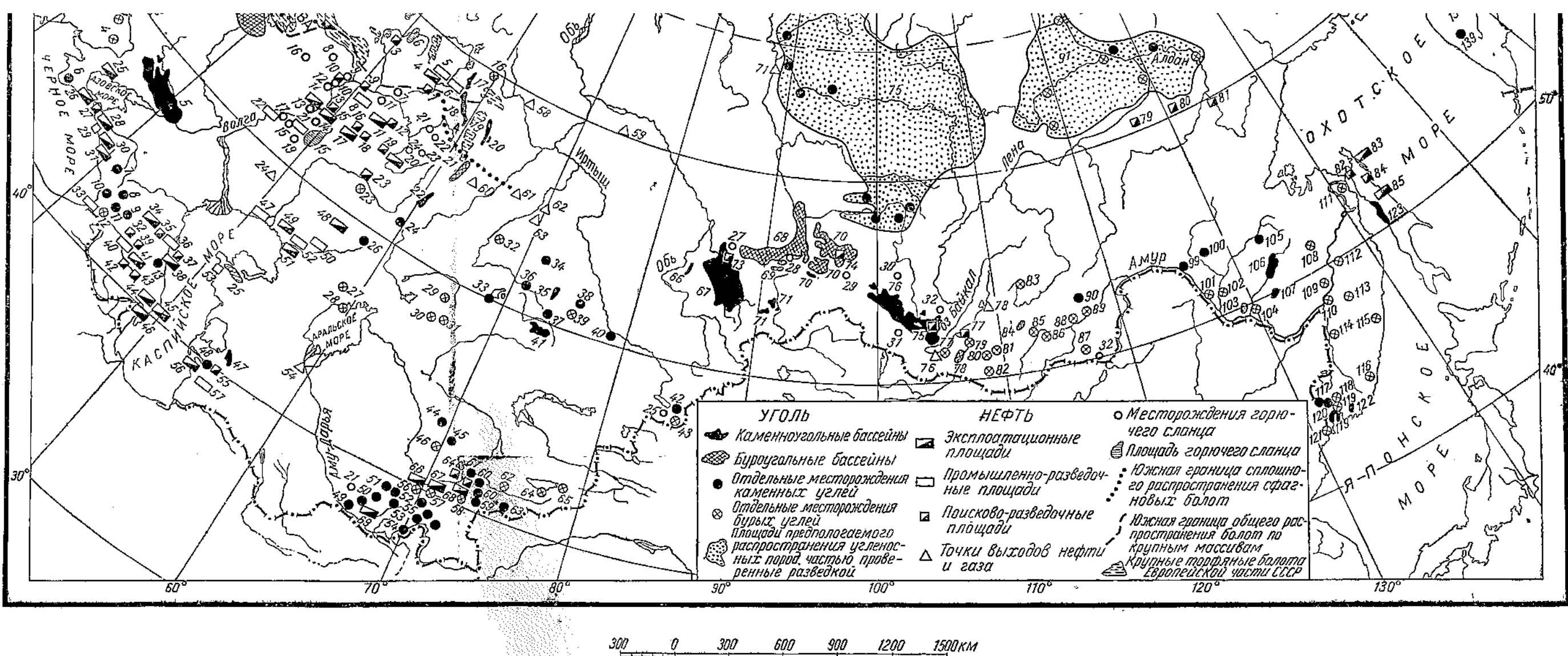






300 0 300 600 900 1200 1500 KM

Фиг. 15. Карта месторождений топлива в СССР



Фиг. 15. Карта месторождений топлив в СССР.

Список месторождений нефти

1. Мало-Кожвинское, Шугорское и др.
2. Чибью, Ярегское
3. Вонгалское и др.
4. Краснокамское
5. Шалашиное, Северо-Камское и Палазское
6. Чусовские городки
7. Осинно-Беляевское
8. Шугурово
9. Чистопольское
10. Сюевское, Удемское
11. Туймазинское
12. Болтаевское, Серафимовское, Михайловское, Ардатское
13. Усольское, Зольный овраг
14. Сызранское
15. Троицкое, Ставропольское
16. Ново-Степановское
17. Бугурусланское
18. Заглядинское и Елатомское
19. Стерлибашевское и др.
20. Ишимбаевское
21. Медногорский район (газы)
22. Топловка
23. Оренбургский район
24. Ново-Казанское (газы)
25. Менинпольское (газы)
26. Ромненское
27. Чонгелекское, Чорелекское, Мало-Бабичское, Борзовское и др.
28. Таманский нефтеносный район
29. Кеслеровское и Адагумское
30. Абузы-Ключевский район
31. Халимское, Калужское
32. Ашеровское
33. Оми, Эрдо, Лиаква
34. Омпарети, Гулиани, Супса
35. Старые Промысла и Новые Промысла, Горское, Вознесенское, Малгобек

35. Гудермас, Бенойское и др.
36. Махач-Кала и др.
37. Уйташское
38. Каякентское, Избер-Башское, Ачи-Суйское
39. Земо-Хелашени, Пховели
40. Норно, Марткоби и др.
41. Мирзаян, Мало-Ширакское
42. Эльдарское
43. Чатма, Байды, Тарибани
44. Чапи-Даское и Кара-Даское и др.
45. Балаханы, Сабунчи, Рамзаны, Суриханы, Кара-Чуккур, Бинагады, Биби-Эйбат, Кала, Остров им. Артема, Локбатан, Шангар и др.
46. Нефтяла, Пирсагат, Бабо-Зонан и др.
47. Ново-Богатинское
48. Дукасы-Май, Шубар-Кулук
49. Доссор, Макар, Искине, Байчунас, Нормунданак
50. Донгелак-Сор
51. Косчагил
52. Кульсары, Карачунгул и др.
53. Мангышлакское
54. Питняк
55. Монжулы
56. Остров Челекен, Нефтедаг и др.
57. Бондаг
58. Красная Речка, р. Тавда
59. Юганское
60. Зверингоголовская
61. Макушинское
62. Ганькинское
63. Сиприновское
64. Наманганское, Чуст-Пал и др.
65. Избаскент
66. Промыслы им. КИМ
67. Гор-Су, Нефтебад Чимнон, Ярку-таское
68. Андиканское, Чангырташ, Теке-бель
69. Хаудат

70. Усть-Порт
71. Туруханский район
72. Хатагское
73. Барзаское
74. Канско-Тасеевский район
75. Усолье
76. Танхойское
77. Селингинское
78. Усть-Баргузинское
79. Толбинское
80. Амгинское
81. Усть-Майское
82. Лянгеры
83. Оха, Эхаби
84. Парамай, Нутово, Братасин и др.
85. Катангли
86. Войновское
87. Богачевское
88. Месторождения и разработки нефти в Западной Украине и Северной Буковине
89. Эстонское (газы)

Список месторождений угля

1. Воровичская группа
2. Селижаровский район
3. Подмосковский бассейн
4. Украинские месторождения
5. Лоябасс
6. Вешуйское
7. Северо-Кавказская группа
8. Карачаевский район
9. Кабардино-Балкарский район
10. Тварчельское
11. Твибулское
12. Ахалихское
13. Дагестанский угленосный район
14. Месторождения в районе рр. Бела и Индига
15. Печорский бассейн
16. Богословский буроугольный район
17. Кизеловский бассейн
18. Чусовский район

19. Егоршинский район
20. Елгинское
21. Челябинский бассейн
22. Полято-Бродинская группа
23. Соль-Илецкое
24. Ломбаровское
25. Мангышлакская группа
26. Верхогурское
27. Месторождение Асиотасты
28. Куландинское
29. Лигиты Джиланчика
30. Кыятинское
31. Байконурское
32. Бураульско-Ишимский район
33. Тениз-Кульское
34. Месторождения в районе комбината "Степняк"
35. Тениз-Коржанкульский бассейн
36. Максимовское
37. Месторождения Борды и др.
38. Экибастузское
39. Майкопское и др.
40. Прииртышская группа
41. Карагандинское
42. Кедровское
43. Сары-Булакское
44. Группа месторождений района Кара-тау
45. Чак-Панское
46. Ленгерское
47. Туаркыр-Чагылынский район
48. Яганское
49. Купитанское
50. Южно-Гиссарская группа
51. Киптур-Зуранское
52. Янгобское
53. Ташкунское
54. Шур-Абадское
55. Оби-Вавноу
56. Сулоктинское
57. Шурабское
58. Кизыл-Кийское
59. Месторождения Ферганского хребта

60. Кок-Янганская группа
61. Нарынское
62. Сон-Кульское
63. Туругартское
64. Согутинское
65. Джаргаланское
66. Горловский бассейн
67. Кузбасс
68. Чудымо-Енисейский бассейн
69. Балахтинский район
70. Канский бассейн
71. Минусинский бассейн
72. Ламбертское
73. Пясинское
- 74-75. Тунгусская угленосная площадь
76. Иркутский бассейн
77. Ташойское
78. Гусино-Озерское
79. Мухинское
80. Тарбагатайское
81. Халартинское
82. Чикойское
83. Витимское
84. Сосновское
85. Черновское
86. Хармангутское
87. Харанорское
88. Арбатро-Холбоное
89. Делюпское
90. Букчалчинское
91. Ленская угленосная область
92. Побережье Хатангского залива
93. Норяинское
94. Месторождения о-ва Бегичева
95. Месторождения хребта Пропишча
96. Месторождение устья р. Оленек
97. Вудкалахское
98. Колымо-Индигирская угленосная площадь
99. Толбузинское
100. Деспское
101. Сазановское
102. Ураловское

103. Кивда-Райчихинское
104. Архаро-Богучанское
105. Огоджинское
106. Бурейский бассейн
107. Тирминское
108. Горинское
109. Литовское
110. Базовское
111. Налевское
112. Хунгарийское
113. Мухенское
114. Розенгартовское
115. Кусунское
116. Тадушинское
117. Верхне-Суйфунское
118. Месторождение района г. Воронинского
119. Район Амурского залива и г. Владивостока
120. Артемовское
121. Новоосинское
122. Сучанское месторождение
123. Западное побережье о. Сахалина
124. Пекулинское
125. Анадырское I
126. Телерфное
127. Месторождение бухты Угольной
128. Амо-Амское
129. Орловское
130. Гижигинское
131. Мыс Астрономический-Пенжинские ворота
132. Месторождение бухты Корфа
133. Бухта Подкагерная
134. Лесное
135. Палан-Анадырское
136. Тигильское
137. Хайрюзовское
138. Чановское
139. Крутогорское
140. Месторождения и добыча бурого угля в Западной Украине и Западной Белоруссии

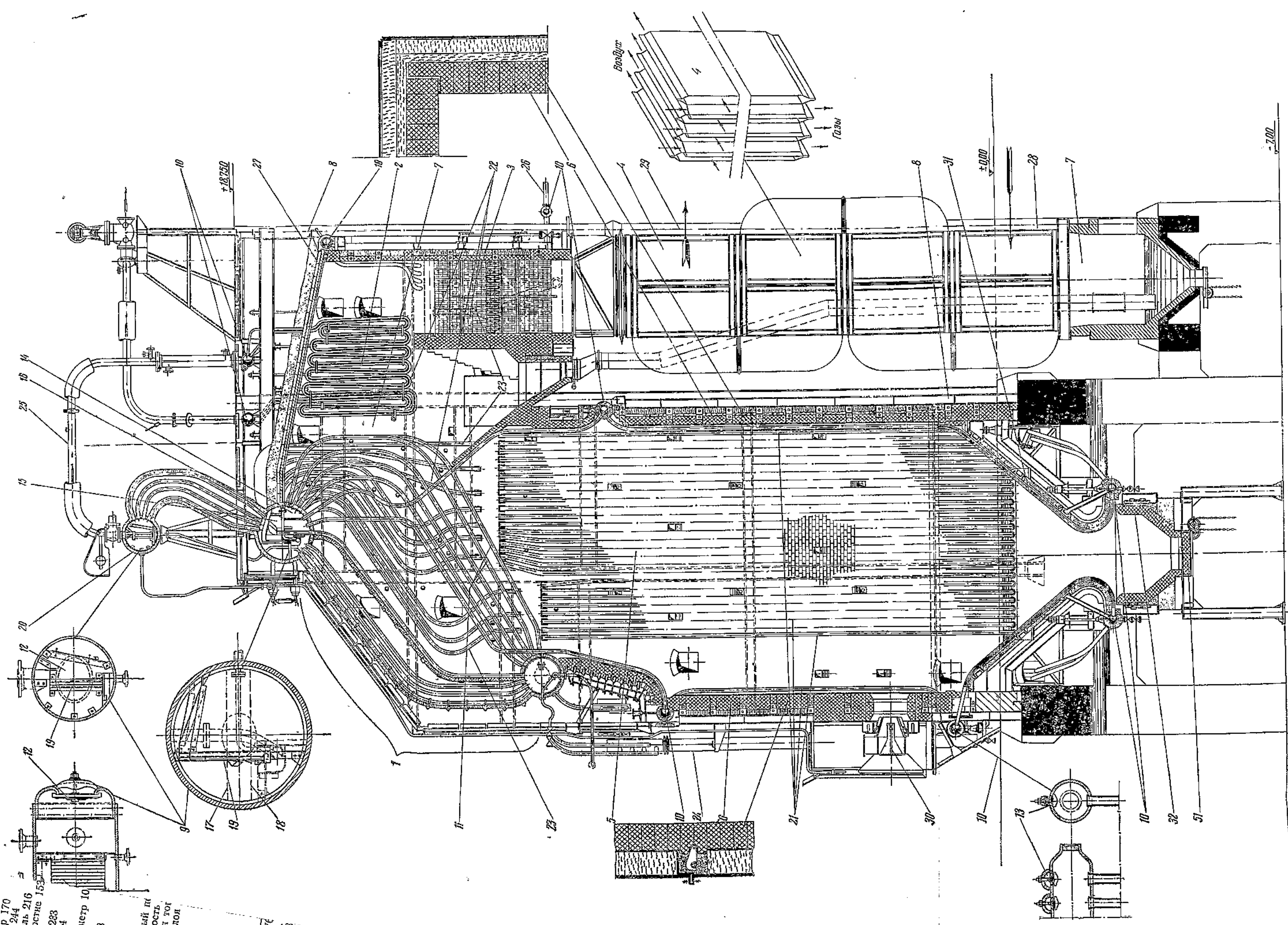
Список месторождений горячих сланцев

1. Ухтинское
2. Сысольско-Кобринский район
3. Веймарское месторождение
4. Гдовское месторождение
5. Мантуровское и Голковское месторождения
6. Верхне-Витский район
7. Гуляшминское месторождение
8. Чувашское (Вурнарское и Ибресинское) месторождение
9. Вупинское месторождение
10. Бессоновское месторождение
11. Юськи-Текерменское и Чершиланское месторождения
12. Ульяновское месторождение
13. Каширское месторождение
14. Дергуновское месторождение
15. Общесырское месторождение
16. Хухорское и Инсарское месторождения
17. Орловское месторождение
18. Савельевское месторождение
19. Озниковское месторождение
20. Подольское месторождение
21. Нижнеурезанское месторождение
22. Верхнеурезанское месторождение
23. Лемезинское месторождение
24. Зининское месторождение
25. Кандринское месторождение
26. Терегин-Гау и Гиссарское месторождения
27. Димитриевское месторождение
28. Соболевское месторождение
29. Район города Канска
30. Хахарейское месторождение
31. Иркутский бассейн
32. Харанарское и Борзинское месторождения
33. Булуновское месторождение
34. Коктылинское месторождение
35. Кукурское месторождение

140, 153
 163
 223, 230
 подпор 170
 экран 244
 питатель 216
 отверстие 153
 яски 283
 оды 84
 и диаметр 10
 107
 же 243
 248
 П

Угнстый п
 верхность
 идения тог
 юго слон

№ 7576
 99560.
 Л 698



Фиг. 1. Схема котельного агрегата.

1 — паровой котел; 2 — пароперегреватель; 3 — водный экономайзер; 4 — воздухоподогреватель; 5 — топочная камера; 6 — обмуровка; 7 — газосол; 8 — жаровая; 9 — барабан; 10 — коллекторы; 11 — трубы; 12 — лавы; 13 — дым; 14 — водное пространство; 15 — паровое пространство; 16 — зеркало испарения; 17 и 18 — вентиль и внешний уровень воды; 19 — сепараторное устройство; 20 — сухой арник; 21 — радиационная поверхность нагрева; 22 — соединительная поверхность нагрева; 23 — подвесные трубы; 24 — опускные трубы; 25 — паропровод насыщенной пара; 26 — трубопровод питательной воды; 27 — трубы, соединяющие экономайзер с барабаном; 28 — входной короб воздухоподогревателя; 29 — выходной короб воздухоподогревателя; 30 — горелка; 31 — холодная воронка; 32 — шлаковый бункер; 33 — затвор бункера.

Зам. 4472. Котельные установки, т. I.