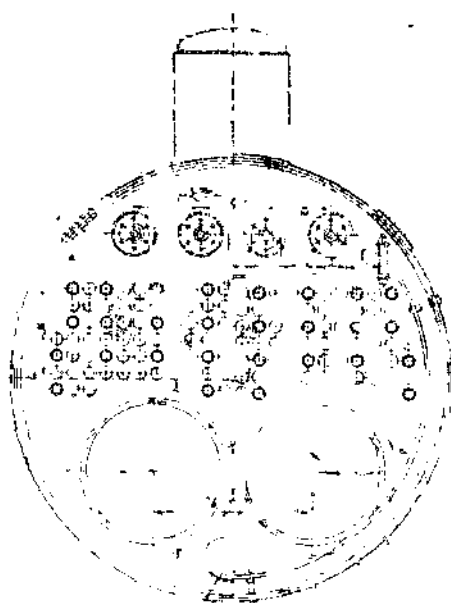


62/181.1
А 46

А. С. АЛЕКСАНДРОВ

РЕЧНЫЕ ПАРОВЫЕ КОТЛЫ



ИЗДАТЕЛЬСТВО НАРКОМРЕЧФЛОТА СССР
МОСКВА



1945

54

А. С. АЛЕКСАНДРОВ

621.181.1

А 46.

62

РЕЧНЫЕ ПАРОВЫЕ КОТЛЫ

(ПОСОВИЕ ДЛЯ ТЕПЛОТЕХНИКОВ
И СУДОМЕХАНИКОВ РЕЧНОГО ФЛОТА)

РЕЧНОЙ ПАРОВОЙ КОТЛ
НАПРОВОДНИКОВ
БЕЗВЕСТИКА СССР

54

~~КАТЕГОРИЯ~~

Дер. 1988

РЕЧНОЙ ПАРОВОЙ КОТЛ
НАПРОВОДНИКОВ
БЕЗВЕСТИКА СССР

34973
РЕЧНОЙ ПАРОВОЙ КОТЛ
НАПРОВОДНИКОВ
БЕЗВЕСТИКА СССР

82604

11/10 108

РЕЧНОЙ ПАРОВОЙ КОТЛ
НАПРОВОДНИКОВ
БЕЗВЕСТИКА СССР



ИЗДАТЕЛЬСТВО НАРКОМРЕЧФЛОТА СССР
МОСКВА 1945

Цена 29 р. — Переплет 2 р.

Отв. редактор Н. В. Мясников.

Техн. редактор Г. М. Кузьмин.

Л49653. Сдано в произв. 29 VII 1944 г. Подп. к печ. 19 IV 1945 г. Тир. 3000.
Изд. № Т. 4043. Печ. л. 19^{1/2}. Уч.-изд. л. 29. Форм. бум. 60×92^{1/2}.
В печ. л. 48608 зн. Зак. 3611.

Типография Профиздата, Москва, Крутицкий вал, 18.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Основное назначение предлагаемого пособия — служить настольным справочником для теплотехников речного флота, работающих в области технической эксплуатации и контроля судовых котельных установок.

В справочнике даны таблицы и формулы, необходимые теплотехнику-речнику для различных подсчётов при теплотехническом контроле, испытании и модернизации судовых котельных установок, а также сведения по их эксплуатации. Кроме того, конспективно изложены теоретические сведения, обязательные для правильного понимания тепловых процессов и тех факторов, которые влияют на качество работы речных паровых котлов.

Учитывая сказанное, а также принимая во внимание малый объём пособия, автор, составляя данный справочник, не преследовал цели полностью удовлетворить также и запросы работников конструкторских групп пароходств и судоремонтных заводов. Поэтому специальные сведения по проектированию и расчёту элементов судовых котельных установок (например, методы определения коэффициентов теплопередачи для отдельных частных случаев теплообмена, расчёт котлов и их деталей на прочность и т. д.) в справочник не вошли. Помещённые в справочнике формулы по теплопередаче, процессам горения, тепловому балансу котла и т. д. даны без выводов. В большинстве своём приводимые формулы настолько просты, что происхождение их для читателя ясно из самой структуры формулы и размерностей входящих в неё величин. Выводы же других, более сложных формул (например, формулы основного уравнения горения, выражения для определения коэффициента избытка воздуха по данным анализа газов и т. д.) интересующиеся найдут в специальных курсах паровых котлов. Кроме того, при пользовании справочником необходимо учитывать, что он преследует, в основном, производственные, а не педагогич-

ческие цели, и предполагается, что теплотехник или судовой механик, пользующийся данным пособием в своей практической работе, проработал ранее более или менее полный общий курс паровых котлов, а также хорошо знаком и с материальной частью речных котельных установок.

А. Александров

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

ОСНОВНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ СОСТОЯНИЕ ГАЗОВ И ПАРОВ (ПАРАМЕТРЫ)

§ 1. ДАВЛЕНИЕ

Давление измеряется в метрических атмосферах. Одна техническая атмосфера равна давлению 1 кг на 1 см², или давлению 10 000 кг на 1 м². Одна физическая атмосфера равна нормальному барометрическому давлению на уровне моря при температуре 0°C. Нормальное барометрическое давление соответствует давлению ртутного столба высотой $b = 760$ мм.

Давление в непроницаемом для внешнего воздуха пространстве, измеряемое манометром, называется избыточным (манометрическим) давлением и обозначается $p_{\text{ати}}$. Абсолютное давление ($p_{\text{ата}}$) равно избыточному давлению плюс атмосферное. На практике всегда применяют избыточное давление (рабочее, манометрическое). Во все тепловые подсчёты вводится абсолютное давление.

Величина абсолютного давления приближённо подсчитывается по формуле:

$$p_{\text{ата}} = p_{\text{ати}} + 1 \quad (1)$$

или более точно:

$$p_{\text{ата}} = p_{\text{ати}} + p_{\text{бар}} = p_{\text{ати}} + \frac{b}{735,6}, \quad (1')$$

где b — показания барометра в миллиметрах ртутного столба.

В таблице 1 дана величина давления атмосферного воздуха в миллиметрах ртутного столба в зависимости от высоты над уровнем моря.

Таблица 1

Среднее давление атмосферного воздуха в зависимости от высоты над уровнем моря

Высота над уровнем моря в м	0	100	200	300	400	500	600	800	1000	1500
b мм	760	752	742	733	724	716	707	690	677	635

Одна физическая атмосфера равна давлению 10333 кг/м².
Одна техническая атмосфера несколько меньше физической и соответствует столбу ртути высотой:

$$760 \cdot \frac{10000}{10333} = 735,6 \text{ мм рт. ст.}$$

Давление меньше 1 ата (разрежение) указывается вакуумметром. Зная показания вакуумметра в миллиметрах ртутного столба, давление в долях технической атмосферы подсчитывают по формуле:

$$P = \frac{760 - W}{735,6} \text{ кг/см}^2, \quad (2)$$

где W — разрежение, показываемое вакуумметром, в миллиметрах.

В таблице 2 дано соотношение употребительных единиц давления.

Таблица 2
Сравнение основных единиц давления

Наименование единиц	кг/см²	мм ртутного столба при 0°C	м водяного столба при 4°C
кг/см²	1,0	735,6	10,0
мм ртутного столба	0,00136	1,0	0,0136
м водяного столба	0,1	73,56	1,0

§ 2. УДЕЛЬНЫЙ ВЕС И ПЛОТНОСТЬ

Удельный вес γ есть отношение веса тела (твёрдого, жидкого, газообразного) к весу воды при 4°C в том же объёме.

Удельный вес — число отвлечённое.

Кубический дециметр воды весит 1 кг при температуре 4°C.

Вес твёрдого, жидкого или газообразного тела, имеющего объём x дм³, равен: $x \cdot \gamma$ кг.

Плотностью называется вес единицы объёма тела. Для газов понятие плотности более употребительно, чем понятие удельного веса.

Плотность газов равна удельному весу, умноженному на 1000. Плотность, как и удельный вес, обозначается буквой γ .

$$\gamma = \frac{G}{V} \text{ кг/м}^3, \quad (3)$$

где: G — вес тела в килограммах,

V — объём тела в м³.

Для воды $\gamma = 1000 \text{ кг/м}^3$.

Удельный вес (плотность) продуктов сгорания котельных установок

По данным инж. Нубера, удельный вес сухих дымовых газов при нормальных условиях (0°C и 760 мм рт. ст.), в зависимости

от содержания в газах углекислоты в процентах и объему, приближенно можно считать равным:

CO ₂ = 9%	$\gamma_{\text{сг}} = 1,337$ кг/м ³
CO ₂ = 10%	$\gamma_{\text{сг}} = 1,349$ "
CO ₂ = 12%	$\gamma_{\text{сг}} = 1,357$ "
CO ₂ = 14%	$\gamma_{\text{сг}} = 1,365$ "

или как среднее значение при содержании CO₂ = 9 ÷ 10% $\gamma_{\text{сг}} = 1,34$ кг/м³.

В таблицах 3, 4 и 5 даны значения плотности и удельного веса для наиболее употребительных твердых, жидких и газообразных тел. В таблице 6 даны атомные веса некоторых элементов. В таблице 7 указаны составные части воздуха.

Таблица 3

Плотность некоторых твердых и жидких веществ

Вещество	Плотность в кг/м ³	Вещество	Плотность в кг/м ³
Алюминий	2700	Чугун	7000.
Железо	7800	Вода (4°C)	1000
Медь	8900	Керосин (0°C)	800
Платина	21500	Ртуть	13600
Дерево	500	Спирт	790

Таблица 4

Удельный вес воды в зависимости от температуры

Температура в °C	Удельный вес	Температура в °C	Удельный вес
0	0,99987	50	0,9881
2	0,99997	55	0,9858
4	1,00000	60	0,9833
6	0,99997	65	0,9807
8	0,99988	70	0,9779
10	0,99973	75	0,9750
12	0,99953	80	0,9722
14	0,99928	85	0,9688
16	0,99824	90	0,9655
18	0,99869	95	0,9621
20	0,99824	100	0,9586
22	0,99780	110	0,9513
24	0,99733	120	0,9435
26	0,99681	130	0,9351
28	0,99626	140	0,9263
30	0,99567	150	0,9172
32	0,99505	160	0,9076
34	0,99440	170	0,8977
36	0,99372	180	0,8875
40	0,99233	190	0,8770
45	0,99035	200	0,8662

Таблица 5

Плотность и удельный объем газов

Название газа	Химический знак	Атомность (число атомов в молекуле)	Молекулярный вес	Плотность при нормальных условиях в кг/м ³	Удельный объем при нормальных условиях в м ³ /кг
Азот	N ₂	2	28	1,252	0,794
Воздух (сухой)	—	—	29	1,293	0,774
Водород	H ₂	2	2	0,09	11,11
Кислород	O ₂	2	32	1,432	0,70
Метан	CH ₄	5	16	0,716	1,397
Оксид углерода	CO	2	28	1,251	0,8
Углекислота	CO ₂	3	44	1,967	0,509
Сернистый газ	SO ₂	3	64	2,865	0,35
Водяной пар	H ₂ O	3	18	0,805	1,178

Примечание. Молекулярный вес показывает, во сколько раз вес молекулы данного вещества больше веса атома водорода.

Таблица 6

Атомные веса некоторых элементов

Наименование элемента	Атомный вес	Примечание
Водород	1,0	Вес атома водорода принят равным единице. Атомный вес других элементов показывает, во сколько раз атом данного элемента весит больше атома водорода.
Углерод	12,0	
Азот	14,0	
Сера	32,0	
Кислород	16,0	
Фосфор	31,0	
Хлор	33,5	
Калий	39,1	
Кальций	40,0	
Магний	24,3	

Таблица 7

Составные части воздуха

	1 м ³ воздуха содержит	1 кг воздуха содержит
Воздуха { м ³ кг	1 1,186	0,843 1,0
Кислорода { м ³ кг	0,210 0,275	0,177 0,232
Азота { м ³ кг	0,79 0,911	0,666 0,768

§ 3. УДЕЛЬНЫЙ ОБЪЕМ

Удельным называется объём 1 кг твёрдого, жидкого или газообразного тела при температуре 0°C и давлении 760 мм рт. столба (т. е. при нормальных условиях), выраженный в кубометрах.

Удельный объём v — величина обратная плотности (удельному весу):

$$v = \frac{V}{G} \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Следовательно,

$$v = \frac{1}{\gamma} \text{ м}^3/\text{кг}$$

или

$$\gamma \cdot v = 1.$$

Если объём газа определяется при температуре 0°C и давлении 760 мм рт. столба, то он обозначается нм^3 (кубический метр газа при нормальных условиях, или нормальный кубический метр газа).

§ 4. ТЕМПЕРАТУРА

Температурой называется степень нагретости тела. В последующих таблицах и формулах температура дана в градусах Цельсия ($^{\circ}\text{C}$).

Нуль градусов по шкале Цельсия соответствует температуре таяния льда, а 100° — температуре кипения воды при нормальном атмосферном давлении. Температура в градусах Цельсия обозначается буквой t .

По закону Гей-Люссака, при нагревании газа на 1°C объём его увеличивается на $1/273$ часть первоначального объёма при 0°C . При охлаждении газа на 1° объём его на такую же часть уменьшается. Следовательно, при охлаждении газа до температуры — 273°C ниже нуля объём его становится равным нулю. Температура — 273°C называется абсолютным нулём температуры.

Абсолютная температура начинается от — 273°C и обозначается в расчётах и формулах буквой T° абс, или $T^{\circ}\text{K}$ (Кельвина), по имени учёного, предложившего эту шкалу.

Если известна температура газа в $^{\circ}\text{C}$, то абсолютную температуру находят по формуле:

$$T = t + 273^{\circ}\text{K}. \quad (4)$$

Методы измерения температур, применяемые в технике для различных случаев, и характеристика применяемых приборов указаны в таблицах 8 и 9.

Таблица 8

Способы измерения температуры и измерительные приборы

Пределы измерения температуры	Приборы
—39° до +200°	Ртутный термометр. —39° соответствует точке замерзания, а +200° — точке кипения ртути
До +550°	Спиральная трубка, наполненная ртутью (манометрический термометр); при расширении и выпрямлении спирали стрелка показывает температуру
До +800°	Ртутный термометр, у которого над столбиком ртути находится газ (углекислота или азот) под давлением в 20 атм.
Ниже —39°	Ртутный термометр из кварцевого стекла, выдерживающего давление до 60 атм.
От любого градуса ниже 0 и до +1000 С	Термометр со спиртом (применяют также для температуры до +78°), толуолом, нефтяным эфиром или пентаном
+200° до +1800°	Электрический термометр, у которого при изменении температуры платиновой проволоки изменяется электрическое сопротивление, обнаруживаемое гальванометром, показывающим на циферблате температуру в градусах. Требуется источник электрического тока
0° до +1000°	Термоэлектрический термометр (термопара с гальванометром), у которого электродвижущая сила, возникающая при повышении или понижении температуры в месте спайки двух различных металлов, измеряется гальванометром. Предел измерения зависит от металла, из которого сделаны термоэлементы
+300° до +3200°	Графитовый пирометр. Измерение температуры производится по удлинению графитового стержня
	Оптический пирометр. Измерение температуры основано на сравнении силы света, излучаемого телом, нагретым до определенной (известной) температуры, с силой света, излучаемого накаливаемым телом.
	Наиболее распространен оптичеcкий пирометр системы Хольборн—Курльбаум: оптическая трубка с лампочкой накаливания, питаемой от аккумулятора. Сила света лампочки регулируется до совпадения с силой света источника тепла. Величина сопротивления, необходимого для этого, показывается гальванометром со шкалой температур.
+500° до +2000°	Требуется источник электрического тока. Результат зависит от субъективных ощущений
	Конусы Зегера. Усеченные трехгранные пирамиды (материал — силикаты) высотой 6 см, 59 различных точек плавления. Температурой, соответствующей номеру конуса, считается та, при которой вершина конуса склонится в сторону.
	Применяются в керамическом производстве для определения температуры обжига, а также в паровых котлах для определения температуры газов в дымоходах, и топке.

Таблица 9

Измерение температуры термопарами .

Термопара	Предельная температура измерения в °С	Электродвижущая сила при предельной температуре (милливольт)	Рабочие пределы измерения температуры в °С	Область применения
Медь—константан . . .	500	около 45	100 ÷ 400	Перегретый пар, воздух после воздухоподогревателя
Железо—константан . .	800	„ 45	200 ÷ 600	Уходящие газы в дыминке котла
Никель—нихром . . .	1100	„ 40	350 ÷ 1100	Газы в первых газоходах, до и после пароперегревателя
Алюмель—хромель . .	1200	„ 45	350 ÷ 1100	Термопары алюмель—хромель более стойки, чем никель—нихром
Платина—платинородий.	1600	„ 17	250 ÷ 1300	Термопара платина—платинородий применяется для особо точных измерений и как эталон для проверки
Никель—железо Никель—медь	1000	„ 26	300 ÷ 930	Температура газов за котлом и экономайзером

Примечание. Указанные значения — средние.

Константан—сплав 40% никеля и 60% меди.

Нихром—сплав 84,6% никеля и 15,4% хрома.

Алюмель—сплав 94% никеля, 1% силиция, 2% алюминия, 0,5% железа, 2,5% марганца.

Платинородий—сплав 90% платины и 10% родия.

§ 5. ОБЪЕМ И УДЕЛЬНЫЙ ВЕС ГАЗОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

В таблице 5 указаны удельный вес и объем газов при нормальных условиях. Если известен объем газа при 0°C и 760 мм рт. столба, то его объем при новой температуре и том же давлении определяется на основании закона Гей-Люссака по формуле:

$$v_t = v_0 \cdot \frac{273 + t}{273}. \quad (5)$$

Если известен объем газа при нормальных условиях и требуется определить его объем при новой температуре и новом давлении P_1 мм рт. столба, следует пользоваться формулой:

$$v_t = v_0 \cdot \frac{273 + t}{273} \cdot \frac{P_1}{760}. \quad (6)$$

Удельный вес газов при новой температуре в градусах Цельсия определяется по формуле:

$$\gamma_t = \frac{\gamma_0}{1 + 0,00367t} \text{ кг/м}^3, \quad (7)$$

где γ_0 — удельный вес газов при нормальных условиях.

§ 6. ЗАКОН ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ ТЕПЛА И РАБОТЫ

При преобразовании тепла в работу полученная работа определяется по формуле:

$$L = E \cdot Q \text{ кгм}, \quad (8)$$

где: Q — затраченное тепло в калориях,

$E = 427$ кгм/кал — механический эквивалент тепла.

Механический эквивалент тепла представляет собой такое количество механической работы, которое, будучи превращено в тепло, способно нагреть 1 кг воды на 1°C . При преобразовании работы в теплоту количество тепла, эквивалентное работе, определяется по формуле:

$$Q = A \cdot L \text{ кал}, \quad (9)$$

где: L — затраченная работа в килограммометрах,

$A = 1/427$ кал/кгм — термический эквивалент работы.

§ 7. ЭКВИВАЛЕНТ 1 СИЛО-ЧАСА И 1 КВТ-ЧАСА

Один сило-час соответствует (эквивалентен) работе 1 л. с. в течение часа. 1 л. с. представляет работу 75 кгм в секунду, или $75 \times 3600 = 270\,000$ кгм/час.

Количество тепла, затрачиваемое на 1 сило-час, составляет поэтому:

$$Q = \frac{1}{427} \times 75 \times 3600 = 632 \text{ кал.}$$

Так как 1 квт = 1,36 л. с., то, следовательно, 1 квт-час эквивалентен:

$$632 \times 1,36 \approx 860 \text{ кал. тепла.}$$

В таблице 10 даны соотношения между килограммометром, калорией, лошадиной силой и киловаттом.

Таблица 10

Соотношения употребительных единиц мощности
(работы в секунду)

Работа в секунду	Килограммометр	Лошадиная сила	Калория	Ватт	Киловатт
Килограммометр	1	$\frac{1}{75}$	$\frac{1}{427}$	9,81	0,00981
Лошадиная сила	75	1	0,176	736	0,736
Калория	427	5,7	1	4190	4,19
Ватт	0,102	0,00136	0,00024	1	0,001
Киловатт	102	1,36	0,24	1000	1

§ 8. ТЕПЛОЁМКОСТЬ

Теплоёмкостью называется количество тепла, затрачиваемое на нагревание единицы вещества (1 кг или 1 м³) на 1° С. Соответственно этому различают весовую и объёмную теплоёмкости. Обозначается теплоёмкость буквой C так: c кал/кг; C м³/кг.

Теплоёмкость 1 кг вещества зависит от природы вещества и температуры, при которой происходит нагревание. Теплоёмкость 1 м³ газа зависит от рода газа, температуры и условий, при которых происходит нагревание (происходит ли процесс нагревания при постоянном давлении или при постоянном объёме); в расчётах котельных установок применяется теплоёмкость при постоянном давлении.

Давление газа в дымоходах и топках котлов считается постоянным и приблизительно равным атмосферному.

Средняя (для данного предела температур) весовая теплоёмкость определяется по формуле:

$$C_m = \frac{Q}{t_2 - t_1} \text{ кал/кг}^\circ\text{С}, \quad (10)$$

где Q — количество калорий тепла, затрачиваемых на нагревание 1 кг данного вещества от температуры t_1 до температуры t_2 .

Теплоёмкость смеси газов подсчитывается по формуле:

$$C_{см} = g_1 c_1 + g_2 c_2 + \dots + g_n c_n \text{ кал/кг}^\circ\text{С}, \quad (11)$$

где: g_1 — вес в долях килограмма газа, входящего в смесь и имеющего теплоёмкость c_1 кал/кг,

g_2 — вес в долях килограмма газа, входящего в смесь и имеющего теплоёмкость c_2 кал/кг, и т. д.

§ 9. ТЕМПЕРАТУРА СМЕСИ

Если смешивают x кг и y кг двух различных веществ с температурами t_x и t_y и теплоёмкостями c_x и c_y , то температура смеси t_z определяется по формуле:

$$t_z = \frac{c_x \cdot t_x \cdot x + c_y \cdot t_y \cdot y}{c_x \cdot x + c_y \cdot y}. \quad (12)$$

В таблицах 11, 12 и 13 дана теплоёмкость воды, газов и водяных паров.

Таблица 11

Теплоёмкость воды в зависимости от температуры

Температура в °C	Теплоёмкость C кал/кг °C	Температура в °C	Теплоёмкость C кал/кг °C
0	1,0038	80	1,0045
10	1,0021	90	1,0070
20	0,9987	100	1,0099
30	0,9984	120	1,0170
40	0,9987	140	1,0267
50	0,9996	160	1,0361
60	1,0008	180	1,0370
70	1,0025	200	1,0780

Таблица 12

Средняя объёмная теплоёмкость газов и водяного пара при постоянном давлении по ЮСТИ C_p кал/м³

t °C	N_2, CO	O_2	H_2O	CO_2, SO_2	Воздух
0	0,311	0,312	0,356	0,384	0,310
200	0,312	0,319	0,362	0,431	0,313
400	0,316	0,329	0,372	0,464	0,318
600	0,322	0,339	0,384	0,492	0,324
800	0,328	0,347	0,397	0,513	0,331
1000	0,334	0,353	0,410	0,530	0,337
1200	0,340	0,359	0,422	0,544	0,343
1400	0,345	0,364	0,434	0,555	0,347
1600	0,349	0,368	0,444	0,565	0,352

Средняя весовая теплоёмкость газов и водяного пара при постоянном давлении по ЮСТИ C_p кал/кг

Температура в °C	Азот, окись углерода N_2, CO	Кислород O_2	Водяной пар H_2O	Углекисло- та, серни- стый газ CO_2, SO_2	Воздух
0	0,248	0,218	0,443	0,196	0,249
100	0,249	0,220	0,446	0,208	0,240
200	0,250	0,223	0,451	0,219	0,242
300	0,251	0,227	0,456	0,229	0,244
400	0,253	0,231	0,468	0,236	0,246
600	0,257	0,237	0,477	0,251	0,251
700	0,259	0,240	0,485	0,256	0,253
800	0,262	0,243	0,493	0,261	0,256
900	0,265	0,245	0,502	0,266	0,259
1000	0,267	0,248	0,509	0,270	0,261
1100	0,270	0,249	0,517	0,274	0,263
1200	0,272	0,251	0,524	0,277	0,215
1400	0,276	0,255	0,539	0,283	0,269

II. ВОДЯНОЙ ПАР

При нормальном барометрическом давлении вода закипает при температуре 100° C. В течение всего процесса парообразования (если давление не меняется) температура воды и пара остаётся постоянной.

Температура кипения понижается при уменьшении давления и повышается при увеличении давления.

Различают пар насыщенный и пар перегретый.

Насыщенный пар получается в замкнутом пространстве в соприкосновении с водой, из которой он образуется. Насыщенный пар может быть влажным, если в нём имеются частицы воды, и сухим — если в нём частиц воды нет. Каждому давлению соответствуют строго определённые температура, удельный вес и удельный объём сухого насыщенного пара.

Если насыщенный пар из сосуда, где он находится в присутствии воды, отвести в другой сосуд и сообщить ему дополнительное количество тепла без повышения давления (т. е. перегреть пар), то этот пар обратится в пар перегретый. При одинаковом с насыщенным паром давлении перегретый пар имеет более высокую температуру и меньший удельный объём.

Пар, находящийся в паровом пространстве котла, всегда влажный, так как он содержит большее или меньшее количество частиц влаги. По выходе из перегревателя пар является перегретым.

Сухой насыщенный пар есть промежуточное состояние, которое на практике в изолированном виде не встречается.

Степенью сухости (x) влажного насыщенного пара, или паросо-
держанием, называется вес сухого пара в 1 кг влажного насыщен-
ного пара ($x \leq 1$).

Степень влажности пара есть величина $(1-x)$, показывающая вес влаги (в долях килограмма) в 1 кг влажного насыщенного пара.

Теплотой жидкости (q кал/кг) называется количество тепла, затрачиваемого на нагревание 1 кг воды, взятой при 0°C , до температуры кипения (парообразования) при данном давлении. С увеличением давления теплота жидкости возрастает.

Теплотой испарения (r кал/кг) называется количество тепла, затрачиваемого на испарение 1 кг воды, нагретой до температуры кипения при данном давлении. Теплота испарения расходуется на изменение агрегатного состояния вещества (превращение воды в пар), причём часть этого тепла (называемая внутренней теплотой испарения) идёт на невидимую для нас работу расщепления молекул воды и образование молекул пара, а другая часть (называемая внешней теплотой испарения) — на совершение уже ощутимой нами работы расширения (увеличение объёма вещества при превращении в пар).

Имеем:

$$r = p + \psi \text{ кал/кг}, \quad (13)$$

где: p — внутренняя теплота испарения,

ψ — внешняя теплота испарения.

Внутренняя теплота расходуется на преодоление сил сцепления, а внешняя теплота — на преодоление сил внешнего давления, приложенных к молекулам (при увеличении объёма).

Полной теплотой парообразования i_s кал/кг (называемой часто теплосодержанием) сухого насыщенного пара называется количество тепла, затрачиваемого на образование 1 кг сухого насыщенного пара из воды, взятой при 0°C . Полная теплота парообразования (теплосодержание) сухого насыщенного пара выражается формулой:

$$i_s = q + r \text{ кал/кг}. \quad (14)$$

Теплосодержание влажного насыщенного пара составляет:

$$i_x = q + x \cdot r \text{ кал/кг}. \quad (14')$$

С увеличением давления теплота испарения уменьшается.

Полная теплота парообразования достигает наибольшей величины при 27 ата и при дальнейшем повышении давления начинает уменьшаться.

При давлении в 224,2 ата и температуре насыщенного пара 374°C полная теплота парообразования состоит только из теплоты жидкости (теплота испарения равна нулю). Давление в 224,2 ата называется критическим. Соответствующая этому давлению температура 374°C называется критической температурой. При указанном давлении парообразование происходит без увеличения объёма, т. е. объём пара при этом давлении равен объёму воды, и переход воды в пар совершается внезапно, так как насыщенный пар не может иметь давления выше критического.

Полное количество тепла в калориях, затрачиваемого для обращения в сухой насыщенный пар 1 кг воды при температуре $t_0^\circ\text{C}$, определяется по формуле Реньо:

$$Q = 606,5 + 0,305 \cdot t - t_0 \text{ кал/кг}, \quad (15)$$

где t — температура насыщенного пара, соответствующая давлению.

Из формулы Ренъо следует, что с увеличением температуры питательной воды затрата тепла на парообразование в самом котле уменьшается.

Удельный объем и удельный вес сухого насыщенного пара, в зависимости от давления, определяются при теплотехнических расчетах по таблицам, составленным в результате экспериментальных исследований.

Температура, теплосодержание и удельный объем сухого насыщенного пара, в зависимости от давления, даны в таблицах 14—18.

Таблица 14

Давление насыщенного пара менее 1 ата в зависимости от температуры

Температура в °C	Давление в кг/см ²	Температура в °C	Давление в кг/см ²	Температура в °C	Давление в кг/см ²
	0,00622	40	0,0752	80	0,4827
	0,00889	45	0,0977	85	0,5893
	0,01252	50	0,1258	90	0,7148
	0,0174	55	0,1602	95	0,8619
	0,0238	60	0,2028	100	1,0333
	0,0333	65	0,2547		
	0,0433	70	0,3165		
	0,0573	75	0,3929		

Таблица 15

Сухой насыщенный пар давления менее 1 ата

P , кг/см ²	t_s , °C	v_s , м ³ /кг	γ_s , кг/м ³	q , кал/кг	r , кал/кг	i , кал/кг
0,01	6,69	181,6	0,007	6,72	598,1	599,8
0,02	17,2	68,27	0,015	17,23	587,2	604,4
0,03	23,8	46,53	0,021	23,8	583,5	607,3
0,04	28,6	35,46	0,028	28,6	580,8	609,4
0,05	32,5	29,73	0,035	32,5	578,6	611,1
0,06	35,8	24,19	0,041	35,8	576,8	612,6
0,08	41,2	18,45	0,054	41,2	573,7	614,9
0,10	45,4	14,95	0,067	45,4	571,4	616,8
0,15	53,6	10,220	0,098	53,6	566,7	620,3
0,20	59,7	7,797	0,128	59,7	563,2	622,9
0,25	64,6	6,320	0,158	64,6	560,3	624,9
0,30	68,7	5,331	0,187	68,7	558,0	626,7
0,40	75,4	4,071	0,245	75,4	554,1	629,5
0,50	80,9	3,304	0,302	80,9	550,9	631,7
0,60	85,9	2,785	0,352	85,9	548,1	633,5
0,70	89,5	2,410	0,414	89,4	545,7	635,1
0,80	93,0	2,128	0,469	93,0	543,5	636,5
0,90	95,2	1,996	0,524	96,2	541,9	638,1

Таблица 16

Свойства водяного насыщенного пара (по Шюле)
с температурой от 10 до 45° С

t°С	Давление		Удельный объем v , м³/кг	Полная теплота парообразования i_s кал/кг
	в мм рт. столба	в кг/см²		
10	9,21	0,0125	106,4	601,3
11	9,84	0,0134	99,7	
12	10,52	0,0143	94,7	
13	11,23	0,0153	87,9	603,6
14	11,99	0,0163	83,0	
15	12,79	0,0174	77,9	
16	13,64	0,0186	73,2	605,8
17	14,5	0,0197	69,0	
18	15,5	0,0211	65,1	
19	16,5	0,0224	61,4	608,1
20	17,5	0,0238	57,8	
21	18,65	0,0254	54,5	
22	19,8	0,0270	51,4	610,2
23	21,1	0,0287	48,6	
24	22,4	0,0305	45,9	
25	23,8	0,0324	43,4	612,5
26	25,2	0,0343	41,0	
27	26,7	0,0363	38,8	
28	28,35	0,0386	36,8	614,8
29	30,05	0,0408	34,8	
30	31,8	0,0432	32,9	
31	33,7	0,0458	31,2	617,0
32	35,7	0,0486	29,6	
33	37,7	0,0513	28,0	
34	39,9	0,0543	26,0	619,3
35	42,2	0,0573	25,2	
36	44,6	0,0606	23,9	
37	47,1	0,0641	22,7	621,6
38	49,7	0,0676	21,6	
39	52,5	0,0715	20,5	
40	55,3	0,0752	19,5	623,9
41	58,4	0,0795	18,6	
42	61,5	0,0836	17,7	
43	64,8	0,0882	16,8	626,2
44	68,3	0,0930	16,0	
45	71,9	0,0978	15,3	

Таблица 17

Свойства водяного насыщенного пара при давлении
от 1 до 60 ата (по Кноблауху, Райшу и Хаузену)

Давле- ние в ата	Температу- ра кипения в °С	Полная тепло- та испарения i_s кал/кг	Теплота жид- кости q кал/кг	Теплота паро- образования r кал/кг	Уд. объем пара v м³/кг
1	99,08	639,4	99,2	540,2	1,7262
2	119,61	646,9	120,0	526,9	0,9022
3	132,82	651,2	133,5	517,7	0,6169
4	142,91	654,2	143,8	510,4	0,4708
5	151,10	656,4	152,3	504,1	0,3818

Продолжение табл. 17

Давление в ата	Температура кипения в °С	Полная тепло- та испарения i_g кал/кг	Теплота жид- кости q кал/кг	Теплота паро- образования r кал/кг	Уд. объём пара v м³/кг
6	158,07	658,2	159,5	498,7	0,3214
7	164,16	659,5	165,8	493,7	0,2778
8	169,59	660,7	171,6	489,2	0,2447
9	174,52	661,6	176,6	485,0	0,2188
10	179,03	662,5	181,4	481,1	0,1979
11	183,20	663,2	185,4	477,4	0,1807
12	187,03	663,7	189,9	473,8	0,1663
13	190,71	664,2	193,8	470,4	0,1540
14	193,14	664,6	197,4	467,2	0,1434
15	197,37	664,9	200,8	464,1	0,1342
16	200,44	665,3	204,1	461,4	0,1260
17	203,36	665,6	207,3	458,3	0,1189
18	206,16	665,8	210,2	455,6	0,1124
19	208,83	666,0	213,1	452,9	0,1067
20	211,39	666,2	215,9	450,3	0,1015
21	213,85	666,3	218,6	447,7	0,0967
22	216,24	666,4	221,1	445,2	0,0924
23	218,53	666,5	223,6	442,9	0,0884
24	220,75	666,6	226,1	440,5	0,0848
25	222,90	666,7	228,4	438,3	0,0814
26	224,99	666,7	230,7	436,0	0,0783
27	227,02	666,7	232,9	433,8	0,0754
28	228,99	666,8	235,1	431,7	0,0727
29	230,90	666,8	237,2	429,6	0,0702
30	232,77	666,8	239,2	427,5	0,0678
32	236,36	666,7	243,2	423,2	0,0636
34	239,78	666,7	247,0	419,7	0,0598
36	243,05	666,6	250,7	415,9	0,0564
38	246,19	666,4	254,1	412,3	0,0533
40	249,20	666,4	257,5	408,9	0,0505
42	252,09	666,3	260,8	405,5	0,0480
44	254,89	666,1	263,9	402,2	0,0458
46	257,58	666,0	267,0	399,0	0,0437
48	260,19	665,9	270,0	395,9	0,0418
50	262,72	665,7	272,8	392,9	0,0400
55	268,72	665,5	279,7	385,8	0,0361
60	274,32	665,2	286,1	379,0	0,0328

Таблица 18

Насыщенный водяной пар при давлении свыше 60 ата
(приблизённые значения по Шюле)

Давление в ата	Температура кипения в °С	i_g кал/кг	q кал/кг	r кал/кг	Удельный объём v м³/кг
70	284,7	673	297,0	376,0	0,029
80	293,8	668	307,6	360,0	0,025
100	309,7	654	326,4	328,0	0,019
120	323,3	640	344,6	296,0	0,016
150	340,7	618	373,8	244,0	0,011
180	355,6	591	403,2	188,0	0,008
210	368,5	558	441,4	117,0	0,005
224,2	374,0	449	499,0	0	0,003

Удельный объем влажного насыщенного пара определяется по формуле:

$$v_x \approx x \cdot v_s, \quad (16)$$

где v_s — удельный объем сухого насыщенного пара при том же давлении в м³/кг.

Удельный вес (плотность) влажного пара со степенью сухости x определяется по формуле:

$$\gamma_x = \frac{\gamma_s}{x} \text{ кг/м}^3.$$

Теплосодержание перегретого пара определяется по формуле:

$$i_n = i_s + c_p (t_n - t_s) \text{ кал/кг}, \quad (17)$$

где:

c_p — теплоёмкость перегретого пара при постоянном давлении в кал/кг; определяется по опытным данным в зависимости от температуры (значения теплоёмкости перегретого пара, по данным Кноблауха, приведены в таблице 19),

t_n — температура перегретого пара в °С,

t_s — температура насыщенного пара при данном давлении в °С.

Количество тепла, затрачиваемого при перегреве 1 кг влажного насыщенного пара, определяется по формуле:

$$m = \underbrace{(1-x) \cdot r}_{\text{Затрата тепла на испарение влаги}} + \underbrace{c_p (t_n - t_s)}_{\text{Затрата тепла на перегрев пара}} \text{ кал/кг} \quad (18)$$

Удельный вес перегретого пара определяется по формуле (Тумлирца — Линде):

$$\gamma_n = \frac{222 \cdot p_1}{T_1 - 3,4 \cdot p_1} \text{ кг/м}^3, \quad (19)$$

где: $T_1 = 273 + t_n$

p_1 — давление пара в ата.

t_n — температура перегретого пара.

Таблица 19

Средняя теплоёмкость перегретого пара (по Кноблауху)

Температура в °С	Давление в кг/см ² ата							
	8	10	12	14	16	18	20	30
200	0,556	0,584	0,615	0,653	—	—	—	—
220	0,546	0,570	0,596	0,625	—	—	—	—
240	0,539	0,559	0,581	0,605	0,631	0,659	0,689	—
260	0,533	0,551	0,570	0,590	0,611	0,635	0,658	0,806
280	0,527	0,541	0,562	0,579	0,597	0,617	0,636	0,751
300	0,524	0,539	0,555	0,570	0,585	0,603	0,619	0,714
320	0,521	0,535	0,548	0,563	0,577	0,592	0,607	0,686
340	0,518	0,532	0,545	0,557	0,570	0,583	0,597	0,665
360	0,516	0,529	0,540	0,552	0,565	0,576	0,588	0,648
380	0,515	0,527	0,538	0,548	0,560	0,570	0,581	—
400	0,514	—	—	—	—	—	—	—

В таблице 20 дан удельный объём перегретого пара в зависимости от температуры, а в таблице 21 — теплосодержание перегретого пара для различных давлений и температур, употребительных для речных паросиловых установок.

Таблица 20

Удельный объём перегретого пара в м³/кг (по Кноблауху, Райшу, Хаузену и Коху 1932 года)

Давление в ата	Температура t_n °C					
	200	250	300	320	340	350
5	0,4338	0,4841	0,5332	0,5527	0,5720	0,5816
6	0,3594	0,4020	0,4432	0,4596	0,4758	0,4838
7	0,3063	0,3432	0,3690	0,3930	0,4070	0,4140
8	0,2664	0,2992	0,3308	0,3433	0,3555	0,3616
9	0,2353	0,2650	0,2934	0,3044	0,3155	0,3210
10	0,2104	0,2376	0,2633	0,2733	0,2833	0,2882
11	0,1917	0,2170	0,2409	0,2501	0,2593	0,2638
12	0,1730	0,1964	0,2184	0,2268	0,2353	0,2394
13	0,1596	0,1818	0,2028	0,2102	0,2181	0,2220
14	0,1462	0,1672	0,1862	0,1935	0,2008	0,2044
15	—	0,1561	0,1742	0,1811	0,1880	0,1913
16	—	0,1450	0,1621	0,1686	0,1751	0,1783

III. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

Переход тепла от одного тела к другому может осуществляться посредством теплопроводности, конвекции и лученспускания (излучения). Во многих случаях теплопередача осуществляется одновременно всеми тремя способами (например, переход тепла от газов в дымоходах через стенки котла к воде, находящейся в котле). Процесс теплопередачи возможен при разности температур, причём тепло передаётся от более нагретого тела к менее нагретому до тех пор, пока температура их не уравнивается. Количество тепла, передаваемого путём теплопроводности через плоскую стенку, вычисляется по уравнению:

$$Q = \frac{\lambda}{\delta} \cdot F (t_1 - t_2) \text{ кал/кг.} \quad (20)$$

где: F — площадь стенки в м²,

δ — толщина стенки в м,

t_1 — температура более нагретой части в °C,

t_2 — температура менее нагретой части стенки в °C,

λ — коэффициент теплопроводности (кал/м · час · °C).

Коэффициентом теплопроводности называется то количество тепла, которое проходит в час между двумя противоположными плоскостями куба, выполненного из данного материала, с длиной ре-

Таблица 21

ТЕПЛОСОДЕРЖАНИЕ ВОДЯНОГО ПЕРЕГРЕТОГО ПАРА (ПО КНОБЛАУХУ, РАЙШУ, ХАУЗЕНУ, КОХУ)

Давление в атм	Т е м п е р а т у р а в о С												
	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310	320
6	680,7	685,8	690,8	695,9	700,9	705,9	710,9	715,0	720,9	725,9	730,8	735,8	740,7
7	679,3	684,5	689,6	694,6	699,8	704,9	710,0	715,0	720,0	725,1	730,1	735,1	740,1
8	678,0	683,3	688,5	693,7	698,8	704,0	709,1	714,3	719,4	724,4	729,4	734,4	739,4
9	676,5	681,9	687,3	692,6	697,8	703,0	708,2	713,4	718,5	723,6	728,7	733,8	738,8
10	675,1	680,6	686,1	691,5	696,8	702,1	707,3	712,5	717,7	722,8	728,0	733,1	738,2
11	673,7	679,3	684,8	690,3	695,8	701,2	706,5	711,7	717,0	722,2	727,4	732,5	737,6
12	672,2	678,0	683,8	689,4	694,9	700,3	705,7	710,9	716,2	721,4	726,7	731,8	737,0
13	670,7	676,7	682,6	688,3	693,9	699,4	704,9	710,2	715,5	720,8	726,1	731,3	736,5
14	669,2	675,3	681,4	687,2	692,9	698,5	704,0	709,4	714,8	720,1	725,4	730,6	735,9
15	667,7	674,1	680,4	686,2	691,9	697,6	703,2	708,6	714,1	719,4	724,8	730,1	735,4
16	—	672,6	679,0	685,0	690,9	696,6	702,3	707,8	713,3	718,7	724,2	729,5	734,8

бра в 1 м при разности температур обеих плоскостей в 1°C и при условии, что остальные грани куба защищены от передачи тепла. Коэффициент теплопроводности различен для различных материалов и зависит также от температуры.

В таблицах 22, 23, 24 даны значения коэффициентов теплопроводности для некоторых наиболее важных материалов и тел.

Таблица 22

Средние значения коэффициентов теплопроводности некоторых материалов

М а т е р и а л	Коэффициент теплопроводности λ кал/м · час · $^{\circ}\text{C}$
Железо	40 — 50
Медь	300—340
Латунь	85—100
Кирпичная кладка	0,4—0,6
Сосновое дерево поперек волокон	0,14
Сосновое дерево вдоль волокон	0,3
Стекло	0,5—0,9
Асбест	0,16—0,2
Котельная накипь	0,7—2,5
Сажа	0,04—0,03
Масло	0,1—0,16
Современный высокоэффективный теплоизоляционный материал	0,08—0,1

Таблица 23—24

Коэффициент теплопроводности воды и воздуха

а) Вода

б) Воздух

Температура в $^{\circ}\text{C}$	Коэффициент теплопроводности λ кал/м · час · $^{\circ}\text{C}$	Температура в $^{\circ}\text{C}$	Коэффициент теплопроводности λ кал/м · час · $^{\circ}\text{C}$
0	0,477	0	0,0202
10	0,495	+ 20	0,0215
50	0,554	+ 100	0,0261
100	0,586	+ 200	0,0318
160	0,587		
200	0,572		

Количество тепла, передаваемого от одного тела к другому при непосредственном соприкосновении тел (например, от газа к металлической стенке, от стенки к жидкости и наоборот), определяется по уравнению:

$$Q = \alpha \cdot F(T - t) \text{ кал/час,} \quad (21)$$

где: F — поверхность соприкосновения (поверхность нагрева, поверхность охлаждения) в м^2 ,

T — температура более нагретого тела (отдающего тепло),

t — температура менее нагретого тела (воспринимающего тепло),

α — коэффициент теплоотдачи в кал/м² · час · °С, т. е. количество тепла, передаваемого в течение часа от одного тела к другому при величине поверхности соприкосновения тел в 1 м² и при разности температур в 1°С.

Следовательно:

$$\alpha = \frac{Q}{(T-t) \cdot F},$$

где $T-t$ — разность температур.

В котельной технике приходится встречаться главным образом с явлением теплоотдачи от твёрдых тел жидкостям и газам или с явлением перехода тепла от газов и пара к металлической стенке. При передаче тепла от газов к стенке общий коэффициент теплопередачи учитывает количество тепла, передаваемого как путём непосредственного соприкосновения газа со стенкой за счёт теплопроводности и конвекции (перемешивания частиц), так и путём лучеиспускания.

Коэффициент теплоотдачи зависит, в основном, от:

1) природы теплоносителей (газ, пар, жидкость), отдающих и воспринимающих тепло;

2) состояния теплоносителей, т. е. от того, находятся ли они в покое или движутся относительно стенки, через которую происходит теплообмен;

3) скорости движения теплоносителя (если он движется);

4) направления движения теплоносителя относительно стенки (например, параллельно стенкам труб, воспринимающим тепло от газа, или перпендикулярно к ним);

5) температуры теплоносителя и стенки.

При расчётах коэффициент теплоотдачи определяют с учётом указанных факторов по специальным формулам или графикам, составленным по результатам экспериментальных исследований.

Ориентировочные значения коэффициентов теплоотдачи для основных случаев теплообмена приведены в таблице 25.

Таблица 25
Приближённые значения коэффициентов теплоотдачи

Условия перехода тепла	α кал/м ² · час · °С
При переходе тепла от кипящей жидкости к металлической стенке или наоборот . . .	4000—6000
При переходе тепла от стенки к перегретому пару	500—1200
При переходе тепла от обмуровки котлов и печей к неподвижному воздуху	4—10
При переходе тепла от некипящей жидкости к стенке трубы при скорости жидкости 1—2 м/сек.	5000
При переходе тепла от газов, движущихся со скоростью 5—10 м/сек. к стенке	15—35

При передаче тепла лученспусканием часть тепла одного тела, имеющего более высокую температуру, передаётся другому в виде лучистой энергии. Лучистая энергия поглощается менее нагретым телом, температура которого повышается.

Лучистая энергия передаётся на расстояние как через пространства, заполненные газами, так и через совершенно пустые (безвоздушные) пространства.

Расстояние между телами, обменивающимися лучистой энергией, не оказывает влияния на количество передаваемого тепла при условии, что на пути лучей, посылаемых более нагретым телом менее нагретому, нет какого-либо третьего постороннего тела, способного поглотить часть проходящих лучей и превратить их в тепло.

Количество тепловой энергии, излучаемой телом, по закону Стефана—Больцмана, пропорционально коэффициенту лученспускания C и абсолютной температуре тела в четвертой степени, т. е.:

$$Q_{\lambda} = C \left(\frac{T}{100} \right)^4 \text{ кал/час,} \quad (22)$$

где $T = t + 273$ — абсолютная температура тела.

Коэффициент лученспускания представляет количество тепла в калориях, излучаемого телом с поверхностью в 1 м^2 в час при $\left(\frac{T}{100} \right)^4 = 1$, и для практических (реальных) тел определяется по формуле:

$$C = C_s \cdot E, \quad (23)$$

где C_s — коэффициент лученспускания абсолютно чёрного тела в $\text{кал/м}^2 \cdot \text{час} \cdot ^\circ\text{K}^4$.

$E = \frac{C}{C_s}$ — отношение коэффициента лученспускания данного «реального» тела к коэффициенту лученспускания абсолютно чёрного тела (степень черноты).

Абсолютно чёрным телом называется такое идеальное тело, которое способно поглощать все падающие на него лучи и обладает наибольшей лученспускающей способностью. Лученспускающая и лучепоглощающая способности всех реальных тел меньше, чем абсолютно чёрного тела, и поэтому величина E для практических тел всегда меньше единицы.

Коэффициент лученспускания абсолютно чёрного тела:

$$C_s = 4,96 \text{ кал/м}^2 \cdot \text{час} \cdot ^\circ\text{K}^4.$$

Отношение коэффициента лученспускания для некоторых употребительных материалов к коэффициенту лученспускания абсолютно чёрного тела дано в таблице 26.

Если излучение происходит между двумя телами (например, между раскалённым слоем топлива на колосниковой решётке и металлической стенкой котла), то теплопереход совершается путём лученспускания, как от более нагретого тела к менее нагретому, так и наоборот.

Таблица 26

Значения коэффициента $E = \frac{C}{C_s}$

Материал	E
Чугун шероховатый	0,94
Железо матовое окислённое	0,96
Железо светлое полированное . . .	0,29
Медь полированная	0,13—0,17
Латунь матовая	0,22
Каменная кладка	0,93
Сажа	0,95
Вода	0,67

На основании закона Стефана—Больцмана, количество тепла, приобретаемого в результате этого процесса менее нагретым телом, вычисляется по уравнению:

$$Q_L = C_0 \cdot H_L \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \text{ кал/час,} \quad (24)$$

где: T_1 — абсолютная температура более нагретого тела,

T_2 — абсолютная температура менее нагретого тела,

H_L — поверхность, воспринимающая тепло путём лучеиспускания.

C_0 — приведённый коэффициент лучеиспускания в $\text{кал/м}^2\text{час}^\circ\text{K}^4$, определяемый по формуле¹:

$$C_0 = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_s}}, \quad (25)$$

здесь C_1 и C_2 — коэффициенты лучеиспускания тел, участвующих в теплообмене,

C_s — коэффициент лучеиспускания абсолютно чёрного тела.

Коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием определяется по формуле:

$$\alpha_L = \frac{C_0 \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}{\Delta t} \text{ кал/м}^2 \text{ час,}$$

где Δt — разность температур обеих лучеиспускающих поверхностей.

Количество тепла, передаваемого через стенку от одного теплоносителя (жидкости, газа или пара) к другому с меньшей температурой (жидкости, газу или пару), вычисляется по уравнению:

$$Q = K \cdot F \cdot \Delta t \text{ кал/м}^2 \cdot \text{час,} \quad (26)$$

¹ Формула справедлива для того случая, когда лучеиспускающая и луче-воспринимающая поверхности параллельны и равны по величине. При ином расположении поверхностей пользуются следующей приближённой формулой:

$$C_0 = C_1 \cdot \frac{C_2}{C_s}$$

где: F — поверхность стенки, через которую передаётся тепло, в м^2 ,

Δt — разность температур теплоносителей в $^{\circ}\text{C}$,

K — общий коэффициент теплопередачи в $\text{кал}/\text{м}^2 \cdot \text{час} \cdot ^{\circ}\text{C}$.

Коэффициентом теплопередачи (учитывающим в общем случае интенсивность передачи тепла как непосредственным соприкосновением, так и лученспусканием) называется количество тепла, передаваемого от теплоносителя с большей температурой к теплоносителю с меньшей температурой через стенку площадью в 1 м^2 в течение часа при разности температур между телами в 1°C .

Величина коэффициента теплопередачи зависит от:

1) материала стенки, через которую передаётся тепло (т. е. от коэффициента теплопроводности материала стенки), и её толщины; если стенка покрыта слоями накипи и сажи, то коэффициент теплопередачи зависит от толщины и этих слоев и их коэффициентов теплопроводности;

2) рода теплоносителя, отдающего тепло, и теплоносителя, воспринимающего тепло (т. е. будет ли это газ, пар или жидкость);

3) величины разности температур вещества, отдающего тепло, и вещества, воспринимающего тепло;

4) состояния тел, между которыми происходит теплообмен, т. е. находятся ли они в спокойном состоянии или в движении. Если теплоноситель движется, то коэффициент теплопередачи зависит от скорости движения, причём с возрастанием скорости движения теплоносителя коэффициент теплопередачи возрастает. Если известен коэффициент теплоотдачи от теплоносителя, отдающего тепло к стенке, а также от стенки к теплоносителю, воспринимающему тепло, то общий коэффициент теплопередачи вычисляется по формуле:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \text{ кал}/\text{м}^2 \cdot \text{час} \cdot ^{\circ}\text{C}. \quad (27)$$

В этой формуле:

α_1 — коэффициент теплоотдачи от теплоносителя, отдающего тепло к стенке, в $\text{кал}/\text{м}^2 \cdot \text{час} \cdot ^{\circ}\text{C}$,

α_2 — коэффициент теплоотдачи от стенки к теплоносителю, воспринимающему тепло, в $\text{кал}/\text{м}^2 \cdot \text{час} \cdot ^{\circ}\text{C}$,

δ — толщина стенки в метрах,

λ — коэффициент теплопроводности материала стенки в $\text{кал}/\text{м} \cdot \text{час} \cdot ^{\circ}\text{C}$.

Если стенка состоит из нескольких слоев, имеющих различные коэффициенты теплопроводности, то вместо $\frac{\delta}{\lambda}$ в формулу подставляется сумма:

$$\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n} = \Sigma \frac{\delta}{\lambda}, \quad (28)$$

где: δ_1, δ_2 и т. д. — толщины отдельных слоев,

λ_1, λ_2 и т. д. — коэффициенты теплопроводности материала отдельных слоев.

При расчёте передаваемого количества тепла в котельных установках надо различать проточные и циркуляционные поверхности нагрева.

При проточных поверхностях нагрева пар, газ или жидкость вступают в соприкосновение с поверхностью нагрева на одном её конце, проходят вдоль поверхности, воспринимают тепло и выходят на другом её конце. К такому типу поверхностей нагрева относятся поверхности трубчатых подогревателей воды, воздуха, пара. Так как в проточных поверхностях нагрева вдоль поверхности (например, при протекании пара в трубках подогревателя) меняется как температура теплоносителя, отдающего тепло, так и температура теплоносителя, воспринимающего тепло, то при расчёте количества передаваемого тепла приходится вычислять среднюю разность температур.

Средняя разность температур может быть приближённо вычислена по уравнению:

$$\Delta t = \left(\frac{t_n + t_k}{2} - \frac{t_1 + t_2}{2} \right), \quad (29)$$

где: t_n — начальная температура теплоносителя, отдающего тепло,
 t_k — конечная температура теплоносителя, отдающего тепло,
 t_1 — начальная температура теплоносителя, воспринимающего тепло,
 t_2 — конечная температура теплоносителя, воспринимающего тепло.

Более точно среднюю разность температур вычисляют по логарифмическому уравнению (средняя логарифмическая разность температур):

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{нач} - \Delta t_{кон}}{\ln \frac{\Delta t_{нач}}{\Delta t_{кон}}}, \quad (30)$$

где: $\Delta t_{нач}$ — разность температур теплоносителей в начале поверхности нагрева,

$\Delta t_{кон}$ — разность температур теплоносителей в конце поверхности нагрева.

Значения $\ln$ (натурального логарифма) для чисел — см. в приложении.

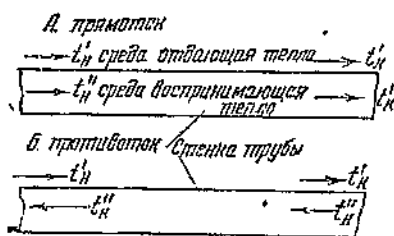


Рис. 1. Проточная поверхность нагрева.

Проточные поверхности нагрева могут работать по принципу прямотока (газ или жидкость, отдающие тепло, движутся параллельно газу или жидкости, воспринимающим тепло) или по принципу противотока (газ или жидкость, отдающие тепло, движутся навстречу газу или жидкости, воспринимающим тепло, рис. 1).

Для случая прямотока средняя разность температур вычисляется по формуле:

$$\Delta t = \frac{(t'_n - t''_n) - (t'_k - t''_k)}{\ln \frac{t'_n - t''_k}{t'_k - t''_n}}. \quad (30)$$

Для случая противотока средняя разность температур вычисляется по формуле:

$$\Delta t = \frac{(t'_n - t''_k) - (t'_k - t''_n)}{\ln \frac{t'_n - t''_n}{t'_k - t''_k}}, \quad (30')$$

где: t'_n — начальная температура среды, отдающей тепло,
 t''_n — начальная температура среды, воспринимающей тепло,
 t'_k — конечная температура среды, отдающей тепло,
 t''_k — конечная температура среды, воспринимающей тепло.

При циркуляционных поверхностях нагрева теплоноситель, воспринимающий тепло (например, вода в паровом котле), соприкасаясь с поверхностью нагрева, вследствие конвекции частиц, находится в постоянном круговом движении, и температура теплоносителя, воспринимающего тепло вдоль поверхности нагрева, может приниматься постоянной.



Рис. 2. Циркуляционная поверхность нагрева.

Температура второго теплоносителя, протекающего вдоль поверхности (например, газа в дымогарных трубках котла), изменяется, так как этот теплоноситель отдаёт тепло поверхности нагрева (рис. 2).

Средняя разность температур для данного случая теплопередачи вычисляется по формуле:

$$\Delta t = \frac{t'_n - t'_k}{\ln \frac{t'_n - t}{t'_k - t}}, \quad (30'')$$

где: t'_n — начальная температура теплоносителя, отдающего тепло,
 t'_k — конечная температура теплоносителя, отдающего тепло,
 t — температура теплоносителя, воспринимающего тепло (вода в котле), — постоянная вдоль поверхности нагрева.

Ориентировочные значения коэффициентов теплопередачи, учитывающие переход тепла, как за счёт непосредственного соприкосно-

вления (т. е. конвекции и теплопроводности), так и за счёт лучеиспускания, для важнейших случаев теплообмена даны в таблице 27.

Таблица 27

Значения коэффициентов теплопередачи для различных случаев теплообмена, наиболее часто встречающихся в практике судовой теплотехники

Условия перехода тепла	K кал/м ² .час °С
1. От продуктов сгорания к воде через стенку дымогарной трубки в огнетрубных котлах	15—17
2. От продуктов сгорания к пару через стенку трубки перегревателя — для перегревателей, установленных в дымоходе огнетрубных котлов (поперечное омывание газами трубок), при скорости движения пара в трубках 15—20 м/сек.	20—25
3. От продуктов сгорания к воздуху в воздухоподогревателе при скорости движения газов 5—10 м/сек.	13—15
4. От продуктов сгорания к воде, движущейся по железным трубкам экономайзера для подогрева питательной воды	12—15
5. От конденсирующегося пара к воде в трубках водоподогревателя при скорости движения воды 0,1—0,3 м/сек.	800—1200
6. От пара к воздуху, через чугунную ребристую грелку парового отопления (при высоте ребер около 50 мм)	6,5
7. От пара к воздуху через стенку неизолированной трубы при температуре пара 150—200°С	11—16
8. От пара к воздуху через стенку паропровода, изолированного асбестом, при температуре пара 100—200°С	2,5—3,5
9. От пара к воздуху через стенку паропровода, изолированного высокоэффективными материалами (совелит, вулканит)	0,8—1,0
10. От нефти, находящейся в цистерне, к воде, через стенки цистерны (при движении судна)	40—45
11. От нефти к воздуху через стенки цистерны	3,0

В таблице 28 приведены эмпирические формулы для определения коэффициентов теплопередачи в двух важнейших для речных котельных установок случаях теплообмена; при передаче тепла от газов к воде через стенку дымогарной трубки котла и при передаче тепла от пара к воде, протекающей в трубках (случай теплообмена в подогревателе питательной воды). Обе формулы — приближённые и дают зависимость коэффициента теплопередачи только от скорости теплоносителя, движущегося внутри трубки.

Практически, вследствие загрязнений поверхности нагрева и ухудшения теплопередачи, величину K , найденную по формулам, следует умножать на коэффициент $\xi = 0,95 \div 0,85$.

Эмпирические формулы для определения коэффициента теплопередачи K в некоторых случаях теплообмена

Условия теплообмена	Формула	Примечание
От продуктов сгорания к воде через стенку дымогарной трубки отнетрубных котлов	$K = 6 + 4,4 \sqrt{W}$	W — скорость газов в м/сек.
От конденсирующегося пара к воде в трубках подогревателя	$K = 1700 \sqrt{W}$	W — скорость воды в трубках подогревателя в м/сек.

IV. ТОПЛИВО ДЛЯ ПАРОВЫХ КОТЛОВ

Топливом служат горючие материалы, используемые для получения тепла. По его агрегатному состоянию топливо разделяют на твердое, жидкое и газообразное.

Различные виды топлива представляют углеродистые и углеводородистые соединения органического, по преимуществу растительного происхождения.

На речных судах в котельных установках сжигают топливо следующих видов:

твердое — дрова, ископаемые угли (каменные угли, антрациты), жидкое — мазут (продукт переработки нефти).

§ 1. СОСТАВ ТОПЛИВА

Элементарный анализ топлива показывает, что всякое топливо состоит из двух частей: горючей и негорючей. Горючая часть твердого или жидкого топлива состоит из углерода, водорода и горючей (летучей) серы. Негорючая часть состоит из азота, кислорода, влаги (воды), минеральных примесей (образующих при сгорании золу) и минеральной (сульфатной) серы. Наличие и количественное соотношение в топливе указанных элементов зависит от вида и сорта топлива, от характера его предварительной обработки; от условий доставки и хранения.

Влага и минеральные примеси, как негорючие вещества, — нежелательные элементы в топливе и составляют так называемый балласт. Чем больше балласта в топливе, тем оно менее ценно для технического использования. К балласту относят также и серу. Хотя часть серы и является горючим элементом, но получающийся при горении серы сернистый газ в соединении с конденсирующимися парами воды может образовать сернистую и серную

кислоту, сильно разъедающую металлические части котельной установки. Сернистый газ вредно влияет также на здоровье обслуживающего персонала. Особенно вредно присутствие серы в нефтетопливе (в так называемом сернистом мазуте). Сернистые соединения, выделяющиеся из нефти, содержащей серу (сероводород, меркаптаны), даже при её хранении при обычных температурах, отравляюще действуют на здоровье судовых команд, а также на перевозимые грузы. Поэтому применение мазута со значительным содержанием серы (1% и более) должно производиться с большой осторожностью и с принятием специальных предохранительных мер (герметизация цистерн и трубопроводов, усиленный обмен воздуха в судовых помещениях и т. д.). Входящие в рабочий¹ состав топлива горючие и негорючие элементы в таблицах и технических расчётах обозначаются следующими буквами латинского алфавита:

C_p — содержание углерода в процентах
 H_p — содержание водорода "
 O_p — содержание кислорода "
 N_p — содержание азота "
 S_p — содержание летучей серы "
 A_p — содержание минеральных примесей (зола и негорючей серы)
 W_p — содержание влаги в процентах

Содержание отдельных элементов в горючей массе (принятой за 100% веса), к которой кроме горючих элементов относят также кислород и азот в процентах по весу, обозначается теми же буквами с индексом g . Например, содержание углерода C_g % и т. д.

Состав горючей массы твёрдого или жидкого топлива в общем виде может быть представлен уравнением:

$$C_g + H_g + O_g + N_g + S_g = 100\%.$$

Состав рабочей массы (рабочего топлива) выражается уравнением:

$$C_p + H_p + O_p + N_p + S_p + A_p + W_p = 100\%.$$

Если известен рабочий состав топлива, содержание отдельных элементов в горючей массе может быть вычислено пересчётом по формуле:

$$I_g = I_p \frac{100}{100 - (A_p + W_p)} \quad (31)$$

В этой формуле под I понимается содержание какого-либо элемента в рабочем топливе (C_p , H_p — и т. д.) или в горючей массе топлива (C_g , H_g и т. д.); A_p — содержание золы в рабочем составе в процентах, W_p — содержание влаги в рабочем составе в процентах.

¹ Рабочим составом называется состав топлива в том виде, в каком оно поступает в котельную.

Если, наоборот, известны состав горючей массы в процентах по весу, а также содержание влаги и золы в рабочем составе, то содержание каждого элемента в рабочем составе определяется пересчётом по формуле:

$$I_p = I_c \frac{100 - (A_p + W_p)}{100} \quad (31)$$

При нагревании без доступа воздуха твёрдое топливо распадается на две части — летучую и твёрдую. Летучая часть состоит из паров воды и горючих летучих веществ, которыми условно называют выделяющиеся из топлива при его нагревании углеводороды (т. е. соединения углерода с водородом). Количество горючих летучих в топливе уменьшается по мере увеличения содержания углерода в топливе.

Содержание в топливе летучих является важной характеристикой топлива, определяющей как более целесообразный способ сжигания топлива и конструкцию топочного устройства, так и характер самого горения топлива.

Топливо, содержащее много летучих, горит с так называемым длинным пламенем; топливо, содержащее мало летучих — коротким пламенем. Горение топлива с малым выходом летучих происходит главным образом в слое, где и развивается высокая температура. Так как на характер горения топлива оказывает основное влияние больший или меньший выход горючих летучих веществ, то для характеристики топлива в таблицах по топливу содержание летучих обычно указывается в пересчёте на горючую массу.

Твёрдая часть топлива после выхода летучих представляет кокс, в состав которого входят углерод и минеральные примеси, образующие золу и шлаки.

§ 2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОПЛИВА

Основными техническими характеристиками твёрдого топлива являются:

- 1) элементарный состав топлива (содержание отдельных элементов в топливе в процентах по весу);
- 2) выход летучих на горючую массу (в процентах по весу);
- 3) спекаемость топлива. Спекаемость — свойство кокса. Если кокс получается в виде порошка, топливо называется неспекающимся. По степени крепости и по виду различают кокс слитый, кокс сплавленный, кокс вспученный;
- 4) теплотворная способность рабочего топлива, т. е. количество тепла в килокалориях, выделяющегося при полном сгорании 1 кг топлива;
- 5) температура размягчения и жидкоплавкого состояния золы топлива, зависящая от свойств и состава минеральных примесей топлива.

Золу, в зависимости от температуры начала её деформации, принято считать:

легкоплавкой, если температура начала деформации ниже 1000°C ;

среднеплавкой, если температура начала деформации от 1000 до 1200°C ;

тугоплавкой, если температура начала деформации более 1200°C .

Основными характеристиками жидкого топлива являются:

1) элементарный состав топлива (в процентах по весу);

2) удельный вес. Удельным весом нефтепродукта называется отношение веса нефтепродукта при температуре $+20^{\circ}\text{C}$ к весу воды в том же объеме при температуре $+4^{\circ}\text{C}$ (обозначается $d_{4^{20}}$);

3) температура вспышки. Температурой вспышки называется температура, при которой пары нефтепродукта, нагреваемые в определенных условиях, образуют с окружающим воздухом смесь, вспыхивающую при поднесении к ней пламени. Температуру вспышки определяют по методу Мартенса-Пенского (закрытый способ) или Бренкена (открытый способ). Выявление температуры вспышки производится для характеристики нефтепродукта, определяющей его огнеопасность.

4) относительная вязкость — отвлеченное число, представляющее, при определенных температурных условиях, отношение времени истечения известного количества испытуемого нефтепродукта ко времени истечения воды при тех же условиях. Относительная вязкость измеряется в градусах Энглера. Числом градусов по Энглеру называется отношение времени истечения из вискозиметра Энглера 200 мл (миллилитров)¹ испытуемого нефтепродукта при данной температуре ко времени истечения 200 мл воды при температуре 20°C . Вязкость по Энглеру обычно определяется при температуре нефтепродукта 50 или 75°C ;

5) температура застывания — та температура, при которой нефтепродукт теряет свою текучесть (подвижность). Застываемость объясняется содержанием в мазуте парафина. Определение температуры застывания необходимо, чтобы показать, при какой температуре топливо способно свободно перетекать по трубопроводам.

6) теплотворная способность рабочего топлива (кал/кг).

§ 3. ТЕПЛОТВОРНАЯ СПОСОБНОСТЬ ТОПЛИВА

Различают высшую и низшую теплотворную способность (или теплотворную способность высшего и низшего предела). Под высшей теплотворной способностью понимается всё тепло, которое получается в лабораторных условиях при полном сгорании 1 кг топлива при условии, что водород топлива сгорает с образованием воды, а тепло на испарение влаги, содержащейся в топливе и по-

¹ Миллилитр — $\frac{1}{1000}$ литра.

лученной при горении водорода топлива, не затрачивается. Теплотворная способность высшего предела обозначается: Q^v , кал/кг.

Низшей теплотворной способностью (Q^u , кал/кг) называется количество тепла, выделяющегося при сгорании 1 кг топлива, за вычетом из него тепла, затраченного на испарение влаги топлива, а также влаги, случившейся при сгорании водорода топлива.

Следовательно, Q^u меньше Q^v .

Между Q^u и Q^v существует следующее соотношение:

$$Q^u_p = Q^v_p - 6(9H_p + W_p) \text{ кал/кг.}$$

Низшая теплотворная способность — основная характеристика топлива, так как практически, при сжигании топлива в топках паровых котлов, вследствие высокой температуры, развивающейся при горении, водород, сгорая, даёт всегда пар, а не воду.

Далее для различных топлив указывается только низшая теплотворная способность, как принятая в СССР при всех расчётах.

Величина теплотворной способности зависит от вида топлива, его состава и большей или меньшей засорённости топлива балластом. Так как основными горючими элементами в топливе являются углерод и водород, то чем больше этих элементов в топливе, тем выше и его теплотворная способность. С увеличением содержания в топливе минеральных примесей и особенно влаги теплотворная способность топлива резко снижается.

Теплотворная способность топлива может быть определена:

1) лабораторным способом — путём сжигания образца топлива в калориметрической бомбе,

2) по эмпирическим формулам — на основании данных химического анализа топлива.

Низшая теплотворная способность твёрдого и жидкого топлива определяется данными элементарного состава по следующей формуле Д. И. Менделеева, дающей для топлив СССР результаты, весьма близкие к лабораторным:

$$Q^u_p = 81 C_p + 300 H_p - 26 (O_p - S_p) - 6(9H_p + W_p) \text{ кал/кг,} \quad (32)$$

где C_p , H_p и т. д. — содержание отдельных элементов в топливе в процентах по весу.

Для определения теплотворной способности дров могут быть использованы более простые формулы.

Горючий состав дров в зависимости от породы почти не изменяется. Поэтому теплотворная способность дров меняется только за счёт изменения содержания в них влаги и золы. Содержание влаги зависит от времени рубки дров, продолжительности их воздушной сушки, породы, способа доставки (гужевой, сплавной) и т. д., а содержание золы зависит главным образом от способа доставки (содержание золы в сплавных дровах на 2—3% больше, чем в дровах сухопутной доставки).

Теплотворную способность дров можно определять без существенной ошибки и не имея данных элементарного анализа, зная только содержание в них влаги и способ доставки к месту потребления.

Для определения Q_p^* дров обычно пользуются следующими формулами проф. Надёжина:

для дров сухопутной доставки

$$Q_p^* = 4370 - 49,7 W_p \text{ кал/кг}; \quad (33)$$

для славных дров

$$Q_p^* = 3870 - 44,5 W_p \text{ кал/кг}. \quad (31)$$

Влага в дровах разделяется на внешнюю и внутреннюю (гигроскопическую). Внешняя влага удаляется путём воздушной сушки древесины при температуре 30—40°С (например в котельной). Состояние древесины, при котором из неё удалена вся внешняя влага, определяется по прекращению изменения веса высушиваемого образца.

Гигроскопическая влага удаляется только при сушке опилок при температуре не ниже 105°С. Гигроскопическая влага дров после их сушки при температуре 30—40°С является величиной более или менее постоянной, составляющей в среднем 7—8%. Содержание внешней влаги в дровах колеблется в широких пределах, в зависимости от породы дров, времени заготовки их, продолжительности сушки и т. д.

Свежерубленые дрова обладают весьма большой влажностью. Обычно в растущем дереве общая влажность (внешняя и гигроскопическая) составляет от 45 до 60%. В молодых частях дерева влаги больше, чем в старых. В твёрдых породах (дуб, бук) влага имеется до 45%, в мягких лиственных (осина, берёза) — до 50%, в хвойных (сосна, ель) — до 60%.

Содержание влаги в стволах растущих деревьев осенью и зимой наименьшее, а летом — наибольшее. Поэтому лучшим временем для заготовки дров являются поздняя осень и начало зимы.

Свежерубленая древесина до употребления в качестве топлива подвергается воздушной сушке в течение 1—1,5 года. Сушка дерева на открытом воздухе происходит до так называемого воздушно-сухого состояния, т. е. состояния устойчивого равновесия между влажностями дерева и окружающего воздуха. Минимальное содержание влаги в дровах при сушке их на открытом воздухе составляет 15—18%.

Скорость воздушной сушки зависит от вида древесины, т. е. от того, подвергается ли сушке неразделанная древесина или распиленная, расколотая и обесшкуренная.

Практика показывает, что скорость сушки на воздухе зависит, при всех прочих равных условиях, от вида полена. Обесшкуренное и расколотое полено сохнет значительно скорее, чем необесшкуренный кругляк. Кора является значительным препятствием для быстрого удаления влаги из дерева. У необесшкуреного полена испарение влаги происходит только с торца, а у обесшкуреного — по всей поверхности.

Среднее содержание влаги в дровах, в зависимости от продолжительности воздушной сушки, указано в таблице 29.

Таблица 29

Содержание общей влаги в дровах в зависимости от продолжительности воздушной сушки

Породы дров	Содержание влаги в процентах после рубки через		
	6 м.с.	1 год	1 1/2 года
Дуб	29,6	23,8	20,7
Бук	23,2	19,1	17,4
Берёза	23,3	18,1	16,0
Ольха	24,1	20,2	18,8
Осина	31,0	21,6	15,9
Ель	29,3	18,5	15,8
Сосна	29,3	18,5	15,8

В производственных условиях содержание внешней влаги в дровах определяют следующим образом. Образец топлива взвешивают и затем высушивают над котлами при температуре 30—40° С в течение 2—3 суток до тех пор, пока не прекратится уменьшение веса образца вследствие удаления влаги (образец подсушивается до постоянного веса). Тогда разница в весе образца древесины до сушки и после неё, делённая на вес образца до сушки и умноженная на 100, даст процентное содержание внешней влаги в дровах:

$$W_{вн} = \frac{G_1 - G_2}{G_1} \cdot 100\% . \quad (35)$$

где: G_1 — вес образца до сушки;

G_2 — вес образца после сушки до постоянного веса.

Для подсчёта общей влаги (внешней и гигроскопической) следует пользоваться формулой:

$$W = W_{вн} + W_2 \frac{100 - W_{вн}}{100} \% , \quad (36)$$

где W_2 — гигроскопическая влажность древесины.

Вес 1 м³ дров любой влажности, зная вес 1 м³ абсолютно сухих дров (см. таблицу 33), можно определять по формуле:

$$G_x = \frac{100}{100 - W_x} \cdot G_{сух} \text{ кг/м}^3 . \quad (37)$$

Если известен рабочий состав дров при определённой влажности (W_p %), то содержание отдельных элементов в составе топлива при другой влажности (например, после подсушки дров до влажности W_x) следует подсчитывать по формуле:

$$I_x = \frac{I_p (100 - W_x)}{100 - W_p} , \quad (38)$$

где: I_x — процентное содержание какого-либо элемента в топливе при влажности W_x % ,

I_p — процентное содержание данного элемента в рабочем составе топлива при влажности W_p %.

Содержание летучих в дровах (на горючую массу) составляет $V_p = 84-85\%$.

Пересчёт теплотворной способности горючей массы топлива (безводной и беззольной) на рабочую производится по формуле:

$$Q_p^H = Q_p^H \frac{100 - (A_p + W_p)}{100} - 6W_p \text{ кал/кг}, \quad (39)$$

где Q_p^H — теплотворная способность горючей массы топлива в кал/кг.

В таблицах 30—41 даны характеристики основных видов твёрдого и жидкого топлива, употребляющегося для паровых котлов.

Таблица 30

Горючий состав дров различных пород

Порода дерева	Содержание в %		
	C ₂	H ₂	O ₂ + N ₂
Дуб	50,0	6,05	43,95
Берёза	49,4	6,3	44,3
Липа	49,4	6,8	43,8
Осина	50,3	6,3	43,4
Ива	50,3	6,27	43,43
Сосна	50,2	6,0	43,8
Ель	49,6	6,4	44,0
В среднем *	49,9	6,3	43,8

Примечание. В сумме O₂ + N₂ содержание азота колеблется в пределах 0,7—1%.

Таблица 31

Рабочая теплотворная способность дров Q_p^H кал/кг в зависимости от влажности

Влажность \ Порода дров	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Лиственные	4420	4170	3920	3660	3410	3160	2910	2660	2410	2160	1910	1660	1410
Хвойные	4510	4230	4000	3750	3490	3230	2980	2820	2470	2210	1960	1700	1450

Таблица 32

Рабочий состав и теплотворная способность дров лиственных пород
сухопутной доставки в зависимости от влажности

Влага $W_p\%$	Углерод $C_p\%$	Водород $H_p\%$	Кислород и азот $O_p + N_p\%$	Зола $A_p\%$	Q_p^H ккал/кг
0	49,40	6,20	43,30	1,10	4400
5	46,80	5,90	41,25	1,05	4150
10	44,40	5,61	39,00	0,99	3900
15	41,91	5,29	36,82	0,95	3650
20	39,50	4,98	34,64	0,88	3410
21	39,00	4,92	34,21	0,87	3350
22	38,48	4,86	33,80	0,86	3300
23	38,00	4,80	33,35	0,85	3250
24	37,50	4,73	32,92	0,84	3200
25	37,00	4,67	32,50	0,83	3150
26	36,51	4,61	32,06	0,82	3100
27	36,02	4,55	31,63	0,80	3050
28	35,53	4,49	31,19	0,79	3000
29	35,04	4,46	30,75	0,78	2950
30	34,55	4,35	30,32	0,77	2900
31	34,06	4,80	29,88	0,76	2850
32	33,57	4,24	29,44	0,75	2800
33	33,07	4,18	29,01	0,74	2750
34	32,58	4,12	28,57	0,73	2700
35	32,08	4,05	28,15	0,72	2650
36	31,59	3,99	27,71	0,71	2600
37	31,10	3,93	27,28	0,69	2550
38	30,61	3,87	26,84	0,68	2500
39	30,11	3,81	26,41	0,67	2450
40	29,62	3,74	25,98	0,66	2400

Таблица 33

Вес 1 м³ разных пород швырковых дров в зависимости от влажности
в килограммах (при хорошей укладке)

Породы дров Влажность	Дуб	Берёза	Осина	Сосна	Ель
0	405	354	270	287	253
5	426	373	284	302	266
10	455	389	297	315	278
15	477	417	318	338	298
20	507	443	338	359	316
21	513	448	342	363	320
22	518	453	346	368	324
23	526	459	350	373	328
24	533	466	355	378	333
25	540	472	360	383	337
26	548	478	365	388	342
27	555	485	370	393	346
28	563	492	375	398	351
29	571	498	381	404	356

Продолжение табл. 33

Породы дров Влажность	Дуб	Берёза	Осина	Сосна	Ель
30	578	506	386	410	361
31	587	513	391	416	367
32	595	521	397	422	372
33	604	528	403	428	377
34	613	536	408	434	383
35	623	545	415	442	389
36	632	553	422	448	395
37	642	561	428	456	402
38	652	571	435	463	408
39	663	580	442	471	415
40	675	590	450	478	422
45	736	644	491	522	460
50	810	708	540	574	506

Таблица 34

Теплотворная способность складочного кубометра дров при разной влажности кал/м³ (объёмная теплотворная способность)

Влаж- ность в %	Дуб	Сосна	Берёза	Осина	Ель	Листо- вен- ница	Смешанные дрова
0	1970	1430	1710	1220	1250	1770	1460
5	1900	1380	1640	1190	1220	1720	1410
10	1830	1330	1570	1140	1180	1620	1360
15	1760	1280	1510	1100	1140	1590	1310
20	1680	1230	1430	1050	1100	1530	1250
25	1630	1180	1380	1020	1070	1480	1210
30	1600	1170	1360	1000	1050	1460	1190
35	1580	1150	1340	980	1030	1430	1170
40	1550	1120	1310	970	1020	1410	1160
45	1520	1100	1290	940	1000	1370	1130
50	1480	1070	1250	920	970	1340	1100
55	—	1040	1210	890	930	—	1020
60	—	990	—	850	890	—	930

Таблица 35

Средний насыпной вес кубометра рядовых углей

Т о п л и в о	Марка или месторождение	Насыпной вес 1 м ³ в кг
Донецкий антрацит	АП	900
	АК	925
	АМ	950
	АС	975
	АРШ	950
Донецкий каменный уголь	Г	825
	ПЖ	840
	ПС	880
	Т	900
Кузнецкий уголь	Анджерово-судженский	800
	Прокопьевский	900

Таблица 36
Характеристика мазута различных марок

Марка мазута	Вязкость по Эн-глеру при 50°C	Вязкость по Эн-глеру при 75°C	Температура вспышки по Бренкену не ниже °C	Температура застывания не выше °C	Содержание воды по стандарту не более %	Содержание серы не более %	Рабочая теплотворная способность Q^H кал/кг
Мазут 7,5	7,5	—	65	— 5	2,0	0,3	9820
Мазут 10	10	—	65	+ 5	2,0	0,5	9750
Мазут 20	—	6	90	+ 5	2,0	0,5	9650
Мазут 40	—	10	110	+ 10	2,0	0,5	9580
Мазут 60	—	13,5	120	+ 10	2,0	0,5	9470
Мазут 80	—	16,5	120	+ 15	2,0	0,5	
Мазут сернистый	—	—	70—120	—	2,0	1,3—3,8	9520

Таблица 36-а
Удельный вес и теплотворная способность горячей массы мазута

Марка мазута	Удельный вес от — до среднее	Q^H кал/кг
Мазут 10	$0,91 \div 0,95$ 0,93	9970
Мазут 20	$0,94 \div 0,97$ 0,95	9870
Мазут 40	$0,95 \div 0,99$ 0,975	9750
Мазут 60—80 (высоковязкий крекинг)	$0,98 \div 1,005$ 0,99	9690

Таблица 37
Характеристика сернистых мазутов Урало-Волжского происхождения
(по анализам проб) по данным «Техрацнефти»

Марка мазута по ГОСТ 13913	Типы топлива по сере	Содержание серы в горячей массе топлива в %	Удельный вес при 20°C	Вязкость по Эн-глеру при 50°C	Температура вспышки по Бренкену в °C	Температура застывания в °C	Теплотворная способность Q^H кал/кг
Мазут 10	Сернистое	3,04	0,9379	7,9	122	— 7	9748
„ 7,5	„	3,10	0,9348	5,3	100	— 18	9702
„ 20	„	3,50	0,9328	10,9	117	— 5	9679
„ 10	„	3,68	0,9385	7,6	110	— 10	9709
„ 7,5	Малосерни- стое	0,42	0,9210	4,94	87	— 20	9974
„ 20	„	0,54	0,9457	17,9	156	— 10	9837
„ 60	„	0,72	0,9915	58,6	147	— 8	9675

Таблица 38

Состав и теплотворная способность Бакинского мазута

	Углерод C_p %	Водород H_p %	Азот N_p %	Кислород O_p %	Сера S_p %	Зола A_p %	Влага W_p %	Q_p ккал/кг
Мазут бакинский . . .	84,51	12,2	—	0,99	—	0,3	2,0	9820

Таблица 39

Рабочий состав (в % по весу) и теплотворная способность ископаемых углей различных месторождений

Вид и марка углей	C_p	H_p	O_p	N_p	S_p^a	A_p	W_p	Q_p ккал/кг
Подмосковный уголь (среднее для всех марок)	34,8	2,4	9,4	0,7	2,5	18,2	32	2980
Донецкий бассейн								
Длиннопламенный Д	59,8	4,2	9,2	1,2	2,9	9,7	13,0	5650
Газовый Г	67,8	4,5	7,4	1,3	2,7	10,4	5,9	6430
Паровичный жирный ПЖ	72,6	4,5	5,1	1,4	2,2	11,0	3,2	6940
Коксовый К	75,0	4,2	3,8	1,4	1,8	10,3	3,5	7100
Паровичный слегающий ПС	77,1	4,0	2,8	1,3	1,9	9,4	3,5	7260
Тощий Т	80,1	3,8	1,7	1,4	1,4	8,2	3,4	7350
Антрацит АП	85,3	1,7	1,2	0,6	1,4	4,3	5,5	7240
Антрацит АК	83,4	1,6	1,2	0,6	1,4	6,4	5,4	7080
Антрацит АМ	77,9	1,5	1,1	0,6	1,5	11,9	5,5	6610
Антрацит АС	75,3	1,5	1,1	0,6	1,4	13,4	6,7	6390
Антрацит АРН	77,1	1,6	1,6	0,6	1,2	11,1	6,8	6560
Уральский Кизеловский уголь	58,6	4,1	3,6	0,9	5,8	21,5	5,5	5720
Карагандинский уголь	65,4	4,0	5,6	1,1	0,6	16,3	7,0	6120
Кузнецкий бассейн								
Анджери-Судженский	79,7	3,8	1,9	1,6	0,4	3,6	4,0	7280
Прокопьевский	78,0	3,9	3,3	1,8	0,4	6,6	6,0	7090

Таблица 40

Характеристика углей СССР различных месторождений местного значения, применяющихся на судах

Район	Месторождение	Марка	Содержание в ра- бочей топливе		Q^*_{p} ккал/кг	Содержа- ние легу- ющих в то- почей массе V_2 %	Горючий состав			
			Влаги W_p %	Золы A_p %			S_2	C_2	H_2	N_2 O_2
Киргизия Сибирь	Суюкта	Б	21,0	11,83	4420	29,0	0,7	77,5	4,0	0,8 17,0
	Минусинское	Д	12,0	10,55	5710	42,0	0,8	79,0	5,5	2,2 12,5
	Черемховское	Д	12,0	14,95	5330	45,0	1,4	78,0	5,7	1,6 13,3
	Сагарское	—	12,0	14,95	5490	50,0	0,4	79,0	6,5	1,0 13,1
о. Шпицберген	Рудники:									
	Баренбург	Г	3,5—7,5	13,3—17,5	6210	42,0	2,7	83,0	5,8	1,5 7,0
	Грумант-Сити									
	Райчихинское	Б	38,0	8,68	3020	41,0	0,3	70,0	4,3	1,1 24,3
Дальний Восток	Артемовское	Б	26—32	14,1—12,9	3810	49,0	0,6	71,5	5,5	1,5 20,9
	Сулацкое	—	6—9	27,2—31,8	5310	32,0	0,6	86,0	5,0	1,4 7,0
	Гусинозерское	—	20,0	14,4	4450	43,0	0,7	76,0	4,9	1,0 17,4
	Тавричанское	—	13,0	26,1	4170	45,0	0,7	75,0	5,6	1,6 17,1
Северный край Печорские угли)	Квадинское	—	33,0	12,7	3150	41,0	0,3	71,0	4,3	1,2 23,2
	Воркутское	ПЖ	6,5	14,9	6340	80,0	0,9	85,5	5,3	2,3 6,0
	Шугорское	—	10,5	11,6	5450	49,0	3,3	75,7	5,2	1,5 14,3

Содержание летучих, характеристика кокса и температура плавления золы ископаемых углей различных месторождений

Род и марка топлива	Содержание летучих на горючую массу $V_2\%$	Характеристика кокса	Плавление золы °С			Примечание
			Начало деформации среднее от — до	Температура размягчения среднее от — до	Температура жидкого плавного состояния среднее от — до	
Подмосковный уголь (среднее для всех марок) Донецкий уголь: Длиннопламенный Д	45,0	Порошкообразный	—	—	—	Данные о плавкости золы испытанных углей получены путем наблюдений за изменением, происходящим с пиромикой, изготовленной из золы исследуемого топлива. При испытании пиромикка специальной формы нагревается в электропечи. При температуре начала деформации происходит закругление вершин и ребер конуса
Газовый Г	43,0	Неспектающийся, порошкообразный, слитый	1030 950—1260	1150 1040—1400	1210 1080—1400	
Паровичный жирный ПЖ	39,0	Спекшийся, сплавленный, иногда вспученный (рыхлый)	1050 940—1190	1160 1010—1290	1220 1060—1370	
Коксовый К	32,0	Спекшийся, сплавленный, плотный или умеренно плотный	1080 970—1400	1120 1060—1400	1210 1170—1400	
Паровичный спектающийся ПС	23,0	То же	—	—	—	
Тощий Т	15,0	Спекшийся или сплавленный от плотного до умеренно плотного	1080 1050—1180	1120 1080—1180	1190 1150—1240	
	12,0	Неспекшийся, порошкообразный или слитый	—	—	—	

Род и марка топлива	Содержание легучих на горючую массу V, %	Характеристика кокса	Плавкость золы °C			Примечание
			Начало деформации среднее от — до	Темпера- тура раз- мягчения среднее от — до	Темпера- тура жидко- плавного состояния среднее от — до	
Донецкий антрацит (среднее для всех ма- рок)	3,5	Порошкообразный	1180 900—1200	1180 1000—1370	1280 1070—1430	При температуре раз- мягчения—верхняя часть шпательки, изгибается, наклоняется до основ- ной пирамидки. При температуре жидкоплав- ного состояния зола растекается по подстав- ке
Уральский скин уголь	40,0	Слипшийся сплавле- нный, плотный	1120 990—1500	1380 1130—1500	1450 1180—1600	
Карагадинский уголь ПЖан	25,0	От порошкообразного до спекшегося плотного	—	—	—	
Кузнецкий бассейн Алджиро-Судженский ПС	15,0	От слабоспекшегося до спекшегося плотного	1140 1030—1200	1330 1200—1500	1420 1250—1500	
Прокопьевский СС	23,0	От слабоспекшегося до спекшегося плотного	—	—	—	

§ 4. УСЛОВНОЕ ТОПЛИВО И КАЛОРИЙНЫЕ ЭКВИВАЛЕНТЫ

Из приведённых выше качественных характеристик топлива следует, что теплотворная способность не одинакова для топлива разных видов и может колебаться в весьма значительных пределах в зависимости от происхождения, сорта и марки топлива, его влажности, большей или меньшей засорённости породой, способа доставки к месту потребления, длительности хранения на воздухе и т. д.

От величины теплотворной способности сжигаемого топлива в значительной степени зависит и расход его на том или ином судне или предприятии. Чем выше теплотворная способность топлива, тем меньше обычно в данной установке получается удельный расход топлива на каждую тонну выработанного пара или одну силу индикаторной мощности машины.

Для возможности сравнения между собою расходов топлива в отдельных теплосиловых установках, работающих на топливе различных видов, составления планов, заявок и топливных отчетов введен термин об условном топливе.

Теплотворная способность условного топлива принята равной 7000 кал/кг. Зная расход топлива в условном выражении, расход натурального топлива получают путём деления расхода условного топлива на переводный коэффициент или так называемый калорийный эквивалент $\mathcal{E}$, представляющий отношение теплотворной способности натурального топлива Q^u_p кал/кг к теплотворной способности топлива условного (7000 кал/кг).

Следовательно:

$$\mathcal{E} = \frac{Q^u_p}{7000}. \quad (40)$$

Таким образом, для одного и того же топлива (например, угля), переводный коэффициент получается различным в зависимости от величины теплотворной способности сжигаемого топлива данной партии.

Для введения единообразия во всех расчётах, связанных с переводом натурального топлива в условное, приняты средние теплотворные способности, характерные в настоящее время для данного вида топлива, его марки или района добычи, и по ним установлены калорийные эквиваленты.

В таблице 42 приведены калорийные эквиваленты для углей, дров и мазута, установленные Госпланом СССР на 1942 год и принятые для расчётов в речном флоте. При наличии нескольких партий топлива с различной теплотворной способностью, израсходованных за отчётный период и имеющих, следовательно, различные эквиваленты, при переводе натурального топлива в условное должен применяться средневзвешенный переводный эквивалент, определяемый по формуле:

$$\mathcal{E}_{cp} = \frac{A_1 \mathcal{E}_1 + A_2 \mathcal{E}_2 + \dots + A_n \mathcal{E}_n}{A_1 + A_2 + \dots + A_n}, \quad (41)$$

где: A_1 — вес партии топлива в кг (для дров—объем в m^3) с калорийным эквивалентом $\mathcal{E}_1$,
 A_2 — вес партии топлива в кг (для дров—объем в m^3) с эквивалентом $\mathcal{E}_2$ и т. д.

Т а б л и ц а 42

Калорийные эквиваленты по данным Госплана на 1942 год

Наименование топлива	Коэффициент перевода натурального топлива в условное
Угли Донецкого бассейна	0,94
В том числе:	
Каменные угли (среднее для всех марок) . .	0,92
Антрациты	0,97
Кузнецкий уголь	0,99
Карагандинский уголь	0,85
Подмосковный уголь	0,40
Уральский (Кизеловский) уголь	0,79
Топочный мазут	1,4
Дрова (среднее для всех пород)	0,186

Т а б л и ц а 42-а

Калорийные эквиваленты безводного мазута, утвержденные Госпланом и Главснабуглем в 1944 году

	Марка	Коэффициент перевода 1 кг безводного мазута в условное
Мазут малосернистый в среднем . .	По всем маркам	1,4
В том числе	„М—10 ^с	1,425
	„М—20 ^с	1,410
	„М—40 ^с	1,393
	„М—80 ^с	1,388
Мазут сернистый (с содержанием серы 1—4%) в среднем	По всем маркам	1,38
В том числе	„М—10 ^с	1,392
	„М—20 ^с	1,384
	„М—40 ^с	1,374

В таблице 43 даны современные калорийные эквиваленты каменноугольного топлива, утвержденные Госпланом в ноябре 1943 г. В таблицах 44 и 45 даны калорийные эквиваленты для дров.

Т а б л и ц а 43

Теплотворная способность и калорийные эквиваленты
каменноугольного топлива¹(утверждены Госпланом СССР и Главнобухгалтером при СНК СССР
в ноябре 1943 г.)

Наименование бассейнов и месторождений	Марка	Сорт	Низшая рабочая теплота, способ- ность $Q^{\text{н}}_{\text{р}}$ кал/кг	Перевод- ный экви- валент
Кузнецкий бассейн (в среднем по бассейну)	По всем маркам	—	7000	1,00
	Г	рядовой	6690	0,955
	ПЖ	„	7125	1,02
	ПС	„	7100	1,015
	СС	по всем сортам	6980	0,997
	Т	то же	6560	0,94
Минусинское месторождение	Д	рядовой	5765	0,824
Подмосковный бассейн (в сред- нем по бассейну)	Б	по всем сортам	2900	0,415
	Б	БК	3115	0,445
		БО	2840	0,405
		БМ	2520	0,360
		БР	2905	0,415
Карагандинский бассейн (в среднем по бассейну)	По всем маркам	—	5880	0,84
	Б	рядовой	3840	0,55
	ПЖ	„	6020	0,86
	ПЖМ	„	6495	0,93
	ПС	—	5980	0,885

¹ См. «Переводные эквиваленты каменноугольного топлива СССР», Энерго-издат, 1943 г.

Продолжение табл. 43

Наименование бассейнов и месторождений	Марка	Сорт	Низшая рабочая теплотв. способ- ность $Q_{\text{н}}$ кал/кг	Перевод- ный экви- валент
Уральский, Кизеловский бас- сейн (в среднем по бассейну)	ПЖ	рядовой	5600	0,80
Егоршинское месторождение (в среднем по тресту Егоршин- уголь)	А	рядовой	6130	0,875
Богословское месторождение (в среднем по тресту Богослов- уголь)	Б	рядовой	3295	0,470
Черемховский бассейн (в сред- нем по тресту Востсибуголь)	Д	рядовой	5510	0,787
Райчихинское месторождение (в среднем)	Б	рядовой	3405	0,485
Артёмовское месторождение (в среднем)	Б	по всем сортам	3830	0,547
Силикатинское месторождение (Средняя Азия)	В среднем по место- рождению Б	по всем сортам	4685	0,669
Ткивибульское месторождение (в среднем по месторожде- нию)	Г	по всем сортам	4680	0,67

Примечание. Обозначение марок: Д — длиннопламенные, ПЖ — паровичные жирные, ПЖМ — паровичный жирный мытый, ЛС — паровичные спекающиеся, СС — слабоспекающиеся, Т — тощий, Б — бурый, БК — бурый крупный, БМ — бурый мелкий, БР — бурый рядовой, Г — газовый, А — антрацит.

Таблица 44

Калорийные эквиваленты 1 кг дров сухопутной доставки лиственных пород
в зависимости от влажности

Влажность в %	Э	Влажность в %	Э
0	0,628	29	0,421
5	0,592	30	0,414
10	0,557	31	0,406
15	0,521	32	0,400
20	0,485	33	0,393
21	0,478	34	0,386
22	0,471	35	0,379
23	0,464	36	0,372
24	0,457	37	0,364
25	0,450	38	0,357
26	0,443	39	0,350
27	0,436	40	0,343
28	0,429	45	0,307
		50	0,272

Таблица 45

Калорийные эквиваленты для 1 м³ дров

Влажность в %	П о р о д а д р о в						Смешанные дрова
	Дуб	Берёза	Осина	Сосна	Ель	Листвен- ница	
15	0,251	0,216	0,157	0,183	0,163	0,227	0,187
20	0,240	0,204	0,150	0,176	0,157	0,218	0,179
25	0,233	0,197	0,146	0,168	0,153	0,211	0,173
30	0,229	0,194	0,143	0,167	0,150	0,208	0,170
35	0,226	0,191	0,141	0,164	0,147	0,204	0,167
40	0,221	0,187	0,138	0,161	0,146	0,201	0,166
45	0,217	0,184	0,134	0,157	0,143	0,195	0,161
50	0,211	0,178	0,131	0,153	0,138	0,191	0,157
55	—	0,173	0,127	0,148	0,133	—	0,146
60	—	—	0,121	0,142	0,127	—	0,133

Переводный эквивалент для углей и мазута показывает, сколько тоннам условного топлива соответствует по калорийности тонна натурального топлива. Переводный эквивалент для дров в табл. 42 и 45 показывает, сколько тоннам условного топлива соответствует складочный кубометр дров.

При пересчёте натурального топлива в условное нужно заданный расход натурального топлива умножить на эквивалент, указанный в таблице для данного вида топлива, т. е. пользоваться формулой:

$$B_{\text{усл}} = B_{\text{нат}} \cdot Э. \quad (42)$$

При пересчёте условного топлива в натуральное нужно заданный расход условного топлива делить на эквивалент, указанный в таблице для данного вида топлива, т. е. пользоваться формулой:

$$B_{\text{нат}} = \frac{B_{\text{усл}}}{\mathcal{E}} \quad (43)$$

Примеры. 1) Судно израсходовало за 48 час. работы 100 м³ дров. Определить расход условного топлива. Приняв пересчётный коэффициент (по данным таблицы 42) $\mathcal{E}=0,186$, получим расход условного топлива:

$$B_{\text{усл}} = 100 \times 0,186 = 18,6 \text{ т.}$$

2) На час работы парохода, работающего на мазуте, установлена норма 800 кг условного топлива. Расход натурального топлива составит:

$$B_{\text{нат}} = \frac{800}{1,4} = 571,4 \text{ кг/час.}$$

§ 5. ВЫВЕТРИВАНИЕ И САМОВОЗГОРАНИЕ УГЛЕЙ

Выветриванием называется растрескивание и измельчение угля, происходящее вследствие соединения кислорода воздуха с органическими элементами топлива при его хранении на воздухе. Теплотворная способность угля при этом понижается за счёт окисления органической массы.

Тепло, выделяемое в результате взаимодействия кислорода и топлива, в большей или меньшей степени накапливается в слое, в зависимости от условий хранения топлива, и повышает его температуру. С ростом температуры создаются ещё более благоприятные условия для окисления горючих элементов топлива. Вследствие постепенного повышения температуры уголь может воспламениться (уголь «самовозгорается» без постороннего источника тепла).

При повышении температуры сверх 60°C у большинства углей наблюдается значительное выделение водяных паров, углекислоты и, наконец, органических продуктов с резким запахом углеводородов и сернистых соединений (температура 60°C является для большинства углей критической температурой самовозгорания). Горение угля при его хранении может протекать с различной интенсивностью в зависимости от химического состава, влажности и условий хранения. Чаще всего топливо тлеет на некоторой глубине с выделением бурого дыма.

Установлено, что чем уголь богаче кислородом, тем большую склонность они имеют к самовозгоранию и окислению.

Способность к самовозгоранию увеличивается также с уменьшением величины кусков угля и с увеличением его влажности. Большая склонность мелкого угля к самовозгоранию объясняется увеличением поверхности соприкосновения топлива с воздухом. Влажность угля ускоряет процесс накопления в топливе кислорода из воздуха. Если топливо хранится на открытом воздухе и доступно воздействию атмосферных осадков, колебания влажности при его хранении приводят к растрескиванию кусков угля и его измельчению, т. е. к увеличению поверхности соприкосновения с воздухом.

В таблице 46 указывается склонность к самовозгоранию наиболее распространенных видов угля.

Т а б л и ц а 46

Способность к самовозгоранию угля различных месторождений и марок

Наименование угля	Склонность к самовозгоранию
Подмосковный бурый	Весьма значительная
Кузнецкий—Анжеро-Судженский	Малая
Кузнецкий—Прокопьевский	Подвержен
Карагандинский	Подвержен
Донецкий уголь Д	Весьма значительная
Донецкий уголь Г	Значительная
Донецкий уголь Т	Слабая
Донецкие угли ПС и ПЖ	Подвержены
Донецкий антрацит	Не подвержен

§ 6. ОТБОР СРЕДНЕЙ ПРОБЫ ТВЕРДОГО И ЖИДКОГО ТОПЛИВА

Рациональное использование топлива возможно только тогда, когда известно его качество. Качественные характеристики топлива определяются в лаборатории путём анализа отобранных средних проб топлива.

Средняя проба представляет собой небольшое количество топлива, по своему составу и качеству одинаковое с составом и качеством той партии топлива, от которой оно отобрано.

Правильный отбор средней пробы тем сложнее и труднее, чем разнороднее партия топлива, от которой отбирается проба.

Техника отбора пробы зависит от рода топлива и от того, при каких условиях этот отбор производится, т. е. находится ли топливо в вагонах, в железнодорожных цистернах, на судне или на складе, а также совершается ли отбор проб в момент транспортировки топлива (например, при перемещении на ленте транспортера, в тачках, при перемещении в трубопроводах) или при постоянном хранении его в штабелях и нефтебаках.

Отбор пробы мазута из мерников нефтемашиннок. При отпуске жидкого топлива пароходу из мерников нефтемашиннок пробы отбирают ковшом из жолоба мерников или сливной трубы. Проба при сливе топлива из мерника машинки в цистерну парохода берётся в три приёма: а) в начале слива, б) в середине слива, в) в конце слива. При этом необходимо избегать нагрева проб, действия на них ветра, попадания в них пыли, грязи, влаги.

Размер каждой пробы приблизительно равен 1 л. Для получения средней пробы отдельные пробы, немедленно после их взятия, сливают для смешения в сухую чистую бутылку (четверть), из которой наливают три бутылки ёмкостью 400—500 см³ при непрерывном взбалтывании, с целью не дать жидкости устояться. Бутылки закупоривают и запечатывают с наложением пломб, причём

две бутылки запечатывают судовой пломбой, а одну — пломбой нефтемашинки (поставщика). Пробу нефтетоплива с пломбой поставщика механик судна направляет в лабораторию для анализа; другую пробу (с пломбой судна) посылают в лабораторию поставщика; третья — сохраняется в течение двух месяцев у поставщика, как контрольная, на случай возникновения конфликта по качеству поставляемого топлива. На каждой пробе, отсылаемой в лабораторию, должен быть ярлык с указанием даты отбора пробы, номера нефтемашинки, выдавшей топливо, её местонахождения, количества принятого топлива, номера приёмной квитанции и названия судна, получившего топливо.

Отбор средней пробы нефтетоплива при испытании в котельной. На трубопроводе, подводящем мазут к форсункам паровых котлов (по возможности на вертикальном участке), устанавливают ответвление с краником (пробник). Через этот пробник и производят отбор пробы в особый сосуд (бутыль), ёмкостью в 1,5—2 раза больше отбираемой пробы.

После окончания испытания набранную таким образом пробу разливают в две склянки ёмкостью не менее 1,5 л каждая; склянки плотно закупоривают и опечатывают; одна из них идёт в лабораторию для исследований, а другая хранится как контрольная.

При невозможности установить отвод для отбора пробы последнюю отбирают из бака путём периодического зачерпывания ковшом, ёмкостью около 0,5 л. При этом, во избежание ошибок, необходимо периодически спускать нефтетопливо из нижней части бака и переливать его наверх.

Количество мазута, отбираемого в качестве пробы, зависит от общего количества топлива, сжигаемого во время опыта.

Количество сожжённого во время опыта топлива	Объём пробы в л
До 1 т включительно	не менее 3
Свыше 1 и до 5 т	не менее 5

Отбор средней пробы каменноугольного топлива из штабелей. При отборе средней пробы из штабелей поступают следующим образом:

1) по всей поверхности штабеля, на расстоянии 2 м друг от друга, в шахматном порядке, отмечают точки, в которых путём отбрасывания лопатой некоторого количества топлива образуют ямки (лунки) глубиной не менее 0,5 м;

2) одинаковое количество лопат топлива отбирают из каждой лунки с таким расчётом, чтобы минимальное количество угля, отобранного от штабеля в 100 т, для одной первичной пробы на каждые 100 т топлива составляло: для мелкого однородного угля не менее 200 кг, а для сильно загрязнённого породой и крупного угля — не менее 500—700 кг.

Так как производить анализ всего отобранного от штабеля количества топлива не представляется возможным, полученную первичную пробу подвергают операции, называемой разделкой средней пробы методом четвертования (квартования) или перелопачивания.

Разделка средней пробы угольного топлива. Метод разделки средней пробы перелопачиванием применяется в том случае, если проба отобрана от большой партии топлива, и заключается в том, что всё топливо, составляющее пробу (отобранное из вагонов или штабелей), делят на две кучи путём складывания в одну кучу чётных лопат, а в другую — нечётных. Одна куча отбрасывается, другая же подвергается дальнейшим операциям. Подобное разделение повторяют до тех пор, пока оставшееся топливо в количестве не менее 200 кг не будет легко укладываться в правильную кучу для квартования.

Разделка пробы квартованием заключается в следующем:

1) отобранное из штабеля топливо измельчают до размера кусков 25 мм, перемешивают на конус, располагают слоем в форме квадрата и делят последний двумя диагоналями на четыре треугольника, из которых два противоположащих отбрасывают, а другие два — подвергают повторному делению до тех пор, пока не получится остаток весом в 200 кг;

2) остаток пробы весом в 200 кг измельчают до 13 мм, перемешивают на конус, располагают слоем в форме квадрата и делят последний двумя диагоналями на четыре треугольника, из которых два противоположащих отбрасывают; эту операцию повторяют два раза;

3) остаток пробы весом около 50 кг измельчают до 10 мм, перемешивают на конус и делят на четыре части, две из которых отбрасывают;

4) остаток пробы весом в 25 кг измельчают до 6 мм, перемешивают на конус и делят на четыре части, две из которых отбрасывают;

5) остаток пробы весом около 12 кг измельчают до 3 мм, перемешивают на конус и делят на четыре части, из которых две отбрасывают;

6) остаток пробы весом около 6 кг измельчают до 1 мм, перемешивают, располагают тонким слоем в виде круга или квадрата, делят двумя взаимно перпендикулярными диаметрами или диагоналями на четыре части и из каждой части отбирают последовательно совком на всю глубину по одной порции топлива весом около 0,5 кг каждая. Все порции соединяют вместе, и полученную таким образом пробу весом около 1,5—2 кг ссыпают в стеклянную банку с притёртой пробкой или металлическую с пропаянными швами и плотной крышкой, запечатывают и направляют в лабораторию для анализа на влажность, зольность и теплотворную способность. Разделку проб надо производить как можно быстрее.

На ярлыке каждой пробы, направляемой в лабораторию, должно

быть указано: 1) название склада; 2) дата отбора пробы, 3) марка угля.

Отбор пробы угля при испытании котельной установки. Отбор угля в течение всего времени испытания должен производиться по возможности непрерывно при сохранении пропорциональности веса между сжигаемым и отбираемым топливом.

Наиболее целесообразным способом отбора пробы является отъём топлива (одной лопаты) от каждой тары (вагонетка, тачки) или с промежутками через несколько тар. При отборе первичной пробы следует не выбирать на лопату отдельные куски, а зачерпнуть полную лопату и взять на пробу всё, что на неё попадётся.

Накапливаемую во время испытания первичную пробу складывают в ящик.

Количество отбираемой первичной пробы должно быть:

- 1) при сжигании во время опыта менее 400 кг угля — в количестве, равном сожжённому топливу;
- 2) при сжигании во время опыта до 20 т — в количестве не менее 400 кг.

Дальнейшее измельчение первичной пробы и отбор необходимого для лабораторий количества производится аналогично указаниям при отборе пробы угля из штабелей (стр. 54).

Отбор средней пробы дров. Отбор первичной пробы дров производится, как правило, из штабелей. Штабели делятся на части, длиной по 2 м. Диагональ, проведенная (обычно мелом) в каждой части штабеля по торцовой стороне выложенных дров (от верхнего угла одного конца данной части штабеля до нижнего угла другого конца), делится на четыре равные части, и поленья, в количестве 5 штук, ограничивающие эти части, отбираются.

При испытании котлов, когда расход дров за опыт левелик (до 5—10 т), для большей точности производят отбор 9 поленьев путём деления диагонали на 8 частей.

При неоднородных дровах (смесь пород разной влажности) отбор пробы производится путём выбора всех поленьев, попадающих на диагональ. При наборе указанным путём более 100 поленьев (например, при выяснении качества крупной партии дров, прибывшей на склад), набранную пробу уменьшают до 50—100 поленьев. Для уменьшения набранной пробы все отобранные поленья сортируют на кругляки и колотые; при этом принимают во внимание также степень зрелости и породу дров. От каждого сорта отбирают количество поленьев, пропорциональное числу первоначально отобранных поленьев данного сорта. Затем готовят среднюю пробу для анализа топлива в лабораториях, для чего от каждого отобранного полена, на расстоянии одной трети его длины от торца, отпиливают кружок толщиной в 50 мм. Под пилу подставляют незагрязнённый ящик для сбора опилок в чистом виде. От каждого кружка вырубает секторы с центральным углом в 30°. Из полукружков колотых поленьев вырубает секторы с таким же углом, но с вершинной, расположенной на расстоянии 0,3 радиуса от прямой линии полукружка.

Набранные таким образом секторы составляют пробу для определения влаги. Секторы укладывают в жестянку с плотной крышкой. Линию раздела крышки с банкой обёртывают изоляционной лентой.

Собранные опилки используют для составления пробы на зольность, элементарный состав и теплотворную способность. Опилки в пробе должно быть около 1 кг. Если опилок при разделке пробы было собрано больше, количество их уменьшают до 1 кг методом квартования. Опилки хорошо перемешивают и раскладывают тонким слоем в форме квадрата; квадрат делят диагоналями на четыре треугольника, из которых два противоположных отбрасывают, а опилки двух других треугольников снова тщательно перемешивают и опять раскладывают в форме квадрата и т. д., пока не останется около 2 кг опилок; эти опилки делят пополам и ссыпают в две банки, одну из которых направляют для анализа в лабораторию, а другая служит контрольной.

У. ПРОЦЕСС ГОРЕНИЯ

Горение есть процесс соединения горючих элементов топлива с кислородом. Процесс сопровождается выделением света и тепла. Различают полное и неполное горение топлива. Полным горением называется такое, при котором образующиеся вещества не способны более гореть. Если в результате горения образуются вещества, которые снова могут воспламениться и начать гореть при определённых условиях (например, при подведении к горючему дополнительного количества воздуха или при повышении температуры), то такое горение называется неполным. Соединение горючих элементов топлива с кислородом воздуха совершается в строго определённых весовых отношениях (см. таблицу 47).

§ 1. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ КОЛИЧЕСТВО ВОЗДУХА, НЕОБХОДИМОЕ ДЛЯ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА

Для полного сгорания 1 кг горючего необходимо строго определённое, зависящее от состава горючего, количество кислорода, а следовательно, и воздуха. Минимальное количество воздуха, теоретически необходимое для полного сгорания 1 кг топлива, называется теоретически необходимым количеством воздуха.

Количество кислорода, теоретически необходимое для сгорания 1 кг твёрдого или жидкого топлива, содержащего в своем составе горючие элементы — углерод, водород и серу, определяется по формуле:

$$L_k = \frac{2,67 C_p + 8 H_p + S_p^2 - O_p}{100} \text{ кг/кг.} \quad (44)$$

В этой формуле:

C_p — содержание углерода в топливе в проц. по весу,

H_p — содержание водорода в топливе в проц. по весу,

S_p^2 — содержание серы в топливе в проц. по весу,

O_p — содержание собственного кислорода в топливе в проц.

по весу.

Весовые соотношения при сгорании и количество выделяющегося тепла

Горючие вещества	Химическая формула сгорания	Продукт сгорания	Весовые соотношения при сгорании	Количество тепла, выделяющегося при сгорании 1 кг вещества	Количество кислорода, требуемого для сгорания 1 кг вещества
Углерод С	$C + O_2 = CO_2$	углекислота	12 кг С + 32 кг $O_2 = 44$ кг CO_2	1 кг С, сгорая в CO_2 , выделяет 8100 кал	1 кг С требует $\frac{32}{12} = 2,67$ кг O_2
Оксид углерода СО (продукт неполного сгорания С)	$2CO + O_2 = 2CO_2$	углекислота	56 кг СО + 32 кг $O_2 = 88$ кг CO_2	1 кг СО, сгорая в CO_2 , выделяет 2440 кал	1 кг СО требует $\frac{32}{28} = 1,14$ кг O_2
Водород H_2	$2H_2 + O_2 = 2H_2O$	вода (водяной пар)	4 кг H_2 + 32 кг $O_2 = 36$ кг H_2O	1 кг H_2 , сгорая в водяной пар, выделяет 28 700 кал. Если, после сгорания образующийся водяной пар может конденсироваться в воду, то выделяется дополнительно 5400 кал на 1 кг, а всего от сгорания 1 кг водорода выделяется 34 100 кал	1 кг H_2 требует $\frac{32}{4} = 8$ кг O_2
Сера	$S + O_2 = SO_2$	сернистый газ (сернистый ангидрид)	32 кг S + 32 кг $O_2 = 64$ кг SO_2	1 кг S, сгорая в SO_2 , выделяет 2181 кал	1 кг S требует $\frac{32}{32} = 1$ кг O_2
Метан CH_4	$CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$	углекислота и пары воды	16 кг CH_4 + 64 кг $O_2 = 44$ кг CO_2 + 36 кг H_2O	1 кг CH_4 , сгорая в CO_2 и H_2O , выделяет 11 900 кал	1 кг CH_4 требует $\frac{64}{16} = 4$ кг O_2

Так как кислорода в воздухе содержится по весу всего 23%, теоретическое количество воздуха, которое нужно подвести для сгорания, составит:

$$L_0 = \frac{L_k}{0,23} \text{ кг/кг.} \quad (45)$$

Теоретически необходимый объём воздуха при нормальных условиях составит:

$$V_0 = \frac{L_0}{1,293} \text{ м}^3/\text{кг.} \quad (46)$$

где 1,293 кг/м³ — удельный вес воздуха при 0° С и 760 мм рт. столба.

Следовательно, теоретически необходимый объём воздуха определяется по составу топлива (в проц. по весу) по следующей формуле:

$$V_0 = \frac{2,67 C_p + 8 H_p + S_p^* - O_p}{100 \times 0,23 \times 1,293} \text{ м}^3/\text{кг.} \quad (47)$$

Если неизвестен состав топлива, а известна только его теплотворная способность, то теоретически необходимый объём воздуха может быть приближённо определён по следующей формуле (для 1 кг топлива):

$$V_0 = \frac{1,1 Q_{H_p}}{1000} \text{ м}^3/\text{кг.} \quad (48)$$

В таблице 48 указаны значения теоретически необходимого количества воздуха для некоторых топлив.

Таблица 48

Теоретически необходимое количество воздуха в кг и м³ для некоторых видов топлива

Топливо	L_0 кг/кг	V_0 м ³ /кг
Дрова влажностью 30%	4,13	3,2
Подмосковный уголь	4,57	3,54
Донецкий длиннопламенный каменный уголь	8,08	6,25
Донецкий уголь ПЖ	9,85	7,6
Донецкий уголь ПС	10,3	7,95
Антрацит АК	10,2	7,9
Антрацит АС	9,2	7,1
Кузнецкий Прокопьевский уголь	10,2	7,9
Мазут бакинский	13,9	10,8

§ 2. КОЭФИЦИЕНТ ИЗБЫТКА ВОЗДУХА. ДЕЙСТВИТЕЛЬНОЕ КОЛИЧЕСТВО ВОЗДУХА, ПОСТУПАЮЩЕГО В ТОПКУ

Количество воздуха, действительно поступающего в топку, всегда больше теоретически необходимого. Объясняется это тем, что вследствие несовершенства перемешивания воздуха с топли-

вом не все частицы кислорода воздуха, введенного в топку, входят в соприкосновение с частицами горючих веществ; часть введенного в топку кислорода не соприкасается с частицами горючего и остается неиспользованным. Для того, чтобы все-таки обеспечить подвод кислорода воздуха к каждой частице горючего, приходится подавать последний в большем количестве по сравнению с теоретически необходимым для сгорания данного вида топлива.

Если измерить количество воздуха, действительно подаваемого в топку для сгорания 1 кг топлива, и подсчитать количество воздуха, теоретически необходимого для сжигания 1 кг данного топлива, то отношение:

$$\alpha = \frac{\text{действительное количество воздуха}}{\text{теоретически необходимое количество воздуха}} = \frac{L_d}{L_m} \quad (49)$$

представляет собой так называемый коэффициент избытка воздуха, с которым работает данная топка. Так как действительное количество воздуха всегда превышает теоретически необходимое, то коэффициент избытка воздуха есть величина бо́льшая единицы.

Из написанной выше формулы получаем, что действительное количество воздуха L_d равно:

$$L_d = \alpha \cdot L_m$$

Точно также: $V_d = \alpha V_m$ — действительный объем воздуха.

Величина коэффициента избытка воздуха практически зависит от рода сжигаемого топлива, конструкции топки, количества топлива, сжигаемого в час на каждом квадратном метре площади решетки или в каждом кубометре объема топочного пространства (т. е. от изменения степени форсировки или нагрузки топки), силы тяги и дутья, а также от качества обслуживания топки.

Установлено, что чем поверхность соприкосновения топлива с воздухом больше, тем с меньшим коэффициентом избытка воздуха, при прочих равных условиях, можно достичь полного горения.

Поэтому жидкое топливо (при условии его хорошего распыливания) сжигается всегда с меньшим избытком воздуха, чем топливо кусковое, при горении в слое на колосниковой решетке.

Хорошему распределению воздуха по слою и, следовательно, возможности получить полное сгорание твердого топлива, с небольшим избытком воздуха, способствует достаточная толщина и равномерность слоя топлива на колосниковой решетке, отсутствие в слое больших воздушных промежутков, наблюдаемых при сжигании топлива крупными кусками.

Ориентировочные значения α для разных топлив при сжигании их в судовых котельных установках указаны в таблице 49. Приведенные коэффициенты избытка воздуха могут быть признаны нормальными.

Чрезмерный избыток воздуха действует на работу котлов неблагоприятно, так как увеличивает количество отходящих газов и, следовательно, потерю тепла в трубу. Кроме того, подача излишнего воздуха снижает температуру в топке.

Таблица 49

Величина коэффициента избытка воздуха для топлива различных видов и способов его сжигания

Топка и топливо	Коэффициент избытка воздуха
Топка с колосниковой решёткой и ручным обслуживанием при сжигании каменных углей	1,4—1,8
Топка с колосниковой решёткой и ручным обслуживанием при сжигании антрацита с дутьём под решётку	1,35—1,45
Топка с ручным обслуживанием при сжигании дров в огнетрубных котлах	1,6—1,8
Мазут при паровых форсунках	1,1—1,25

С уменьшением температуры в топке ухудшаются условия сгорания топлива, а одновременно уменьшается и паропроизводительность котла, так как разность температур между газами и водой в котле становится меньше и тепловосприятие котла падает.

Недостаточный коэффициент избытка воздуха может привести к образованию продуктов неполного сгорания вследствие недостаточного притока кислорода к некоторой части горючих элементов.

Приведенные в таблице 49 значения коэффициентов избытка воздуха представляют средние величины α для указанных типов топок при их нормальной работе и умелом обслуживании. На практике нередко наблюдаются отклонения от указанных значений вследствие нерациональной конструкции топки, излишне форсированной работы (при увеличении форсировки коэффициент избытка воздуха обычно снижается), неумелого обслуживания топки кочегарами и т. д.

§ 3. СОСТАВ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ПРИ ПОЛНОМ И НЕПОЛНОМ ГОРЕНИИ

При полном сгорании с избытком воздуха в продуктах сгорания содержатся в общем случае следующие элементы: CO_2 — углекислота, SO_2 — сернистый газ (если топливо содержит серу), O_2 — кислород, N_2 — азот, H_2O — водяные пары.

При неполном сгорании в газах, кроме того, обычно присутствуют: CO — окись углерода, H_2 — водород, CH_4 — метан и другие углеводороды.

Кроме того, в продуктах сгорания может содержаться в чистом виде сажа (несгоревший углерод).

Состав продуктов сгорания определяется газовым анализом. При исследовании продуктов сгорания газоанализатором, поскольку газоанализатор забирает пробу только сухих продуктов сгорания (водяные пары на пути к газоанализатору задерживаются и конденсируются), их состав при неполном сгорании принимается:

$$\text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{O}_2 + \text{N}_2 + \text{CO} = 100\% \quad (50)$$

Так как CO_2 и SO_2 при исследовании продуктов сгорания химическим газоанализатором поглощаются одновременно, то содержание этих газов принято давать в сумме и обозначать сумму $\text{CO}_2 + \text{SO}_2$ в объёмных процентах через RO_2 . Следовательно, состав сухих газов при неполном горении можно представить формулой:

$$\text{RO}_2 + \text{O}_2 + \text{N}_2 + \text{CO} = 100\%.$$

При рядовых испытаниях котельных установок и текущем контроле качества горения это уравнение может применяться при всяком топливе и при любом совершенстве горения, хотя и не обеспечивает точных результатов. При испытаниях содержание RO_2 и O_2 определяется непосредственно анализом порции газа (100 см³ газа) в химическом газоанализаторе, CO находится расчётом по данным RO_2 и O_2 (формула даётся ниже), а содержание азота определяется по разности:

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

§ 4. АНАЛИЗ ГАЗОВ

Для анализа продуктов сгорания при испытаниях употребляется химический газоанализатор системы Орса—Фишер. Обычный газоанализатор Орса—Фишер с двумя жидкостями имеет два погложительных сосуда: в одном находится раствор для поглощения $\text{CO}_2 + \text{SO}_2$, а в другом — раствор для поглощения кислорода. Объёмные проценты (содержание в газах в процентах по объёму) RO_2 и O_2 определяются анализом с помощью прибора Орса.

Сущность действия прибора Орса состоит в том, что дымовые газы в количестве 100 см³ засасывают в градуированную на сотые части своего объёма бюретку и затем пропускают через погложительный сосуд с раствором едкого калия, который поглощает одновременно углекислоту и сернистый газ.

После этого газ возвращают обратно в бюретку и наблюдают уменьшение его объёма в сотых частях объёма бюретки. Это уменьшение соответствует содержанию RO_2 в процентах.

Для определения содержания кислорода находящийся в бюретке газ (после анализа на RO_2) пропускают несколько раз через второй сосуд с раствором, поглощающим из газов кислород. Перегнав газ обратно в бюретку, судят о процентном содержании кислорода по новому уменьшению объёма газа.

Реактивом для поглощения RO_2 служит 25-процентный водный раствор едкого калия. Для поглощения кислорода служит следующий раствор пирогаллола: 25 г пирогаллола растворяют в

* Это уравнение можно считать практически достаточно точным, когда содержание в газах водорода и углеводородов незначительно, что обычно имеет место, при сжигании антрацита и тощих углей. Для топлива с большим содержанием летучих (например мазута) это уравнение может быть применено при ориентировочных подсчётах.

45 см³ горячей воды и смешивают с 120 см³ 25-процентного раствора едкого калия. Так как на воздухе раствор пирогаллола быстро окисляется, его необходимо немедленно после составления перелить в поглотительный сосуд. Для предохранения этого раствора от окисления, сверху в заднюю часть поглотительного сосуда наливают слой вазелинового масла, толщиной около 5 мм.

Поглотительная способность этих растворов следующая: 1 см³ раствора едкого калия поглощает 40 см³ углекислоты, а 1 см³ раствора пирогаллола — 2,25 см³ кислорода. Следовательно, принимая объём налитого в поглотительный сосуд раствора в 160 см³, можно считать, что раствора едкого калия хватит приблизительно на 400—450 анализов, раствора же пирогаллола хватит на 50—60 анализов. После этого эти растворы следует заменять свежими.

Газоанализатор, как хрупкий стеклянный аппарат, требует весьма бережного обращения.

Для правильного действия прибора необходимо следить за плотностью всех его соединений, за чистотой газоанализатора и за тем, чтобы реактивы не проникали в краны и выше их. Анализы должны производиться внимательно и аккуратно. Особого внимания требуют краны; для обеспечения плотности и во избежание заедания необходимо содержать их в чистоте и смазывать вазелином.

Отбор отходящих газов в речных котельных установках производится из дымника, из средней его части, выше верхнего ряда дымстарных трубок или верхнего коллектора пароперегревателя.

Отбор газов производится по медной трубке с внутренним диаметром в 6 мм, вставляемой в специальное отверстие в дымнике или в имеющийся в нём глазок. Зазор между краями этого отверстия и заборной трубкой должен быть тщательно замазан глиной или асбестом во избежание присоса воздуха.

§ 5. ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ ГОРЕНИЯ

Установлено, что при неполном горении с избытком воздуха между содержанием в газах RO_2 , O_2 и CO справедливо следующее соотношение, которое называется основным уравнением горения (при принятом составе воздуха по объёму 21% O_2 и 79% N_2):

$$21 - \beta RO_2 = RO_2 + O_2 + (0,605 + \beta) CO, \quad (51)$$

где β — коэффициент, называемый характеристикой топлива, так как он зависит от состава сжигаемого топлива. Он определяется с достаточной точностью для твёрдых и жидких топлив по формуле:

$$\beta = 2,37 \frac{H_p - \frac{O_p}{8}}{C_p + 0,368 S_p} \quad (52)$$

Значения характеристики топлива β для среднего состава некоторых видов топлива даны в таблицах 50 и 51.

Таблица 50

Характеристики β некоторых видов твёрдого топлива

Топливо	β
Дрова суховутной доставки с влажностью 25%	0,043
Дрова сплавные с влажностью 30%	0,051
Подмосковный уголь	0,1
Донецкий каменный уголь ПЖ и ПС	0,12-0,11
Донецкий антрацит	0,051
Уральский (Кизеловский) уголь	0,14
Кузнецкий (Кальчугинский) уголь	0,127
Кузнецкий (Аджеро-Судженский) уголь	0,1

Таблица 51

Характеристики β для мазута различных марок

Марка мазута	β
7,5	0,348
10	0,345
20	0,321
40	0,305
60-80	0,291

Из основного уравнения горения определяется содержание окиси углерода CO (в проц. по объёму) по формуле:

$$CO = \frac{21 - \beta RO_2 - (RO_2 + O_2)}{0,605 + \beta} \quad (53)$$

Этим уравнением пользуются для вычисления содержания в газах CO по RO_2 и O_2 , определяемым анализом в приборе Орс-Финшер.

Максимальное содержание RO_2 в продуктах сгорания. Если горение полное ($CO=0$) и коэффициент избытка воздуха $\alpha=1$ (работа с теоретически необходимым количеством воздуха), то основное уравнение горения можно представить в следующем виде:

$$21 - 3 RO_2 = RO_2 \quad (54)$$

Содержание RO_2 в газах, которое можно получить в этом случае, будет максимальным для топлива данного вида. Из последнего уравнения:

$$RO_{2\max} = \frac{21}{1 + 3} \quad (55)$$

Максимальное содержание RO_2 для топлива разных видов дано в таблице 52:

Максимальное содержание RO_2 в газах

Топливо	RO_{2max}
Дрова сухопутной доставки с влажностью 25%	20,1
Дрова сплавные с влажностью 30%	19,95
Подмосковный бурый уголь	19,0
Донецкий каменный уголь ПЖ	18,65
Донецкий антрацит	19,95
Уральский (Кизеловский) уголь	18,4
Кузнецкий (Кольчугинский) уголь	18,65
Кузнецкий (Анжеро-Судженский) уголь	19,0
Мазут	15,6

§ 6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФИЦИЕНТА ИЗБЫТКА ВОЗДУХА

Коэффициент избытка воздуха, с которым работает топка (точнее коэффициент избытка воздуха α в отходящих газах) при полном горении топлива, может быть определен путем сравнения RO_{2max} с полученным фактически по данным газового анализа RO_2 . Чем больше содержится в газах O_2 , тем меньше практически содержание RO_2 , и тогда соответственно больше α .

Для определения α через RO_{2max} служит формула:

$$\alpha = \frac{RO_{2max}}{RO_2} \quad (56)$$

Формула эта вполне справедлива только для случая полного горения; однако при текущем контроле работы топки она может быть применима и при неполном горении (когда можно полагать, что содержание CO невелико), т. е. в том случае, если требуется оценить величину коэффициента избытка воздуха по данным анализа газа только на RO_2 .

Более точные формулы для определения коэффициента избытка воздуха следующие:

при полном горении

$$\alpha = \frac{21}{21 - 79 \cdot \frac{O_2}{100 - (RO_2 + O_2)}} \quad (57)$$

при неполном горении

$$\alpha = \frac{21}{21 - 79 \cdot \frac{O_2 - 0,5 CO}{100 - (RO_2 + O_2 + CO)}} \quad (57')$$

§ 7. КОНТРОЛЬ ГОРЕНИЯ

Контроль работы топки (контроль качества горения) при наличии газоанализатора осуществляется по содержанию в отходящих газах RO_2 , O_2 , CO и величине α .

Топка должна быть так отрегулирована, чтобы при поддержании α в пределах, указанных в таблице 49, содержание окиси углерода было возможно меньшим и сгорание топлива было бы бездымным. При неполном горении в газах, как указано выше (см «Состав продуктов горения»), содержится, кроме CO , еще CN_2 и даже в свободном виде H_2 . Однако, имея в виду трудность практического определения CN_2 и H_2 , считают, что отсутствие дыма (частиц несгоревшего углерода) и окиси углерода в газах (основного продукта неполного сгорания углерода) является показателями полного горения.

При отсутствии газоанализатора контроль топки осуществляется по цвету пламени и слоя горящего топлива в топке, а также по цвету продуктов сгорания, выходящих из трубы. Однако последний способ, требующий большого навыка и наблюдательности обслуживающего персонала, всё же далеко несовершенен, ибо не всегда отсутствие дыма указывает на полноту горения. Так, неполное горение при недостатке воздуха сопровождается образованием большого количества окиси углерода, представляющей собой бесцветный газ, не окрашивающий в темный цвет продукты сгорания и поэтому незаметный для глаза. Помимо этого, если в топке низкая температура и процесс неполного горения протекает с образованием большого количества несгоревших углеводородов (окрашивающих продукты сгорания в бурый цвет) и сажи, но топка работает с большим избытком воздуха, отходящие газы могут казаться почти бесцветными вследствие большого объема излишнего воздуха и не указывать на несовершенство процесса горения.

Ниже приведены выработанные практикой условия правильного режима горения при сжигании различного топлива. Этими указаниями можно пользоваться как при ведении топки по газоанализатору, так и при его отсутствии.

§ 8. УСЛОВИЯ ПРАВИЛЬНОГО ЭКОНОМИЧНОГО РЕЖИМА ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА В ТОПКАХ ПАРОВЫХ КОТЛОВ

а) При сжигании мазута

Цвет пламени — яркий, соломенно-жёлтый. Цвет дыма — слабый, беловатый (сгорание почти без дыма).

Коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,15 - 1,3$.

Содержание $\text{RO}_2 = 11 - 13\%$ (ориентировочно).

Содержание $\text{O}_2 = 3,5 - 5,5\%$.

б) При сжигании спекающихся каменных углей

Цвет пламени — яркожёлтый.

Цвет дыма — светлосерый, не густой.

Коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,5 - 1,8$.

Содержание $\text{RO}_2 = 11 - 12\%$.

Содержание $\text{O}_2 = 7 - 9\%$.

Толщина слоя топлива на решётке: 120—200 мм.

в) При сжигании антрацита

Цвет горящего слоя — яркожёлтый.

Цвет дыма — бесцветный.

Коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1.35 \div 1.45$.

Содержание $RO_2 = 12 \div 14\%$.

Содержание $O_2 = 4.5 \div 7.5\%$.

Толщина слоя для мелкого антрацита 60—80 мм, для более крупных сортов 100—160 мм.

г) При сжигании дров

Цвет пламени — жёлтый.

Цвет дыма — серый, не густой.

Коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1.5 \div 2.0$.

Содержание $RO_2 = 11 \div 14\%$.

Содержание $O_2 = 7 \div 10\%$.

§ 9. ПОЛНЫЙ ОБЪЕМ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ И ТЕПЛОСОДЕРЖАНИЕ ИХ

Полный объем продуктов сгорания, получаемых при сжигании 1 кг топлива, составляет:

$$V_s = V_{c,г} + V_{c,п} \text{ м}^3/\text{кг},$$

где: $V_{c,г}$ — объем сухих газов (CO_2 , SO_2 , N_2 и т. д.) в $\text{м}^3/\text{кг}$,

$V_{c,п}$ — объем водяных паров в $\text{м}^3/\text{кг}$, содержащихся в продуктах сгорания, вследствие испарения влаги топлива и влаги, получаемой при сгорании водорода топлива.

Общий объем сухих газов, приведенный к 0°C и нормальному давлению, определяется по формуле:

$$V_{c,г} = \frac{1,86(C_p + 0,368S_p)}{(RO_2 + CO)} \text{ м}^3/\text{кг}, \quad (58)$$

где: C_p — содержание углерода в топливе в процентах по весу,

S_p — содержание серы (летучей) в процентах,

RO_2 и CO — содержание ($CO_2 + O_2$) и окиси углерода в процентах по объему.

В свою очередь, объем сухих газов может быть представлен, как сумма:

$$V_{c,г} = V_{RO_2} + V_{N_2, H_2} \text{ м}^3/\text{кг},$$

где: V_{RO_2} — объем уголекислоты и сернистого газа;

$$V_{RO_2} = 0,0186(C_p + 0,368S_p) \text{ м}^3/\text{кг};$$

V_{N_2, H_2} — объем азота и свободного водорода (объем двухатомных газов).

$$V_{N_2, H_2} = V_{c,г} - V_{RO_2} \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Объем водяных паров, получающийся от сжигания водорода топлива и содержания влаги в топливе, составляет:

$$V_{c,п} = \frac{9H_p + W_p}{11,835 \cdot 100} \text{ м}^3/\text{кг}, \quad (59)$$

где: H_p — содержание водорода в рабочем составе топлива в процентах по весу,

W_v — содержание влаги,

0,805 — плотность водяных паров при атмосферном давлении в кг/м^3 .

Объём влаги (водяного пара), вносимой в топку с воздухом и с форсуночным паром (при наличии паровых форсунок или парового дутья в топку), определяется по формуле:

$$V_{\text{влага}} = \frac{\alpha \cdot L_m \cdot \frac{d}{1000}}{0,805} + \frac{W_{\phi}}{0,835} \text{ м}^3/\text{кг}, \quad (60)$$

где: L_m — теоретически необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг топлива в кг/кг ;

α — коэффициент избытка воздуха, с которым ведётся процесс горения;

d — влагосодержание воздуха в граммах на 1 кг воздуха. Можно принимать $d = 8 : 12 \text{ г/кг}$;

W_{ϕ} — количество водяного пара, вносимого в топку через паровые мазутные форсунки или дутьевой аппарат на каждый килограмм топлива в кг.

При паровом распыливании мазута для речных установок можно принимать в среднем $W_{\phi} = 0,5 - 0,7 \text{ кг/кг}$; при пароструйном дутье угольных топок $W_{\phi} = 0,6 - 0,8 \text{ кг/кг}$.

Экспериментальные данные по удельному расходу пара паровыми форсунками различных систем, применяющимися на речных судах, приведены в таблице 53 (по испытаниям Горьковского института инженеров водного транспорта в 1941 году).

Таблица 53

Удельный расход пара на распыливание мазута при паровых форсунках различных систем, по данным испытаний ГИИВТ в 1941 году

Тип топочного фронта и форсунки	Удельный расход пара на распыливание при нагрузках в кг/час на одну форсунку		
	$B = 65$	$B = 100$	$B = 130$
<i>Фронтон с нижним поддувалом</i>			
Форсунки:			
Вагенера	0,75	0,69	0,60
Габеля	0,86	0,78	0,71
Васильева	0,59	0,50	0,42
Бест	0,71	0,60	0,59
Александрова	0,57	0,46	0,51
Нобеля	0,71	0,56	0,53
<i>Фронтон веерообразный системы Габеля</i>			
Форсунки:			
Вагенера	0,94	0,67	0,62
Габеля	0,71	0,61	0,55

Примечание. Для возможности сопоставления форсунок по удельному расходу пара все форсунки испытывались при трёх приблизительно одинаковых нагрузках по расходу топлива. При испытании добивались полного сгорания топлива.

Коэффициент избытка воздуха поддерживался различным при различных нагрузках. Однако для всех форсунок, при одной и той же нагрузке, коэффициент избытка воздуха отличался мало и в среднем составлял:

при $B=65$	$B=100$	$B=130$
$\alpha = 1,35 \div 1,4$	$\alpha = 1,25 \div 1,3$	$\alpha = 1,12 \div 1,18$

При установленной нагрузке полноты горения добивались за счёт получения необходимой тонкости распыливания соответствующей подачи форсуночного пара. Давление форсуночного пара (после регулировочного вентилля) для всех типов форсунок также было приблизительно одинаковым, составляя в среднем: при нагрузках $B=65 \div 100$ кг/час; $P=1,6 \div 2,0$ ата, а при нагрузке 130 кг/час $P=2 \div 2,5$ ата.

Полный объём водяного пара на 1 кг топлива:

$$V_{g.n} = V_H + V_{g.a}, \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Полный объём продуктов сгорания на 1 кг сжигаемого топлива может быть представлен формулой:

$$V_2 = \frac{1,86(C_p + 0,368 S_p)}{RO_2 + CO} + \frac{9H_p + W_p}{80,5} + \frac{\alpha L_m \cdot \frac{d}{1000}}{0,805} + \frac{W_{\phi}}{0,805}. \quad (61)$$

Из формулы следует, что объём продуктов сгорания в основном зависит:

- 1) от рода сжигаемого топлива,
- 2) от коэффициента избытка воздуха, с которым ведётся процесс горения (так как от величины зависит содержание RO_2 в газах).

Примечание. При сжигании угля, при более точных расчётах, следует объём продуктов горения подсчитывать не по общему содержанию углерода в рабочем составе топлива (C_p %), а по количеству фактически сгорающего углерода C_p' %, которое будет всегда меньше C_p вследствие содержания части несгоревшего углерода топлива в отаговых остатках и в уносе мелких частиц топлива из топки в дымник и дымовую трубу, т. е. вследствие механического недожога топлива (см. ниже главу X «Потери тепла в котельной установке»). Количество углерода в %, не участвующего в процессе горения, определяется по формуле:

$$C_{н.н} = C_p \cdot \frac{q_4 \cdot Q_{н.п}^*}{8100} \%,$$

где q_4 — потеря тепла от механического недожога в процентах от $Q_{н.п}^*$.

Количество сгорающего углерода, по которому подсчитывается объём газов, будет:

$$C' = C_p - C_{н.н} \%.$$

При расчётах, не требующих особой точности, полный объём продуктов сгорания при 0°C и 760 мм рт. столба можно определять по следующей упрощённой формуле:

$$V_2 = x \cdot \frac{Q_{н.п}^*}{1000} \cdot \alpha + 0,112 H_p + 0,0124 W_p \text{ м}^3/\text{кг}, \quad (62)$$

где: H_p — содержание водорода в рабочем составе топлива в процентах по весу;

W_p — содержание влаги в топливе в процентах по весу;

x — коэффициент, зависящий от состава топлива, который можно принимать: $x=1,32$ — для дров, $x=1,14$ — для каменных углей, $x=1,13$ — для антрацита, $x=1,15$ — для мазута.

Для быстрых расчётов при определении V_1 можно пользоваться также формулами:

$$V_2 = \frac{Q_p^H}{900} \cdot \alpha \text{ м}^3/\text{кг}, \quad (63)$$

или

$$V_2 = \frac{0,206 \cdot Q_p^H}{RO_2} \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (64)$$

При быстрых ориентировочных подсчётах объём продуктов сгорания (при нормальных условиях) на 1 кг сжигаемого топлива может приниматься по таблице 54 в зависимости от теплотворной способности топлива и коэффициента избытка воздуха, или по таблице 55 для основных видов топлива среднего состава в зависимости от содержания RO_2 в продуктах сгорания.

Таблица 54

Объём продуктов сгорания (в $\text{м}^3/\text{кг}$) в зависимости от теплотворной способности топлива и коэффициента избытка воздуха в продуктах сгорания

Q_p^H кал/кг	$\alpha = 1,0$	$\alpha = 1,25$	$\alpha = 1,5$	$\alpha = 1,75$	$\alpha = 2,0$
2000	2,2	2,7	3,3	3,9	4,4
2500	2,8	3,4	4,1	4,8	5,5
3000	3,3	4,1	4,9	5,8	6,6
3500	3,8	4,8	5,8	6,8	7,7
4000	4,4	5,5	6,6	7,8	8,8
4500	4,9	6,2	7,4	8,7	9,9
5000	5,5	6,9	8,4	9,7	11,0
5500	6,0	7,6	9,1	10,7	12,1
6000	6,6	8,2	9,9	11,7	13,2
6500	7,1	8,9	10,7	12,6	14,3
7000	7,7	9,9	11,5	13,6	15,4
7500	8,2	10,3	12,4	14,6	16,5
8000	8,9	11,0	13,2	15,5	17,6

Количество воздуха, необходимого для сгорания ($\text{м}^3/\text{кг}$) и объем получающихся продуктов сгорания в м^3 на 1 кг сжигаемого топлива для некоторых наиболее употребительных видов топлива

№ п/п		Размер- ность	Дрова	Донецкий уголь Д	Донецкий уголь ПЖ	Донецкий уголь Т	Антрацит	Мазут
1	Состав топлива:							
	C_p	%	34,8	58,4	73,2	78,0	73,6	83,9
	N_p	"	4,3	4,1	4,4	3,7	1,8	12,3
	O_p	"	29,5	8,2	4,0	2,0	1,7	0,4
	H_p	"	0,7	1,3	1,4	1,3	0,4	—
	S_p	"	0,0	3,0	2,0	2,0	1,5	0,2
	A_p	"	0,7	15,0	11,0	9,0	10,0	0,2
	W_p	"	30,0	10,0	4,0	4,0	5,0	3,0
2	Количество влаги, при- ходящее с паром, по- ступающим в топку	кг/кг	—	—	—	—	0,5	0,5
3	Теоретически необходи- мое количество воз- духа	$\text{м}^3/\text{кг}$	3,25	6,12	7,62	7,93	7,55	10,74
4	Коэффициент избытка воз- духа при:							
	$RO_2=10\%$	"	2,0	1,84	1,83	1,87	1,98	1,52
	$RO_2=15\%$	"	1,84	1,23	1,23	1,26	1,33	1,03
5	Действительный объем воздуха на 1 кг топ- лива:							
	$RO_2=10\%$	"	6,51	11,23	13,96	14,83	14,98	16,28
	$RO_2=15\%$	"	4,35	7,55	9,38	9,95	10,02	11,09
6	Объем продуктов сгора- ния на 1 кг топлива							
	$RO_2=10\%$	"	7,5	11,95	14,69	15,53	15,57	17,48
	$RO_2=15\%$	"	5,29	8,18	9,97	10,5	10,48	12,13

Теплосодержание продуктов сгорания на 1 кг топлива в калориях определяется как произведение из объема продуктов сгорания, полученных от сжигания 1 кг топлива (объем газов берётся при нормальных условиях), на их температуру и теплоёмкость при данной температуре.

Получаем:

$$I = (V_{CO_2} + V_{H_2O}) C_p T_z \text{ кал/кг топлива,} \quad (65)$$

где C_p — теплоёмкость продуктов сгорания в кал/м³.

При температуре газов 200—400° С их теплоёмкость, в зависимости от температуры, с точностью до 4% можно определять по следующей формуле Теплотехнического института:

$$C_p = 0,323 + 0,000018 T \text{ кал/м}^3, \quad (66)$$

где T — температура газов в °С.

Если принять объем продуктов сгорания по формуле: $V_p = \frac{Q_p}{900} \alpha$, а среднюю теплоёмкость газов $C_p = 0,34$ кал/м³, то для определения теплосодержания продуктов сгорания получим следующую формулу, пригодную для ориентировочных подсчётов:

$$I_z = 0,34 \cdot \frac{Q_p}{900} \cdot \alpha \cdot T_{газ} \text{ кал/кг.} \quad (67)$$

Более точно, при тепловых расчётах котельных установок теплосодержание продуктов сгорания на 1 кг сжигаемого топлива определяется по формуле:

$$I = (V_{RO_2} \cdot C_{RO_2} + V_{N_2H_2} \cdot C_{N_2H_2} + V_{H_2O} \cdot C_{H_2O}) T_{газ} \text{ кал/кг.} \quad (68)$$

В этой формуле:

V_{RO_2} — объем трёхатомных газов на 1 кг сжигаемого топлива, определяемый по формуле:

$$V_{RO_2} = 0,0186 [C_p + 0,368 S_p] \text{ м}^3/\text{кг.}$$

$V_{N_2H_2}$ — объем сухих двухатомных газов, определяемый как разность:

$$V_{N_2H_2} = V_{газ} - V_{RO_2} \text{ м}^3/\text{кг.}$$

C_{RO_2} — объёмная теплоёмкость трёхатомных газов,

$C_{N_2H_2}$ — объёмная теплоёмкость двухатомных газов,

C_{H_2O} — теплоёмкость водяного пара.

Теплоёмкости, в зависимости от температуры, принимаются по данным ЮСТИ из таблицы 12.

VI. ТОПОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА РЕЧНЫХ СУДОВЫХ КОТЛОВ

1. ТИПЫ ТОПОК, РАСПРОСТРАНЕННЫЕ НА РЕЧНЫХ СУДАХ, В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РОДА ТОПЛИВА

Топливо	Тип топки	Наиболее применительный тип тягодутьевой установки
Дрова	1. Горизонтальная колосниковая решётка с балочными колосниками. Живое сечение решётки 30—40%¹. Применяется в пролётных и оборотных котлах при диаметре жаровой трубы > 0,9 м, а также при сжигании дров под речными водотрубными котлами (рис. 3 и 4) 2. Фартучная топка системы проф. Кирша. Применяется в пролётных и оборотных котлах при диаметре жаровой трубы > 0,6 м, а также при использовании дров с влажностью до 40—45% (рис. 5 и 6)	1. Естественная тяга (при работе с малой форсировкой) 2. Вытяжная тяга паровым сифоном с диффузором в дымовой трубе 3. Вентиляторное дутьё под колосниковую решётку при наличии воздухоподогревателя с температурой воздуха 130—180° С
Антрацит	Горизонтальная колосниковая решётка из плитчатых колосников с живым сечением 12—14% (рис. 7 и 8)	1. Паровое дутьё под решётку с помощью групповых диффузоров (по 3—4 диффузора в топке) или выносного диффузора 2. Комбинированное паровоздушное дутьё с вентилятором и выносным диффузором
Спекающиеся каменные угли	Горизонтальная колосниковая решётка с балочными или плитчатыми колосниками при живом сечении в 16—20%	Паровое диффузорное дутьё Вентиляторное дутьё под решетку
Мазут	Камерная топка, паровые форсунки (рис. 9 и 10)	Естественная тяга

¹ Живое сечение решётки = $\frac{\text{суммарная площадь отверстий}}{\text{полная площадь решётки}}$

2. ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПРЯЖЕННОСТИ РАБОТЫ ТОПОЧНОГО УСТРОЙСТВА

Тепловое напряжение площади колосниковой решётки. Тепловым напряжением колосниковой решётки называется количество тепла, выделившегося в топке в течение часа (при полном сгорании топлива), которое приходится на 1 м² площади колосниковой решётки.

$$\text{Тепловое напряжение площади колосниковой решётки} = \frac{B \cdot Q^u_p}{\Sigma R} \text{ тыс. кал/м}^2 \cdot \text{час,}$$

(69)

где: B — часовой расход топлива в кг/час;

Q^u_p — теплотворная способность топлива в кал/кг;

ΣR — суммарная площадь колосниковой решётки.

Примечание. Если котёл (котельная установка) имеет несколько топок, площадь колосниковой решётки подсчитывается как сумма площадей всех топок.

Тепловое напряжение площади колосниковой решётки не одинаково для топок различных котлов. Оно не одинаково также и для одной и той же установки в различные периоды её работы. Основными факторами, влияющими на эту величину, являются:

1) род сжигаемого топлива и его качество;

2) конструктивные особенности котла, его система, а также соотношение между величиной поверхности нагрева котла и площадью колосниковой решётки. Чем меньше площадь колосниковой решётки, приходящаяся на 1 м² поверхности нагрева в данной установке, тем больше требуется тепловая нагрузка, с которой должна работать топка при прочих равных условиях (т. е. одинаковой потребной паропроизводительности котла с каждого квадратного метра поверхности нагрева, одинаковом виде топлива и т. д.). Соотношения между поверхностью нагрева котлов и площадью колосниковой решётки для речных котлов указаны в таблице 56.

Таблица 56

Соотношения между величиной полной площади колосниковой решётки и поверхностью нагрева котлов для котельных установок речных пароходов

$\Sigma R_{\text{м}^2}$ — суммарная площадь колосниковой решётки,

$\Sigma H_{\text{м}^2}$ — поверхность нагрева котлов.

Рекомендуемые соотношения	Соотношения, при которых обычно требуется форсированная работа топки
$\frac{\Sigma R}{\Sigma H} = \frac{1}{25} \div \frac{1}{35}$	$\frac{1}{40} \div \frac{1}{50}$

3) мощность имеющихся тягодутьевых устройств данной котельной установки. Чем сильнее дутьё под решётку, чем больше

сила тяги, создаваемая дымовой трубой, сифоном или дымососом, тем большее количество топлива удаётся сжигать в одной и той же установке, тем выше оказывается достигаемое тепловое напряжение колосниковой решётки;

4) количество пара, которое требуется получить с каждого квадратного метра поверхности нагрева котла (т. е. требуемая в данный момент удельная паропроизводительность котла). С увеличением паропроизводительности возрастает и тепловое напряжение площади колосниковой решётки;

5) качество ухода за котлом в эксплуатации.

Особое значение имеет большая или меньшая загрязнённость поверхности нагрева, качество процесса горения и т. п. При загрязнённой поверхности нагрева ухудшается теплопередача от газов к воде, и поэтому для достижения требуемой паропроизводительности котла приходится увеличивать количество сжигаемого топлива и, следовательно, увеличивать тепловое напряжение площади решётки. Точно так же, если процесс горения топлива ведётся неумело, топливо сгорает с дымообразованием и образованием в газах CO , количество сжигаемого топлива для заданной паропроизводительности возрастает и, следовательно, увеличивается напряжение площади колосниковой решётки.

При сжигании каменных углей и антрацитов в топках с дутьём (при паровом или вентилятором дутье под решётку) характеристиками для судовых речных котлов тепловыми напряжениями (нагрузками) площади решётки можно считать указанные в таблице 57.

Таблица 57

Тепловое напряжение колосниковой решётки в тыс. кал/м²час при сжигании углей и антрацита в топках с ручным обслуживанием

Пониженная нагрузка	Средняя нагрузка	Форсированная работа
400—600	600—850	850—1100

Весовое напряжение колосниковой решётки. Весовым напряжением колосниковой решётки называется количество топлива, которое сжигается в среднем на каждом квадратном метре площади колосниковой решётки в течение часа.

$$\text{Весовое напряжение площади решётки} = \frac{B}{SR} \text{ кг/м}^2 \cdot \text{час.} \quad (70)$$

Основными факторами, влияющими на величину $\frac{B}{SR}$ для той или иной установки, являются указанные выше для теплового напряжения площади колосниковой решётки и, кроме того, теплотворная способность сжигаемого топлива.

Чем ниже Q^* , тем большее количество топлива приходится сжигать на каждом квадратном метре решётки при заданной

производительности и тем больше получается напряжение решетки.

Увеличение напряжения решетки требует усиления дутья и тяги, увеличивает потери от неполноты горения топлива вследствие образования продуктов неполного сгорания, усиленного уноса мелких частиц топлива в газоходы и т. д. (см. ниже раздел «Потери тепла»).

Тепловое напряжение суммарного газового окна (суммарного зеркала горения) является характеристикой напряженности работы топки при сжигании топлива непосредственно в жаровых трубах котлов, т. е. без колосниковых решеток (сжигание мазута, распыливаемого форсунками, а также дров в фартучных топках).

Тепловым напряжением суммарного газового окна (зеркала горения) называется количество тепла, выделившегося в топке в течение часа (при полном сгорании топлива) и приходящегося на 1 м² площади суммарного газового окна данной котельной установки.

$$\text{Тепловое напряжение газового окна} = \frac{B \cdot Q^{\text{н}}_{\text{г.т.}}}{\Sigma F_{\text{г.т.}}} \text{ тыс. кал/м}^2 \cdot \text{час.} \quad (71)$$

Здесь: B кг/час — количество сжигаемого топлива с рабочей теплотворной способностью $Q^{\text{н}}_{\text{г.т.}}$ кал/кг (для дров произведение $B \cdot Q^{\text{н}}_{\text{г.т.}}$ может быть заменено произведением $B' \cdot Q$, где B' — часовой расход дров в кубометрах, а Q — теплопроизводительность кубометра дров в тыс. калорий);

$\Sigma F_{\text{г.т.}}$ — суммарная площадь газового окна данной котельной установки.

Суммарная площадь газового окна для судовых огнетрубных котлов (пролётных и оборотных) подсчитывается как сумма площадей поперечного (перпендикулярного к оси) сечения всех одновременно работающих топок (жаровых труб).

Для определения суммарной площади сечения газового окна служит формула:

$$\Sigma F_{\text{г.т.}} = 0,785 D_{\text{г.т.}}^2 \cdot Z \text{ м}^2, \quad (72)$$

где: $D_{\text{г.т.}}$ — диаметр жаровых труб в метрах,

Z — число жаровых труб работающего котла (или всех одновременно работающих котлов данной котельной установки, имеющей расход топлива B кг/час).

Основными факторами, от которых зависит величина теплового напряжения газового окна при работе котла, являются:

- 1) род сжигаемого топлива и его качество;
- 2) конструктивные особенности котла и система его, а также имеющееся в данной паросиловой установке соотношение между поверхностью нагрева и величиной площади газового окна. Чем больше кв. метров поверхности нагрева котла падает на 1 м² площади газового окна, тем при прочих равных условиях, тре-

буется бо́льшая тепловая напряжённость газового окна. Для огнетрубных речных котлов величина отношения $\frac{H_{\text{в}}}{\Sigma F_{\text{ж.т}}}$ колеблется обычно в пределах $80 \div 180 \text{ м}^2/\text{м}^2$. Более благоприятными отношениями, при которых в случае работы на мазуте требуется умеренная форсировка горения, являются $80 \div 120 \text{ м}^2/\text{м}^2$;

3) паропроизводительность котла. С изменением скорости движения и загрузки судна изменяется развиваемая главной машиной мощность и, следовательно, количество пара, требуемое для работы машины. С увеличением паропроизводительности соответственно возрастает количество сжигаемого топлива и тепловое напряжение газового окна.

Характерные для речных котельных установок величины теплового напряжения газового окна указаны в таблице 58.

Таблица 58

Тепловое напряжение суммарного газового окна в тыс. кал/м² час при сжигании мазута и дров в топках судовых огнетрубных котлов

Мазут	Дрова
1500—4000	При искусственной тяге с паровым сифоном: 1000—2500 и выше

При сжигании мазута в топках речных котлов требуемое тепловое напряжение газового окна в пределах, указанных в таблице 58, достигается при естественной тяге. При сжигании дров получение тепловых напряжений в 1500—2000 тыс. кал/м² час и выше возможно только при условии усиления тяги пароструйным сифоном в дымовой трубе или при вентиляторном дутье.

Практически достигаемое тепловое напряжение газового окна при работе на дровах зависит от конструктивных особенностей топки и котла, располагаемой силы тяги, качества топлива (влажность), а также от качества обслуживания установки.

С возрастанием теплового напряжения:

- 1) увеличиваются потери от неполноты горения,
- 2) при искусственной тяге с пароструйным прибором значительно возрастает служебный расход пара на создание тяги,
- 3) затрудняется обслуживание топки, так как требуются более частые загрузки топлива и шуровки, нарушающие нормальный режим топки.

Весовое напряжение суммарного газового окна. Весовым напряжением газового окна называется количество топлива, сжигаемого в час и отнесённого к единице площади суммарного газового окна.

$$\text{Весовое напряжение газового окна} = \frac{B}{\Sigma F_{\text{ж.т}}} \text{ кг/м}^2 \cdot \text{час.} \quad (73)$$

Основными факторами, влияющими на величину $\frac{B}{\Sigma F_{\text{ж.т.}}}$, являются те же, что указаны выше для теплового напряжения газового окна, и, кроме того, теплотворная способность сжигаемого топлива.

Характерные значения $\frac{B}{\Sigma F_{\text{ж.т.}}}$ при сжигании мазута и дров в топках огнетрубных котлов на речных судах приведены в таблице 59.

Таблица 59

Весовое напряжение суммарного газового окна в килограммах на кв. метр площади газового окна в час

Топливо	
Мазут	Дрова
150—400	350—800

Тепловое напряжение объёма топочного пространства. Эта характеристика применяется у речных котлов для оценки напряжённости работы топки при сжигании мазута и угольного топлива.

Тепловым напряжением объёма топочного пространства называется количество тепла, выделившегося в топке в течение часа при полном сгорании топлива и приходящегося на 1 м³ суммарного объёма топочного пространства.

Примечание. Объём топочного пространства судового огнетрубного котла подсчитывается как сумма полезного объёма огневых камер и жаровых труб (для топок с колосниковой решёткой — за вычетом части объёма под колосниковой решёткой и объёма, заложенного кирпичём).

Тепловое напряжение объёма топочного пространства =

$$\frac{B \cdot Q_{\text{г.р.}}}{\Sigma V} \text{ тыс. кал/м}^3 \cdot \text{час.} \quad (74)$$

где ΣV — суммарный объём топочного пространства работающих котлов в м³.

Основными факторами, влияющими на величину $\frac{B \cdot Q_{\text{г.р.}}}{\Sigma V}$, являются: конструктивные особенности котла (система котла, соотношение между поверхностью нагрева котла и объёмом топочного пространства), требуемая теплопроизводительность поверхности нагрева (степень форсировки поверхности нагрева), качество ухода за котлом и топкой и т. д.

В зависимости от указанных факторов, а также режима работы, величина $\frac{B \cdot Q_{\text{г.р.}}}{\Sigma V}$ при работе на мазуте и угле обычно колеблется в пределах 400—1000 тыс. кал/м³ · час.

В. УХОД ЗА ТОПКАМИ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

§ 1. УХОД ЗА ТОПКОЙ ПРИ СЖИГАНИИ МАЗУТА

Растопка. 1. Перед растопкой необходимо проверить футеровку топок, состояние форсунок и правильность их установки. Форсунки должны быть очищены от нагара и установлены строго горизонтально с тем, чтобы при горении пламя было направлено по оси жаровой трубы. Даже небольшое отклонение пламени от оси трубы может вызвать вредные последствия: сильное одностороннее дымление, иногда образование коксовых наростов на стенках топки и даже перегрев стенок жаровой трубы или огневой камеры в том месте, где ударяет пламя, хотя бы металл при этом со стороны воды и был чист.

2. Растопка котла, работающего на мазуте, производится дровами, которые выкладывают в клетку внутри жаровых труб и зажигают. Переходить на отопление мазутом следует после того, как давление в котле достигнет $1,5-2 \text{ кг/см}^2$ по манометру.

3. Перед включением форсунок в работу полностью спускают воду из дежурного ящика (расходной цистерны). Затем открывают вентиль на паропроводе от котла к форсункам и продувают форсунки паром. После этого открывают вентиль на нефтепроводе от дежурного ящика к форсункам и заполняют мазутом нефтяной трубопровод к форсункам.

4. Перед включением форсунок следует полностью открыть дымовую заслонку и провентилировать топку. Регистр топочного фронта (или поддувало) должен быть также полностью открыт для свободного притока воздуха в топку.

5. Зажигание форсунок производят в следующем порядке:

- а) открывают паровой вентиль у форсунки (при этом из паровой щели форсунки начинает выходить струя пара);
- б) к струе пара подносят зажжённый факел;
- в) постепенно открывают мазутный вентиль, после воспламенения струи мазута факел выводят из топки.

Примечания:

1. При зажигании форсунок никогда не следует открывать первым мазутный вентиль, так как скопление в топке негоревшего мазута может дать взрыв и причинить ожоги кочегару.

2. Для факела употребляется обтирка или прядь, заправленная в железную трубку или намотанная на железный стержень и смоченная мазутом.

3. При зажигании форсунки в момент воспламенения топлива часть газов обычно выбрасывается наружу. Во избежание получения ожогов кочегар при зажигании форсунки должен становиться сбоку топочного фронта.

Регулировка форсунок. 1. После включения форсунок должно быть отрегулировано правильное горение. Следует учитывать, что выгоднее работать с малым избытком воздуха в топке, мирясь с тем, что при этом приходится несколько увеличивать расход пара на распыливание. Поэтому в начале регулировки следует несколько прикрыть шибер за котлом и установить небольшое открытие

поддувала или воздушного регистра, через который вводится в топку воздух. После этого можно начать регулировку форсунки.

2. Регулировку форсунки производят следующим образом. Не трогая нефтяной вентиль форсунки, понемногу прикрывают паровой вентиль до тех пор, пока в топке не покажется дым. После появления дыма следует снова несколько увеличить приток пара. Затем приток пара оставляют без изменения, а приток мазута немного увеличивают. Появление при этом дыма указывает на то, что первоначальная установка парового и нефтяного факелов была правильной. Такая установка вентилей остаётся до тех пор, пока не потребуются изменить режим работы топки. Если при установленном открытии воздушного регистра и шибера за котлом одной регулировкой пара хорошего горения достичь не удаётся, следует увеличить приток воздуха в топку. Регулировку количества воздуха надо производить шибером за котлом и открывая поддувало или воздушный регистр топочного фронтона так, чтобы разрежение в топке поддерживалось минимальным.

Уход за топкой во время работы. 1. Основной задачей кочегара во время работы мазутной топки является такая регулировка форсунок, при которой было бы обеспечено поддержание нормального давления пара в котле. Для этого, в соответствии с режимом работы машины, следует производить изменение степени форсировки работы форсунок, регулируя подачу как топлива, так и пара. Для усиления горения надо прибавлять сначала пар, а затем — мазут. При уменьшении горения следует, наоборот, уменьшить сначала подачу мазута, а затем — пара.

2. Если котёл имеет несколько топок, необходимо следить за тем, чтобы форсунки во всех топках работали с одинаковой нагрузкой.

3. При регулировке форсунки всегда следует наблюдать за цветом пламени и отсутствием дымления. Ровное пламя факела светлооранжевого цвета указывает на нормальное горение. Потемнение пламени до красного цвета с тёмными полосами указывает на недостаток воздуха. Белое или прозрачное пламя с появлением ярких искр указывает на большой избыток воздуха. Периодически следует контролировать температуру мазута в дежурном ящике.

Для обеспечения хорошего распыливания при работе на вязких мазутах и в холодное время года топливо надо подогревать. Температуру подогрева выбирают в зависимости от сорта мазута:

Для мазута марок:	Не ниже °С
7,5—10	35
20	60
40—60	70
60—80	75

Ненормальности в работе форсунок и их устранение. 1. Форсунка горит неровно, неполным односторонним факелом или даже совсем

гаснет. Причина — засорение форсунки или образование нагара у выходных щелей форсунки. Для устранения этого необходимо прекратить подачу мазута, затем подачу пара и продуть мазутный канал форсунки паром. При обнаружении нагара нужно очистить от него щели форсунки.

2. Форсунка работает с перерывами (хлопками), факел срыгается или совсем гаснет. Причина — попадание в форсунку вместе с мазутом воды или низкая температура мазута. Для устранения этого надо выключить подачу топлива и пара, спустить воду из дежурного бака и мазутопровода, продуть форсунки, проверить температуру в дежурном ящике. Если температура топлива низка, необходимо увеличить подачу пара на подогрев в расходном ящике.

3. Форсунка работает с дымным факелом. Причина — недостаток воздуха или пара для распыливания. Прекратить дымление можно, увеличив подачу пара или воздуха. При обнаружении дымного факела следует прежде всего увеличить подачу пара на распыливание. Если это не помогает или паровой вентиль форсунки уже полностью открыт, то следует усилить подачу воздуха, увеличив открытие шиберов за котлом, а также поддувала или регистра, топочного фронта.

§ 2. УХОД ЗА ТОПКОЙ ПРИ СЖИГАНИИ АНТРАЦИТА

Растопка. 1. Перед растопкой следует очистить котёл от сажи, золы и уноса, осмотреть решётку, колосники, убедиться в плотности их прилегания к стенкам топки, очистить зашлакованные отверстия в колосниках и проверить работу шиберов.

2. Растопку производят дровами, выложив их в клетку на передней части колосниковой решётки. После того как дрова разгорятся, клетку дров обкладывают спекающимися, легко загорающимися углями (марок ПЖ, ПС)¹. Топочные дверцы при этом следует держать приоткрытыми для обеспечения достаточного притока воздуха к горючей массе.

3. Если на судне имеется другой, уже работающий котёл, то для растопки берут из топки работающего котла несколько лопат раскалённого угля и забрасывают его на переднюю часть колосниковой решётки. Этот уголь разравнивают и забрасывают на него спекающийся уголь.

4. После образования на решётке кучи раскалённого угля, эту кучу разгребают гребком по всей площади колосниковой решётки, после чего забрасывают тонкий слой антрацита. При появлении жара на всей решётке топочные дверцы закрывают.

5. При наличии на судне работающего котла после закрытия топочных дверей включают дутьё, используя пар действующего

¹ При отсутствии этих углей для растопки можно пользоваться и антрацитом, однако, время развода при этом увеличивается вследствие более трудной загоряемости антрацита.

котла. Если работающего котла нет, дутьё дают после того, как давление в котле поднимется до 3—4 кг/см².

Уход во время работы. 1. По мере прогорания антрацита на решётку забрасывают новые порции топлива. При загрузке дутьё прикрывают во избежание выбрасывания пламени из топки. Топливо должно подаваться часто и небольшими порциями (после 10—15 мин. работы топки).

2. Подачу топлива в топку следует производить возможно быстрее и топочные дверцы держать открытыми как можно меньше, чтобы излишне не охлаждать топку.

3. Никогда не следует забрасывать в топку крупные куски антрацита (более 100—125 мм в поперечнике). Если такие куски попадают в топливо, их перед загрузкой следует разбивать. Чтобы топливо горело равномерно, без местных прогаров, оно должно лежать на решётке ровным слоем, и куски топлива должны быть одинаковой величины.

4. Толщину слоя угля при сжигании кускового антрацита следует держать в пределах от 80 до 150 мм. Более тонким слоем сжигают мелкий антрацит (марки АС, АМ), более толстым — крупный (марки АК, АП).

5. Показателем качества горения антрацита является цвет пламени в топке. Светложёлтое пламя является показателем хорошего горения. Красноватое пламя с тёмными полосами указывает на недостаток воздуха в топке (приток воздуха должен быть увеличен усилением дутья; открытие шиберов за котлом также должно быть при этом увеличено).

6. Помимо цвета пламени, при работе топки следует наблюдать также за цветом самого горящего слоя. При обнаружении тёмных мест в горящем слое следует, не подрывая его, разровнять потемневшие места сверху. Если это не поможет, необходимо осторожно, не нарушая всего слоя, удалить плотную шлаковую корку на потемневшем месте.

7. При работе топки на паровом дутье с несколькими диффузорами необходимо следить, чтобы работали все сопла. Если какое-либо сопло выйдет из строя (например, вследствие засорения), то нормальный режим дутья будет нарушен и воздух будет выходить в котельную из зольникового пространства через диффузор с бездействующим соплом, так как давление в зольнике больше, чем в котельном помещении.

8. Отверстия сопел дутьевых аппаратов следует периодически очищать изогнутым шилом. Если это не помогает, необходимо закрыть пар к группе сопел, среди которых имеются засорившиеся, снять форсунку, тщательно прочистить её и затем установить на место.

9. Давление пара, поступающего к форсункам дутьевого аппарата, следует держать не выше 7 кг/см².

10. Следует наблюдать за состоянием колосников. При обнаружении перегрева хотя бы одного колосника, если топка работает на вентиляторном дутье, нужно немедленно дать пар (под-

паривание под решётку) для охлаждения колосников, а при паровом дутье — увеличить подачу пара.

11. Дутьё и тягу следует регулировать так, чтобы в топке поддерживалось давление, приблизительно равное атмосферному (чтобы пламя не выбивалось из топки).

Чистка топки. 1. Чистку топки при работе на антраците производят через 5—8 час. работы. Продолжительность периода между отдельными чистками зависит от сорта антрацита, напряжённости работы и мощности имеющихся тягодутьевых устройств. На необходимость чистки указывают: ухудшение горения, трудность поддержания пара на марке и накопление шлака.

2. Перед чисткой (примерно за 25—30 мин.) следует пустить топку на прогар (не подбрасывать топлива). При работе на воздушном дутье за 20—30 мин. перед чисткой следует дать подпаривание для разрыхления накопившихся на решётке шлаков.

3. Порядок работы при чистке топки следующий:

- а) прекращают дутьё;
- б) отгребают горящий уголь с передней части решётки назад к бортовку;
- в) на очищенной от угля передней части решётки с помощью лома подламывают шлак;
- г) удаляют шлак с передней части решётки, гребком выгребая его из топки;
- д) горящий уголь с задней части решётки гребком перемещают на очищенную от шлака переднюю часть;
- е) подламывают ломом шлак на задней половине решётки;
- ж) через раскалённый горящий уголь на передней части решётки осторожно выгребают шлак с задней половины решётки;
- з) разравнивают гребком оставшийся в топке раскалённый уголь по всей площади колосниковой решётки;
- и) забрасывают новую порцию антрацита тонким слоем равномерно по всей решётке;
- к) закрывают топочные дверцы и включают дутьё.

4. Во избежание охлаждения топки чистку её должно производить как можно быстрее. Продолжительность чистки одной топки не должна превышать 6—10 мин. Топки надо чистить поочерёдно.

5. При работе топки на воздушном дутье по окончании чистки даётся подпаривание до тех пор, пока в топке не накопится достаточный шлаковый слой, о чем можно судить по потемнению зольника.

§ 3. УХОД ЗА ТОПКОЙ ПРИ СЖИГАНИИ СПЕКАЮЩИХСЯ КУЗНЕЦКИХ УГЛЕЙ

Растопка. 1. Перед растопкой следует очистить котёл от сажи, золы, уноса, осмотреть колосники (прогоревшие заменить новыми), очистить зашлакованные отверстия между колосниками.

2. На решётку забрасывают уголь слоем толщиной 100—

120 мм. На передней части решётки, около мёртвой доски, располагают сухие дрова, обкладывают их кусками угля и зажигают. Топочные дверцы при этом надо держать открытыми для обеспечения достаточного притока воздуха к горящей массе.

3. Когда на передней части решётки образуется слой раскалённого древесного угля, на него забрасывают каменный уголь так, чтобы образовалась горка. Как только летучие из этой горки выгорают, слой разравнивают, сдвигая уголь по направлению к задней части топки, а на переднюю забрасывают свежее топливо. При появлении жара на всей площади решётки топочные дверцы закрывают.

4. Если на судне, кроме растапливаемого котла, имеется другой, уже работающий, то для растопки берут из топки работающего котла несколько лопат раскалённого угля, накладывают его на переднюю часть колосниковой решётки и забрасывают свежим топливом.

5. При наличии на судне работающего котла после закрытия топочных дверец включают дутьё, используя пар действующего котла. Если работающего котла нет, дутьё даётся после того, как давление в котле поднимется до 3—4 кг/см².

Работа топки. 1. При сжигании спекающихся углей в топках с дутьём слой угля на колосниковой решётке следует держать в 140—180 мм. Чем крупнее куски угля, тем слой должен быть толще.

2. Загрузку топлива следует производить по 4—5 лопат поочередно в каждую топку и по возможности быстро, чтобы топка не охлаждалась. Момент заброски свежего топлива определяется по внешнему виду горящего слоя. Начинать загрузку следует тогда, когда ранее брошенная порция топлива хорошо разгорелась и имеет вид белой раскалённой массы. Преждевременная заброска или заброска с опозданием приводят к излишним тепловым потерям и снижению паропроизводительности котла.

3. Если воздуха в топку поступает недостаточно, пламя становится мутнокрасным. Появление дыма указывает на наличие недогоревших летучих в уходящих продуктах сгорания. Для восстановления правильного режима горения следует увеличить количество поступающего в топку воздуха, уменьшить толщину слоя угля, прекратить на время заброску топлива и подломать или прорезать шлак.

4. При сжигании угля на простых балочных колосниках, по мере скопления на них шлака, следует резакон прорезать шлак снизу, из поддувала, через щели между колосниками. Прорез шлака нужно производить в местах скопления его на решётке. На скопление шлака указывают места, выделяющиеся тёмными пятнами на решётке, если смотреть на неё снизу через поддувало. Если шлак спёкся в большую плотную массу, прорезать которую снизу не удастся, или если решётка имеет плитчатые колосники, следует подломать шлак с помощью лома, пропустив его поверх колосниковой решётки (через топочные дверцы).

5. Подламыванием шлака и другими приёмами, требующими открытия топочных дверей, злоупотреблять не следует. Надо помнить, что всякое открытие топочных дверей вредит процессу горения, так как охлаждает топку и может привести к повреждению котла (течь дымогарных труб, расстройство цивов и т. п.).

6. Спекшийся в большие пласты уголь необходимо разбивать сверху прабами, чтобы облегчить проход воздуха сквозь массу угля.

7. Когда слой шлака под слоем угля станет слишком толстым и будет затруднять проход воздуха, необходимо произвести чистку топки.

Чистка топки. 1. Перед чисткой топки надо заблаговременно прекратить шуровку слоя, дать шлаку осесть на колосники, поднять уровень воды несколько выше рабочего.

2. Начиная чистку, необходимо уменьшить питание котла, закрыть поддувало или дутьё и, если это не нарушит работу других топок, прикрыть шибер. Горящий уголь надо сгрести на одну половину топки, ломом подорвать обнажённый шлак и гребком выгresti его из топки, стараясь не выгребать при этом куски недогоревшего угля. После этого следует отгрести жар на чистую половину решётки и очистить от шлака другую сторону решётки.

3. После того как шлак полностью удалён, следует разгрести жар по всей решётке и забросить свежее топливо, постепенно доводя толщину слоя до нормального, давая разгореться при чистке одной топки каждой порции заброшенного угля. Для поддержания давления пара в котлах на марке работу остальных необходимо форсировать. Чистку топок—производить поочерёдно.

§ 4. УХОД ЗА ТОПКОЙ ПРИ СЖИГАНИИ ДРОВ

1. Во время работы топки у котлов должен всегда иметься запас дров, пригодных для загрузки в топку. Длина поленьев должна быть не более 1 м, а толщина — не более 130—150 мм. Более крупные поленья надо предварительно разделять. Необходимо помнить, что чем мельче дрова, тем лучше и равномернее они омываются воздухом, и процесс горения протекает более правильно.

2. Так как при загрузке и шуровке топлива нормальный режим работы топки нарушается и паропроизводительность котла в этот момент неизбежно снижается, операции, связанные с открытием топочных дверей, должны выполняться возможно быстрее, чтобы не допустить длительного снижения мощности топки, её охлаждения и связанного с этим падения давления пара в котле.

3. Если топка имеет горизонтальную колосниковую решётку, составленную из балочных колосников, дрова должны загружаться на решётку по возможности ровной, плотной массой, чтобы не было кое-как набросанных поленьев, создающих излишние пустоты и способствующих неправильному распределению воздуха по слою, а следовательно, и неправильному горению. В зависимости

от диаметра топки толщина слоя дров на колосниковой решётке должна поддерживаться в пределах 500—700 мм.

Если топка оборудована фартуком Кирша, дрова должны плотно, без излишних пустот, заполнять всё пространство жаровой трубы от фронта топки до топочного порога. При этом условии получается наилучшее использование топочного объёма, равномерное пронизывание слоя топлива воздухом, чем и достигается полное горение. В передней части фартука происходит подсушка, а затем зажигание поступившего в топку свежезаброшенного топлива, между фартуком и порогом создаётся зона интенсивного горения топлива и дожигания образующегося древесного угля.

4. По окончании загрузки дров следует прикрыть топочную дверцу, увеличить открытие шиберов за котлом и усилить подачу пара на паросифон для того, чтобы обеспечить достаточный приток воздуха к топливу. Необходимо учитывать, что после загрузки слой топлива увеличится, сопротивление его для прохода воздуха значительно возрастёт и приток воздуха затруднится, а потребность его после заброски топлива станет большей.

По мере прогорания топлива, постепенно требуется всё меньше и меньше воздуха; сопротивление слоя также снижается (поступление воздуха облегчается), и поэтому регистр за котлом для уменьшения тяги надо постепенно прикрывать. Необходимо помнить, что если в течение сгорания заброшенной порции дров приток воздуха и тягу от загрузки до загрузки не регулировать, то процесс горения топлива будет проходить крайне неравномерно.

Непосредственно после загрузки сгорание будет идти со значительной потерей тепла от неполноты горения вследствие недостатка воздуха (показателем этого служит появление тёмного дыма из трубы). Затем горение некоторое время будет нормальным, но перед началом новой загрузки, когда основная масса топлива и летучие выгорят, горение будет сопровождаться излишней потерей тепла с отходящими газами вследствие избытка воздуха.

5. В процессе нормальной работы фартучной топки подвод воздуха должен осуществляться через поддувальную дверцу, загрузочная же дверца должна быть закрыта. В тех случаях, когда требуется форсированная работа топки и нехватает воздуха, в силу чего горение начинает протекать с образованием дыма, допускается дополнительный подвод воздуха к слою топлива через приоткрытую загрузочную дверцу.

6. Если котёл имеет несколько топок, загрузка их должна производиться поочерёдно. Требуемая частота загрузки зависит от особенностей установки, режима работы, качества сжигаемых дров и устанавливается опытом. Лучше всего производить загрузку чаще, но небольшими порциями, и возможно быстрее.

7. Во время работы дровяной топки необходимо внимательно следить за процессом горения. Если пламя становится белым и ослепительно ярким, это указывает на поступление воздуха в из-

лишнем количестве. В этом случае тяга должна быть уменьшена, поддувало — прикрыто. Если пламя, наоборот, темнеет и делается более длинным или появляется дым из трубы, тяга должна быть усилена, поступление воздуха в топку — облегчено (большим открытием поддувальной дверцы), так как эти явления указывают на недостаток воздуха в топке.

8. Золу, накапливающуюся в топке между фартуком и топочным порогом и в пространстве под фартуком, а также унос и сажу из дымохода надо периодически удалять. Поверхность нагрева дымогарных трубок нужно содержать в чистоте, обдувать паровыми стационарными банниками или, при их отсутствии, паровыми переносными фурорами и проволочными ершами. При наличии горловин в огневых камерах пролётных котлов через них должно производиться выгревание золы из огневой камеры по мере её накопления, а также после очередной очистки и обдувки труб.

При открывании крышек горловин вытяжной паровой сифон должен быть выключен, дымовой регистр — прикрыт. Открытие горловин при полной тяге или в коем случае не допускается, так как это влечёт за собой засос холодного воздуха в огневую камеру, что может явиться причиной возникновения течи дымогарных трубок.

VIII. РЕЧНЫЕ ПАРОВЫЕ КОТЛЫ

§ 1. ТИПЫ КОТЛОВ

Паровые котлы характеризуются: системой, величиной поверхности нагрева и рабочим давлением пара.

На речных судах применяются обычно котлы следующих типов (систем): а) огнетрубные — пролётные и оборотные, б) водотрубные.

Из числа различных систем водотрубных котлов (Ярроу, Бабкок-Вилькокс и др.) в настоящее время на речных судах получили распространение только водотрубные котлы системы Ярроу-Шульца, так называемого треугольного типа.

подавляющее большинство речных судов имеет до настоящего времени огнетрубные котлы.

Из систем огнетрубных котлов предпочтение должно быть отдано оборотным, получившим в настоящее время преимущественное распространение. При равной поверхности нагрева оборотные котлы, в сравнении с пролётными, имеют меньшую длину (но больший диаметр), дают лучшее использование тепла газов, и дымогарные трубки их меньше подвержены при эксплуатации расстройству и течи, так как трубная решётка в этих котлах более защищена со стороны огневой камеры от влияния холодного воздуха, проникающего в топку. При работе на твёрдом топливе (каменном угле, антраците) оборотные котлы менее подвержены забиванию дымогарных трубок и огневых камер уносом и золой.

Некоторые характеристики пролётных и оборотных котлов даны в таблице 60.

Характеристики пролётных и оборотных речных судовых котлов

Тип котла	Место, занимаемое котлом, на 1 м ² поверхности нагрева в м ²	Объём водяного пространства на 1 м ² поверхности нагрева в л	Объём парового пространства на 1 м ² поверхности нагрева в л	Площадь зеркала испарения на 1 м ² поверхности нагрева в м ²
Пролётный	0,25—0,3	110—130	20—30	0,125—0,15
Оборотный	0,2—0,25	100—120	50—60	0,125—0,15

Сопоставление достоинств и недостатков огнетрубных котлов и водотрубных треугольного типа приведено в таблице 61.

Таблица 61

Сравнение судовых огнетрубных котлов и водотрубных котлов треугольного типа

Огнетрубные котлы	Водотрубные котлы
1. Сравнительно большие паровые и водяные объёмы, приходящиеся на 1 м² поверхности нагрева (вес воды в среднем около 100—110 кг на 1 м² поверхности) 2. Значительный вес котельного металла, отнесённый к 1 м² поверхности нагрева [120—140 кг на 1 м² поверхности нагрева котла] 3. Плохая циркуляция воды в котле и большой объём воды требуют продолжительной и осторожной растопки во избежание расстройств мест соединений котла. Средняя продолжительность растопки 6—10 час. Плохая циркуляция воды обуславливает невысокий паросъём (в среднем 19—23 кг пара с 1 м² поверхности нагрева в час) • 4. Рабочее давление до 16 кг/см². При более высоком давлении котлы	Значительно меньшие паровые и водяные объёмы (вес воды в водотрубных котлах треугольного типа 20—25 кг на 1 м² поверхности нагрева) Сравнительно меньший вес металла на 1 м² поверхности нагрева [60—70 кг на 1 м² поверхности нагрева котла] Хорошая циркуляция воды и, как следствие, быстрый подъём пара без опасности расстройств мест соединений, а также возможность получения большего количества пара в сравнении с огнетрубными котлами. Допустимая с точки зрения сохранения прочности котла и технически вполне достижимая продолжительность растопки (подъёма пара) в 1,5—2 часа. Паросъём с каждого квадратного метра 24—28 кг в час и выше Могут быть построены на давлении до 30—40 кг/см² и выше

Огнетрубные котлы	Водотрубные котлы
трудны в изготовлении, так как требуют толстых листов и получаются очень тяжелыми 5. Трудность установки пароперегревателей в дымогарных трубках и трудность их эксплуатации (особенно при работе котла на твердом топливе вследствие заноса труб золой). Размещение перегревателя за поверхностью нагрева котла, т. е. в дымнике, вследствие сравнительно низкой температуры газов по выходе из дымогарных трубок, требует большой поверхности нагрева перегревателя и не даёт возможности практически получать температуру перегретого пара выше 230—260° С 6. Вследствие значительной аккумулярующей способности большого водяного объёма, даже при резком изменении количества потребляемого из котла пара, давление в котле легко удаётся удерживать почти постоянным (Изменение нагрузки котла продолжительное и постепенное) 7. Малая чувствительность к качеству питательной воды 8. Простота обслуживания и питания водой 9. Сравнительно хорошие условия для очистки от накипи 10. Ввиду большого объёма воды — значительная опасность разрушительного взрыва в случае появления трещин или упуска воды ниже допускаемого уровня	Полная возможность получения перегретого пара с температурой до 320° С и выше. Удобство компоновки перегревателя с котлом 50 2 1 Вследствие малого водяного объёма небольшая аккумулялирующая способность и, как следствие, лёгкий и быстрый переход от малой нагрузки к полной и наоборот Большая чувствительность к качеству питательной воды (повышенные требования к питательной воде) Вследствие малого водяного объёма более трудная регулировка питания (особенно при переменном режиме работы установки) и более сложное обслуживание котла в целом Затруднительная очистка от накипи Малый объём воды в котле исключает опасность разрушительных взрывов

Типовые конструкции огнетрубных котлов (пролётного и оборотного) даны на рис. 11 и 12.

Разрез водотрубного котла системы Ярроу-Шульца с наименованием основных частей дан на рис. 13.

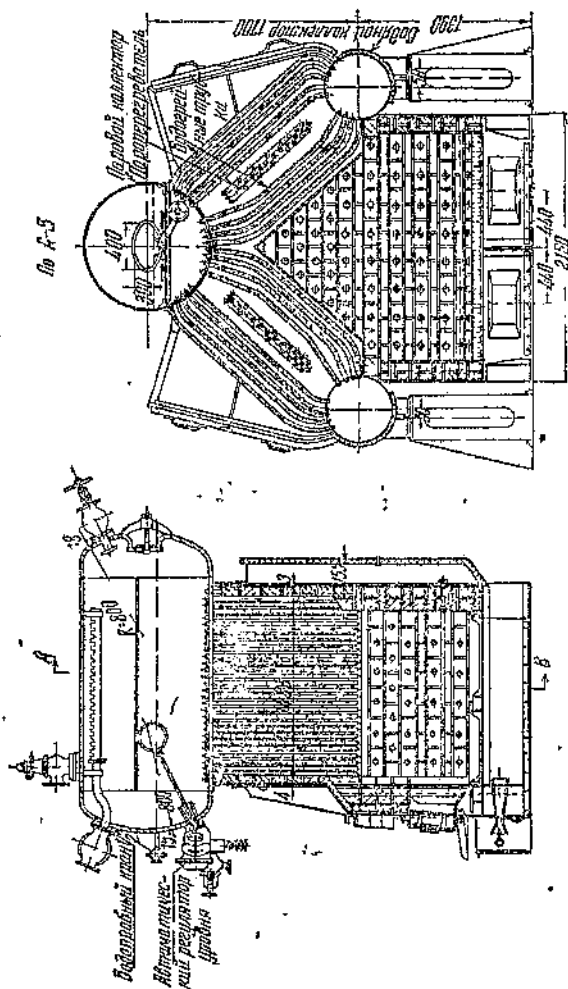


Рис. 13. Водотрубный котёл сист. Ярроу-Шульц. Поверхность нагрева 70 м^2 .
Рабочее давление 14 кг/см^2 .

§ 2. РАБОЧЕЕ ДАВЛЕНИЕ ПАРА

На речных пароходах рабочее давление пара в котлах, употребительное в настоящее время, колеблется в пределах 7—16 кг/см².

Для новых установок с водотрубными котлами давление принимается в 14 кг/см². Давление в котлах на судах старой постройки зависит от конструкции существующей главной паровой машины и состояния самих котлов. Для установок с давлением пара в 7—12 кг/см² при замене ветхих котлов новыми давление повышается, как правило, до 14 кг/см², если этому не препятствует состояние машины. При смене котлов и решении вопроса о повышении рабочего давления части паровой машины подвергают проверке на прочность и, если оказывается, что некоторые детали не удовлетворяют требованиям, — они заменяются новыми, рассчитанными на работу при повышенном давлении.

Для речного флота наиболее употребительное в настоящее время рабочее давление пара в котлах, в зависимости от типа машин, указано в таблице 62.

Таблица 62

Рабочее давление пара, употребительное на речных судах, в зависимости от типа машин

Тип паровой машины	Рабочее давление по манометру в кг/см ²
Машины двойного расширения с золотниковым парораспределением (старой постройки)	7,0—10,5
Машины двойного расширения с клапанным парораспределением (новой постройки)	14,0
Машины тройного расширения	10—14,0

§ 3. ПОВЕРХНОСТЬ НАГРЕВА КОТЛОВ

Поверхностью нагрева называются части котла, омываемые с одной стороны газами, а с другой — водой. Поверхность нагрева принято подсчитывать со стороны газов. Измеряется поверхность нагрева в кв. метрах. Поверхность нагрева огнетрубных котлов, подсчитанная со стороны водяного пространства, больше подсчитанной по газовой стороне на 11—12%.

Общая поверхность нагрева огнетрубных котлов составляется из поверхности огневых камер, дымогарных трубок и жаровых труб. Основную часть поверхности нагрева в огнетрубных котлах составляют дымогарные трубки.

Распределение общей поверхности нагрева между отдельными частями огнетрубных судовых котлов может быть представлено следующими средними цифрами (в процентах от общей поверхности).

Дымогарные трубы	80
Огневые камеры	10—12
Жаровые трубы	6—7
Днища (трубные решётки)	1—2

В водотрубных котлах поверхность нагрева составляется из внешней поверхности водогрейных трубок, внутри наполненных водой, а снаружи омываемых продуктами сгорания.

Поверхность нагрева котлов для речных судов мощностью от 150 до 1200 н. л. с. составляет соответственно от 60 до 400 м².

Как правило, для пароходов до 300—350 н. л. с. устанавливается один котёл; для пароходов мощностью 350—700 н. л. с. — два котла; для пароходов 700—1200 н. л. с. — также два (редко три) котла.

Требуемая поверхность нагрева котлов находится в определённом соотношении с мощностью главной машины.

Отношение поверхности нагрева к мощности, как показывает практика, колеблется в довольно узких пределах, а именно $\frac{H_K}{N_i} = 0,3 \div 0,45$ и зависит, в основном, от типа судна, мощности и конструкции главной машины и параметров пара (насыщенный, перегретый).

Для ориентировки в таблице 63 указаны употребительные на речных судах отношения $\frac{H_K}{N_i}$, показывающие сколько квадратных метров поверхности нагрева приходится на 1 н. л. с. мощности главной машины. Указанные в таблице соотношения предусматривают нормальную нагрузку поверхности нагрева огнетрубных котлов, причём меньшие пределы отношения $\frac{H_K}{N_i}$ относятся к более мощным речным силовым установкам.

Т а б л и ц а 63

Употребительные соотношения между поверхностью нагрева огнетрубных котлов и мощностью главных машин на речных судах

Тип главной машины	Отношение $\frac{H_K}{N_i}$ м ² /н. л. с.
Тройного расширения при работе перегретым паром	0,3—0,36
Тройного расширения при работе насыщенным паром	0,36—0,42
Двойного расширения при работе перегретым паром	0,35—0,4
Двойного расширения при работе насыщенным паром	0,4—0,45

В таблице 64 для примера приведены отношения поверхности нагрева котлов к мощности главной машины для некоторых судов волжского флота, у которых, отношение $\frac{H_K}{N_i}$ может считаться

достаточным и работа котлов происходит без излишней форсировки.

Таблица 64

Отношение величины поверхности нагрева котлов к мощности главных машин для некоторых волжских речных пароходов

Название парохода	Тип судна	Мощность в л. с.	Тип главной машин	Отношение $\frac{H_k}{N_g}$ м ² /л. с.
«Карл Маркс»	Грузо-пассажирское	1150	Тройного расширения (перегретый пар)	0,3
«Страж Революция»	»	900	Тройного расширения (насыщенный пар)	0,36
«Память Баранова»	»	420	Двойного расширения (насыщенный пар)	0,4
«Авиастрой»	Буксирное	1200	Тройного расширения (перегретый пар)	0,36
«Вульф»	»	800	Тройного расширения (насыщенный пар)	0,42
№ 121	»	300	Двойного расширения (насыщенный пар)	0,4
«Память Котовского»	»	465	Двойного расширения (перегретый пар)	0,35

§ 4. МАТЕРИАЛ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СУДОВЫХ ПАРОВЫХ КОТЛОВ

Данные о требуемых качествах металла для изготовления котлов (листовой и заклёпочный металл) в соответствии с правилами Речного Регистра СССР приведены в таблицах 65, 66 и 67.

§ 5. ИСПЫТАНИЕ МЕТАЛЛА РЕЧНЫХ КОТЛОВ¹

Исследование и испытание материала котла производятся в тех случаях, когда: а) возраст котла неизвестен или достиг 30 лет; б) имеются дефекты котла, вызывающие сомнение в безопасности его работы: расслоения, трещины, выпучины с подрывами и т. д.; в) вновь устанавливаемый на судне котёл изготовлен из материала неизвестного происхождения.

¹ См. «Правила классификации и технического надзора за речными и озёрными судами Регистра СССР». Изд. 1941 года.

Марки стали для изготовления паровых котлов речных судов с давлением не менее 15 кг/см²

Марки стали	Временное сопротивление разрыву ¹ в кг/мм ²	Наименьшее удлинение в %: $l=200$ мм для плоского и $l=10 d$ для круглого образца	Испытание на загиб на 180°		Содержание углерода в % (нормально)	Примечание
			в закаленном состоянии	в холодном состоянии		
2	34—42	26	вплотную	—	0,08÷0,13	Для огневых частей котла и листов, подверженных действию горячих газов с температурой выше 700° С или подвергающихся обработке в нагретом состоянии: шлакопосаде, отгибанию бортов и сварке (топки, огневые камеры, трубные доски)
3	38—45	23	на одну толщину образца	—	0,14÷0,2	
4	42—50	20	—	на двойную толщину образца	0,18÷0,27	Для корпуса котла и частей, не подвергающихся действию огня или горячих газов.

¹ Временным сопротивлением называется разрывная сила в килограммах (при которой происходит разрыв образца), приходящаяся на 1 мм² площади сечения образца.

Углеродистая сталь для изготовления паровых котлов с давлением до 22 кг/см²

Марки стали по ОСТ НКТП 4034	Временное сопротивление в кг/мм ²	Наименьшее удлинение на расчётной длине $l=10d$ %	Испытание на загиб в холодном состоянии на 180° d —толщина оправки a —толщина образца (по ГОСТ-1633)	Проба на незакалинаемость, загиб на 180° d —толщина оправки a —толщина образца по ОСТ-1684	На удар на образце с подрезом типа Менже	Содержание элементов			
						углерод %	марганец %	сера %	фосфор %
Ст-3ГСП	38—41	25	—	$d=0$	8	0,12—0,2	—	0,04	не более 0,01
	41—43	24	—	$d=0$	8		—		
	43—45	23	—	$d=0$	8		—		
Ст-4ГП	41—43	23	—	$d=a$	8	0,13—0,26	не более 0,6	0,04	не более 0,04
Ст-5ГК ²	45—52	21	$d=1,5a$	—	6	не более 0,3	—	0,05	0,05
	52—56	20	$d=1,5a$	—	6				

¹ Для частей котла, подвергающихся в процессе обработки фланцеванию, штамповке, сварке, и для листов, подверженных непосредственному действию горячих газов или расположенных в первом газоходе с температурой выше 700° С (топки, оребранные камеры, трубные решётки).

² Для частей котла, не соприкасающихся непосредственно с горячими газами и не подвергающихся обработке с нагревом (корпус котла, стыковые плиты и т. д.).

Нормы заклепочной стали для заклепок паровых котлов

Марки стали по ГОСТ НКТ 2900	Испытание на разрыв		Проба на незакалив- аемость, загиб на 180° по ГОСТ 1684 d — толщина оправки a — толщина образца	Проба на осадку		Проба на расплющи- вание головки в холодном состоянии ОСТ 1686 ОСТ 1693	Назначение материала
	временное сопротив- ление σ кг/мм ²	наименьшее относитель- ное удли- нение $l=10 d$ %		в холодном состоянии ОСТ 1686 $\frac{h_1}{h}$	в горячем состоянии ОСТ 1686 $\frac{h_1}{h}$		
СТ-2 норм.	31—42	26	$d=0$	0,4	до $\frac{1}{8}$ высоты	До диаметра, равного 2,5 диаметра прутка	Для огневых частей котла
СТ-группа 4	41—47	23	$d=0,5 a$	0,75	до $\frac{1}{3}$ высоты	То же	Для бочек котла и других ответственных частей

Примечание. Заклепки также испытываются на срез под прессом; напряжение на срез не должно быть менее 30 кг/мм².

В указанных выше случаях прежде всего предварительно исследуют материал котла. При предварительном исследовании производят: а) микроанализ, б) определение твёрдости по Бринеллю, в) химический анализ.

Число образцов должно быть взято по указанию Речного Регистра, но в каждом случае не менее двух.

Твёрдость H измеряется по Бринеллю отношением нагрузки P кг к боковой поверхности шарового сегмента (оттиска) на испытуемом образце и определяется по данным испытания образца на прессе Бринелля по формуле:

$$H = \frac{P}{\frac{\pi D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad \text{кг/мм}^2, \quad (75)$$

где: D — диаметр шарика в миллиметрах;

d — диаметр отпечатка в миллиметрах;

P — нагрузка в килограммах.

При неудовлетворительных результатах микроанализа материал котла должен быть подвергнут механическим испытаниям на разрыв на прессе Гагарина и на ударную вязкость образцов Менаже.

Число образцов должно быть взято по указанию Речного Регистра, но не менее трёх для каждого вида испытаний.

Материал котла считается удовлетворительным, если:

а) временное сопротивление материала образца на прессе Гагарина получено не менее 32 кг/мм^2 , а относительное удлинение не менее 20% (при длине образца равном 10 его диаметрам);

б) ударная вязкость образцов Менаже не ниже 4 кг/см^2 при температуре $+15^\circ\text{C}$;

в) твёрдость по Бринеллю не ниже $H=95$;

г) химический состав подходит к листовой стали, обусловленной техническими условиями изготовления паровых котлов.

Шашки для микроанализа и химических исследований рекомендуются брать $d=20$ мм, а для механических испытаний — вырезать по плану в виде круга $d=150 \div 170$ мм или квадрата размером 120×120 мм (с закруглёнными углами).

Шашки следует брать: а) из бочки котла — сверху между днищем котла и сухопарником и на уровне воды в котле; б) из днища — в нижней отфланцеванной части; в) из жаровых труб — в верхней половине на расстоянии 150—200 мм от огневой камеры; г) в потолке огневой камеры — в середине; д) в задней стенке огневой камеры — против жаровых труб.

Вырез планок можно производить как механическим, так и автогенным способом. При вырезке планок автогенным способом края выреза необходимо подрубать.

Место выреза шашки заделывают постановкой шпурца, а на место выреза планки вваривают заплату. Вырезку шашек для металлографического исследования обычно производят 3-миллиметровым сверлом, которым проходят по всей окружности шашки.

Примечание. Если качество материала котла не исследовано, допустимое рабочее давление в котле (по известной толщине стенки) определяют по условному временному сопротивлению металла на разрыв — 32 кг/мм^2 (3200 кг/см^2).

Допустимое рабочее давление по толщине стенки цилиндрической части корпуса котла может быть подсчитано по формуле:

$$P = \frac{2 \cdot \sigma_n \cdot \varphi \cdot S}{D \cdot x} \text{ кг/см}^2, \quad (76)$$

где: S — толщина стенки котла в сантиметрах;

σ_n — временное сопротивление на разрыв в кг/см^2 ;

D — наибольший внутренний диаметр цилиндрической части котла в сантиметрах;

x — коэффициент запаса прочности, принимаемый: $x=4,75$ — для швов внахлестку с односторонней накладкой; $x=4,25$ — для двухрядных швов с двумя накладками (если одна из них прикреплена однорядным швом) и для сварных швов; $x=4,0$ — для многорядных швов с двумя накладками и для барабанов без шва.

φ — коэффициент ослабления шва: $\varphi=1$ — для барабанов без шва, $\varphi=0,85$ — для сварных швов.

Для заклёпочных швов φ принимается в зависимости от типа шва: $\varphi=0,75$ — трёхрядный шов внахлестку; $\varphi=0,75$ — двухрядный шов встык с двумя накладками;

$\varphi=0,85$ — трёхрядный шов встык с двумя накладками.

§ 6. ДАННЫЕ О РАЗМЕРАХ СУДОВЫХ КОТЛОВ

Данные о размерах судовых котлов приведены в таблицах 68, 69, 70, 71, 72.

Размеры судовых пролётных котлов

Таблица 68

Число топок	Однотопочные	Трёхтопочные
Поверхность нагрева в м^2	30—120	150—200
Диаметр котла в мм	1300—2200	2600—3250
Длина котла в мм	3300—6300	5000—6200
Длина топки в мм	1400—2600	1900—2500
Диаметр топки в мм	1500—2500	1800—2500
Длина дымогарных трубок в мм	800—1200	900—1100

Таблица 69

Размеры судовых оборотных котлов

Число топок	Однотопочные		Двухтопочные		Трёхтопочные
Поверхность нагрева в м^2	10—20	20—100	45—100	100—180	130—200
Внутренний диаметр котла в мм	1100—1800	1600—2600	2600—3250	2800—4250	3500—4500
Длина между днищами в мм	1500—2500	2100—3300	2600—3000	2900—3500	2900—3700
Длина топок в мм	1100—1800	1500—2500	1800—2400	2050—2500	2300—2700
Внутренний диаметр топки в мм	450—760	700—1100	750—900	850—1300	850—1100

Данные о пролётных котлах, установленных на некоторых пароходах Волжского бассейна

Название парохода	"Маневрострой"	"Вашерхсцев"	"Батуми"	"А. Петраш"	"Спартак"	"Памяти Котов-ского"	"Радичев"	"Красное Сол-ново"	"Капа Маркс"	"Генерал Мерен-ков"	"Гражданка"	"Бера Фингер"
Давление пара в кг/см ²	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	12,0	14,0	14,0	14,0	10,5	11,0
Поверхность нагрева в м ²	220	100	80	120	188	80	126	120	172	122,3	83,6	111,0
Число жаровых труб	8	1	1	1	3	1	2	1	3	1	1	1
Диаметр жаровых труб в мм	1045	1100	1100	1150	900/1000	1100	803	1215	800/930	1150	914,5	895
Длина жаровой трубы в мм	2711	2500	2404	2645	2200	2496	2070	2445	2020	2570	2013	2290
Число жаровых камер	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Число огневых котла в мм	3100	2100	2000	2250	2950	2000	2400	2190	2600	2250	1796	1750
Диаметр бочки котла в мм	5708	5525	5170	5666	5500	5720	5000	5700	5480	6160	5486	5791
Длина бочки котла в мм	272	138	98	129	186	98	132	152	183	122	102	136
Число простых дымогарных труб					142+44				146+37			
Число связанных дымогарных труб	70	34	24	37	36+14	24	56	32	40+11	40	20	34
					50				51			
Длина дымогарных трубок в мм	2550	2500	2690	2830	2600	2715	2480	2720	2800	2930	2928	3287
Внутренний диаметр простых дымо-гарных труб в мм	75	70	83	75	70-123	75	68	63	64-127	75	61	57
Внутренний диаметр связанных дымо-гарных труб в мм	69	64	75	63	64-117	69	69	51	62-123	71	55	51

Данные об оборотных котлах некоторых речных судов

Название парохода	"Память Азина"	"Социализм"	"Волгострой"	"Степан Шалаев"	"Павел Федосеев"	"Сочи"	"Профессор Алеников"	"Максим Горький"	т/х "Армения" (вспомогательный котел)
Давление пара в кг/см ²	12,0	11,0	10,5	8,4	13,0	12,0	7,5	11,6	10,0
Площадь нагрева в м ²	180,0	130,0	79,5	162,6	82,5	120,0	164	144	50,0
Число жаровых труб	952	760	850	2	868	1000	690	720	850
Диаметр жаровых труб в мм	3070	3085	2566,5	3540,0	2669,0	2900	3600	3429	2200
Длина жаровой трубы в мм	840	2	1	1	2	1	1	1	1
Число отрезных камер	4070	-2765	2300	2640	2900	2700	2400	2462	2100
Диаметр бочки котла в мм	4070	3978	3361,5	4450,0	3340,0	3840,0	4435	4343	3014
Длина бочки в мм	174,0	128,0	120,0	160,0	68	134	202	182	79
Число простых дымогарных трубок	48	36	20	26	30	32	23	26	18
Число связанных дымогарных трубок	3000	2940	2640	3540	2520	2800	3650	3295	2200
Длина дымогарных трубок в мм	76	76	63	70	81	70	57	57	64
Внутренний диаметр простых труб в мм	76	76	58	70	75	64	51	57	58
Внутренний диаметр связанных труб в мм									

Водотрубные котлы треугольного типа постройки 3-да, Ленинская кузница

Таблица 72

Поверхность нагрева в м ²	Рабочее давление в кг/см ²	Количество коллекторов водяных паровых	Длина коллектора в мм	Высота котла между центрами коллекторов в мм	Диаметр водогрейных труб		Количество рядов труб		Количество труб		Диаметр коллекторов в мм водяных паровых
					малых	больших	малых	больших	малых	больших	
70	14,0	2 1	1710	1700	38 51		9 3		315 54		500 1000 500 1000 500 1000
130	14,0	2 1	2630	1900	38 38		11		610		
160	14,0	2 1	2630	2200	38 51		9 2		511 94		

§ 7. ДАННЫЕ О ВЕСАХ СУДОВЫХ КОТЛОВ

Данные о весах судовых котлов приведены в таблице 73.

Вес цилиндрических оборотных котлов на 1 м² поверхности нагрева в килограммах

Таблица 73

Поверхность нагрева в м ²	Число топок		Однотопочные		Двухтопочные		Трёхтопочные	
	Поверхность нагрева в м ²		10—25	25—75	45—100	100—160	180—200	
Вес котла на 1 м ² без обшивки и изоляции при давлении:	6 атм		190	160	160	135	—	
	8 атм		205	170	170	150	155	
	10 атм		220	185	190	165	175	
	12 атм		230	210	210	185	195	
	14 атм		240	220	225	200	210	
Обшивка и изоляция			40	27	25	25	22	
			125	120	125	120	110	
Вода в котле			425—475	365—425	380—460	340—420	35—420	
			415—465	360—450	370—420	340—420	350—420	

Полный вес котла с водой и всей гарнитурой при максимальном отоплении

Полный вес котла с водой и всей гарнитурой при угольном отоплении

Примечание. Веса пролётных котлов (без воды) при одинаковой поверхности нагрева в среднем на 10% меньше оборотных.

§ 8. ФОРМУЛЫ ДЛЯ ПРИБЛИЖЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГАБАРИТНЫХ РАЗМЕРОВ И ВЕСА ОГНЕТРУБНЫХ КОТЛОВ

Для судовых оборотных котлов основные размеры и вес можно определять по формулам:

Диаметр бочки котла:

$$D = a \cdot D_{ж.т.} \text{ м.} \quad (77)$$

где: $D_{ж.т.}$ — диаметр жаровой трубы в метрах,

a — коэффициент, значения которого принимаются: $a = 2,5$ — для однотопочных котлов, $a = 3,5$ — для двухтопочных котлов, $a = 4,2$ — для трёхтопочных котлов.

Длина бочки котла определяется из выражения:

$$D^2 L = \frac{10,3 \cdot H_k}{P + 23,8} \text{ м.} \quad (78)$$

где: D — диаметр котла в метрах,

L — длина котла в метрах,

H_k — поверхность нагрева котла в м^2 ,

P — рабочее давление в кг/см^2 .

Вес котла в тоннах без воды, арматуры и гарнитуры:

$$G_k = \frac{P \cdot D^2}{27,15} \cdot \left(L + \frac{D}{4} \right) \text{ т.} \quad (79)$$

где: L — длина котла в метрах,

D — диаметр бочки в метрах,

P — рабочее давление в кг/см^2 .

Вес воды в котле в тоннах:

$$G_v = \frac{L \cdot D^2}{0,1 \cdot P + 1,55} \quad (80)$$

Обозначения и размерности величины те же, что и в предыдущих формулах.

Для определения веса речных огнетрубных котлов (с водой, арматурой и гарнитурой, но без сухопарников) инженером Х. И. Перетрутовым предложены следующие формулы:

Оборотные котлы:

$$G_0 = 20 \cdot H \cdot P \text{ кг.} \quad (81)$$

Пролётные котлы:

$$G_0 = 19 \cdot H \cdot P \text{ кг.} \quad (82)$$

В этих формулах: H — поверхность нагрева котла в м^2 ,

P — рабочее давление в кг/см^2 .

По элементам вес котла определяется следующими эмпирическими формулами:

Элементы	Оборотные котлы	Пролётные котлы
Вес металла G_1 (кг)	$K \cdot H \cdot P$	$K \cdot H \cdot P$
Вес воды в котлах G_2 (кг) . .	$(0,6 \div 0,65) \cdot G_1$	$(0,65 \div 0,7) \cdot G_1$
Вес арматуры и гарнит. G_3 (кг)	$(0,03 \div 0,06) \cdot G_1$	$(0,03 \div 0,06) \cdot G_1$

Примечание. Значение коэффициента K для оборотных котлов 12, для пролётных котлов — 11. При наличии сухопарника коэффициент увеличивается на 5%.

§ 9. ДЫМОГАРНЫЕ И ВОДОГРЕЙНЫЕ ТРУБЫ КОТЛОВ

Наиболее употребительные размеры дымогарных труб речных котлов указаны в таблицах 74 и 75.

Таблица 74

Трубы дымогарные простые для судовых огнетрубных котлов
(стандарт Главного управления Наркомата Обороны СТ 390-К)

Толщина стенки Наружный диаметр трубы в мм	2,5 мм			3,0 мм			3,5 мм		
	Внутренний диаметр в мм	Допустимое рабочее давление в кг/см ²	Вес 1 пог. м в кг	Внутренний диаметр в мм	Допустимое рабочее давление в кг/см ²	Вес 1 пог. м в кг	Внутренний диаметр в мм	Допустимое рабочее давление в кг/см ²	Вес 1 пог. м в кг
51	46	5	2,99	45	12	3,55	44	16	4,1
57	52	5	3,36	51	10	3,99	50	16	4,62
63	—	—	—	57	10	4,44	56	16	5,13
70	—	—	—	64	8	4,96	63	14	5,74
76	—	—	—	70	8	5,4	69	12	6,26
83	—	—	—	—	—	—	76	12	6,86

Таблица 75

Трубы дымогарные вязные для огнетрубных котлов

Толщина стенки в мм	5,0	6,0	7,0
Наружный диаметр в мм	Внутренний диаметр в мм	Внутренний диаметр в мм	Внутренний диаметр в мм
51	41	39	—
57	47	45	—
63	53	51	56
70	60	58	62
76	66	64	69
83	73	71	69

Нормальные размеры диаметра отверстий под дымогарные трубки в трубных решётках (по ОСТ СТ 390-К):

а) в трубной решётке огневой камеры — 51, 57, 63, 70, 76, 83 мм,

б) в передней трубной решётке — 53, 59, 65, 72, 78, 85 мм.

Нормальные расстояния между трубными отверстиями в решётках (определяемые по наружным кромкам фактически выполненных отверстий), согласно техническим условиям на изгото-

товление судовых паровых котлов на давление 22 кг/см² по Регистру СССР:

для дымогарных трубок диаметром:

до 70 мм — не менее 20 мм

до 83 мм — не менее 22 »

83 мм и более — 25 »

Размеры и вес цельнотянутых труб, употребительных для судовых водотрубных котлов в качестве водогрейных труб, даны в таблице 76.

Бесшовные трубы (цельнотянутые)

(Таблица 76)

(извлечение из технических условий на цельнотянутые трубы общего назначения. ОСТ 6688)

Наружный диаметр в мм	Толщина стенки в мм	Теоретический вес 1 пог. м. труб в кг
38	1,0	0,912
	1,5	1,35
	2,0	1,78
41	1,5	1,46
	2,25	2,15
42	1,0	1,01
	1,5	1,50
	2,0	1,97
44,5	2,0	2,10
	2,5	2,59
51	2,5	2,99
	3,0	3,55

§ 10. ХАРАКТЕРИСТИКА НАПРЯЖЕННОСТИ РАБОТЫ ПАРОВОГО КОТЛА

Основным показателем напряжённости работы (степени форсировки) котла является количество пара, снимаемого в среднем с 1 м² поверхности нагрева. Эта величина называется напряжением поверхности нагрева или удельной паропроизводительностью. Размерность:

$$\frac{D}{H_n} \text{ кг/м}^2 \cdot \text{час},$$

где: D — паропроизводительность в кг/час,

H_n — поверхность нагрева котла в м².

Так как количество пара, снимаемого с 1 м² поверхности нагрева (при одной и той же величине форсировки работы топочного устройства), зависит от того, с какими параметрами (давление, температура) вырабатывается пар, а также от температуры подаваемой в котёл питательной воды, то для сравнения напряжённости работы различных котельных установок удельная паропро-

производительность указывается в килограммах нормального или стандартного пара.

Нормальным называется пар, имеющий теплосодержание 640 кал/кг. Теплосодержание нормального пара соответствует количеству тепла, которое нужно затратить, чтобы получить пар при давлении 1 ата из воды с температурой в 0°C.

Удельная паропроизводительность по нормальному пару определяется по формуле:

$$K = \frac{D \cdot \Delta i}{H_k \cdot 640} \text{ кг/м}^2 \cdot \text{час}, \quad (83)$$

где: $\Delta i = i - t_g$ — приrost теплосодержания в котле,

i — теплосодержание пара, даваемого установкой, в кал/кг,

t_g — температура питательной воды в °C.

Средние значения удельной паропроизводительности для котлов речных судов:

$$K = 20 \div 24 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{час}.$$

Величина напряжения поверхности нагрева котлов в зависимости от форсировки работы дана в табл. 77.

Таблица 77

Напряжение поверхности нагрева огнетрубных котлов речных судов

	Нормальная нагрузка	Повышенная нагрузка	Форсированная работа
$K \text{ кг/м}^2 \cdot \text{час}$	19—23	23—25	25—28 и выше

Если котельная установка вырабатывает и насыщенный и перегретый пар, условное напряжение поверхности нагрева котла по нормальному пару подсчитывают по формуле:

$$K = \frac{D_n(i_n - t_g) + D_p(i_x - t_g)}{H_k \cdot 640} \text{ кг/м}^2 \cdot \text{час}. \quad (84)$$

где: D_n — количество вырабатываемого перегретого пара с теплосодержанием i_n кал/кг в кг/час,

D_p — количество вырабатываемого котлом насыщенного пара с теплосодержанием i_x и степенью сухости x в кг/час.

Требуемая удельная паропроизводительность не одинакова для различных установок, а также и для одной и той же установки в различные периоды её работы и зависит в основном от следующих факторов:

1) соотношения между мощностью главной машины и общей поверхностью нагрева котлов в данной установке;

2) расхода пара, требуемого в данной установке на 1 и. л. с./час главной машины;

3) режима работы машины (число оборотов, наполнение цилиндра высокого давления) и развиваемой ею мощности.

§ 11. ТЕПЛОВАЯ НАГРУЗКА ПОВЕРХНОСТИ НАГРЕВА

Тепловой нагрузкой (тепловым напряжением) поверхности нагрева называется количество тепла, переданного от газов к воде, находящейся в котле, через 1 м² поверхности нагрева в час. Размерность:

$$\frac{Q}{H_k} \text{ кал/м}^2 \cdot \text{час.}$$

Тепловая нагрузка рассчитывается по формуле:

$$\frac{Q}{H_k} = \frac{D(i - t_g)}{H_k} \text{ кал/м}^2 \cdot \text{час.}, \quad (85)$$

где: D — часовая паропроизводительность в кг/час,

i — теплосодержание пара в кал/кг,

t_g — температура питательной воды в °C,

H_k — поверхность нагрева котла в м².

Средние значения тепловой нагрузки поверхности нагрева для судовых огнетрубных котлов:

$$\frac{Q}{H_k} = 11\,000 \div 15\,000 \text{ кал/м}^2 \cdot \text{час.}$$

§ 12. ПИТАТЕЛЬНЫЕ СРЕДСТВА ПАРОВЫХ КОТЛОВ

Питательными средствами называются аппараты, служащие для подачи воды в котлы.

По правилам Регистра СССР, каждый судовой паровой котёл или группа объединённых в работе котлов должны иметь не менее двух питательных приборов, действующих независимо один от другого. Один из этих приборов должен обязательно иметь устройство, позволяющее производить питание котлов во время стоянки судна.

Основным питательным прибором на речных судах является машинопитательная помпа, приводимая в движение главной паровой машиной. Вторым питательным прибором (который обычно подает воду в котлы на стоянках судна) является инжектор. На очень многих судах кроме машинопитательных помп и инжекторов имеются специальные паровые питательные насосы. В большинстве случаев предусмотрена также возможность подачи воды в котёл с помощью пожарных насосов.

Часовая производительность каждого из двух питательных приборов должна быть, по крайней мере, вдвое больше количества воды, которое требуется при нормальной паропроизводительности котла или группы объединённых котлов, для питания которых предназначен прибор. Исключение составляют только насосы, приводимые в движение главной паровой машиной. Для приводных от машины насосов достаточной считается производительность, равная 1,5 количества питательной воды, требуемой для нормальной производительности котлов.

В речном флоте из различных систем инжекторов наибольшее распространение имеют инжекторы системы Рестартинг. Употребительные номера инжекторов этого типа и их производительность указаны в таблице 78.

Таблица 78

Производительность инжекторов системы Рестартинг

№ инжектора	Производительность в л/мин.	Диаметр труб в мм		№ инжектора	Производительность в л/мин.	Диаметр труб в мм	
		паровых	водяных			паровых	водяных
2	8	20	20	8	87	40	30
3	12	20	20	9	100	40	30
4	25	25	25	10	125	45	40
5	37	25	25	11	150	45	40
6	50	30	30	13	200	60	50
7	62	30	30	15	300	75	60

Примечание. Производительность инжекторов указана в таблице при давлении пара 6 кг/см², высоте всасывания в 1 м и температуре всасываемой воды 15°С. При увеличении высоты всасывания и повышении температуры всасываемой воды производительность инжектора снижается.

Данные об инжекторах системы Кертинг приведены в таблице 79.

Таблица 79

Производительность инжекторов системы Кертинг

№ инжектора	Производительность в л/мин.	Диаметр труб в мм		№ инжектора	Производительность в л/мин.	Диаметр труб в мм	
		паровых	водяных			паровых	водяных
3	10	13	13	10	108	50	50
4	17	25	25	11	130	50	50
5	27	30	30	12	155	60	60
6	30	30	30	13	180	60	60
7	51	40	40	14	200	60	60
8	68	40	40	15	240	70	70
9	87	50	50	16	275	80	80

Примечание. Производительность указана при давлении пара в 6 кг/см² и температуре всасываемой воды 15°С.

В таблицах 80, 81 и 82 приведены данные о паровых насосах, применяемых для питания паровых котлов.

§ 13. АРМАТУРА ПАРОВЫХ КОТЛОВ

Арматурой являются приборы, устанавливаемые на котлах для наблюдения за безопасной и правильной их работой.

Арматура котла разделяется на: а) арматуру парового пространства, б) арматуру водяного пространства.

Арматура парового пространства. К ней относятся: манометры, предохранительные и стопорные клапаны.

а) Манометры. По правилам Речного Регистра, ведающего надзором за работой паровых котлов на речных судах, при каждом судовом паровом котле должно быть два выверенных манометра, на циферблатах которых высшее допущенное для котла рабочее давление должно быть отмечено красной чертой. Циферблаты манометров должны иметь шкалу давлений в кг/см^2 , причём шкала циферблата должна иметь деления на давление не менее полуторного рабочего давления плюс $3,5 \text{ кг/см}^2$.

При манометрах должен быть трёхходовой кран с фланцем, диаметром 38 мм и толщиной 6 мм для присоединения контрольного манометра. Каждый манометр должен быть запломбирован Палатой мер и весов, куда ежегодно манометры сдаются на проверку.

б) Предохранительные клапаны. Каждый судовый паровой котёл должен быть снабжён не менее чем двумя предохранительными клапанами, нагрузка которых должна соответствовать наибольшему допущенному рабочему давлению пара в котле. Один из предохранительных клапанов котла должен иметь приспособление для пломбирования или запора на замок во избежание произвольного увеличения давления пара в котле.

в) Стопорные клапаны служат для разобщения парового пространства котла с паропроводом. Каждый котёл обычно имеет два стопорных клапана: главный — для сообщения с главным паропроводом и вспомогательный — для сообщения с трубопроводом, подающим пар к вспомогательным механизмам.

Арматура водяного пространства. К арматуре водяного пространства относятся: водоуказательные приборы (пробные краны, водомерные колонки), питательный клапан, обратный клапан и краны верхнего и нижнего продувания.

Водоуказательные приборы. В соответствии с правилами Речного Регистра СССР каждый судовый котёл должен быть снабжён по крайней мере двумя независимыми приборами для показания в нём уровня воды. Одним из этих приборов может быть колонка с водомерным (водоуказательным) стеклом, а другим — комплект пробных кранов. Водоуказательные стёкла должны устанавливаться в плоскости, перпендикулярной к продольной плоскости оси котла, на одинаковой высоте и на равных расстояниях от середины котла.

Высота расположения водоуказательных стёкол должна быть такова, чтобы середина стекла была выше низшего допускаемого уровня воды в котле, а верхняя грань нижней гайки стекла или

Размеры и характеристики насосов

№	Производительность м³/час	Диаметр цилиндров в мм		Ход поршня в мм	Число однократных ходов в минуту
		парового	водяного		
1	1,8—3,7	83	51	83	100—210
2	4—7	114	70	102	100—175
3	6—14	133	89	127	75—165
4	10—20	153	102	152	75—150

Стандартные паровые горизонтальные

Номер модели насоса	Производительность в т/час	Диаметр цилиндров в мм		Ход поршня в мм	Число двойных ходов в минуту
		парового	водяного		
I	5	100	70	100	60
II	10	125	90	130	57
III	15	150	110	150	50

Примечание. 1) Котельное давление 12—16 кг/см², 2) рабочее да-

Стандартные паровые вертикальные

Номер модели насоса	Производительность т/час	Диаметр цилиндров в мм		Ход поршня в мм	Число двойных ходов в минуту
		парового	водяного		
I	5	100	70	100	60
II	10	125	90	130	57
III	15	150	110	150	50
IV	20	175	130	150	48

Примечание. 1) Котельное давление пара 12—16 кг/см², 2) рабочее

системы Ворингтон советского производства

Напор воды в атм. при давлении пара 5 кг/см ²	Увеличение напора при увеличении давления на 0,5 кг/см ²	Диаметр труб в дюймах			
		паровых		водяных	
		впускных	выпускных	всасываю- щих	нагнетатель- ных
7	1	1/8	3/4	1 1/2	1
7	1	1/2	6/4	2	1 1/2
6	1,1	3/4	1 1/4	2 1/2	2
	1,6	1	1 1/2	3	2 1/2

Таблица 81

питательные насосы (ОСТ 3470)

Диаметр отверстий для труб в мм				Наибольшие габаритные размеры в мм			Прибли- зительный вес насоса в кг
паровых		водяных		длина	ширина	высота	
свежего пара	отрабо- танного пара	всасы- вающих	нагнета- тельных				
12	20	50	40	850	345	465	180
20	32	65	50	950	375	515	260
25	40	75	65	1190	420	635	400

давление насосных цилиндров 17,5—20 кг/см².

Таблица 82

питательные насосы (ОСТ 3465)

Диаметр отверстий для труб в мм				Габаритные размеры ¹ в мм			Прибли- зительный вес насоса в кг
паровых		водяных		длина	ширина	высота	
свежего пара	отрабо- танного пара	всасы- вающих	нагнета- тельных				
12	20	50	40	445	350	1130	170
20	32	65	50	480	380	1200	250
25	40	75	65	520	480	1345	380
32	40	75	65	585	550	1360	460

давление насосных цилиндров 17,5—20 кг/см².

нижний край прорези прибора Клингера были выше наименьшей точки поверхности нагрева, по крайней мере, на 50 мм.

Примечание. Высота наименьшего уровня воды в котле над наименьшей точкой поверхности нагрева (в огнетрубных котлах потолок огневой камеры) принимается в зависимости от диаметра бочки котла по данным следующей таблицы:

Диаметр котла в м	Высота наименьшего уровня в мм
1,0	100
1,5	140
1,8	150
2,1	165
2,4	175
2,8	190
3 и более	200

Для отметки наименьшего допускаемого уровня воды, по правилам Регистра СССР, на каждом судовом котле, вблизи водомерных приборов, на высоте наименьшего допускаемого при работе котла уровня воды, должен быть укреплен металлический указатель. Указатель должен быть прочно привёрнут шурупами к стенке котла. Отметка наименьшего уровня воды должна быть также ясно обозначена и на каждом водоуказательном приборе.

Кроме водомерных стёкол, каждый паровой котёл для контроля уровня воды должен иметь не менее двух пробных кранов. Нижний пробный кран помещается на низшем допустимом уровне воды, а верхний — в паровом пространстве котла.

§ 14. УХОД ЗА ПАРОВЫМИ КОТЛАМИ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

Основные правила для кочегаров. 1. Кочегар не имеет права без разрешения администрации судна (капитана или механика) допускать в котельное помещение посторонних лиц.

2. Выходы из машинного и котельного помещения во время работы не должны запираются на ключ или засов.

3. Котельное помещение должно содержаться в порядке.

4. Проходы вокруг котлов не должны загромождаться.

5. Кочегар не имеет права, хотя бы на короткое время, оставить котельное отделение и прервать наблюдение за котлом. Всякая, даже самая кратковременная, отлучка стоящего на вахте кочегара допускается только после замены его подвахтенным лицом и с ведома вахтенного начальника по машине.

6. Кочегар, сдающий вахту, не имеет права покинуть котёл до тех пор, пока сменяющий его кочегар не примет вахту.

7. О всякой неисправности котла или приборов, обнаруженной во время вахты, следует немедленно заявить вахтенному начальнику по машине.

8. Воспрещается во время действия котла держать воду ниже наименьшего допускаемого уровня, а давление пара — выше разре-

шённного (стрелка манометра не должна переходить за красную черту).

9. Работа топки должна быть немедленно прекращена:

а) если уровень воды в котле, несмотря на питание его, быстро понижается или вода упала так низко, что её не видно в стекле;

б) если неисправны все питательные приборы;

в) если внутренние топочные части накаляются докрасна, а также если на них будет замечена отдулина (взбучина) или трещина;

г) если оба предохранительных клапана неисправны;

д) если в работе котла будут замечены непонятные явления.

10. Запрещается производить какой-либо ремонт котла во время его работы.

11. Во время пожара или аварии судна кочегар должен оставаться на своём посту и выполнять распоряжения вахтенного начальника. В случае, если пожар начинает угрожать котельному отделению или оно подверглось затоплению, следует: выключить форсунки (при мазутном отоплении), выгнать огонь из топки (при отоплении твёрдым топливом), пустить полным ходом все питательные приборы, закрыть регистр и травить пар через предохранительные клапаны.

12. Кочегар отвечает в административном и судебном порядке за повреждения котла или несчастные случаи, которые произошли из-за его невнимательности или небрежности.

Уход за водоуказательными приборами, манометрами и предохранительными клапанами. 1. Водоуказательные приборы (водомерные колонки, пробные краны), манометры и предохранительные клапаны являются важнейшими контрольными приборами, от правильного действия которых зависит безопасность работы котла. Небрежный уход за этими приборами, невнимательное наблюдение во время работы котла за показаниями водомерных стёкол и манометра могут вызвать серьёзную аварию котла вплоть до его взрыва. Поэтому в эксплуатации должно быть обеспечено правильное действие этих приборов, а уровень воды в водомерном стекле и показания стрелки манометра должны находиться под постоянным наблюдением вахтенного кочегара.

2. Водоуказательные приборы и манометры во время работы котла должны быть хорошо освещены.

3. Правильное действие водомерных колонок надо проверять: а) по постоянному колебанию уровня воды в стекле; б) по положению рисок у кранов водомерной колонки; в) продуванием кранов и водомерных стёкол.

4. Продувать краны и стёкла водомерных колонок следует регулярно не реже 1—2 раз за вахту и, кроме того, немедленно каждый раз в том случае, если явится какое-либо сомнение в их исправном состоянии или действии.

5. Не реже одного раза за вахту следует проверять уровень воды в котле, пользуясь водопробными кранами.

6. Продувание водомерного стекла следует производить в та

ком порядке: а) открыть продувочный кран; б) закрыть паровой кран колонки, оставив открытым водяной; в) открыть паровой кран и закрыть водяной; г) открыть водяной кран и закрыть продувочный.

7. Не допускается течь кранов водомерных колонок, кранов манометра или трубок. Лопнувшее стекло водомерной колонки немедленно нужно заменять новым.

8. Правильное действие манометров надо проверять:

а) сравнением показаний нескольких манометров, установленных на котлах (при исправном состоянии манометров их показания на соседних котлах, работающих на общую паровую магистраль, должны быть приблизительно одинаковы);

б) путем соединения манометра трёхходовым краном с атмосферой. При этом стрелка манометра должна спокойно спускаться до нуля. Такая проверка манометров должна производиться механиком не реже одного раза в сутки.

Примечание. При сообщении манометра с атмосферой краники его следует поворачивать медленно, так как быстрое открывание крана может испортить манометр.

9. Регулярно нужно проверять исправное действие предохранительных клапанов путём продувки клапана паром, для чего следует периодически осторожно приподнимать клапан с седла при помощи рычага.

Примечание. Продувку клапана следует производить во время стоянки машины или на малом ходу.

10. Категорически воспрещается прибавлять нагрузку на предохранительный клапан или заклинивать рычаги клапанов.

Ненормальности в работе манометра и меры их устранения

Ненормальность	Причины	Меры устранения
Стрелка не опускается на нуль, хотя трёхходовой кран сообщён с атмосферой	Засорён канал трёхходового крана	Снять пробку трёхходового крана манометра, прочистить каналы (если есть разобитительные краны)
При включении в рабочее положение стрелка поднимается очень медленно или не доходит до своего прежнего положения	Засорились отверстия крана, или сифонной трубки. Перекрыты каналы прокладкой	Продуть трубку манометра. Сменить прокладку
Из корпуса манометра капает вода	Нарушилась плотность внутренней трубки. Показания давления будут неверны (запущены)	Заменить манометр исправным

Примечание. Во всех приведённых и других сомнительных случаях (например, манометры нескольких сообщённых котлов показывают разное давление), если рекомендованными выше мерами не удастся устранить неисправность, манометр следует зачистить запасным, исправным.

Уход за котлом при подъёме пара

1. Перед заполнением котла водой, после чистки или ремонта нужно убедиться, что:

а) поверхность котла со стороны воды тщательно очищена от накипи и грязи, а с огневой стороны — от сажи и уноса;

б) легкоплавкие пробки находятся в исправном состоянии;

в) из котла удалены все инструменты и приспособления, употреблявшиеся при чистке котла;

г) все части арматуры и гарнитуры котла, а также питательные приборы находятся на месте, в исправном состоянии и готовы к действию;

д) заглушки, поставленные для отключения котла от трубопроводов на время чистки, сняты;

е) футеровка топок находится в исправном состоянии.

2. После того как механик убедится, что котёл находится в полной исправности и может быть допущен к работе, котёл заполняют водой. Наполнение котла желательно производить тёплой водой, так как при этом потребуется меньше времени и топлива на подогрев воды и подъём пара. Если котёл находится в холодном состоянии, а вода имеет температуру свыше 40°C , наполнение котла должно производиться медленно, чтобы все части котла прогревались постепенно. При наполнении котла надо по стеклу следить за уровнем воды. Подачу воды следует прекратить, когда уровень воды будет немного ниже верхней кромки водоуказательного стекла.

3. Во время растопки котла паровое пространство его должно быть сообщено с атмосферой для выхода из котла находящегося в нём воздуха, растворённого в воде и выделяющегося при её нагревании. Для этого при растопке котла следует открыть воздушный кран, а если его нет, — приподнять предохранительные клапаны.

4. Если котёл имеет пароперегреватель, трубки его перед растопкой следует заполнить водой во избежание перегрева и порчи элементов перегревателя, а разобщительный вентиль между котлом и перегревателем должен быть приоткрыт.

5. Растопка котла должна производиться медленно, в соответствии с установленными Речным Регистром нормами времени (см. ниже) на подъём пара в зависимости от величины поверхности нагрева котла. Медленный подъём пара способствует равномерному прогреванию металла и предотвращает опасность возникновения дополнительных напряжений от неравномерного расширения частей котла.

6. Если вследствие расширения при нагревании уровень воды поднимается выше верхней кромки стекла, часть воды должна

быть спущена (до появления уровня воды в стекле) через кран верхнего продувания.

7. Когда из открытого воздушного крана или приподнятых предохранительных клапанов начнёт выходить пар, последние нужно закрыть; с этого момента в котле начнётся повышение давления, за которым необходимо следить по манометру.

8. После того как давление пара в котле достигнет 1 атм. по манометру, следует открыть продувочный кран перегревателя, выпустить из него воду и полностью открыть разобщительный вентиль между котлом и перегревателем.

9. Во время подъёма пара следует периодически осматривать арматуру котла, люки, а также находящиеся под давлением вентили и фланцы. В случае обнаружения пропаривания, производить подкрепление и поджатие сальников, болтов фланцев и т. д. допускается только при малом давлении (до 3—4 атм.) и при соблюдении осторожности, постепенно, без ударов и без удлинения рычагов гаечных ключей надставками.

10. Во время подъёма пара следует несколько раз проверять исправность действия водоуказательных приборов и питательных средств.

11. По достижении разрешённого давления пара включают котёл в паропровод. При этом медленно открывают стопорный клапан на котле или запорный вентиль между пароперегревателем и главным паропроводом.

Примечание. Включение растапливаемого котла в паропровод, в который уже подаётся пар из других котлов, производят в тот момент, когда в растапливаемом котле и в уже работающих давлении пара будет одинаково.

Уход за котлом во время его работы. Уход за котлом во время его действия заключается:

1) в наблюдении за давлением пара по манометру — давление в котлах во время работы должно быть равно нормальному, разрешённому (пар должен держаться «на марке», т. е. стрелка манометра должна быть на красной черте). Для этого паропроизводительность котла должна соответствовать имеющейся потребности в паре на работу главной машины и вспомогательных механизмов на судне. В зависимости от режима работы судна обеспечение необходимой паропроизводительности котла достигается изменением форсировки работы топок, т. е. регулированием количества подаваемого в топку топлива и воздуха;

2) в наблюдении за качеством процесса горения топлива — сгорание должно быть по возможности почти бездымным; топки нужно своевременно очищать от золы и шлаков (см. выше главу «Уход за топками в эксплуатации»);

3) в поддержании нормального уровня воды в котлах — подача воды в котёл должна регулироваться в соответствии с паропроизводительностью котла и режимом работы топок;

4) в наблюдении за исправной работой водоуказательных приборов и предохранительных клапанов (регулярная продувка во-

домерных стёкол и открытие пробных кранов, проверка исправности предохранительных клапанов).

Примечание. Для проверки нужно вручную регулярно приподнимать клапаны с седла, чтобы была уверенность, что они не прикипели. При давлении в котле на 0,2—0,3 кг/см² выше рабочего клапаны должны начинать «травить» пар;

5) в проведении регулярных нижних и верхних продувок котла (см. главу «Продувка и промывка котлов»);

6) в наблюдении за температурой питательной воды и перегретого пара (по термометрам).

Остановка действия котла. При получении распоряжения о предстоящем прекращении работы (охлаждении котла) выполняют следующее:

1) заблаговременно прекращают заброску топлива и толку пускают на прогар;

2) затем, при твёрдом топливе выгребают огонь из топок, закрывают топочные дверцы, поддувало, регистр; при отоплении мазутом выключают форсунки, закрывают поддувало;

3) пар срабатывается на судовые вспомогательные механизмы или, приподняв предохранительные клапаны, пар травят через них, постепенно снижая давление в котле;

4) когда давление пара понизится до 2 атм. по манометру, открывают нижний спускной (продувочный) кран и воду выпускают из котла;

5) верхние лазы и люки разрешается открывать тогда, когда котёл остыл примерно до 60—70°С. Нижние люки открывают перед самой очисткой котла. Продолжительность спуска пара и охлаждения котла по нормам Регистра указана ниже.

Нормы времени на подъем пара и остывание для речных судовых котлов (в соответствии с требованиями Речного Регистра СССР)

Огнетрубные котлы

Поверхность нагрева котла в м ²	Остывание в часах		Подъём пара при наливе котла заборной водой в часах
	при жидком топливе	при твёрдом топливе	
До 30	6—8	8—10	6
30—59	8—10	10—12	7
60—89	10—12	12—14	8
90—119	12—14	14—16	9
120—149	14—16	16—18	10
150—179	16—18	18—19	11
180 и выше	18—19	19—20	12

Примечания:

1. При остывании котлов строго воспрещается применение искусственных мер их охлаждения, как-то: выпуск воды и пара из котла под давлением выше 2 кг/см², подкачивание холодной воды, образование сквозняков и т. д., так как быстрое и неравномерное охлаждение частей котла вызывает большие напряжения в швах и материале котла, что ведёт к появлению трещин, к расстройству швов и течей дымогарных трубок.

2. При наливке котла горячей водой с температурой выше 50°C продолжительность подъёма пара сокращается для котлов с поверхностью нагрева до 90 м² на 1 час, а свыше 90 м² — на 2 часа.

Водотрубные котлы треугольного типа

Поверхность нагрева котла в м ²	Остывание в часах	Подъём пара в часах
До 50	5	1
50—89	7	1
90—119	9	1,5
120—179	12	2
180 и выше	14	2

Приведённых норм следует строго придерживаться. Следует помнить, что ускорение остывания котлов на несколько часов против указанных норм даст незначительное обережение эксплуатационного времени, но может привести к повреждениям, которые надолго выведут котёл из строя и потребуют серьёзного ремонта.

§ 15. НЕНОРМАЛЬНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В РАБОТЕ ПАРОВОГО КОТЛА И МЕРЫ ИХ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ

Явление и его причины	Возможные последствия	Меры предупреждения	Действия при обнаружении
<i>1. Упуск воды в котле</i> а) Невнимательность кочегара б) Обманчивый уровень воды в водоуказательных стёклах вследствие засорения стёкол и кранов или неправильного открытия кранов в) Быстрое падение уровня воды вследствие утечки воды из котла по причине заедания продувочного крана при продувке или пропуски крана вследствие его неисправности г) Резкое возрастание расхода пара при низком уровне воды в котле	Взрыв котла Перегрев стенок, трещины, выпучивания, расстройство и темь заклинивание швов, темь дымогарных трубок и связей	а) Содержание водомерных стёкол в чистоте, чистая продувка их, непрерывное внимательное наблюдение за состоянием стога воды в стекле б) Правильное открытие и закрытие кранов водомерной колонки, проверка показаний стёкол по пробным кранам в) Проверка каждую вахту состояния штатных приборов и крана нижнего продувания	Если уровень воды еще выше нижнего пробного крана, но быстро падает — ускорить питание В случае невозможности усиленным питанием удержать падающий уровень воды: при отоплении макутом — прекратить продувку, выключив форсунки, при сжигании твердого топлива — выгнать огонь из топки, закрыть топку Если обнаружен упуск воды (уровень воды опустился ниже нижнего пробного крана), немедленно остановить топку и не в коем случае не питать котёл
<i>II. Чрезмерно высокий уровень воды в котле (перелив воды)</i> а) Неисправность кочегара	Разрыв перегревателя или паропровода; попадание воды из котла в паропровод или цилиндр машины, что может вызвать аварийно машины. Снижение тем-	Внимательное наблюдение за уровнем воды и умелое регулирование питания Содержание водоуказательных стёкол в чистоте и исправности	Прекратить питание котла. Уменьшить число оборотов машины, открыть продувательные краны цилиндров или совсем остановить машину, прекратить в неё доступ пара

Явление и его причины	Возможные последствия	Меры предупреждения	Действия при обнаружении
б) Неисправность водоуказательных стёкол <i>III. Повышение давления пара в котле выше нормы</i> а) Порча манометра или неправильное открытие крана его, вследствие чего котелгар перестаёт знать истинное давление пара и может изгнание форсировать горение, что и приведёт к чрезмерному повышению давления б) Неисправность предохранительных клапанов (перегрузка или заедание) в) Внезапное прекращение расхода пара при форсировке котла При поддержании воды в котле на чрезмерно высоком уровне и неисправности предохранительных клапанов опасность возрастает	перегретого пара Взрыв котла	Регулярная проверка исправности предохранительных клапанов и манометра. Внимательное наблюдение за внешними признаками исправности их действия Поддержание нормального уровня воды в котле	Уменьшить форсировку работы топков 1. Уменьшить или даже полностью прекратить горение 2. Усилить питание котла 3. Выпускать пар в атмосферу через предохранительные клапаны
<i>IV. Разрыв паропровода и паровых вентилей</i> а) Нетипичные мер для выпуска конденсата из паропровода б) Резкое открытие парового вентилей при выпуске пара в паропровод	Опасное снижение уровня воды, выпуск воды, взрыв котла	Постепенное прогревание паропровода, удаление конденсата из паропровода	1. Немедленная остановка топки 2. Усиленное питание котла пинжктором

Явление и его причины	Возможные последствия	Меры предупреждения	Действия при обнаружении
в) Вскипание воды или перекачка её выше допустимого уровня		Медленное и осторожное открытие и закрытие вентилей на паропроводе	3. Закрытие доступа пара в повреждённый паропровод при помощи притопки воды с палубы
V. Разрыв пароперегревателя а) Разобщение перегревателя с котлом в период растопки при наличии воды в перегревателе б) Неисправность предохранительного клапана перегревателя в) Резкое открытие парового вентили г) Попадание воды в перегреватель вследствие перекачки её в котле	Усиленное парообразование и опасное снижение уровня воды Взрыв котла	При растопке котла проветрить, сообщить или перегревателю с котлом. Регулярно проверять исправность предохранительного клапана перегревателя Строго наблюдать за поддержанием в котле нормального уровня воды	1. Немедленно прекратить работу топщи 2. Разобщить перегреватель с котлом 3. Усиленно питать котёл
VI. Взрыв газов в топке или газокотлах	Срыв топочного фронта, разрушение тонкой футеровки, а в водогрейном котле — обмуровки котла	Перед растопкой котла обязательно проветривать дымоходы. На остановках судна не засорять свежим топливом горящий слой в топке	Прекращение горения в топке. Дальнейшие мероприятия — в зависимости от обстоятельств (оказание помощи пострадавшим, тушение пожара и т. д.).
Невыполнение правил о проветривании дымоходов котла перед растопкой			

Явление и его причины	Возможные последствия	Меры предупреждения	Действия при обнаружении
Неправильное зажигание или выключение форсунок при мазутном отоплении. Плохое распыливание мазута и неполное горение, приводящее к скоплению в топке и газоходах большого количества недогоревших газов	Выбрасывание пламени в котельное помещение, ожоги обслуживающего персонала, пожар	При работе топки поджигать равномерный слой горящего топлива, внимательно наблюдать за процессом горения, своевременно чистить топку При мазутном отоплении правильно включать и выключать форсунок и регулировать их работу в соответствии с режимом работы главной машины	
VII. Течь дымогарных труб и швов, вызванные трещины на стенках котлов а) Быстрое охлаждение котла холодным воздухом при открытии топочных дверей без прикрытия шиберов б) Периодическая подача в котёл больших количеств холодной воды в) Быстрое охлаждение котла при остановке его действия и быстрый подъём пара	Необходимость быстрого ремонта, а в случае непринятия мер — взрыв котла	Во время зимнего ремонта судна обращать особое внимание на подготовку трубных решёток (отсутствие адгезивности очков и т. д.), качество вставок и вальцовки дымогарных труб В навигационный период не допускать резкого охлаждения топок, не держать топочные двери долго открытыми. Быстро производить загрузку твёрдого топлива в топку. В холодное	При обнаружении лёгкой течи уменьшить горение, усилить питание котла. При большой течи немедленно остановить котёл

Явление и его причины	Возможные последствия	Меры предупреждения	Действия при обнаружении
г) Подтекание швов котла, падающего под давлением д) Педоброкачественный ремонт		время наведения не допускать попадания в котельное помещение наружного холодного воздуха через открытые иллюминаторы и люки Не допускать быстрой разводки пара или охлаждения котла искусственными мерами после останова его действия Не допускать налива в горячий котёл холодной воды Производить правильное питание котла: на ходу судна непрерывное при водными насосами, а на стоянке периодическое (инжекторами), но часто и небольшими порциями. Не допускать никаких ремонтов работ котла в рабочем состоянии	

Явление и его причина	Возможные последствия	Меры предупреждения	Действия при обнаружении
VIII. Выплавление легкоплавкой пробки Упуск воды	Перегрев стенок жаровых труб. Появление выпучин	Внимательно наблюдать за уровнем воды и исправностью водоуказательных приборов	1. Немедленно прекратить работу топки 2. Проверить уровень воды. Если уровень воды выше нижнего пробного крана, усилить питание котла Если вода ушла ниже нижнего пробного крана, питание котла не допускается
IX. Появление выпучин а) Неправильное направление при мазутном отоплении факела. Форсушки, приводящие к местному перегреву металла б) Скопление в котле накипи в) Попадание в котёл масла, затрудняющего теплопередачу и способствующего перегреву котельной стенки	Взрыв котла	Правильная установка форсунок и регулирование факела во время работы Регулярные промывки и продувание котлов, применение антинакипных средств. Контроль качества чистой воды, фильтрация воды до поступления в котел для очистки от масел, попадающих в питательную воду вместе с отработанным паром	При обнаружении выпучин немедленно прекратить работу, топок, выгнать жар из топок, прекратить питание, закрыть дутьё (поддувало) и шиббер за котлом. Не прекращая расхода пара на машину, трезить пар через предохранительные клапаны

Явление и его причины	Возможные последствия	Меры предупреждения	Действия при обнаружении
г) Оставление в котле посторонних предметов по небрежности рабочих, чистивших котёл	Скопление в этом месте накипи и появление выпучины	Тщательный осмотр котла перед пуском его в ход	
Х. <i>Вскипание воды в котле</i> Грязная вода в котле Перекачка воды Резкое увеличение расхода пара из котла	Унос воды с паром в машину и повреждение машины	Своевременно и тщательно производить промывку и очистку котлов. Не допускать увеличения дозирования антинакипина, контролируя правильность дозирования по натрону числу	Уменьшить расход пара, прикрывать топку При мазутном отоплении убавить форсировку форсунок. Продуть котёл
Введение в котёл антинакипина в излишнем количестве	Отопление поверхности нагрева вследствие колебаний уровня Перегрев стёнок котла	Внимательно контролировать уровень воды. Регулярно продувать котлы	

Основные повреждения огнетрубных паровых котлов в эксплуатации и их причины

Виды повреждений	Причины
1. Выпучины	Плохая, нерегулярная чистка и промывка котлов и наличие накипи на поверхностях нагрева котла Упуск воды Попадание в котёл масла вместе с питательной водой Ударное действие пламени в одно место жаровой трубы или огневой камеры
2. Трещины	Частая перемена режима работы топки Частое введение в топку холодного воздуха Быстрое охлаждение котла перед промывкой и быстрый подъём пара после промывки Утоньшение металла котла от ржавления Местный перегрев металла Чеканка на морозе кромок листов или головок заклёпок
3. Разъедание металла котла как внутри, так и снаружи	Плохая очистка и плохая изоляция котла (разъедание наружных поверхностей) Плохая очистка огневых поверхностей (жаровых труб и огневых камер) от сажи, отчего во время зимней стоянки в котлах появляется сырость, способствующая ржавлению Накопление внизу водяного пространства грязи, которая осаждается из питательной воды Оставление пароводяных поверхностей котла сырыми на зиму. Наличие в воде и воздухе углекислого газа Разъедание от пропаривания в кромок швов, головках заклёпок и связей
4. Расстройство мест соединений дымогарных трубок с трубными решётками котла (течь дымогарных трубок)	1. Плохое качество ремонта и вставки трубок 2. Неудовлетворительный уход за котлом в эксплуатации (резкая перемена режима, «простуда» котла холодным воздухом, плохая очистка котла от накипи, чрезмерная форсировка и т. д.)

§ 16. ОСВИДЕТЕЛЬСТВОВАНИЕ ПАРОВЫХ КОТЛОВ¹

Каждый находящийся в эксплуатации судовой паровой котёл должен подвергаться: а) наружному осмотру при нахождении под парами (не реже 1 раза в год), б) внутреннему осмотру (не реже 1 раза в 2 года), в) гидравлическому испытанию (не реже 1 раза в 8 лет).

Освидетельствование паровых котлов речных судов производит инспектор местной Инспекции Речного Регистра.

¹ В соответствии с правилами Речного Регистра по техническому надзору за речными судами, изд. 1941 года.

Наружный осмотр. Наружный осмотр заключается в выявлении состояния котла, трубопроводов и всего котельного помещения во время работы котла. При наружном осмотре необходимо:

а) ознакомиться по котловой книге с состоянием котла и паропровода, его дефектами, требованиями по устранению их и получить от механика судна сведения о работе котла, замеченных дефектах и времени последней чистки его;

б) установить по водоуказательным приборам уровень воды в котле путём продувки водомерных стёкол и пробных кранов;

в) укрепить к фланцу трёхходового крана контрольный манометр и сравнить его показания с показаниями котельных и палубных манометров, одновременно проверить правильность нанесения на последние краской черты;

г) проверить правильность нанесения риски на стоящей на котле пробке краника котельного манометра;

д) проверить предохранительные клапаны и исправную работу питательных приборов (насосов и инжекторов);

е) путём открывания дверей дымника и топок убедиться в отсутствии течей, пропаривания и выпучины в доступных глазу огневых частях.

При нефтяном отоплении котлов инспектор должен выяснить общее состояние всех нефтехранилищ, нефтепровода и его арматуры и их соответствие правилам Регистра по постройке машинных и котельных установок.

При производстве наружного осмотра должна быть проверена правильность установки и действия всей котельной арматуры. Предохранительные клапаны должны быть проверены и установлены в зависимости от наибольшего рабочего давления пара в котле с перегрузкой в $0,2-0,3 \text{ кг/см}^2$.

Все замеченные при наружном осмотре дефекты должны быть занесены в котловую книгу с обязательным указанием срока, в течение которого они должны быть устранены.

Внутренний осмотр. Внутренний осмотр производится с целью выявления степени надёжности котла и всей котельной установки и заключается в тщательном освидетельствовании состояния котла как со стороны паро-водяного и огневого пространства, так и с наружной стороны, а также состояния котельного помещения и трубопроводов в котельной установке.

Подготовка котла для внутреннего освидетельствования заключается в следующем:

а) изоляция котла по всем соединениям к швам, около горловины, наклёпшей и клапанов должна быть снята; и все места должны быть очищены от грязи и ржавчины (в случае необходимости инспектор может потребовать снятия всей обшивки и изоляции котла);

б) вся арматура должна быть очищена от грязи и накипи и находиться на своём месте;

в) котёл внутри должен быть тщательно очищен от накипи и грязи;

г) топки и все газоходы должны быть очищены от золы, сажи, пепла, шлаков и окалины;

д) кирпичная кладка должна быть удалена;

е) колосники, поперечины и пороги должны быть сняты;

ж) горловины и лазы котлов должны быть открыты;

з) лапы, крепящие котёл к фундаменту, должны быть хорошо очищены;

и) внутренняя арматура котлов и коллекторов должна быть снята.

(Разделы а, е, з могут быть выполнены частично, по требованию инспектора).

При внутреннем освидетельствовании котла должны быть тщательно осмотрены поверхности и швы топок и огневых камер, а в сомнительных местах и при осмотре ранее замеченных дефектов, в зависимости от рода их (с помощью луты, шупа, штихмаса, шаблона и т. п.), должна быть установлена степень увеличения старых дефектов и появление новых, как-то: плен, расслоений, выпучин, проседаний, трещин, раковин, разъеданий, неплотностей прилегания и обгорания головок и гаек анкерных связей, уменьшение перемычек в задней и передней трубных решётках, обгорание концов простых и связных дымогарных трубок, а также износ и неплотность заклёпок.

Гидравлическое испытание. Гидравлическое испытание производится 1 раз в 8 лет, если котлу по его состоянию срок гидравлического испытания инспектором Регистра не был сокращён.

Гидравлическое испытание обязательно соединяется с внутренним освидетельствованием и производится после него. При этом испытании давление в котле, создаваемое гидравлическим прессом, должно быть равно:

а) двойному рабочему давлению, если последнее не превосходит 5 кг/см^2 по манометру,

б) рабочему давлению плюс 5 кг/см^2 , если рабочее давление выше 5 кг/см^2 по манометру.

Котёл признается выдержавшим испытание, если в нём не обнаруживаются признаков разрыва и деформации и не замечается течи, причём появление мелкой водяной пыли и выступление воды у кромок листов, заклёпочных головок и связей в виде отдельных капель, так называемых «слезок», течью не считается.

Если при гидравлическом испытании в котле будут замечены какие-либо слышимые или видимые сомнительные явления, удары и т. п., то испытание нужно прекратить и выявить причины этих явлений. Если при этом повреждён котёл не обнаружено, то котёл должен быть подвергнут вторичному испытанию.

Результаты внутреннего осмотра и гидравлического испытания должны быть занесены инспектором Регистра в котловую книгу, где должно быть указано допущенное рабочее давление пара котла и срок следующего гидравлического испытания.

IX. КАЧЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

§ 1. КОЭФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ КОТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

В процессе преобразования химической энергии топлива в тепловую (при сжигании топлива в топке котла) и передачи тепла от продуктов сгорания воде, находящейся в котле, только часть тепла топлива полезно используется на нагрев воды, получение пара и его перегрев (при наличии в котельной установке перегревателя). Чем больше тепла от каждого килограмма топлива полезно используется, тем более совершенной является котельная установка и тем лучше она работает с теплотехнической точки зрения.

Отношение тепла, полезно использованного на получение пара (в кг/час), к теплу топлива, затраченного за то же время (в кг/час), называется коэффициентом полезного действия котельной установки (η_k).

$$\eta_k = \frac{\text{полезно использованное тепло}}{\text{тепло, выделяющееся при полном сгорании затраченного топлива}} \quad (86)$$

Коэффициент полезного действия котельной установки, определяемый при теплотехнических испытаниях, зависит, в основном:

1) от рода сжигаемого топлива и его качества (влажности, содержания в топливе мелочи и т. д.);

2) от конструкции котла (пролётный, оборотный, водотрубный) и топочного устройства (колосниковой решётки, обмуровки топок, топочных фронтов и т. д.), наличия у котла перегревателя и т. п.;

3) от степени форсировки работы котла и топки при испытании (характеризуемой величинами $\frac{D}{H_k}$, $\frac{B \cdot Q}{V}$);

4) от состояния котла во время испытания (большая или меньшая загрязнённость поверхности нагрева сажей, уносом, накипью и т. д.);

5) от качества ухода за топкой (более или менее умелая регулировка процесса горения топлива и т. д.);

6) от температуры воздуха, подаваемого в топку.

Если котельная установка вырабатывает только насыщенный пар, к. п. д. определяется по формуле:

$$\eta_k = \frac{D_n(i_x - t_1)}{B \cdot Q_p}, \quad (87)$$

где: i_x — теплосодержание влажного пара, вырабатываемого котлом ($i_x = q + x r$, где x — степень сухости пара), в кал/кг;

t_1 — температура питательной воды в °C;

B — часовой расход топлива в кг;

D_n — количество килограммов насыщенного пара, вырабатываемого котлом в час.

Если часть пара, вырабатываемого котлом, перегревается (для

работы главной паровой машины), а часть насыщенного пара отбирается непосредственно от котла (для работы вспомогательных механизмов), то к. п. д. котла (котельной установки) следует определять по формуле:

$$\eta_k = \frac{D_n(t_n - t_1) + D_n(i_x - t_1)}{B \cdot Q^H_p}, \quad (87')$$

где: D_n — количество перегретого пара, вырабатываемого котельной установкой, в кг/час;

i_n — теплосодержание перегретого пара в кал/кг;

i_x — теплосодержание влажного насыщенного пара в кал/кг;

t_1 — температура питательной воды в °С.

Коэффициент полезного действия, найденный по полному количеству пара D_n , называется к. п. д. брутто. Если из полного количества выработанного пара D_n исключить часть пара, затрачиваемого котельной установкой на собственные нужды (работа форсунок при сжигании жидкого топлива, расход пара на паровое дутьё или на привод паровой машины дутьевого вентилятора при работе на угле), то получим к. п. д. нетто:

$$\eta_{k \text{ нетто}} = \frac{(D_n - D_c)(t_x - t_1)}{B \cdot Q^H_p}, \quad (88)$$

где D_c — служебный расход пара в кг/час.

Очевидно, что $\eta_{k \text{ нетто}} < \eta_{k \text{ брутто}}$.

Таблица 83

Коэффициент полезного действия брутто речных судовых котлов при сжигании мазута и угля

Топливо	Мазут	Каменный уголь (антрацит)	
		насыщенный пар	перегретый пар 240—300° С
Тепловое напряжение колосниковой решётки $\frac{B \cdot Q^H_p}{R}$ тыс. кал/м ² · час	—	700—1100	350—650
Тепловое напряжение газового окна $\frac{B \cdot Q^H_p}{F_{\text{окна}}}$ тыс. кал/м ² · час	2800—3500 1800—2800	—	—
η к. п. д. котла	0,7—0,64 0,78—0,73	0,65—0,55	0,75—0,68
Большие значения к. п. д. относятся к котлам, работающим с более низкими напряжениями топок и поверхности нагрева.		Большие значения к. п. д. относятся к котлам, работающим с меньшими тепловыми напряжениями колосниковых решёток и более высоким перегревом пара.	

Характерные значения к. п. д. брутто котельных установок речных судов при сжигании мазута и угля указаны в таблице 83 (к. п. д. нетто меньше указанных значений к. п. д. брутто обычно на 5—10%).

В таблице 84 даны значения к. п. д. брутто при работе судовых котельных установок на дровах.

Таблица 84

Ориентировочные значения к. п. д. брутто речных судовых котлов при работе на дровах

$\eta_{\text{б}}=0,5 \div 0,65$	в установках без подогрева воздуха
$\eta_{\text{б}}=0,65 \div 0,7$	в установках с перегревом пара и подогревом воздуха

К. п. д. котлов при работе на дровах в значительной степени определяется качеством дров и величиной требуемой форсировки работы топки (величиной требуемого теплового напряжения топки). Радикальным средством, обеспечивающим возможность устойчивого сжигания дровяного топлива большой влажности, при одновременном получении высокого к. п. д. установки, является предварительный подогрев воздуха, подаваемого в топку (о подогреве воздуха см. ниже).

§ 2. ИСПАРИТЕЛЬНОСТЬ ТОПЛИВА ПО НОРМАЛЬНОМУ ПАРУ

Испарительностью топлива по нормальному пару называется количество нормального пара, получаемого при сжигании 1 кг топлива. Величина испарительности, получаемая в той или иной котельной установке, зависит от тех же факторов, что и к. п. д. котельной установки, и, кроме того, от рабочей теплотворной способности сжигаемого топлива.

Испарительность определяется по формуле:

$$U = \frac{D(t - t_1)}{B \cdot 640} \text{ кг/кг}, \quad (89)$$

где: D — паропроизводительность котла в кг/час;

i — теплосодержание пара, вырабатываемого котлом, в ккал/кг;

t_1 — температура питательной воды в °C;

B — расход топлива в кг/час;

640 — теплосодержание нормального (стандартного) пара, в кал/кг.

Если известен к. п. д. котельной установки, испарительность подсчитывается по формуле:

$$U = \frac{Q_{\text{пр}} \cdot \eta_{\text{б}}}{640} \text{ кг/кг}, \quad (89)$$

где $\eta_{\text{б}}$ — к. п. д. котла брутто в сотых долях.

Числовые значения величины испарительности топлива, характерные для котельных установок речных судов при работе на мазуте, угле и дровах, даны в таблице 85.

Т а б л и ц а 85

Испарительность топлива в речных котельных установках

Топливо	Мазут	Каменный уголь (антрацит)	Дрова	Примечание
Рабочая теплотворная способность топлива				
Q^*_p кал/кг	9600—9800	6400—7000	2800—3500	
U кг/кг	10,5—12,0	5,8—7,4	2,5—3,3	Без подогрева воздуха С подогревом воздуха
	—	—	3,0—4,0	

Величины к. п. д. для различных котельных установок, полученные при теплотехнических испытаниях некоторых судов, и соответствующие значения испарительности топлива приведены в таблице 86.

Расход топлива на брутто-тонну выработанного нормального пара. Если известна величина испарительности, расход топлива на тонну нормального пара определяется по формуле:

$$G_m = \frac{1000}{U} \text{ кг/т.}$$

Х. ПОТЕРИ ТЕПЛА В КОТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ И УРАВНЕНИЕ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА

Из всего тепла, которое выделяется при полном сгорании 1 кг топлива, практически котельной установкой полезно используется только $Q^*_p \cdot \eta_{к.у}$ кал/кг, а остальное количество тепла, соответствующее разности:

$$Q^*_p - Q^*_p \cdot \eta_{к.у} = Q_{пот}$$

составляет потери тепла на каждый килограмм сжигаемого топлива.

Потери тепла в котельной установке вызываются:

- 1) провалом, выгребом и уносом несоревших частиц топлива (потеря от механической неполноты горения топлива);
- 2) образованием в газах окиси углерода (СО) и других продуктов неполного сгорания (потеря от химического недожога);
- 3) уносом тепла с продуктами сгорания, уходящими в трубу (потеря с уходящими газами);
- 4) охлаждением котла и арматуры (потери в окружающую среду, потери на лучеиспускание).

Коэффициент полезного действия речных судовых котельных установок (по данным теплотехнических испытаний)

Название судов	„Мван-План-нин“	„Гр-жа-нин“	„Гри-дов“	„Leite“	„За-бия-кл“	КП-23	„Ан-древ“	„Исправ-ный“	„Гру-довой“	„Боль-ше-вик“	„Выче-да“	„Стенан-Шаумян“
	Протечный без переправы	Протечный без переправы	Протечный без переправы	Оборотный без переправы	Оборотный без переправы	Водотрубный трехугольного типа Яруш-Шульц с переправой	Оборотный с переправой	Огнеотрубный без переправы	Огнеотрубный с переправой и воздухоподогревателем	Водотрубный трехугольного типа с переправой	Водо-трубный с переправой и воздухоподогревателем	Оборот-ный без пере-ре-ваты
Род топлива	Мазут	Мазут	Мазут	Мазут	Антра-цит	Антрацит	Антра-цит	Дрова	Дрова	Антра-цит	Уголь	Каракан-динский уголь
Теплотворная способность Q_p кал/кг	9807	9699	9650	9221	6430	6860	6770	3435	3220	6460	6692	6530
Видимое тепловое напряжение колосниковой решетки тыс. кал/м ² . час	—	—	—	—	1095	435,0	340,0	870,0	925,0	564,0	782,0	444,3
Видимое тепловое напряжение суммарного газового окна тыс. кал/м ² . час	3350	1960	2630	2060	—	—	—	—	—	—	—	—
Напряжение поверхности на-грева по нормальному пару кг/м ² . час	28,1	20,8	25,4	22,7	22,35	15,5	17,7	17,4	24,1	23,0	27,45	8,0
Коэффициент полезного дейст-вия котельной установ-ки brutto	0,691	0,757	0,730	0,777	0,600	0,815	0,745	0,528	0,690	0,670	0,677	0,67
Испаряемость по нормаль-ному пару	10,55	11,45	11,0	11,95	6,03	8,75	7,89	2,84	3,48	6,67	7,07	5,8

§ 1. ПОТЕРЯ ОТ МЕХАНИЧЕСКОЙ НЕПОЛНОТЫ ГОРЕНИЯ

$$Q_4 \text{ кал/кг, } q_4 \%$$

Эта потеря тепла имеет место только при сжигании твёрдого топлива (угля, дров). Она возникает вследствие того, что часть топлива, не сгорая, проваливается вместе с золой через прозоры колосниковой решётки в поддувало или выгребаются вместе со шлаками при чистке топки. Кроме того, мелкие частицы в несгоревшем состоянии уносятся из топки вместе с газами в дымовую трубу. Таким образом, всё тепло, которое могло бы выделяться, если бы эти частицы сгорели, — теряется.

Величина потери от механической неполноты горения (или так называемого механического недожога) для той или иной судовой котельной установки зависит в основном:

1) от вида топлива, его свойств и размера кусков (при спекающихся и более крупных сортах углей эта потеря меньше, а при сжигании мелочи, наоборот, больше);

2) от конструкции топки и соответствия её роду сжигаемого топлива (правильно подобранное живое сечение решётки и т. д.);

3) от рода тягодутьевой установки (естественная тяга, паровое дутьё под решётку, вытяжная тяга паровым сифоном) и величины форсировки топки. Чем больше в топке сжигается топлива в единицу времени, тем сильнее даётся дутьё и увеличивается тяга и тем больше получается при данном топливе потеря от уноса мелких частиц;

4) от качества обслуживания топки. Умелое регулирование тяги и дутья, а также правильная шуровка топки могут значительно снизить эту потерю.

Общая потеря от механической неполноты горения может быть представлена в виде уравнения:

$$Q_4 = Q_4^{oc} + Q_4^{un} \text{ кал/кг,} \quad (90)$$

где: $Q_4^{oc} = Q_4^{ш} + Q_4^{np}$ кал/кг.

В приведённых формулах обозначают:

Q_4^{oc} — общая потеря тепла с очаговыми остатками в кал/кг;

Q_4^{un} — потеря тепла от уноса топлива;

$Q_4^{ш}$ — потеря с выгребаемыми шлаками;

Q_4^{np} — потеря с провалом в кал/кг.

Зная потерю тепла в калориях на каждый килограмм сжигаемого топлива, потерю тепла от механического недожога в процентах теплотворной способности топлива можно подсчитать по формуле:

$$q_4 = \frac{Q_4 \cdot 100}{Q_{HP}} \quad (91)$$

Практически при теплотехнических испытаниях обычно определяется только потеря Q_4^{oc} , а потеря с уносом, ввиду трудности

определения количества уноса, подсчитывается вместе с потерей в окружающую среду (Q_5 кал/кг) по разности:

$$(Q_{\text{у}}^{\text{н}} + Q_5) = Q_{\text{р}}^{\text{н}} - (Q_{\text{н.у}}^{\text{н}} + Q_2 + Q_3 + Q_4^{\text{оч}}). \quad (92)$$

Сумма ($Q_{\text{у}}^{\text{н}} + Q_5$) представляет остаточный член теплового баланса, куда, кроме потерь с уносом и в окружающую среду от охлаждения, входят и возможные погрешности при определении остальных потерь (так называемая невязка баланса).

Q_2 — потеря с газами, уходящими в трубу, в кал/кг,

Q_3 — потеря от химического недожога (химической неполноты горения) в кал/кг.

Потеря в очаговых остатках в кал/кг, по данным испытаний, подсчитывается по формуле:

$$Q_{\text{оч}}^{\text{н}} = 8100 \frac{G_{\text{оч}}^{\text{н}}}{B} \cdot \frac{C_{\text{оч}}^{\text{н}}}{100} \text{ кал/кг}, \quad (93)$$

где: $G_{\text{оч}}^{\text{н}}$ — вес шлаков и провала, удаленных из топки и проходящих на час работы в килограммах,

$C_{\text{оч}}^{\text{н}}$ — содержание углерода в очаговых остатках в процентах, определяемое из формулы:

$$C_{\text{оч}}^{\text{н}} = 100 - (A_{\text{оч}}^{\text{н}} + W_{\text{оч}}^{\text{н}}), \quad (94)$$

где $A_{\text{оч}}^{\text{н}}$ и $W_{\text{оч}}^{\text{н}}$ — содержание золы и влаги в очаговых остатках.

Содержание углерода в очаговых остатках определяется по данным анализа отобранных при испытании очаговых остатков на содержание золы и влаги (принимается, что очаговые остатки состоят только из углерода, влаги и золы).

При дровяном отоплении, правильно устроенной и хорошо работающей топке потеря от механического недожога является весьма небольшой и вызывается только провалом через прозоры колосниковой решётки частиц древесного угля вместе с золой и при подсчётах, не требующих особой точности, ею часто пренебрегают.

Для определения этой потери при сжигании дров просеивают провалившийся через решётку уголь и взвешивают его. Так как древесный уголь представляет почти чистый углерод, принимают, что $Q_{\text{р}}^{\text{н}}$ очаговых остатков равна 8100 кал/кг (т. е. равна теплотворной способности чистого углерода).

При этом условии потеря от механического недожога для 1 кг дров будет:

$$Q_{\text{оч}}^{\text{н}} = 81 \cdot g \text{ кал/кг}, \quad (95)$$

где g — количество провалившегося через решётку древесного угля в процентах к весу сожжённых дров.

Потеря в процентах теплотворной способности топлива составит:

$$q_1 = \frac{8100 \cdot g}{Q_{\text{р}}^{\text{н}}} \% \quad (96)$$

§ 2. ПОТЕРЯ С УХОДЯЩИМИ ГАЗАМИ

(Q_2 кал/кг, q_2 %)

Тепло, выделяющееся при сгорании топлива, частью передаётся поверхности нагрева котла путём лучеиспускания раскалённого слоя к пламени в топке, частью идёт на нагрев продуктов сгорания. Продукты сгорания, имея при вступлении в дымогарные трубки температуру 800—900° С, проходя по дымогарным трубкам, отдают им свою теплоту как путём лучеиспускания, так и путём непосредственного соприкосновения газов с поверхностью нагрева. Теплопередача от газов к поверхности нагрева совершается по всей длине дымогарных трубок. Если бы газы имели возможность, проходя по газоходам котла, охладиться до температуры наружного воздуха, они отдали бы всё тепло, выделенное при сжигании топлива, и потеря тепла в трубу не существовало бы. Однако практически охлаждения продуктов сгорания до температуры 20—30° С (температуры наружного воздуха) не происходит, так как теплопереход от газов к котлу совершается только до тех пор, пока температура газов не будет равна температуре котельных стенок. Температура чистой котельной стенки равна (приблизённо) температуре воды в котле. При давлении пара 10—15 кг/см² эта температура составляет 180—200° С.

При загрязнённой накипью стенке её температура оказывается практически выше указанных значений. Следовательно, даже в том случае, если бы уходящие газы приняли температуру котельной стенки, наименьшей температурой уходящих газов могла бы быть температура 180—200° С. Практически температура уходящих газов в судовых котлах (в зависимости от степени форсировки, рода топлива, конструкции котла и других факторов) составляет 280—400° С, так как дымогарные трубки в котлах существующих конструкций не делаются столь длинными, чтобы газы на пути дымогарных трубок могли охладиться до температуры котельных стенок; в действительности температура уходящих газов всегда выше температуры стенок дымогарных трубок.

Количество тепла, уносимого в трубу продуктами сгорания, полученными при сжигании 1 кг топлива, соответствующее разности температур ($T_{yx} - t_{воз}$), где T_{yx} — температура уходящих газов, а $t_{воз}$ — температура воздуха в котельном помещении, представляет потерю тепла с уходящими газами или потерю тепла в трубу. Величина потери тепла с уходящими газами зависит, в основном, от следующих факторов:

- 1) системы котла и его конструктивных особенностей;
- 2) рода сжигаемого топлива, его качества и конструкции топки;
- 3) от степени форсировки работы котла. С увеличением количества сжигаемого топлива увеличиваются количество и температура продуктов сгорания. С увеличением количества протекающих по дымогарным трубкам продуктов сгорания возрастает их скорость и улучшается теплопередача; однако количество тепла, которое газы успевают отдать на каждый килограмм топлива, снижается, и продукты сгорания, с увеличением форсировки, как пра-

вило, уходят в трубу с более высокой температурой, чем при малой форсировке. Вследствие этого с увеличением форсировки потеря тепла с уходящими газами возрастает;

4) коэффициента избытка воздуха, с которым ведётся процесс горения. Чем больше на каждый килограмм сжигаемого топлива вводится в топку воздуха, тем больше объём уходящих газов и тем больше потеря тепла в трубу при одинаковой температуре уходящих газов;

5) от состояния поверхности нагрева котла, т. е. большей или меньшей загрязнённости поверхности нагрева сажей и золой снаружи и накипью изнутри. Так как сажа, зола, накипь — материалы с малым коэффициентом теплопроводности, то наличие этих материалов на стенках котла повышает сопротивление стенки переходу тепла, и газы, протекая вдоль поверхности нагрева при той же скорости движения и на той же длине труб, успевают отдавать стенкам меньшее количество тепла, чем при отсутствии слоя загрязнений. В результате температура отходящих газов получается выше и, следовательно, возрастает потеря тепла с уходящими газами.

Потеря тепла с уходящими в трубу продуктами сгорания определяется по формуле:

$$Q_3 = V_3 \cdot C_3 (T_{yx} - t_0) \text{ кал/кг}, \quad (97)$$

где: C_3 — теплоёмкость продуктов сгорания в кал/м³, которую можно определять по формуле: $C_3 = 0,323 + 0,000018 T_{yx}$;

V_3 — объём продуктов сгорания на 1 кг сжигаемого топлива (нм³/кг).

В процентах теплотворной способности топлива потеря с уходящими газами определяется из формулы:

$$q_3 = \frac{Q_3 \cdot 100}{Q_{HP}} \%. \quad (98)$$

Следовательно, для определения потери тепла с уходящими газами нужно знать:

1) температуру уходящих газов,
2) состав сжигаемого топлива и состав продуктов сгорания (для нахождения объёма газов, получаемых от сжигания 1 кг топлива);

3) температуру воздуха в котельной.

Объём газов может быть определён по данным газового анализа по формулам, приведённым в главе «Процесс горения». Однако поскольку V_3 для топлива данного вида зависит в основном от избытка воздуха, с которым ведётся процесс горения, то в случае, если состав топлива неизвестен, могут быть использованы и приближённые формулы для быстрого определения потери тепла с уходящими газами в процентах теплотворной способности топлива. Приведённые ниже формулы Теплотехнического института дают для различных видов топлива среднего состава зависимость q_3 от избытка воздуха в уходящих газах α и разности температур $(T_{yx} - t_0)$.

Виды топлива	Потеря тепла с уходящими газами в °
Дрова	$q_2 = \frac{3,75 \alpha + 0,9}{100} (T_{yx} - t_a)$
Каменный уголь	$q_2 = \frac{3,63 \alpha + 0,2}{100} (T_{yx} - t_a)$
Антрацит при паровом дутье	$q_2 = \frac{3,66 \alpha + 0,1}{100} (T_{yx} - t_a)$
Мазут при паровых форсунках	$q_2 = \frac{3,63 \alpha + 0,4}{100} (T_{yx} - t_a)$

(99)

Для приближённого определения потери q_2 по данным анализа уходящих продуктов сгорания может также служить формула Зигерта—Гассенштейна:

$$q_2 = \frac{T_{yx} - t_a}{RO_2 + CO + 0,33} \cdot y, \quad (100)$$

где коэффициент y , в зависимости от вида топлива, имеет следующие значения: $y = 0,65$ — для каменного угля, $y = 0,75$ — для антрацита при паровом дутье, $y = 0,80$ — для дров, $y = 0,57$ — для мазута при паровом распыливании.

Для быстрого определения потери q_2 при сжигании топочного мазута может служить формула:

$$q_2 = 0,001 \left[\frac{500}{RO_2 + CO} + 6 \right] (T_{yx} - t_a) \%. \quad (101)$$

Величина потери тепла с уходящими газами для речных судовых котлов, в зависимости от рода топлива и избытка воздуха, с которым ведётся процесс горения, в среднем колеблется в пределах 14—18% от $Q_{\text{н}}$.

§ 3. ПОТЕРЯ ОТ ХИМИЧЕСКОЙ НЕПОЛНОТЫ СГОРАНИЯ

(Q_3 кал/кг, q_3 %)

Эта потеря обуславливается образованием продуктов неполного сгорания углерода (главным образом окиси углерода — CO). Если 1 кг углерода сгорает в углекислоту (CO_2), то выделяется 8100 калорий тепла. Если же воздуха подводится недостаточно и в результате горения углерода образуется продукт неполного сгорания — окись углерода (CO), то выделяется всего 2440 калорий. Следовательно, на каждый килограмм неполно сгоревшего углерода потеря тепла составляет: $8100 - 2440 = 5660$ кал/кг.

В правильно сконструированных топках и при умелом ведении режима процесса горения, в условиях установившейся работы топки и при отсутствии излишней форсировки, потеря от химического

недожога топлива может быть весьма малой (0—1%). Однако в большинстве топок судовых котлов она достигает в обычной эксплуатационной работе 2—6% теплотворной способности топлива. Исключительно неблагоприятно на величине потери от химического недожога сказывается частое изменение режима и напряженности работы топки, которое неизбежно при маневровой работе судна (частые переходы от полного хода судна к малому и т. д.), а также неумелая работа кочегаров (неправильное регулирование тяги и дутья, редкие загрузки топлива сразу большими порциями и т. д.).

По данным газового анализа, потеря от химической неполноты сгорания в калориях на килограмм топлива определяется по формуле:

$$Q_3 = 56,6 (C_p + 0,368 S_p) \frac{CO}{RO_2 + CO} \text{ кал/кг.} \quad (102)$$

В процентах эта потеря теплотворной способности топлива составит:

$$q_3 = \frac{Q_3 \cdot 100}{Q_{n.p}} \% \quad (103)$$

При сжигании топочного мазута потерю q_3 можно подсчитывать (при отсутствии точных данных о составе топлива) по формуле:

$$q_3 = \frac{493\,000}{Q_{n.p}} \cdot \frac{CO}{RO_2 + CO} \% \quad (104)$$

В таблице 87 даны значения потерь от механической и химической неполноты сгорания, а также с уходящими газами для некоторых речных судовых котлов по данным теплотехнических испытаний. В этой же таблице указаны и величины тепловых напряжений топки, при которых получены указанные величины отдельных потерь.

§ 4. ПОТЕРЯ В ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Эта потеря вызывается тем, что температура воздуха в котельной всегда ниже температуры поверхности котла и арматуры. Котёл таким образом во время работы непрерывно теряет часть своего тепла в окружающую среду как путём непосредственного соприкосновения (конвекции), так и путём лучеиспускания.

Величина потери в окружающую среду зависит от конструкции котла и его размеров; качества тепловой изоляции поверхности котла; степени форсировки котельной установки (с увеличением форсировки потеря тепла котлом в окружающую среду, приходящаяся на каждый килограмм сжигаемого топлива, уменьшается).

Потеря тепла от охлаждения изолированной поверхности котла в процентах от $Q_{n.p}$ может быть ориентировочно подсчитана по формуле:

$$q_5 = \frac{K \cdot F \cdot \vartheta \cdot 100}{B \cdot Q_{n.p}} \% \quad (105)$$

Величина отдельных потерь тепла по данным

Название судна	„Иван Па- панни“	„Гражданин“	„Трудовой“	—
Характеристика котель- ной установки	Пролётный однотопоч- ный без перегрева- теля	Пролётный без перегрева- теля	Пролётный без перегрева- теля	Водотруб- ный с перегре- вателем
Топливо	Мазут	Мазут	Дрова	Антрацит
Тепловое напряжение колосниковой решётки в тыс. кал/м ² · час.	—	—	910,0	998,0
Тепловое напряжение газового окна в тыс. кал/м ² · час.	—	—	1715	—
Суммарное тепловое напряжение объёма топки и огневой каме- ры в тыс. кал/м ² · час.	1117,0	363,0	—	—
Потеря тепла с ухо- дящими газами в %	22,75	18,4	14,6	11,28
Потеря от химической неполноты горения в %	5,42	2,8	8,8	5,52
Потеря от механиче- ской неполноты горения в %	—	—	—	10,0

где: F — охлаждаемая поверхность котла (для огнетрубных кот-
лов — суммарная поверхность бочки, днища, сухопарни-
ков и т. д.) в м²;

B — количество килограммов топлива, сжигаемого в час;

K — потеря тепла с 1 м² изолированной поверхности в час
при наилучшем качестве современной изоляции (для
изоляционного материала с наименьшим коэффициентом
теплопроводности) — кал/м² · час.

При давлениях пара 10—14 кг/см² нормированной величиной
теплопотери с 1 м² для наилучших теплоизоляционных материа-
лов (совелит, вулканит) можно считать 150 кал/м² · час. Учиты-
вая, что на большинстве речных котлов качество изоляции в вы-
полненных конструкциях таково, что действительные теплопотери,
даже при изоляции совелитом и вулканитом, больше указанных,
в приведённую выше формулу введён коэффициент качества изо-
ляции ϕ , который принимается: $\phi = 1,2$ — при совелитовой или
вулканитовой изоляции котлѐв; $\phi = 3 \div 4$ — при изоляции котлов
асбестом или асбеститом (старый тип изоляции).

испытаний некоторых речных судов

„Лейтенант Шмидт“	„Маршал Ворошилов“	„Андреев“	„Выцегда“	„Спартак“	„Степан Шаумян“
Оборотный без перегревателя	Водотрубный с перегревателем	Оборотный с перегревателем	Водотрубный с перегревателем и воздухоподогревателем	Пролётный с перегревателем	Оборотный без перегревателя
Сернистый мазут	Антрацит	Антрацит	Камешный уголь	Мазут	Карагандинский уголь
—	665,0	340,0	782,0	—	444,3
2060	—	—	—	1390	—
—	—	—	—	—	415
17,1	19,0	15,3	18,0	14,4	19,7
2,4	5,5	—	3,95	2,97	5,4
—	8,8	8,5	5,55	—	6,5

Потеря тепла, подсчитываемая по приведённой выше формуле, представляет потерю только от охлаждения изолированной поверхности котла и составляет в среднем, в зависимости от размеров котла, качества изоляции и форсировки работы 0,5—1,5% от Q_p^* . Практически потеря q_5 получается больше, так как, кроме потери через изоляцию, нужно учесть также потерю тепла арматурой, прямое излучение фронта топки, плохо изолированного дымника и т. д.

При составлении теплового баланса величина потери q_5 для речных судовых котлов обычно принимается в размере 2—3% от Q_p^* .

§ 5. УРАВНЕНИЕ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА КОТЛА

Определив тепло, полезно использованное котлом, и подсчитав потери тепла по приведённым выше формулам, можно составить тепловой баланс котла. В этом балансе тепло затраченного топлива равно теплу, полезно использованному в котле, плюс сумма всех тепловых потерь. В общем виде тепловой баланс, составленный на 1 кг сжигаемого топлива, выражается уравнением (106):

$$Q_p'' = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5$$

Тепло, выделяемое при полном сгорании 1 кг топлива кал/кг	Тепло, полезно использованное в котле и перегревателе, кал/кг	Тепло, теряемое с уходящими газами, кал/кг	Тепло, теряемое от химического недожога, кал/кг	Тепло, теряемое от механического недожога, кал/кг	Тепло, теряемое в окружающую среду, кал/кг
Приход тепла	Расход тепла				(105)

Тепловые балансы некоторых речных котельных дровяк (по данным тепло)

Название парохода	Характеристика сжигаемого топлива	Характеристика напряжённости работы	
		топки	котла
		$\frac{B}{R}$ кг/м ² · час	$\frac{D}{H_k}$ кг/м ² · час
„Сокол“	$W = 33,4\%$ $Q_p'' = 2822$ кал/кг	339,0	18,5
„Сыктывкар“	$W = 25\%$ $Q_p'' = 3130$ кал/кг	184,0	20,4
„Лизогуб“	$W = 25\%$ $Q_p'' = 3130$ кал/кг	257,0	11,4
„Трудовой“	$W = 24\%$ $Q_p'' = 3180$ кал/кг	245,0	16,2

Тепловые балансы некоторых речных судовых котельных мазуток (по данным тепло)

Название парохода	Характеристика топлива (влажность и теплотворная способность)	Характеристики напряжённости работы	
		топки	котла
		$\frac{Q \cdot Q_p''}{F_{ж.т}}$ тыс. кал/м ² · час	$\frac{D}{H_k}$ кг/м ² · час
„Ф. Дзержинский“	$W = 22\%$ $Q_p'' = 9543$ кал/кг	1550,0	17,7
„Лейтенант Шмидт“	$W = 1,45\%$ $Q_p'' = 9221$ кал/кг	1780	19,8
„Социальная революция“	$W = 5\%$ $Q_p'' = 9110$ кал/кг	3330	27,0
„Нарым“	$W = 3\%$ $Q_p'' = 9476$ кал/кг	1840	14,6
„Лермонтов“	$W = 4,5\%$ $Q_p'' = 9408$ кал/кг	2200	25,8

Баланс тепла в процентах выражается уравнением:

$$q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 = 100\% \quad (107)$$

В таблицах 88, 89, 90, 91 для примера, приведены данные тепловых балансовых испытаний некоторых судовых котельных установок на различных видах топлива.

Тепловой баланс котельной установки составляется по данным теплотехнического испытания. Существуют два метода сведения теплового баланса.

Таблица 88

установок с огнетрубными котлами при работе на технических испытаниях)

Температура в °C			Тепловой баланс в %			
питательной воды	воздуха, поступающего в топку	уходящих газов	полезно использованное тепло, q_1	потери с уходящими газами, q_2	потери от химического недожога, q_3	потери от механического недожога и в окружающую среду, $q_4 + q_5$
58,5	35	376,0	62,4	22,0	3,5	12,1
46,0	37,6	326,0	64,0	18,2	8,6	9,2
40,0	58,0	248,6	61,5	18,6	6,5	13,4
54,5	35,0	244	70,6	15,9	9,1	4,4

установок с огнетрубными котлами при работе на технических испытаниях)

Таблица 89

Температура в °C		Тепловой баланс в %			
питательной воды	уходящих газов	полезно использованное тепло, q_1	потери с уходящими газами, q_2	потери от химического недожога, q_3	потери от механического недожога и в окружающую среду, $q_4 + q_5$
92,0	342,0	79,8	15,1	0,7	4,4
55,0	355,0	73,0	15,5	1,0	8,5
77,0	390,5	74,7	15,6	3,4	6,3
42,5	326,5	76,8	17,2	1,4	4,6
60,0	382,0	70,5	16,6	2,62	10,28

Результаты теплотехнических испытаний судовых огнетрубных котлов некоторых пароходов при работе на дровах без подогрева воздуха

Название парохода	Характеристика топлива		Температура воздуха, поступающего в топку, в °С	Коэффициент избытка воздуха, α	Температура охлаждающих газов, $T_{\text{вх}}^{\circ}\text{C}$	Тепловое нап- ряжение газо- вого окна $\frac{F \cdot Q}{B \cdot Q}$ тыс. кал/м ² · час	Тепловой баланс в %			
	влажность в %	плотность $Q_{\text{пл}}$ кал/кг					полезно использован- ное тепло, q_1	потери с охлаждающим тазами, q_2	потери от химической неполноты сгорания, q_3	прочие потери, $q_4 + q_5$
„Потанов“	32,0	2780	44,0	1,56	461	2630	59,5	29,5	7,9	3,1
	26,9	3082	39,0	1,42	445	2470	64,6	25,9	6,2	3,3
„Сокол“	23,1	3397	51,5	1,27	337	1880	55,6	17,1	4,4	22,9
	24,8	3296	50,0	1,17	370	2380	41,8	17,9	4,5	35,3
„Орджоникидзе“	33,4	2822	53,5	1,55	376	1420	62,4	22,0	3,48	12,1
	35,0	2630	39,0	1,66	291	1080	65,1	21,1	6,8	7,0
„Красная Балтика“	34,1	2675	34,5	1,69	242	1050	62,6	15,3	4,8	16,8
	35,0	2460	30,0	1,40	280	2390	61,0	14,9	0,8	33,9

Результаты балансовых теплотехнических испытаний парового пролётного котла парохода «Гражданин» с паровыми форсунками системы Вагенера

(Котёл с поверхностью нагрева $H_k = 185 \text{ м}^2$ без перегревателя)

	I	II	III	IV	На стоянке
Напряжение объёма топочного пространства в тыс. кал/м ³ · час	363	449	552	666	15,0
Топливо	Мазут	$Q_p^H = 9699 \text{ кал/кг}$			$Q_p^H = 9715 \text{ кал/кг}$
Вязкость топлива		4,88° E_{50}			4,2° E_{50}
Число работающих форсунок	3	3	3	3	1
Давление пара в кот- ле, кг/см ²	12,3	12,4	12,4	12,3	12,4
Температура пита- тельной воды в °С	41,0	46,8	44,5	47,9	—
Напряжение поверх- ности нагрева котла, видимое в кг/м ² · час	13,9	17,6	21,5	23,9	—
Испарительность ви- димая	11,66	11,89	11,86	10,9	—
Давление распыли- вающего пара (до регу- лирующего вентиля) в кг/см ²	11,8	11,6	11,2	11,2	11,3
Расход пара на рас- пыливание мазута в кг/кг	0,684	0,711	0,658	0,656	5,556
Температура отходя- щих газов в °С	383	328	377	406	143
Коэффициент избытка воздуха	1,74	1,45	1,65	1,55	9,25
Разрежение в дымо- ходе в мм вод. столба	1,9	1,7	2,3	3,2	0,1
Использовано в котле (к. п. д. brutto котель- ной установки)	75,0	75,8	75,7	69,3	—
Потеря от химической неполноты сгорания в %	2,8	1,1	0,4	0,0	9,2
Потеря с отходящими газами в %	18,4	14,9	20,2	20,7	28,8
Остаточный член ба- ланса в %	3,8	9,3	3,7	10,0	62,0
Расход тепла на ра- боту паровых форсунок в %	4,4	4,5	4,2	4,2	35,6
К. п. д. котла нетто в %	70,6	71,3	71,5	65,1	—

1. Прямой метод, при котором определяются паропроизводительность котла и потери Q_2 , Q_3 и Q_4 , а потеря Q_5 выявляется как остаточный член теплового баланса по разности:

$$Q_5 = Q_p'' - (Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4),$$

причём при сжигании твёрдого топлива в остаточную потерю Q_5 входит обычно и потеря тепла с уносом, так как потеря Q_4 подсчитывается по анализу очаговых остатков и включает тепло, теряемое только с провалом и выгребом.

2. Обратный метод, при котором по данным испытания подсчитываются потери Q_2 , Q_3 , Q_4 , а потерей Q_5 (остаточным членом) задаются по опытным данным. При этом полезно использованное тепло подсчитывается как разность между Q_p'' и суммой всех потерь, т. е.:

$$Q_1 = Q_p'' - (Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5).$$

Ввиду трудности применения в условиях речной котельной установки и неточности метода непосредственного определения количества вырабатываемого котлом пара паромерами (вследствие малого числа оборотов машины и пульсации парового потока), паропроизводительность котлов при испытаниях обычно выявляется по расходу испаряемой воды, причём часовой расход питательной воды устанавливается мерными баками. Определив часовой расход питательной воды D кг/час, полезно-использованное тепло (в том случае, если котельная установка вырабатывает только насыщенный пар) подсчитывают по формуле:

$$Q_1 = \frac{D(t_x - t_1)}{B} \text{ кал/кг.} \quad (108)$$

Если котельная установка вырабатывает перегретый пар, который расходуется на работу главной машины, а также насыщенный пар, расходуемый на собственные нужды котла и работу судовых вспомогательных механизмов, то для определения полезно использованного тепла по количеству испаренной воды D кг/час это количество воды следует разделить на две части: затраченную на производство перегретого пара и на производство насыщенного пара. Для возможности указанного разделения количество насыщенного пара устанавливают либо непосредственным замером расхода пара на каждый паропотребитель отдельно (пародинамо, форсунки, параштурвал), либо путём оценки расхода насыщенного пара на работающие паропотребители по практическим данным.

Количество перегретого пара в этом случае определяется, как разность:

$$D_n = D - D_n \text{ кг/час,}$$

где: D — количество испаренной воды в кг/час, определяемое при испытании мерными баками;

D_n — количество израсходованного насыщенного пара в кг/час.

Полезно использованное тепло на 1 кг сожжённого топлива определяется в случае производства котлом и насыщенного и перегретого пара, по формуле:

$$Q_1 = \frac{D_n(i_n - t_1)}{B} + \frac{D_n(i_n - t_1)}{B} \text{ кг/час,} \quad (109')$$

где: i_n — теплосодержание перегретого пара в кал/кг;

i_a — теплосодержание влажного насыщенного пара в кал/кг;

D_n — расход насыщенного пара на работу вспомогательных механизмов в кг/час;

t_1 — температура питательной воды;

B — расход топлива в кг/час.

Если при испытании котла, дающего на главную машину перегретый пар, измерение расхода насыщенного пара на вспомогательные механизмы не производится, то ориентировочная оценка количества насыщенного пара может быть произведена с помощью данных, приведённых в таблицах 92, 93, 94.

Таблица 92

Ориентировочные данные по расходу насыщенного пара на вспомогательные нужды речных котельных установок

	Мощность главной машины в и. л. с.				
	200	400	600	900	1100
Расход пара на распыливание жидкого топлива при паровых форсунках в кг/час	100,0	160,0	210,0	270,0	310,0
Расход пара на паровое диффузорное дутьё в кг/час	160,0	280	400	550	650
Расход пара на паровую машину дутьевого вентилятора в кг/час .	75	130	180	240	280

Таблица 93

Ориентировочные данные по расходу насыщенного пара на вспомогательные механизмы речных буксирных пароходов

	Мощность главной машины в и. л. с.				
	200	400	600	900	1100
Паровая рулевая машина в кг/час	60,0	100,0	140,0	180,0	220,0
Осветительная пародинамо в кг/час	100,0	150,0	240,0	300,0	380,0
Паровое отопление в кг/час . . .	35,0	60,0	85,0	100,0	120,0
Бытовые нужды (куб, баня и т.д.) в кг/час	8,0	12,0	16,0	20,0	25,0

Таблица 94

Ориентировочные данные по расходу насыщенного пара на вспомогательные механизмы речных грузо-пассажирских двухдечных пароходов

	Мощность главной машины в л. с.				
	200	400	600	900	1100
Паровая рулевая машина в кг/час	90,0	150,0	210,0	270,0	320,0
Осветительная пародинамо в кг/час	220,0	280,0	320,0	360,0	390,0
Паровое отопление в кг/час	70,0	140,0	200,0	280,0	320,0
Бытовые нужды в кг/час	30,0	40,0	50,0	65,0	70,0

Удельный расход пара на осветительную пародинамо при испытании может быть также оценён по фактической электрической нагрузке динамо, принимая удельный расход пара для крупных динамомашин-компаунд $d_d = 15 \div 20$ кг/л. с.-ч., а для одноцилиндровых — $d_d = 20 \div 25$ кг/л. с.-ч.-с.

Индикаторная мощность пародинамо по показаниям электроприборов (постоянный ток) вычисляется по формуле:

$$N_i = \frac{E \cdot I \cdot 1,36}{1000 \cdot \eta_p \cdot \eta_m} \text{ л. с.}, \quad (110)$$

где: E — напряжение по вольтметру в вольтах;

I — сила тока по амперметру в амперах;

η_p — к. п. д. ременной передачи (при соединении паровой машины с динамо через ремень), равный 0,95—0,97;

η_m — механический к. п. д. паровой машины; $\eta_m = 0,8 \div 0,85$;

η_i — к. п. д. динамо.

Коэффициент полезного действия динамо постоянного тока в зависимости от мощности и нагрузки дан в таблице 95.

Таблица 95

Коэффициент полезного действия динамомашин постоянного тока

Мощность в квт	Число оборотов в минуту			Нагрузка			
				100 %	75%	50%	25%
	125	250	500—2000	В зависимости от нагрузки значение к. п. д. умножается на:			
10	0,8	0,845	0,87	1,0	0,98	0,93	0,82
25	0,865	0,88	0,91	1,0	0,99	0,95	0,85
50	0,892	0,905	0,92	1,0	0,99	0,87	0,90

Установив индикаторную мощность паровой машины пародинамо, полный расход пара определяют по формуле:

$$D_{дин} = N_i d_d \text{ кг/час.} \quad (111)$$

§ 6. ИЗМЕНЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕПЛООВОГО БАЛАНСА КОТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ НАГРУЗКИ

Практикой и специальными испытаниями установлено, что для одной и той же котельной установки, при одинаковом сжигаемом топливе и качестве обслуживания к. п. д. котельной установки есть величина переменная, зависящая от требуемой в данный момент производительности установки или степени её форсировки. При возрастании нагрузки от минимальной к. п. д. обычно сначала увеличивается, затем, достигнув своего максимума (максимум к. п. д. соответствует оптимальной нагрузке установки), начинает уменьшаться. Изменение к. п. д. объясняется изменением тепловых потерь в общем балансе тепла установки.

Потеря с уходящими газами сначала, при возрастании нагрузки, обычно снижается: Последнее может быть объяснено тем, что при малых нагрузках топка работает с повышенным против нормального коэффициентом избытка воздуха. При возрастании нагрузки коэффициент избытка воздуха и, следовательно, объём продуктов сгорания, приходящихся на 1 кг сжигаемого топлива, уменьшается. Уменьшение объёма продуктов сгорания в пределах малых нагрузок котельной установки даёт снижение потери тепла с уходящими газами. При дальнейшем возрастании нагрузки потеря с отходящими газами почти не изменяется или даже несколько увеличивается, ибо уменьшение потери с уходящими газами, вследствие уменьшения объёма продуктов сгорания, компенсируется одновременным увеличением потери от возрастания температуры уходящих газов с повышением форсировки. При значительных перегрузках потеря с уходящими газами начинает резко возрастать.

Потеря от химического недожога в пределах малых форсировок с изменением форсировки изменяется обычно незначительно, а при дальнейшем возрастании форсировки начинает резко расти вследствие практически получающегося недостатка воздуха для возможности полного горения при больших форсировках.

Потеря от механической неполноты горения, как показывают исследования, резко возрастает с повышением нагрузки. При этом увеличивается как потеря в шлаках, так особенно и с уносом (сказывается усиление дутья и тяги при увеличении форсировки, способствующее захвату мелких частиц топлива из слоя).

Общая потеря тепла котлом в окружающую среду, зависящая, в основном, от размеров котла, его системы, давления пара и качества изоляции, приблизительно одинакова при всех нагрузках. Поэтому с увеличением количества сжигаемого топлива, (при повышении форсировки) потеря тепла в окружающую среду, приходящаяся на 1 кг сжигаемого топлива, уменьшается. Кроме того, эта потеря вследствие её относительно небольшой величины имеет малое влияние на общий баланс тепла.

Поскольку основные потери тепла с увеличением форсировки котла возрастают, к. п. д. всей установки снижается.

Характеристика изменения к. п. д. и отдельных потерь с изме-

нением нагрузки выявляется для данной судовой котельной установки теплотехническими испытаниями, производимыми при различных форсировках работы котла, соответствующих различным режимам работы главной машины и всего судна в целом.

Помещаемый график (рис. 14) показывает характер изменения

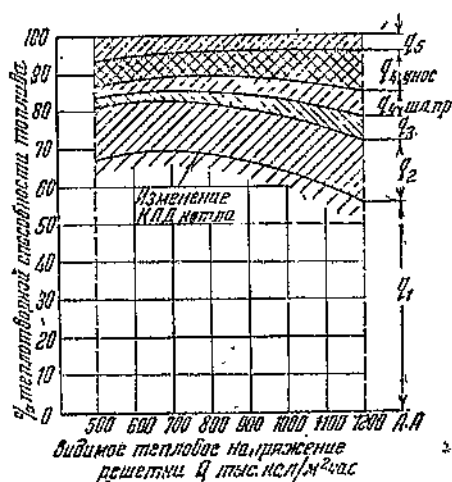


Рис. 14. Зависимость к. п. д. котла и тепловых потерь от нагрузки.

к. п. д. и отдельных составляющих теплового баланса в зависимости от нагрузки для одного из судовых котлов при сжигании твердого топлива.

Пример снижения к. п. д. брутто котельной установки с увеличением форсировки топки (работа на мазуте), полученный по данным испытаний волжского парохода «Лермонтов», приведен в таблице 96.

Таблица 96

Значения к. п. д. котельной установки, соответствующие различному тепловому напряжению топки, по данным теплотехнических испытаний парохода «Лермонтов»

Тепловое напряжение суммарного газового окна в тыс. ккал/м ² · час	1900	2220	2910	3170
$\eta_{\text{к}} \text{ брутто} \%$	74,5	69,6	66,7	65,0

Пример изменения к. п. д. и отдельных потерь с изменением режима работы котла парохода «Гражданин» был приведен так же в таблице 91.

XL. ИСПЫТАНИЕ ПАРОВОГО КОТЛА

§ 1. ЦЕЛИ И ПОРЯДОК ИСПЫТАНИЙ

Теплотехническое испытание парового котла (котельной установки) на речных судах обычно производится с целью:

1) установления основных качественных показателей работы котла — определения испарительности топлива, расхода топлива на тонну вырабатываемого пара и к. п. д. котла;

2) выявления напряжённости работы отдельных частей котельного агрегата при заданных режимах работы главной машины и всего судна в целом, т. е. теплового напряжения колосниковой решётки, газового окна и объёма топочного пространства, а также напряжения поверхности нагрева котла;

3) составления полного теплового баланса котла.

Проводимые на судах испытания котлов разделяются на контрольные, балансовые и специальные.

При контрольных испытаниях котлов, которые производятся теплотехническими партиями, обычно одновременно с испытанием главной паровой машины, (всей паросиловой установки в целом), по котлу производятся следующие замеры: 1) расход топлива, 2) давление пара, 3) температура пара (если установка с перегревателем), 4) температура питательной воды, 5) состав продуктов сгорания (производится анализ уходящих газов из дымника на содержание CO_2 и O_2), 6) температура уходящих газов в дымнике, 7) температура воздуха, поступающего в топку, 8) разрежение в дымнике и давление в поддувале (при топках с дутьём).

Определение указанных выше величин даёт возможность:

- а) выявить напряжённость работы топочного устройства;
- б) подсчитать коэффициент избытка воздуха, с которым работает топка, и произвести (по показаниям газоанализатора и тягомеров) правильную регулировку топки во время самого испытания;
- в) подсчитать основные потери тепла в котельной установке: потерю с уходящими газами и от химической неполноты сгорания.

Состав топлива (угля или мазута) и теплотворная способность его, необходимые для подсчётов тепловых потерь и при контрольных испытаниях, принимаются в зависимости от вида и марки топлива по табличным данным. При дровяном топливе, влажность которого и, следовательно, теплотворная способность колеблется в широких пределах, обязательно выявление фактической влажности сжигаемых при испытании дров. Содержание влаги при этом обычно определяется по отобранному образцу топлива (куску древесины), высушиваемому над котлами до постоянного веса (см. раздел «Топливо паровых котлов»). По найденной влажности определяется далее теплотворная способность 1 кг дров известной породы по таблицам или формулам.

Продолжительность контрольных испытаний по котлу должна быть не менее 1—1,5 часов при работе на жидком топливе. При работе на угле и дровах 3—4 часа.

При балансовых испытаниях котла, кроме указанных выше замеров, производится определение: 1) расхода питательной воды и 2) количества очаговых остатков (пропад, выгреб) при сжигании твёрдого топлива.

Для установления действительного качества сжигаемого топлива во время балансовых испытаний производят отбор средней пробы сжигаемого топлива, по которой путём анализа в лаборатории выявляют состав топлива и его теплотворную способность.

Для определения содержания углерода в очаговых остатках производят отбор средней пробы их. Последующим анализом средней пробы очаговых остатков устанавливают зольность и влажность последних.

Если котельная установка вырабатывает перегретый пар для работы главной машины судна, то количество насыщенного пара, расходуемого на работу вспомогательных механизмов и собственные нужды котла, может быть установлено путём оценки на основании практических данных или же выявлено путём замера расхода пара по каждому потребителю насыщенного пара отдельно. Расход пара на форсунки и паровое дутьё может быть замерен при помощи дроссельной шайбы и дифференциального манометра, а на рулевую машину и пародинамо — более точно, по количеству собираемого и взвешиваемого конденсата отработавшего пара этих механизмов.

Необходимо, однако, отметить, что если определение расхода пара на вспомогательные механизмы не является одной из целей испытаний, то замера расхода насыщенного пара по отдельным паропотребителям при балансовом испытании котельной установки обычно не производят, так как вследствие относительно малого расхода насыщенного пара даже грубо приближённая оценка количества насыщенного пара не даёт практически сколько-нибудь существенной ошибки при определении количества тепла, полезно использованного котельной установкой. Для приближённого определения расхода пара на вспомогательные механизмы можно пользоваться данными, приведёнными выше (см. таблицы 92, 93, 94).

Основным условием правильности балансовых испытаний является тепловое равновесие (установившееся состояние) котлов во время испытания.

Поэтому не менее как за 3—4 часа до начала балансовых испытаний котла устанавливают тот режим работы судна, при котором должна работать котельная установка при испытании.

Во избежание значительных ошибок начинать испытание можно только после того, как равновесие достигнуто, т. е. установились мощность, расход пара, давление и температуры.

Во время балансового испытания котельной установки соблюдается возможно более равномерный режим.

В начале и конце испытания требуется одинаковое состояние установки, т. е. в основном одинаковая толщина слоя топлива на

колосниковой решётке (при сжигании твёрдого топлива), одинаковые уровень воды и давление пара.

Продолжительность испытания определяется главным образом требованием точности замеров расхода воды и топлива. Чем продолжительнее испытание, тем меньше получаются относительные ошибки в замерах.

Принятая продолжительность испытаний:

При работе на мазуте	4 часа
При работе на угле	8 час.
При работе на дровах	6 час.

После испытания производят первичную обработку результатов по данным журналов наблюдений, т. е. выводят средние величины показаний приборов и устанавливают расход чистой воды и топлива за опыт.

После первичной обработки результатов подсчитывают все характерные величины и составляют протокол испытания котельной установки. Примерная форма протокола балансового испытания приведена ниже.

Специальные испытания котлов производят по особой, вырабатываемой перед испытанием, программе; в зависимости от задания они могут преследовать различные цели, как например: изучение влияния степени форсировки котла на величину тепловых потерь; определение эффективности введения подогрева воздуха в цикл котельной установки при сжигании того или иного вида топлива; выявление результатов проведённой модернизации и т. д. Поставленными задачами определяется как продолжительность испытаний, так и объекты наблюдений.

§ 2. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПРИ ИСПЫТАНИИ РЕЧНЫХ КОТЛОВ

1. Расход твёрдого топлива при испытании котлов должен учитываться по весу. Объёмный способ измерения твёрдого топлива может дать значительные ошибки. Для взвешивания топлива применяют обычно десятичные весы, устанавливая на платформу весов ящик-носилки. Используются также пружинные весы (динанометр), хотя получаемый результат менее точен, чем при десятичных весах.

Расход жидкого топлива, как правило, определяется по объёму. При этом пользуются расходным баком (дежурной цистерной), замеряя уровень мазута в нем обычно деревянной рейкой, которую опускают по середине бака до дна его.

Для определения веса жидкого топлива при измерении расхода его во время испытания по рейке нужно знать размеры бака и удельный вес (плотность) мазута при данной температуре. Для последующего выявления состава и теплотворной способности сжигаемого топлива во время испытания производится отбор пробы топлива.

ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЯ КОТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ПАРОХОДА

I. Конструктивные данные

Система котлов

Число котлов

Общая поверхность нагрева $\Sigma H_N = \dots \dots \dots \text{м}^2$

Общая площадь колесниковых решеток $\Sigma R = \dots \dots \dots \text{м}^2$

Суммарная площадь газового окна $\Sigma F_{\text{окна}} = \dots \dots \dots \text{м}^2$

Суммарный объем топочного пространства $\Sigma V = \dots \dots \dots \text{м}^3$

II. Результаты испытания

№ по порядку	Наименование величины	Обозначение или расчётная формула	Размерность	Числовые значения
1	Дата испытаний			
2	Продолжительность испытаний	Z	час	
3	Топливо			
4	Вид топлива и марка Рабочий состав топлива	$ \begin{array}{r} C_p \\ H_p \\ O_p \\ N_p \\ S_p \\ A_p \\ W_p \\ \hline 100 \end{array} $	% % % % % % %	

№ по порядку	Наименование величины	Обозначение или расчётная формула	Размерность	Числовые значения
5	Рабочая температурная способность низшего предела	Q_p^H	кал/кг	
6	Характеристика топлива	$\beta = 2,37 \cdot \frac{H_p - \frac{Q_p}{8}}{C_p + 0,368S_p^2}$	—	
7	Расход топлива	B	кг/час	
8	Очаговые остатки			
8	Количество шлака и провала	$G_{ог}$	кг/час	
9	Данные анализа очаговых остатков	Зольность $A_{ог}$ Влажность $W_{ог}$	% %	
10	Содержание углерода в очаговых остатках	$C_{ог} = 100 - (A_{ог} + W_{ог})$	%	
11	Напряжённость работ топочного устройства	$\frac{B}{\Sigma R}$	кг/м ² · час	
11	Весовое напряжение суммарной площади колосниковых решёток	$\frac{B \cdot Q_p^H}{\Sigma R}$		
12	Тепловое напряжение суммарной площади колосниковых решёток	$\frac{B \cdot Q_p^H}{\Sigma R}$	тыс. кал/м ² · час	
13	Тепловое напряжение суммарного газового окна	$\frac{B \cdot Q_p^H}{\Sigma F_{ж-н}}$	тыс. кал/м ² · час	
14	Тепловое напряжение суммарного объёма топочного пространства	$\frac{BQ_p^H}{\Sigma V}$	тыс. кал/м ³ · час	

№ по порядку	Наименование величины	Обозначение или расчётная формула	Размерность	Числовые значения
15	Вода и пар Давление пара в котлах (абсолютное)	P_k	кг/см ²	
16	Температура перегретого пара	t_n	°C	
17	Температура питательной воды	t_1	°C	
18	Расход питательной воды	D	кг/час	
19	Расход перегретого пара	D_n	кг/час	
20	Расход насыщенного пара	D_n	кг/час	
21	Теплоудержание пара Напряжённость работы поверхности нагрева	i_n (перегретого) i_x (влажного насыщенного)	ккал/кг ккал/кг	
22	Удельная паропроизводительность по нормальному пару: при производстве котельной уста- новкой насыщенного пара при производстве котельной уста- новкой и насыщенного и пере- гретого пара Продукты сгорания и воздух	$K = \frac{D_n(i_x - t_1)}{\Sigma H_k \cdot 640}$ $K = \frac{D_n(i_n - t_1) + D_n(i_x - t_1)}{\Sigma H_k \cdot 640}$	кг/м ² · час кг/м ² · час	
23	Температура воздуха в котельной	t_g	°C	
24	Содержание RO ₂ в уходящих газах	RO ₂	%	
25	Содержание O ₂ в уходящих газах	O ₂	%	

№ по порядку	Наименование величины	Обозначение или расчётная формула	Размерность	Числовые значения
26	Содержание окисл. углерода CO	$CO = \frac{21 - \beta RO_2 - (RO_2 + O_2)}{0,605 + \beta}$	%	
27	Температура уходящих газов в дымо- нике	T_{yx}	°C	
28	Коэффициент избытка воздуха в уходя- ющих газах	$\alpha = \frac{21}{21 - 79 \frac{O_2 - 0,5 CO}{100 - (RO_2 + O_2 + CO)}}$	—	
29	Качественные характеристики котельной уста- новки Кoeffициент полезного действия ко- тельной установки брутто:	$\eta_{\kappa} = \frac{D_{\kappa} \rho_{\kappa} (t_{\kappa} - t_1)}{B \cdot Q_p^*}$	—	
	при производстве установкой на- сыщенного пара	$\eta_{\kappa} = \frac{D_{\kappa} (t_{\kappa} - t_1) + D_{\kappa} (t_{\kappa} - t_1)}{B \cdot Q_p^*}$	—	
	при производстве установкой на- сыщенного и перегретого пара	$U = \frac{Q_p^* \cdot \eta_{\kappa}}{640}$	кг/кг	
30	Испарительность топлива по нор- мальному пару	$b = \frac{1000}{U}$	кг/т	
31	Расход топлива на брутто-топну вы- работанного нормального пара			

№ по порядку	Наименование величины	Обозначение или расчётная формула	Размерность	Числовые значения
32	Дутьё и тяга			
33	Давление в поддувале	S_1	мм вод. ст.	
33	Разрежение в дымнике	S_2	мм вод. ст.	
34	Баланс тепла			
34	Тепло, полезно-использованное котлом и перегревателем	$Q_1 = Q_p^{н.к.}$	кал/кг	
35	Тепло, теряемое с уходящими газами	$Q_2 = \left(\frac{1,86 (C_p + 0,368 S_p^2)}{(RO_2 + CO)} + \frac{9 H_p + W_p}{80,5} \right) C_z T_{г.з.}$	кал/кг	
36	Тепло, теряемое от химической неполноты горения	$Q_3 = 56,6 (C_p + 0,368 S_p^2) \frac{CO}{RO_2 + CO}$	кал/кг	
37	Тепло, теряемое с очажовыми остатками (механический недожог)	$Q_4^{оч.} = 8100 \frac{C_{оч.}}{B} \cdot \frac{C_{оч.}}{100}$	кал/кг	
38	Остаточный член теплового баланса (потери с уносом, потеря в окружающей среду и невязка баланса) ($Q_1^{н.к.} + Q_2 = Q_p^{н.к.} - (Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4)$)		кал/кг	

Руководитель испытания (подпись)

Примечание: При испытании котла, работающего на угле, в формулы для определения Q_2 и Q_3 вместо C_p следует подставлять содержание углерода с поправкой на механический недожог. Это количество углерода в процентах определяется по формуле:

$$C' = C_p - C,$$

где C — количество несгоревшего углерода, содержащегося в очажовых остатках приходящегося на 1 кг сжигаемого топлива, определяемое из выражения:

$$C = \frac{G_{оч.}}{B} \cdot \frac{C_{оч.}}{100},$$

здесь $C_{оч.}$ — содержание углерода в очажовых остатках в процентах.

Техника отбора проб твёрдого и жидкого топлива при испытании указана выше (см. главу «Топливо паровых котлов»).

Удельный вес потребляемого при испытании мазута определяется взвешиванием топлива в металлическом мернике-литре или с помощью ареометра (последнее — менее точно).

Часовой расход мазута при испытании определяется по формуле:

$$G = (d' \cdot h' - d'' \cdot h'') f \text{ кг}, \quad (112)$$

где: h' — высота уровня мазута в цистерне в начале опыта в метрах;

d' — плотность мазута в начале опыта в кг/м^3 ;

h'' — высота уровня после опыта в метрах;

d'' — плотность мазута при температуре в конце опыта в кг/м^3 ;

f — площадь горизонтального сечения мазутной цистерны в м^2 .

При нахождении удельного веса мазута с помощью литра-мерника определяют температуру мазута и затем пересчитывают полученный удельный вес для той средней температуры в дежурной цистерне, при которой производился замер расхода топлива.

Пересчёт удельного веса на температуру в цистерне производят по формуле:

$$\gamma_1 = \gamma [1 - 0,0007 (t_1' - t)], \quad (113)$$

где: γ — удельный вес при температуре мазута в мернике;

t — температура мазута в мернике;

t_1 — температура мазута в дежурной цистерне.

2. Расход питательной воды определяется мерными баками или (менее точно) с помощью водомеров.

При паровых машинах с обычной для речных судов впрыскивающей конденсационной установкой вода из сливной трубы мокровоздушного насоса направляется в мерные баки. При этом, вследствие малого напора воды в сливной трубе и неудобства её перёдёлки, подача воды в мерные баки производится каким-либо вспомогательным, имеющимся на судне, насосом (например, пожарным) через гибкий шланг.

Мерных баков устанавливается два. Из баков поступление воды в тёплый ящик происходит самотёком, а из него вода нагнетается в котёл приводными от машины питательными насосами.

Во время испытания воду пропускают через мерные баки, наполняя поочередно то один бак, то другой, а также поочередно их опоражнивая, перепуская воду в тёплый ящик (питательный резервуар). В то время как один из баков наполняется водой из воздушного насоса, — другой опоражнивается.

3. Состав уходящих газов в дымнике определяется прибором Орса—Фишер с двумя жидкостями.

4. Температура при испытании измеряется:

а) ртутными термометрами (температура питательной воды, пара, воздуха в котельной),

б) термопарами с гальванометрами или пирометрами (температура уходящих газов).

Для определения температуры топочного пространства (при специальных испытаниях) пользуются оптическими пирометрами.

5. Давление пара наблюдается по котельному манометру. Показания котельного манометра проверяются контрольным манометром, и в случае обнаруженных расхождений к показаниям котлового манометра делается необходимая поправка.

6. Разрежение в дымоходе замеряется простейшим У-образным тягомером или тягомером типа Крейля.

ХИ. ОБРАБОТКА ПИТАТЕЛЬНОЙ И КОТЛОВОЙ ВОДЫ

§ 1. ПИТАТЕЛЬНАЯ ВОДА РЕЧНЫХ СУДОВЫХ КОТЛОВ

При работе главной машины парохода, когда подача воды в котёл совершается приводными от машины насосами, питательной водой для паровых котлов обычно служит вода, откачиваемая из конденсатора. До настоящего времени на абсолютном большинстве речных судов установлены конденсаторы смещения, в которых конденсация пара, выходящего из цилиндра низкого давления, происходит путём непосредственного соприкосновения пара с подаваемой в конденсатор забортной водой. Таким образом, питательная вода представляет собой смесь конденсата отработавшего пара и забортной воды (в среднем 95% сырой забортной воды и 5% конденсата).

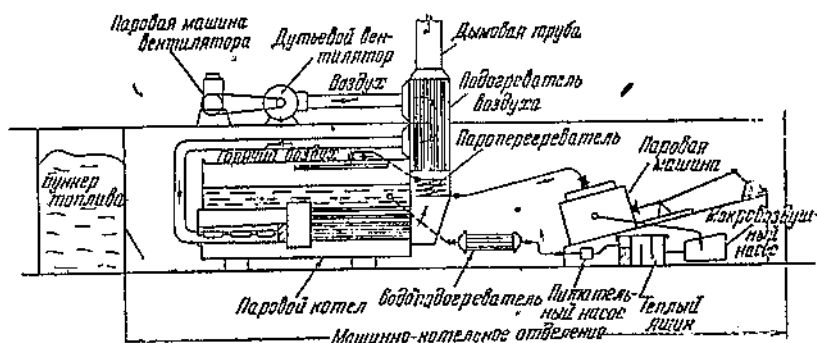


Рис. 15. Схема питания котла тепловой установки речного парохода.

На стоянке судна, когда главная машина не работает, питание котлов совершается инжектором или паровым насосом исключительно забортной водой. Схема питания котла речной паросиловой установки дана на рис. 15.

§ 2. ВЕЩЕСТВА, СОДЕРЖАЩИЕСЯ В ПИТАТЕЛЬНОЙ ВОДЕ, И ИХ ВЛИЯНИЕ НА РАБОТУ КОТЛА

Вода, идущая на питание паровых котлов, представляя, как указано выше, в основном речную воду, принимаемую из-за борта судна, не является химически чистой водой, а всегда содержит большее или меньшее количество посторонних веществ, часть ко-

торых находится в воде в растворённом, а часть — во взвешенном состоянии.

В таблице 97 указаны основные вещества, встречающиеся в воде в растворённом состоянии.

Таблица 97

Растворимые в воде вещества

Растворённые газы	Трудно растворимые вещества	Легко растворимые вещества	Продукты местных загрязнений почвы и воды
Углекислота CO_2 Кислород O_2 Азот N_2 и др.	Двууглекислый кальций $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ Двууглекислый магний $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ Сернокислый кальций — гипс CaSO_4 Соли щелочно-земельных металлов кремниевой кислоты SiO_2 Двууглекислое железо $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$ Двууглекислый марганец $\text{Mn}(\text{HCO}_3)_2$ Глинозем Al_2O_3 Органические вещества и др.	Хлористый натрий NaCl Хлористый кальций CaCl_2 Хлористый магний MgCl_2 Сернокислый магний MgSO_4 Сернокислое железо FeSO_4 и др.	Органические вещества Хлор (хлористый натрий) Соли азотистой и азотной кислот Аммиак NH_3 Сероводород H_2S и др.

Веществами, содержащимися в питательной воде, обычно являются:

1) механические примеси (вещества, содержащиеся в воде во взвешенном состоянии) — ил, песок, глина. Содержание в питательной воде механических примесей особенно значительно на загрязнённых мелководных реках;

2) соли некоторых металлов (кальция, магния), находящиеся в воде в растворённом состоянии. Содержание растворённых солей в речной воде в среднем составляет 0,1—0,3 г/л воды;

3) растворённые в воде газы — воздух и углекислота;

4) минеральные масла, попадающие в котёл вместе с конденсатом, входящим в состав питательной воды. Присутствие в воде масла объясняется тем, что внутрь цилиндров паровой машины подаётся для смазки минеральное масло. Это масло в цилиндре частично испаряется и вместе с отработавшим паром увлекается в конденсатор, откуда, смешиваясь с заборной водой, попадает в котёл.

Присутствие в питательной воде указанных выше веществ вредно для котла. Технические примеси загрязняют котёл и арматуру, растворённые в воде соли, выделяясь из воды, образуют на стенках котла более или менее твёрдые отложения, называемые накипью. Состав и структура накипи (более твёрдая или рыхлая) зависят от количества и вида солей, содержащихся в питатель-

ной воде. Газы, растворённые в воде и выделяющиеся при её нагревании в котле, вызывают ржавление и разъедание металла котла.

Масло, отлагаясь на стенках котла, как плохой проводник тепла вызывает ухудшение теплопередачи от газов к воде. Кроме того, обладая способностью разлагаться под действием высокой температуры, масло образует жирные кислоты, способствующие разъеданию котельного металла.

В таблице 98 подробно указано действие, оказываемое на котёл различными примесями, содержащимися в питательной воде.

§ 3. ЖЁСТКОСТЬ ПИТАТЕЛЬНОЙ ВОДЫ

Жёсткость воды обуславливается содержанием в ней в растворённом виде кальциевых, магниевых и других солей. С увеличением жёсткости увеличивается накипеобразующая способность питательной воды.

Жёсткость разделяется на временную и постоянную.

Временная (так называемая бикарбонатная) жёсткость получается вследствие присутствия в воде двууглекислых солей кальция, магния, а также железа и марганца (последние две соли встречаются редко). Временной указанная жёсткость называется потому, что она пропадает при кипячении воды. Объясняется это тем, что при нагревании воды до кипения двууглекислые соли переходят в практически нерастворимые в воде углекислые соли кальция и магния.

Постоянная (так называемая сульфатная) жёсткость получается от присутствия в воде растворённых в ней соединений кальция и магния с минеральными кислотами (сернокислые соединения), в частности, соединения сернокислых солей кальция CaSO_4 , магния MgSO_4 , хлористых солей кальция и магния CaCl_2 и MgCl_2 , азотнокислых кальция $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ и магния $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ и др.

Наиболее нежелательным является гипс, дающий очень твёрдую накипь.

Постоянная жёсткость кипячением не устраняется. Соли постоянной жёсткости выпадают из раствора только после того, как содержание их в котловой воде (вследствие испарения воды) достигает предела растворимости (раствор становится насыщенным). Таким образом, выпадение солей постоянной жёсткости в осадок является результатом концентрации раствора.

Сумма временной и постоянной жёсткости даёт так называемую общую жёсткость воды. Общая концентрация солей в котловой воде определяется по ареометру Боме. Для определения концентрации солей вода отбирается из нижнего водопробного крана котла и охлаждается до $15-20^\circ\text{C}$.

Жёсткость воды измеряется в градусах жёсткости. Принятый в СССР градус жёсткости соответствует содержанию в 1 м^3 воды 10 г окиси металла кальция. В таблице 99 указано количество растворённых веществ, соответствующее одному градусу жёсткости.

Примеси, находящиеся в питательной воде, и их влияние на котёл и на его работу

Примеси, находящиеся в воде	Химическая формула	Источник загрязнения	Действие, производимое в котле
1. Взвешенные вещества	—	Почва, песок, глина, хозяйственные и промышленные отбросы	Вскипание и вспенивание воды. Унос воды с паром. Образование шла и шлама
2. Кремнезём	SiO_2	Минералы земной коры	Отложение накипи
3. Глинозём	Al_2O_3	То же	То же
4. Двууглекислый кальций (бикарбонат кальция)	$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$	»	»
5. Сернокислый кальций (гипс)	CaSO_4	»	»
6. Хлористый кальций	CaCl_2	»	Кроме накипи возможна и коррозия металла
7. Двууглекислый магний (бикарбонат магния)	$\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$	»	Накипь
8. Двууглекислое железо	$\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$	»	»
9. Хлористый натрий	NaCl	Минералы земной коры, сточные воды	Коррозия и вскипание воды
10. Продукты местных загрязнений почвы и воды: аммиак, сероводород, азотная и азотистая кислоты	NH_3 , H_2S , HNO_3 и HNO_2	Местные загрязнения почвы, фабрично-заводские сточные воды	Коррозия металла котла
11. Углекислота	CO_2	Атмосфера, минералы земной коры, разложение органических веществ	Коррозия металла
12. Кислород	O_2	Атмосфера	Коррозия металла
13. Жиры и масла	—	Фабрично-заводские отбросы Смазка цилиндров	Коррозия, вспенивание и унос воды с паром, отложение с накипью
14. Органические вещества	—	Разложение органических и животного мира, сточные воды	Коррозия, вспенивание и унос воды с паром; отложение с накипью

Таблица 99

Количество растворённых в воде веществ, соответствующее одному градусу жёсткости (в миллиграммах на литр)

Наименование	Химическое обозначение	Количество растворённых веществ в мг/л
Оксид кальция	CaO	10,0
Оксид магния	MgO	7,14
Кремниевая кислота	SiO ₂	10,7
Едкий натр	NaOH	14,3
Кальцинированная сода	Na ₂ CO ₃	18,9
Углекислый кальций	CaCO ₃	17,9
Углекислый магний	MgCO ₃	15,0
Сернокислый кальций	CaSO ₄	24,3
Хлористый кальций	CaCl ₂	19,8
Сернокислый магний	MgSO ₄	21,5
Хлористый магний	MgCl ₂	17,0

В таблице 100 указана средняя общая жёсткость речной воды (по данным анализов) для различных рек.

Таблица 100

Общая жёсткость воды крупнейших рек и озёр СССР

Жёсткость	Название рек и озёр
До 4 градусов	Реки: Нева, Свирь, Печора, Амур, Ангара, Селенга; озера — Байкал, Онежское
До 8 градусов	Реки: Аму-Дарья, Сыр-Дарья, Кубань, Рпон, Иртыш, Обь, Енисей, Волхов, Луга, Вятка, Шексна, Молога; озеро Ильмень
До 12 градусов	Реки: Днепр, Западная Двина, Березина, Северная Двина, Сухона, Сож, Тура, Кура и верховья Волги (Верхняя Волга)
До 16 градусов	Реки: Ока, Москва, Кама, Белая, Лена, Дон, Донец, Урал, Сура, Индигирка, Колыма, Средняя и Нижняя Волга

§ 4. ВРЕД НАКИПИ

Накипь является материалом, имеющим очень малый коэффициент теплопроводности (см. таблицу 22), в среднем, в зависимости от состава накипи, 1—2 кал/м. час. °С. Поэтому даже при

слое очень малой толщины накипь представляет значительное сопротивление переходу тепла от газов через стенку котла к воде. При наличии накипи общий коэффициент теплопередачи снижается, а использование тепла продуктов сгорания поверхностью нагрева котла значительно ухудшается.

Зная коэффициент теплопередачи от газов к воде для чистой стенки, коэффициент теплопередачи при наличии слоя накипи может быть определён по формуле:

$$K' = \frac{K}{1 + \frac{\delta}{\lambda} \cdot K}$$

где: K — коэффициент теплопередачи для чистой стенки,
 δ — толщина слоя накипи в метрах,
 λ — коэффициент теплопроводности материала накипи.

Пример.

Положим:

$$K = 19,52 \text{ кал/м}^2 \cdot \text{час} \cdot ^\circ\text{C}, \delta = 5,5 \text{ мм}, \lambda = 2,96 \text{ кал/м} \cdot \text{час} \cdot ^\circ\text{C}.$$

Тогда

$$K' = \frac{19,52}{1 + \frac{0,0055}{2,96} \times 19,52} = 18,84 \text{ кал/м}^2 \cdot \text{час} \cdot ^\circ\text{C}.$$

Кроме того, при загрязнении стенок котла накипью продукты горения начинают покидать котёл с более высокой температурой, вследствие чего увеличивается потеря тепла с уходящими газами; к. п. д. котла падает, расход топлива увеличивается, так как при понижении к. п. д. котла для получения заданного количества пара требуется увеличенная форсировка котла, вызывающая дополнительный расход топлива.

Вред накипи, однако, не ограничивается только ухудшением теплопередачи и перерасходом топлива. Вследствие ухудшения теплопередачи от котельной стенки к воде в результате наличия слоя накипи между внутренней поверхностью стенки и водой температура котельной стенки повышается (см. ниже раздел «Температура металла котла») и возникает возможность перегрева металла котельной стенки, в первую очередь в частях котла, воспринимающих тепло главным образом путём лучеиспускания и работающих, таким образом, с большой тепловой нагрузкой.

Влияние накипи на перерасход топлива в той или иной котельной установке зависит от состава накипи, конструкции котла, тепловой напряжённости его работы и от других факторов. Поэтому данные увеличения расхода топлива при одной и той же толщине слоя накипи у различных исследователей получаются далеко не одинаковыми. Ориентировочно можно считать, что накипь толщиной в 1 мм даёт перерасход топлива в 2—3%; при накипи толщиной 2 мм перерасход топлива составляет около 4—5% в сравнении с работой котла при полном отсутствии накипи.

§ 5. НАЗНАЧЕНИЕ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ПИТАТЕЛЬНОЙ ВОДЫ

Цель водообработки заключается в предотвращении образования в котле накипи или в получении отложений в рыхлом, хлопьевидном состоянии, при котором они легко удаляются из котла, а также в предотвращении скопления масла и попадания в котёл газов.

Водообработка разделяется на следующие виды:

- 1) обработка питательной воды до её поступления в котёл;
- 2) внутрикотловая обработка (обработка воды, находящейся в котле).

Наиболее употребительные методы докотловой обработки питательной воды следующие:

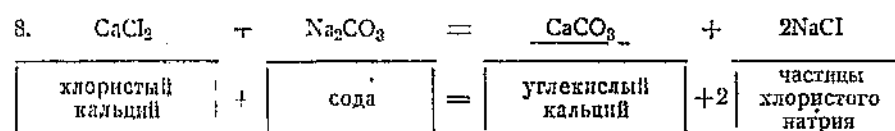
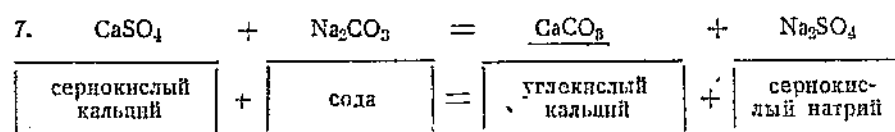
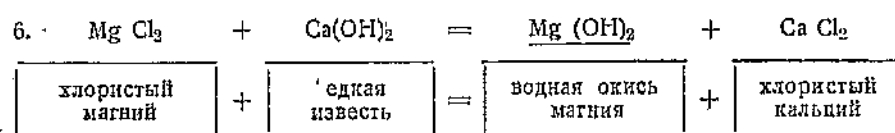
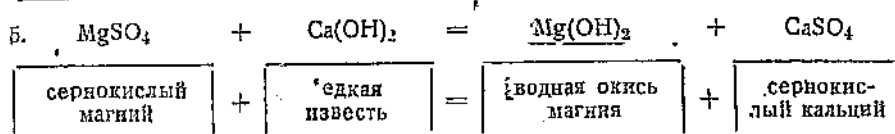
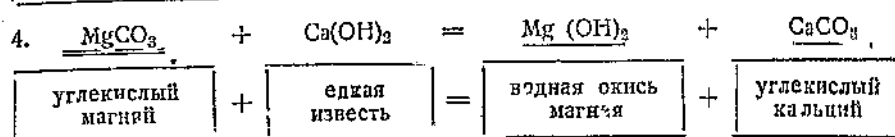
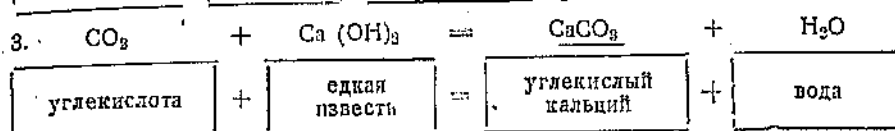
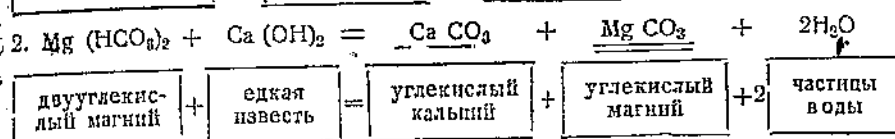
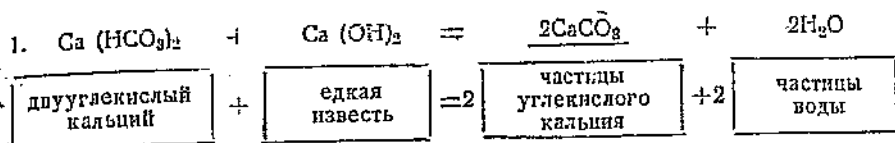
- 1) фильтрация питательной воды через кокс, зофу, гравий и т. д. с целью освобождения её от взвешенных веществ и масла;
- 2) подогрев питательной воды в подогревателях и тёплых ящиках, в результате которого вода освобождается от растворённых в ней газов и частично от солей временной жёсткости;
- 3) химическая очистка питательной воды. Химическая очистка заключается в том, что из питательной воды, перед поступлением её в котёл, удаляются вещества, образующие накипь. Производится так называемое «умягчение» воды. Химическим путём можно почти полностью устранить жёсткость воды. Остаточная жёсткость воды после химической очистки может быть всего 1—2 градуса.

§ 6. ХИМИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА ПИТАТЕЛЬНОЙ ВОДЫ

Умягчение воды химическим способом достигается введением различных реактивов, вступающих в химическую реакцию с растворёнными в воде соединениями. В результате происходящих химических реакций растворимые соли превращаются в нерастворимые, которые удаляются из питательной воды механическим путём, т. е. отстаиванием и фильтрацией. Существует несколько методов химической обработки воды известью, содой, едким барием и др., в зависимости от состава примесей, находящихся в воде. Наиболее распространённым является содово-известковый метод очистки, т. е. прибавление к воде одновременно извести и соды. При этом действием едкой извести выделяются из воды соли временной жёсткости, а кальцинированной содой выделяются соли постоянной жёсткости.

Процесс обработки воды известью и содой протекает по следующим химическим формулам (нерастворимые соли подчеркнуты одной чертой, а слабо растворимые соли — двумя чертами).

Процесс работы содово-известковой водоочистительной установки заключается в следующем. Подлежащая очистке вода и реактивы в необходимом количестве (в зависимости от характера примесей и общей жёсткости обрабатываемой воды) подаются в специальный бак (так называемый сатуратор), где под действием указанных выше факторов происходит выделение из раствора со-



держатся в воде солей временной и постоянной жёсткости. Проходя далее через специальный отстойник с фильтром, вода освобождается от выделившихся из раствора соединений и направляется в котлы. Соединения, выпавшие из раствора и скопившиеся в нижней части, периодически удаляются при их продувке.

Содово-известковые водоочистительные установки широко распространены для подготовки питательной воды для котлов на электростанциях, а также в котельных установках фабрик и за-

водов. На речных судах химический метод предварительной водоподготовки до сих пор не получил большого распространения. Объясняется это тем, что для проведения химической очистки воды требуется сооружение на судне специальной водоочистительной установки, занимающей много места и увеличивающей осадку судна. Для речных пароходов даже больших мощностей, при крайне ограниченных габаритах корпуса, монтаж такой установки является затруднительным, а для судов малой мощности — совершенно невыполнимым. Кроме того, сооружение установки для химической очистки питательной воды требует значительных капитальных затрат. Другие из существующих методов докотловой обработки питательной воды, например, катодный метод, очистка воды испарением и др. — также не получили распространения на речных судах.

Поэтому в настоящее время докотловая обработка питательной воды на речных судах заключается в подавляющем большинстве случаев только в фильтрации питательной воды и её подогреве отработавшим паром до температуры 70—90°C и выше.

Борьба с накипеобразованием проводится путём внутрикотловой обработки питательной воды.

§ 7. ВНУТРИКОТЛОВАЯ ОБРАБОТКА ВОДЫ

Внутрикотловая обработка воды (фосфатирование) имеет своей целью такую обработку котловой воды, в результате которой содержащиеся в воде соли не осаждаются в самом котле в виде твёрдых трудноудаляемых отложений, а переводятся в шламовидное состояние. Получающийся шлам легко удаляется из котла вместе с водой при полном или частичном выпуске её из котла.

Фосфатирование котловой воды производится с помощью тринатрийфосфата или более сложных препаратов, содержащих тринатрийфосфат, каустическую и кальцинированную соду и другие вещества. Эти препараты получили название антинакипинов. На речных судах наибольшее распространение с 1935 года получил так называемый «антидепон» (предложен инженером А. И. Штюрк), а с 1940 года — антинакипин № 1 Наркомречфлота.

В состав антидепона входят: тринатрийфосфат, сода, каустик (едкий натр), дубильный экстракт и другие вещества в разных дозах. Антидепон по внешнему виду представляет густую массу или однородные твёрдые куски выкристаллизовавшихся солей от коричневого до чёрного цвета, легко растворимые в воде. Изготавливалось 13 различных марок (шифров) антидепона, отличавшихся друг от друга количественным соотношением отдельных веществ, входящих в состав антидепона. Применение того или иного шифра определялось составом воды и её жёсткостью. Шифры 1—7 применялись для морских вод. Для речного флота применялись шифры 8—13.

Перечень важнейших компонентов и весовой состав различных марок (шифров) антидепона даны в таблице 101.

Перечень отдельных компонентов (в % по весу) марок антидиспона, предназначенных для речных вод

№ шиф- ра	Сода от—до	Каустик (едкий натр) от—до	Хромоагриевая соль от—до	Тринатрий фосфат от—до
8	11—13,5	2,5—4,0	1,2—2,5	40,5—45,24
9	11—13,5	4,0—6,2	1,2—2,5	33,64—38,97
10	14—16,5	4,2—6,5	1,6—2,9	34,8—40,6
11	14—16,5	3—4,0	1,5—2,8	40,6—45,24
12	17—20,5	3,5—5,0	1,0—2,0	45,24—52,2

Примечание При определении щелочей (сода и едкого натра) нормируется только их сумма; в отдельности содержание Na_2CO_3 и NaOH не нормируются.

Антинакипин № 1 Наркомречфлота представляет смесь:

тринатрий фосфата	25,4%
кальцинированной соды	38,0%
каустической соды (каустика)	28,5%
воды	8,1%

С 1943 года в Московско-Окском пароходстве успешно применяется заимствованный из НКПС метод внутрикотловой обработки воды с помощью жидкого антинакипина, изготовленного из торфа с большим содержанием гуминовых кислот¹.

§ 8. ДЕЙСТВИЕ АНТИНАКИПИНА

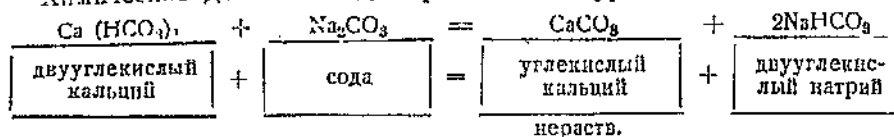
Антинакипины действуют на примеси котловой воды как химически, так и механически (как коллонды).

Механическое воздействие заключается в том, что частицы антинакипина, имея большую поверхность, отвлекают на себя частицы, образующие накипь, являясь как бы центром образования накипи, и вместе с ними дают илистые отложения, оседающие в виде шлама, легко удаляемого из котла периодическим продуванием.

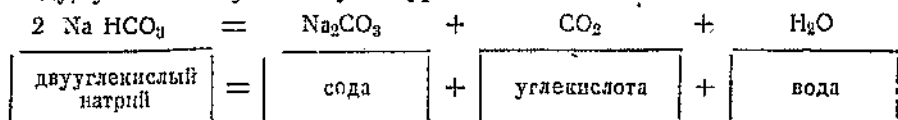
Химическое воздействие заключается в том, что под влиянием содержащихся в антинакипине реагентов растворимые соли котловой воды превращаются в нерастворимые, которые и выпадают в виде осадков, также удаляемых при продувке котла. Основным реагентом, входящим в состав антинакипина, действующим химически на содержащиеся в воде соли, является сода.

¹ О применении щелочных вытяжек из торфа в качестве антинакипина см. подробно в брошюре инж. Л. В. Петровой «Щелочные вытяжки из торфа как заменители антинакипина», издательство Наркомречфлота СССР, 1944 год.

Химическое действие соды протекает по уравнению:



Далее, при кипячении двууглекислый натрий разлагается на соду, углекислоту и воду по уравнению:



Дозировка антинакипинов. Для обработки котловой воды антинакипин регулярно вводится в котёл вместе с питательной водой. Расчёт суточной дозировки препарата производится соответственно с составом применяемого антинакипина, с условиями работы котельной установки и качеством питательной воды. Суточная порция антинакипина обычно вводится в 6 приёмов, через каждые 4 часа, при смене вахт на судне. Ввод в котёл антинакипина происходит с помощью питательного приводного от машины насоса (при работе судна в ходу) или инжектором (на стоянке). Имеются конструкции механических дозёров для непрерывного ввода антинакипинов в котёл.

Расчёт дозировки для речных котлов обычно производится по количеству испаряемой воды, т. е. определяется количество антинакипина в килограммах на тонну испаряемой воды в сутки. Более приближённой является дозировка на 1 м² поверхности нагрева котла в сутки или на 1 силу индикаторной мощности главной машины парохода.

В таблице 102 указаны суточные нормы препарата антидепон, а в таблице 103 — антинакипина № 1 в зависимости от жёсткости питательной воды.

Таблица 102

Суточные нормы препарата антидепон в зависимости от жёсткости питательной воды

Жёсткость воды в градусах	Марка (шифр) антидепона	Суточная норма препарата на 1м ² поверхности нагрева котлов в г	Суточная норма препарата на 1 м ² поверхности нагрева котлов в дни нижних продувок в г	
			при чистой поверхности нагрева котла	при загрязнённой поверхности нагрева котла
1—3	8	18,7	22,0	23,7
3—6	9	27,8	30,8	32,8
6—9	10	37,0	40,0	42,0
9—12	11	41,8	44,3	47,0
12—15	12	46,2	49,0	52,0
выше 15	13	74,0	77,0	79,0

Суточные нормы препарата антيناкиппин № 1 Наркомречфлота

Жесткость воды в градусах	Наименование главнейших рек и водоёмов, из которых берётся питьевая вода	Суточная норма в г	
		на 1 т испаряемой питательной воды	на 1 н. л. с. мощности главной машины
1—6	<i>Реки:</i> Нева, Свирь, Амур, Селенга, Нижний Иртыш, Сыр-Дарья, Рион <i>Озера:</i> Ладожское, Онежское, Чудское, Байкал, Ильмень <i>Каналы:</i> Мариинской системы	45,0	11,0
6—12	<i>Реки:</i> Обь, Верхний Иртыш, Енисей, Вятка, Молога, Днепр, Верхняя Волга, Северная Двина, Сухона, Шексна <i>Каналы:</i> канал Москва-Волга	60,0	14,5
12—16	<i>Реки:</i> Аму-Дарья, Ока, Москва, Средняя и Нижняя Волга, Кама, Белая, Лена, Дон, Урал	75,0	18,0
Выше 16	<i>Озера:</i> Балхаш, Иссык-Куль, Аральское море	110,0	27,0

§ 9. ЩЕЛОЧНОСТЬ КОТЛОВОЙ ВОДЫ

Щёлочность котловой воды обуславливается присутствием в воде соды и едкого натра, входящих в состав антيناкиппинов, вводимых в котёл.

Щёлочность воды является полезной, так как предохраняет металл котла от коррозии (протравления). Практика, однако, показывает, что концентрация в котловой воде щелочей не должна превышать известных пределов. Излишняя щёлочность приводит к нарушению процесса кипения воды, т. е. к вскипанию и вспениванию воды¹, разъеданию котельной арматуры и т. д. Величина содержания соды и едкого натра (в миллиграммах на литр воды) характеризуется натронным числом. Практикой и исследованиями установлено, что для речных котлов желательным натронным числом является 150—300. Поддержание щёлочности котловой воды в указанных пределах при всех режимах работы судовой котель-

¹ Вскипание воды есть физико-химический процесс, вызываемый резким снижением поверхностного натяжения воды. Внешним признаком вскипания является резкое колебание уровня воды в водоуказательных стеклах, несмотря на постоянство режима питания и равномерную нагрузку котла. Способность воды к вскипанию зависит от степени загрязнённости воды и рода загрязнений (концентрации отдельных видов растворённых солей), напряжения поверхности нагрева котла, а также его конструктивных и эксплуатационных особенностей, в первую очередь от объёма и высоты парового пространства, от качества циркуляции воды в котле и т. д.

ной установки производится изменением количества вводимого антинакипина и продувками котлов (количеством котловой воды, ежесуточно удаляемой через кран нижнего продувания). В свою очередь, величина натронного числа является контролем правильности применяемой дозировки антинакипинного препарата. С увеличением дозировки антинакипина, при неизменном режиме работы котла, щёлочность возрастает. Если натронное число, установленное пробой котловой воды, оказывается меньше 100—150, значит суточная норма антинакипина для данного режима работы котла недостаточна и её нужно несколько увеличить. Если натронное число оказывается более 300, это указывает на то, что котловая вода обладает излишней щёлочностью. Для снижения щёлочности суточная норма антинакипина должна быть уменьшена.

§ 10. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАТРОННОГО ЧИСЛА КОТЛОВОЙ ВОДЫ

Натронное число определяется с помощью специального реактива, так называемого химического индикатора (указателя).

Применяемый химический индикатор представляет собой бесцветный спиртовой раствор фенолфталеина и некоторого количества соляной кислоты.

При применении антинакипинов натронное число должно определяться ежесуточно, для чего из котла отбирается проба воды.

Проба котловой воды отбирается в чистую кружку через нижний водопробный кран или через водяной кран водоуказательного стекла. Перед отбором пробы кран нужно обязательно продууть. Пробу воды для анализа следует отбирать медленно, при небольшом открытии краника, чтобы избежать разбрызгивания и большого испарения воды. Отобранную пробу воды охлаждают до комнатной температуры.

Остывшую пробу котловой воды, предварительно профильтрованную через бумажный фильтр, наливают в градуированный стаканчик (мензурку) в количестве 50 см³. Затем пипеткой из флакона набирают небольшое количество реактива и пускают в мензурку одну каплю, отчего вода в мензурке окрасится в розовый цвет. Если после первой капли вода не окрасилась, это значит, что натронное число котловой воды меньше 50 и дозировка антинакипина недостаточна. В этом случае для окрашивания воды прибавляют еще 1—2 капли реактива.

После окрашивания воды в мензурку добавляют пипеткой еще несколько капель реактива, помешивая палочкой воду после добавления каждой капли. Вводить реактив по каплям продолжают до тех пор, пока розовая окраска не исчезнет и вода в мензурке снова не станет бесцветной.

Натронное число определяется умножением затраченного количества капель реактива на число 50 (т. е. на количество отобранной в мензурку воды в см³).

ХИ. ПРОДУВАНИЕ И ПРОМЫВКА КОТЛОВ

§ 1. ПРОДУВАНИЕ КОТЛОВ

Продуванием (продувкой) называется частичное удаление воды из котла под давлением в процессе эксплуатации котла. Продувание котла разделяется на верхнее и нижнее. Верхнее продувание производится через верхний продувочный или так называемый «пенковый» кран. Через кран верхнего продувания выпускаются верхние слои воды (на уровне водяного зеркала). Верхним продуванием удаётся достигнуть частичного удаления плавающих на поверхности масла и грязи в виде пены.

Порядок выполнения верхнего продувания. Верхнее продувание должно производиться не реже одного раза в сутки или чаще, если будет замечено появление маслянистого слоя в водоуказательном стекле. Давление пара при верхнем продувании может быть равно рабочему. Перед продуванием необходимо опробовать действие продувочного крана осторожным поворачиванием его в сторону открытия. Открывать кран, надевая трубу на его ручку или применяя ломик, строго воспрещается, так как при этом можно сломать кран или патрубков.

Нижнее продувание производится через кран, установленный в нижней части котла (кран нижнего продувания).

Нижнее продувание имеет целью:

- 1) удаление из котла шлама, образующегося в результате взаимодействия антинакипина с накипеобразователями, содержащимися в воде;
- 2) поддержание щёлочности котловой воды в желаемых пределах;
- 3) ограничение концентрации солей котловой воды.

Практика показала, что нижние продувки оказывают очень большое влияние на работу котла. Сочетанием продувок с правильным и регулярным применением антинакипинов удаётся достигнуть: экономии топлива, вследствие поддержания поверхности нагрева котла в чистом состоянии, обеспечивающем хорошую передачу тепла от газов к воде; увеличения рабочего периода времени между котлоочистками или очередными промывками котлов до 2000 и более часов работы котла, что сокращает необходимое количество остановок судна на котлоочистку в течение навигации; работы котла без вырезки дымогарных трубок в течение нескольких навигаций; сохранения стенок котла от коррозии и протравления.

До 1941 года по правилам Регистра СССР нижнее продувание разрешалось производить только на пониженном давлении (при давлении пара в котлах не более 4—5 кг/см²). Это затрудняло эксплуатацию котлов и не давало возможности производить регулярные ежесуточные нижние продувания. В то же время практика показала, что поддержание поверхности нагрева со стороны воды в чистоте при применении антинакипина возможно только

в случае регулярного удаления образующегося в котле шлама путём нижнего продувания (в среднем по 4—6 раз в сутки).

При наличии на спускной линии котла (на линии нижнего продувания) специального предохранительного устройства (так называемой дроссельной шайбы) нижнее продувание вполне надёжно, и его безопасно можно производить при полном рабочем давлении, без нарушения нормальной работы котла. С 1941 года постановка дроссельных шайб признана обязательной для всех паровых котлов на речных судах.

Назначение и конструкция дроссельной шайбы (в соответствии с требованиями Регистра СССР по очистке паровых котлов на речных судах).

Дроссельная шайба предназначена для:

1) уменьшения вибрации котла, паропроводов и трубы нижнего продувания, соединяющей кран нижнего продувания с забортным кингстоном, что даёт возможность производить нижнее продувание котла на полном рабочем давлении пара;

2) уменьшения скорости убыли воды (по водомерному стеклу) при продувке, что повышает надёжность и безопасность продувки;

3) создания более совершенной очистки котла от шлама и грязи при продувке;

4) уменьшения шума при продувке.

Дроссельная шайба представляет собой круглую пластинку с отверстием в центре. Материал пластинки — сталь 5 толщиной 3—5 мм. Диаметр центрального отверстия шайбы должен быть равен 18 мм при внутреннем диаметре трубы или отверстия крана нижнего продувания — 38 мм, независимо от величины давления пара в котле.

При диаметрах спускных труб паровых котлов менее или более 38 мм диаметр центрального отверстия шайбы должен быть принят равным половине внутреннего диаметра трубы или крана, причём за исходный диаметр следует брать меньший.

Примечание. Во время очередных котлопромывок диаметр центрального отверстия шайбы необходимо замерять и в случае разработки отверстия на 2 мм — шайбу заменить новой.

Дроссельная шайба устанавливается на клингеритовых прокладках на линии нижнего продувания, между фланцами спускной трубы и крана нижнего продувания. Установка дроссельной шайбы между котлом и краном нижнего продувания не допускается. Центры отверстий дроссельной шайбы и трубы нижнего продувания должны точно совпадать.

Порядок нижнего продувания котла при наличии дроссельной шайбы. При наличии дроссельной шайбы на продувочной линии нижнее продувание производится при полном давлении пара, независимо от места нахождения судна и без вывода судна из эксплуатации.

Порядок выполнения нижнего продувания должен быть следующим:

а) уровень воды в водоуказательном стекле проверяют продувкой стекла;

б) воду подкачивают в котёл до уровня не ниже $\frac{3}{4}$ водоуказательного стекла;

в) полностью открывают забортный кингстон;

г) медленным поворачиванием ключа полностью открывают кран нижнего продувания (риска на пробке крана должна совпадать с осью трубы).

Продолжительность продувания определяется быстротой понижения уровня воды, причём за понижением уровня воды в стекле ведется тщательное наблюдение. Во время продувания уровень воды спускается примерно на 50 мм против первоначального, но к моменту закрытия крана он должен быть не ниже рабочего;

д) кран нижнего продувания быстро закрывают; при полном закрытии крана риска на пробке крана должна быть перпендикулярна к оси трубы;

ж) закрывают бортовой кингстон.

По окончании нижнего продувания в котёл вводят очередную порцию антинакипина.

Каждая произведённая продувка котла должна регистрироваться в машинном журнале, где должно быть отмечено: время продувки, давление пара в котле при продувке, убыль воды по водоуказательному стеклу и количество антинакипина, введённого в котёл после продувки.

Частота нижних продувок котлов. Каждый установленный на судне котёл, в зависимости от величины его поверхности нагрева и загрязнённости питательной воды, должен ежедневно подвергаться нижнему продуванию следующее число раз:

	При регулярном применении антинакипина	При работе без антинакипина
Крупные котлы (поверхность нагрева 120—180 м ²) или при загрязнённой воде и отсутствии на судне фильтров питательной воды	6 раз в сутки	Не менее 3—4 раз в сутки
Котлы с небольшой поверхностью нагрева (до 100—120 м ²) или при наличии исправно действующих фильтров питательной воды	4 раза в сутки	Не менее 1—2 раз в сутки

В течение суток указанное число продувок выполняется через равные промежутки времени.

При наличии у котла двух кранов нижнего продувания (например, у фронта котла и под огневой камерой) пользование кранами должно быть поочерёдным.

§ 2. ПРОМЫВКА КОТЛОВ

Промывка паровых котлов на речных судах производится в течение навигации. Тщательная холодная механическая очистка

котлов производится обычно в течение зимнего судоремонтного периода, при нахождении судов в зимовочном состоянии.

Допустимая продолжительность работы котлов от промывки до промывки (межпромывочный период) зависит от качества питательной воды, состояния котлов, степени их изношенности, периода навигации, более или менее регулярного и правильного применения антинакипных средств и т. д.

В таблице 104 даны установленные Речным Регистром СССР нормы времени межпромывочной работы котлов на речных судах¹.

Промывкой котлов достигается: а) смена котловой воды, б) освобождение котла от шлама и осадков и частичное удаление накопившихся на стенках котла отложений накипи.

Различают холодную и горячую промывку котлов.

Холодная промывка котлов. Следует различать два случая промывки: 1-й случай, когда судно имеет котельную установку, состоящую из двух и более котлов, и 2-й случай, когда судно имеет один котёл.

При наличии на судне двух и более котлов промывка их обычно производится поочерёдно. В то время как первый котёл охлаждается и чистится, второй — находится под парами. При этом вода для промывки первого котла подаётся инжектором с помощью пара от работающего котла. Промывка котла и наполнение его производится в этом случае водой с температурой 40—45° С.

При наличии на судне одного котла для промывки требуется либо помощь другого, находящегося под парами судна, подающего для промывки воду инжектором через гибкий шланг (в этом случае промывка производится также тёплой водой), либо котёл промывается с помощью ручного насоса, имеющегося на судне, например, ручного пожарного насоса. В этом случае промывка и наполнение котла производится холодной забортной водой.

Практикой установлен следующий порядок промывки котлов.

1. Назначенный к промывке котёл отключают от работающих котлов. На трубопроводах к промываемому котлу ставят заглушки. Допускается разъединить промываемый котел и работающий путём перекрытия клапанов на трубопроводах и запирания их на замок.

2. Пар из котла, предназначенного к промывке, сбрасывают на паровую машину, динамо, водогонь, насосы и т. д. до давления 2 кг/см² по манометру.

3. По достижении в котле давления не более 2 кг/см² открывают нижний продувочный кран и постепенно спускают из котла воду и пар.

¹ Однако с развитием на речном флоте лужинско-киселевских методов работы эти нормы превзойдены.

Передовые механики речных судов путем тщательного ухода за котлами и механизмами добились как на огнетрубных, так и на водотрубных котлах удлинения межпромывочных сроков работы котлов до 3000 часов и выше, сохранив чистоту поверхностей нагрева.

Сроки между промывками котлов на речных судах

Система котлов	Качество питательной воды	Период навигации	Продолжительность периода работы между промывками	
			для котлов, имеющих дефекты и признанных ограниченно годными в эксплуатации, или при нерегулярном применении антинакипина	для котлов, находящихся в хорошем техническом состоянии и при регулярном применении антинакипина и продувок через дроссельную шайбу
Огнетрубные котлы	Для котлов, питающихся чистой и мягкой водой (жесткость до 4°), при плавании судна на реках: Свирь, Амур, Печора, Нева, Мезень и озерах: Ладожском, Онежском и Байкал	Весеннее и осеннее половодье	31 сутки 750 часов	90—105 сут. 2160—2520 час.
		Межень	37,5 сутки 900 часов	
	Для котлов, питающихся водой с жесткостью в 4—12°, при плавании судна на реках: Кубань, Рьон, Днепр, Северная Двина, Западная Двина, Верхняя Волга, Ока, Сухона, Вятка, Енисей, Иртыш, Обь, Беломорский канал, каналы Мариинской системы	Весеннее и осеннее половодье	27 суток 650 часов	
		Межень	33 сутки 800 часов	
	Для котлов, питающихся водой с жесткостью в 12—15°, при плавании судна на реках: Москва, Волга, Кама, Белая, Лена, Дон, Донец, Урал, Кура, канал Москва-Волга, Чусовая, Клязьма, Сыр-Дарья.	Весеннее и осеннее половодье	25 суток 600 часов	
		Межень	29 суток 700 часов	
Водотрубные котлы	Для котлов, питающихся водой с большой загрязненностью, жесткостью свыше 15°, при плавании на реке Аму-Дарья и озерах Балхаш, Иссык-Куль, Аральское море	Всю навигацию	21 сутки 500 часов	
			33—42 сутки 800—1000 часов	

Примечание. Сроки между чистками (промывками) котлов считаются с момента поднятия пара в котле после котлоочистки до момента его последующего спуска.

4. После спуска воды котлу дают дополнительно охладиться в течение 1—2 часов при закрытых люках, после чего открывают нижние люки котла и удаляют шлам и грязь из нижней части котла.

Примечание. Общая продолжительность остывания котлов, требуемая правилами Регистра, указана в разделе «Уход за паровыми котлами в эксплуатации».

5. Через 1,5—2 часа после вскрытия нижних люков открывают также верхние люки. Котёл остывает и некоторое время вентилируется при открытых люках.

6. Через верхний люк влезает в котел и с помощью стальных щёток, прутков и других инструментов очищают жаровые трубы и потолки огневых камер от отложений.

7. Введя гибкий шланг с брандспойтом через верхний люк в котёл, струей воды отбивают и смывают отложения со стенок котла, жаровых и дымогарных труб. Вода для промывки подается от инжектора соседнего работающего котла или насосом с ручным приводом.

8. После промывки котла брандспойтом скопившуюся в нижней части котла грязь удаляют через нижние люки, после чего влезает в нижнюю часть котла и осматривают в доступных местах состояние поверхности нагрева.

9. Закончив удаление грязи и отложений, закрывают нижние люки и производят наполнение котла водой, после чего начинают подъём пара.

Общая продолжительность промывки, требуемая для судовых огнетрубных котлов, от момента начала спуска пара из котла до момента достижения в котле рабочего давления, в зависимости от величины поверхности нагрева и рода топлива, указана в таблице 105.

Т а б л и ц а 105

Общая продолжительность спуска пара, промывки одного котла и подъёма пара (при холодной промывке)

Поверхность нагрева котла в м ²	Общая продолжительность в часах	
	при работе котла на мазуте	при работе котла на угле и дровах
до 30	18—20	20—22
30—59	22—24	24—26
60—89	25—27	27—29
90—119	29—31	31—33
120—149	32—34	34—36
150—179	36—38	38—39
180 и выше	39—40	40—41

При каждом вскрытии котла механиком судна и представителем пароходства или инспекции Речного Регистра составляется акт с указанием характера и толщины накипи, найденной при осмотре.

ре на огневых частях котла, и количеств удаленного из котла шлама и грязи из нижней части котла — в ведрах.

При промывке котла, кроме того, необходимо:

а) освидетельствовать все доступные осмотру части котла в целях выявления его общего состояния и состояния ранее отмеченных повреждений (трещин, выщупин);

б) осмотреть арматуру и гарнитуру, причём все обнаруженные при осмотре повреждения (если они по своему характеру не требуют большого ремонта) должны быть немедленно устранены.

Горячая промывка котлов. Очистка судовых котлов горячим способом производится при нахождении судна у станции горячей промывки. Станция для производства горячих промывок может быть береговой или пловучей.

Горячая промывка не исключает, однако, полностью необходимости производства холодных промывок котлов в течение навигации. Основное преимущество горячей промывки — значительное ускорение процесса за счёт уменьшения времени, потребного на охлаждение котла и подъём пара. Практика показывает, что при горячей промывке тщательное удаление накипи из котла затруднительно, а из-за высоких температур как внутренний осмотр котла, так и производство котельных работ невозможны. Поэтому горячие промывки должны чередоваться с очистками холодным способом. Целесообразно производить тщательную холодную очистку котлов после двух горячих промывок. Сроки межпромывочной работы при очистке котлов горячим способом сохраняются те же, что и при холодной очистке.

Порядок проведения горячей промывки. 1. Перед поступлением судна на промывку накачивают воду в дополнительный бак станции в таком количестве, чтобы её хватило для заполнения промываемого котла до рабочего уровня.

2. Котёл судна, поступившего на промывку, подключают к трубопроводам станции.

3. Пар из котла травят в дополнительный бак. За счёт теплоты пара вода в баке нагревается до температуры 60—80° С.

4. Когда давление пара в котле будет не более 1,5—2 атм. по манометру, воду из котла под этим давлением выпускают в промывочный бак, находящийся на станции. Так как эта вода далее используется для промывки котла, то её перед поступлением в промывочный бак пропускают через коксовый фильтр, очищающий котловую воду от взвешенных веществ и масла.

5. После наполнения промывочного бака открывают верхний люк котла, пускают в действие центробежный насос, имеющийся на станции, и вода из промывочного бака под давлением 4—5 кг/см² направляется в котёл через шланг, присоединяемый к нагнетательной магистрали центробежного насоса. Шланг должен иметь изогнутые наконечники, позволяющие направлять струю воды на все внутренние части котла с целью сбивания накипи и грязи с поверхности нагрева.

6. По правилам Речного Регистра, очистка котла горячим спо-

собом должна производиться водой с температурой не ниже 65° С при давлении не более 5 кг/см².

7. После очистки огневых камер и дымогарных трубок струей воды из шланга через верхний люк последний прикрывают; далее открывают боковой люк и ведут промывку через него; затем открывают второй боковой люк и производят смывание грязи и накипи с другой стороны котла.

8. Во время спуска воды из котла, промывки и наполнения его котельное помещение необходимо держать закрытым во избежание сквозняков, могущих вызвать резкое и неравномерное охлаждение котла и расстройство его соединений. Во время промывки не следует также допускать налacha тяги в котле. С той же целью следует держать закрытыми дверцы топок, поддувало и регистр, а также все люки, кроме того, через который ведётся промывка.

9. Накипь и грязь, сбивая с поверхностей нагрева струей воды, удаляется через нижние грязевые люки.

10. По окончании промывки механик парохода совместно с представителем промывочной станции должен произвести осмотр котла через люки в видимых и доступных местах.

11. После осмотра быстро закрывают люки и производят наплевание котла до половины водомерного стекла нагретой чистой водой из наполнительных баков. Вода из наполнительного бака при этом поступает в котёл самотёком.

12. Закончив наполнение котла водой, разводят в топках огонь и поднимают пар.

Время, необходимое на остывание котла, очистку и подъём пара при горячих промывках, в соответствии с правилами Регистра, указано в таблице 106.

Таблица 106

Нормы времени на остывание, очистку и подъём пара при горячих промывках котлов

Поверхность нагрева котла в м ²	Остывание в часах		Очистка в часах	Подъём пара в часах при нали- ве котла водой с температурой выше 50°С	Общее количество часов	
	на мазуте	на угле			на мазуте	на угле
До 30	6—8	8—10	2	4	12—14	14—16
30—59	8—10	10—12	3	6	17—19	19—21
60—89	10—12	12—14	4	7	21—23	23—25
90—119	12—14	14—16	4	8	24—26	25—28
120—149	14—16	16—18	5	9	28—30	30—32
150—179	16—18	18—19	5	9	30—32	32—33
180 и выше	18—19	19—20	6	10	34—35	35—36

§ 3. СЕПАРАЦИЯ ШЛАМА ИЗ КОТЛА (ТЕРМОСИФОННОЕ ШЛАМОУДАЛЕНИЕ)

При эксплуатации котлов с применением внутрикотловой обработки воды в них образуется значительное количество шлама.

The diagram shows a cross-section of a steam boiler system. On the left is a large cylindrical boiler body. Inside, there is a smaller central riser tube. A horizontal line labeled 'с' indicates the water level. Above the water level, there is a space for steam. A vertical pipe labeled 'Опускной трубопровод' (downcomer) extends from the top of the boiler. To the right of the boiler is a vertical separator vessel. A pipe labeled 'В котел' (to boiler) connects the bottom of the separator back to the boiler. The separator has a central riser tube with an upward arrow and a downward arrow, indicating a circulation loop. The top of the separator is labeled 'Ведущая продукция' (leading product) and has a valve. The bottom of the separator is labeled 'Нижняя продукция сепаратора' (bottom product of separator) and has a valve. The entire system is labeled 'Сепаратор' (separator).

а) циркуляционный напор, обусловленный разностью температур и, следовательно, удельных весов жидкости в подъёмном и опускном участках контура;

В силу существующего столба жидкости h над уровнем жидкости в котле в точке a давление будет ниже, чем в точке c . Давление в точке a будет меньше на величину давления, создаваемого столбом h . Так как температура жидкости в котле определяется величиной давления, то, следовательно, температура в точке a будет ниже, чем в точке c . Разность температур в этих точках и приводит к явлению самоиспарения жидкости в точках, находящихся выше уровня воды в котле.

Корпус сепаратора представляет собой бачок высотой 1000—1500 мм и диаметром 300—400 мм. Для удаления осаждающегося

шлама в конической части корпуса сепаратора устанавливается спускной кран.

Работа сепаратора осуществляется следующим образом: смесь шлама с водой поступает в корпус сепаратора по центральной трубе, в которой скорость воды вследствие увеличенной площади сечения уменьшается, и частицы шлама оседают в конической части сепаратора. По выходе из центральной трубы вода меняет свое направление и поднимается вверх, проходя между шереборками с ещё меньшей скоростью, и в результате этого почти полностью осветляется.

По опытам, проведённым на железнодорожном транспорте, количество шлама, отделяемого в сепараторе, достигает 85—97%. Периодически (через 3—6 часов) должна производиться продувка сепаратора. При этом открывают продувочный кран у корпуса сепаратора и держат его открытым до прекращения удаления густой массы.

При работе шламоотделителя продувочными кранами котла почти совершенно не пользуются, за исключением лишь тех случаев, когда необходимо понизить солесодержание котловой воды.

Применение термосифонного шламоудаления при внутрикотловой обработке воды антинакипинами даёт возможность:

- 1) достичь экономии топлива за счёт уменьшения потерь тепла с продувочной водой (количество тепла, теряемого со шламом, удаляемым из сепаратора, во много раз меньше количества тепла, теряемого при обычных регулярных нижних продувках котла);

- 2) сократить расход антинакипина на 20—30%;

- 3) поддерживать поверхность нагрева котла в чистоте и увеличить межпромывочный период работы котла.

Термосифонные шламоудалители получили распространение заграничной практикой главным образом для стационарных установок низких и средних давлений, а также на паровозах. В СССР термосифонное шламоудаление для паровозов предложено в 1939 году. На речном транспорте первая судовая речная термосифонная установка была оборудована в 1943 году на пароходе «Звенига» Средне-Волжского пароходства.

XIV. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕМПЕРАТУРА ГОРЕНИЯ.

ПРЯМАЯ ОТДАЧА ТЕПЛА В ТОПКЕ. ТЕПЛОПОГЛОЩЕНИЕ В ОТДЕЛЬНЫХ ЧАСТЯХ ПОВЕРХНОСТИ НАГРЕВА КОТЛА

§ 1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕМПЕРАТУРА ГОРЕНИЯ

Если работа топки установилась и тепловой режим её не изменяется, то тепло, непрерывно выделяясь при горении топлива, одновременно отводится из топки с уходящими продуктами горения, а также непосредственно передается поверхности нагрева путём лучеиспускания слоя топлива и пламени в топке; температура в топке поддерживается неизменной.

Наличие высокой температуры в топке является непременным условием устойчивого сгорания всякого топлива. Установлено, что

для того, чтобы выделяющиеся при нагревании топлива углеводороды могли воспламениться и сгореть, температура в топке должна быть не ниже $700-800^{\circ}\text{C}$. Практически она составляет для топок судовых котлов, работающих как на твердом, так и на жидком топливе, 1000°C и более. Чем выше температура в топке, тем энергичнее идет процесс горения, тем легче добиться полного сгорания топлива, тем экономичнее работает паровой котел.

Максимальной теоретической температурой горения ($T_{\text{т.р.}}^{\circ}\text{C}$) называется та наивысшая температура, которая получается при полном сгорании топлива и при условии, что всё тепло, выделяющееся при горении, а также и вносимое в топку с воздухом, полностью используется на нагрев продуктов сгорания.

Теоретическая температура горения определяется из уравнения теплового баланса топки, составленного на 1 кг топлива.

Приход тепла в топку складывается из тепла, выделяемого при сгорании 1 кг топлива (равного рабочей низшей теплотворной способности $Q_{\text{н}}^{\text{ккал/кг}}$), и тепла, вносимого в топку с воздухом, расходуемым на 1 кг сжигаемого топлива. Кроме того, в топку вносится ещё тепло с самим топливом, но физическим теплом топлива вследствие его относительно малой величины можно пренебречь.

Тепло, вносимое в топку с воздухом на 1 кг сжигаемого топлива, определяется как произведение:

$$V_{\text{т}} \cdot \alpha_{\text{т}} \cdot C_{\text{в}} \cdot t_{\text{в}} \text{ ккал/кг},$$

где: $V_{\text{т}}$ — теоретически необходимый объём воздуха на 1 кг сжигаемого топлива в $\text{м}^3/\text{кг}$;

$t_{\text{в}}$ — температура поступающего в топку воздуха;

$C_{\text{в}}$ — теплоёмкость воздуха в ккал/кг;

$\alpha_{\text{т}}$ — коэффициент избытка воздуха.

Общий приход тепла в топку на 1 кг сжигаемого топлива при полном горении его составит:

$$Q_{\text{т}} = Q_{\text{н.р}} + V_{\text{т}} \cdot \alpha_{\text{т}} \cdot C_{\text{в}} \cdot t_{\text{в}} \text{ ккал/кг}. \quad (114)$$

Если предполагается, что в топке нет никаких потерь и всё поступившее тепло полностью используется на нагревание продуктов сгорания до температуры $T_{\text{гор}}$, то эта температура, названная выше теоретической температурой сгорания, может быть определена из уравнения:

$$\underbrace{Q_{\text{н.р}} + V_{\text{т}} \cdot \alpha_{\text{т}} \cdot C_{\text{в}} \cdot t_{\text{в}}}_{\text{Приход тепла}} = \underbrace{V_{\text{з}} \cdot C_{\text{з}} \cdot T_{\text{гор}}}_{\text{Расход тепла}} \quad (115)$$

В правой части этого уравнения:

$V_{\text{з}}$ — объём продуктов сгорания на 1 кг сжигаемого топлива в $\text{м}^3/\text{кг}$;

$C_{\text{з}}$ — объёмная теплоёмкость продуктов сгорания при постоянном давлении в ккал/м³, подсчитанная при температуре $T_{\text{гор}}$, которой приходится предварительно задаваться.

Следовательно, максимальная теоретическая температура горения будет:

$$T_{гор} = \frac{Q_{нр} + V_{м} \cdot \alpha_m \cdot C_g \cdot t_a}{V_g \cdot C_g} \text{ } ^\circ\text{C.} \quad (115')$$

Из этого уравнения следует, что теоретическая температура горения зависит от следующих факторов:

- 1) рода сжигаемого топлива и его теплотворной способности;
- 2) температуры поступающего в топку воздуха;
- 3) коэффициента избытка воздуха, с которым работает топка, так как с увеличением избытка воздуха увеличивается объём газов, а чем больше объём продуктов сгорания, тем до меньшей температуры они могут быть нагреты при условии, что количество тепла, идущее на нагревание, не изменяется.

Для возможности быстрой оценки величины теоретической температуры горения в зависимости от основных факторов и для нахождения зависящей от температуры теплоёмкости продуктов сгорания в таблице 107 даны подсчитанные по вышеприведённой формуле значения $T_{гор}$. Выбрав из таблицы для данного вида топлива и α_m значение $T_{гор}$, определяют теплоёмкость газов по формуле:

$$C_g = 0,323 + 0,000018 T_{гор}$$

и далее уже более точно определяют по приведённой выше формуле (115') теоретическую температуру горения для данного состава топлива.

Таблица 107

Теоретическая температура горения в зависимости от коэффициента избытка воздуха для различных топлив

Топливо	Теоретическая температура горения в $^\circ\text{C}$				
	$\alpha_m = 1$	$\alpha_m = 1,2$	$\alpha_m = 1,3$	$\alpha_m = 1,4$	$\alpha_m = 1,5$
Дрова сухопутной доставки с влажностью $W=25\%$	2070	1810	1710	1610	1530
Дрова сплавные с влажностью $W=30\%$	1980	1740	1645	1550	1475
Подмосковный уголь теплотворной способностью 3300 кал/кг	2100	1825	1710	1610	1525
Донецкий антрацит	2450	2100	1950	1830	1720
Мазут	2370	2020	1895	1790	1690

§ 2. ТЕМПЕРАТУРА В ТОПКЕ

Действительная температура в топке всегда ниже теоретической температуры горения, так как:

- 1) вследствие неполноты горения при сжигании 1 кг топлива выделяется не $Q_{нр}$ калорий тепла, а меньшее количество (в зависимости от величины потерь от химической неполноты горения q_3 и механической неполноты горения q_4);

2) часть тепла, выделяющегося при сгорании топлива, не идёт на нагрев продуктов сгорания, а теряется топкой в окружающую среду; для внутренних топок судовых котлов потеря тепла от охлаждения топки обычно весьма мала и в среднем принимается 0,5% от Q_p^k ;

3) часть тепла, выделяющегося при сгорании топлива, не идёт на повышение температуры образующихся продуктов сгорания, а непосредственно передаётся поверхности нагрева котла путём лученспускания газов, факела пламени или слоя горящего топлива в топке.

Суммарная потеря тепла в топке вследствие неполноты горения и потери тепла в окружающую среду учитывается коэффициентом полезного действия топки, который определяется как отношение:

$$\eta_{\text{т}} = \frac{\text{тепло, действительно выделяемое в топке на 1 килограмм топлива}}{\text{теплотворная способность топлива}} = \frac{Q_p^k (1 - q_3 - q_4 - q_5^m)}{Q_p^k} \quad (116)$$

В этой формуле:

q_3 — потеря от химического недожога в долях килограмма,

q_4 — потеря от механического недожога,

q_5^m — потеря тепла топкой от охлаждения, составляющая часть общей потери котельной установки в окружающую среду.

Следовательно, зная q_3 , q_4 , q_5^m , к. п. д. топки можно определить из выражения:

$$\eta_{\text{т}} = 1 - q_3 - q_4 - q_5^m \quad (117)$$

Потеря тепла котлом и топкой в окружающую среду зависит от системы котла и топки, качества изоляции, величины тепловой нагрузки топки. С увеличением форсировки понижается доля тепла, теряемого котлом и топкой в окружающую среду.

При расчётах топок величину потери тепла в окружающую среду ориентировочно принимают в пределах, указанных в таблице 108.

Таблица 108

Потери тепла от охлаждения котла и топки в процентах от Q_p^k

Тип котла	Потери на охлаждение q_5	
	всего котла q_5	в том числе топки q_5^m
Огнетрубный	3,0—3,5	0,5
Водотрубный треугольного типа . .	4,0—5,0	1,0—1,5

Для оценки величины потерь q_3 и q_4 следует пользоваться данными теплотехнических испытаний однотипных котлов.

Для ориентировочных расчётов можно также пользоваться приближёнными данными к. п. д. топки, указанными в таблицах 109 и 110.

Таблица 109

Потери в топке и к. п. д. топки при сжигании мазута

Потери в % от Q_p^y и к. п. д. топки	Тепловое напряжение объёма топочного пространства в тыс. кал/м ³ · час.		
	400	550	750
Потеря от химического недожога q_3	2,2	2,8	3,6
Потеря от механического недожога q_4	0	0	0
Потеря тепла топкой в окружающую среду q_5^m	0,55	0,5	0,45
К. п. д. топки η_m	97,25	96,7	95,95

Таблица 110

Потери тепла и к. п. д. топок при сжигании антрацита на колосниковых решётках в топках речных котлов с дутьём

Потери в % от Q_p^u и к. п. д. топки	Тепловое напряжение колосниковой решётки в тыс. кал/м ² · час.		
	550	700	850
Потеря от химического недожога q_3	2,0	2,5	3,0
Потеря от механического недожога q_4	8,0	11,0	13,5
Потеря топкой в окружающую среду q_5^m	0,6	0,5	0,45
К. п. д. топки η_m	89,4	86,0	83,05

Приводимые в таблицах 109 и 110 значения отдельных потерь и к. п. д. топки относятся к топкам речных судовых огнетрубных котлов при сжигании мазута и антрацита в пределах наиболее употребительных тепловых нагрузок.

Влияние отдачи тепла путём лучеиспускания (прямой отдачи) на температуру в топке учитывается так называемым коэффициентом прямой отдачи ε , представляющим отношение:

$$\varepsilon = \frac{\text{количество тепла, отдаваемого в топке в час путём лучеиспускания}}{\text{общее тепловыделение в топке в час}}$$

или

$$\sigma = -B \cdot \frac{Q_d}{Q_p^{0,38}}, \quad (118)$$

где: B — количество сжигаемого топлива в кг/час;

Q_d — количество тепла, отдаваемого котлу путём лучеиспускания газов и раскалённого слоя топлива, в ккал/час.

Величина коэффициента прямой отдачи зависит от типа топки, рода сжигаемого топлива, теплового напряжения топки и ряда других факторов.

Для топок судовых котлов σ в среднем составляет 0,3—0,38.

Для ориентировочной оценки действительной температуры в топке по известным $T_{гор}$ и σ можно пользоваться следующей формулой:

$$T_{топ} = T_{гор} (1 - \sigma) \gamma_{пр}. \quad (119)$$

Из этой формулы следует, что действительная температура в топке зависит:

1) от рода сжигаемого топлива и его теплотворной способности, а также от количества и температуры поступающего в топку воздуха, так как от этих факторов зависит теоретическая температура горения, а также в значительной степени и ожидаемый к. п. д. топки;

2) от величины коэффициента прямой отдачи;

3) от величины потерь тепла в топке.

Мероприятиями, повышающими температуру в топке, являются:

1) сжигание топлива с более высокой теплотворной способностью и меньшей влажностью;

2) подача в топку подогретого воздуха;

3) ведение процесса горения с возможно меньшим коэффициентом избытка воздуха (уменьшение коэффициента избытка воздуха допустимо, если оно не идёт в ущерб полноте горения топлива);

4) повышение форсировки топки, т. е. увеличение количества топлива, сжигаемого в топке в час. Установлено, что с увеличением степени форсировки топки коэффициент прямой отдачи понижается и, следовательно, температура топки при прочих равных условиях возрастает, так как, хотя с увеличением форсировки топки количество тепла, отдаваемого поверхности нагрева путём лучеиспускания, и увеличивается, но в меньшей степени, чем возрастает общее тепловыделение в топке;

5) уменьшение прямой отдачи тепла путём уменьшения лучевоспринимающей поверхности котла (перекрытие топки сводами, закрытие части поверхности нагрева жаровых труб, расположенных над колосниковой решёткой, кирпичной футеровкой и т. д.).

Средние значения действительной температуры газов в топке при сжигании различного топлива указаны в таблице III.

Средние значения действительной температуры в топке

Вид сжигаемого топлива	Температура газов °С
Каменный уголь	1100—1300
Дрова	900—1100
Антрацит	1200—1300
Мазут	1300—1400

При теплотехнических испытаниях действительная температура пламени в топке определяется обычно оптическими пирометрами.

§ 3. РАСЧЕТ ПРЯМОЙ ОТДАЧИ В ТОПКЕ

При тепловых расчётах топок и котлов обычно не ограничиваются приближённой оценкой величины коэффициента прямой отдачи и температуры в топке в зависимости от конструкции топки и рода сжигаемого топлива, а определяют σ более точно.

Для расчёта коэффициента прямой отдачи существуют два пути.

1. Определение количества тепла, отдаваемого путём лучеиспускания раскалённым слоем топлива и пламени в топке (или, что то же, количества тепла, воспринимаемого котлом путём лучеиспускания) по закону Стефана — Больцмана. При этом методе устанавливают величину лучевоспринимающей поверхности H_a , подсчитывают Q_a по формуле Стефана — Больцмана (см. выше раздел «Теплопередача») и находят далее коэффициент прямой отдачи по формуле:

$$\sigma = \frac{Q_a}{B \cdot Q_{II}^p}.$$

2. Использование найденных опытным путём зависимостей между величинами B , H_a и σ (метод применения эмпирических уравнений).

В первом случае для определения Q_a обычно пользуются уравнением Стефана — Больцмана в следующем виде:

$$Q_a = H_a C_0 \left[\left(\frac{T_{\text{топ}} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{\text{ст}} + 273}{100} \right)^4 \right] \text{ кал/час,} \quad (120)$$

где: H_a — лучевоспринимающая поверхность котла (поверхность радиации) в м²;

$T_{\text{топ}}$ — ожидаемая действительная температура в топке (при факельном способе сжигания вместо $T_{\text{топ}}$ в формулу подставляется средняя температура лучеиспускающего факела), которой при расчёте прямой отдачи предварительно задаются;

$t_{\text{ст}}$ — температура котельной стенки;

C_0 — приведённый коэффициент лучеиспускания.

Для быстрого определения входящего в формулу члена $\left(\frac{t+273}{100}\right)^4$ даётся таблица 112.

$$\text{Значения } \left(\frac{t+273}{100}\right)^4 = \left(\frac{T}{100}\right)^4.$$

Таблица 112

$t^{\circ}\text{C}$	$\left(\frac{T}{100}\right)^4$	$t^{\circ}\text{C}$	$\left(\frac{T}{100}\right)^4$
150	320	650	7260
200	501	700	8960
250	748	750	10955
300	1078	800	13210
350	1506	850	15980
400	2051	900	18990
450	2732	950	22370
500	3571	1000	26540
550	4590	1050	30650
600	5810	1100	35550
		1150	41000
		1200	47080

Достаточно точное определение количества тепла, передаваемого путём лучеиспускания ($Q_{\text{л}}$), по формуле Стефана—Больцмана, однако, практически оказывается затруднительным ввиду сложности процессов передачи тепла в топке. Наиболее трудным является определение величины лучевоспринимающей и лучеиспускающей поверхности $H_{\text{л}}$, а также коэффициента лучеиспускания C_0 , зависящего от состояния лучевоспринимающей поверхности (загрязнение поверхности нагрева сильно снижает коэффициент лучеиспускания), от лучеиспускающей способности самих газов и топлива в топке и взаимного расположения лучевоспринимающей и лучеиспускающей поверхностей.

При приближённых подсчётах для случая слоевого сжигания топлива на колосниковой решётке (каменный уголь, антрацит) коэффициент лучеиспускания как раскалённого слоя топлива, так и радиационной поверхности котла принимают часто равным $4,4 \text{ кал/м}^2 \cdot \text{час}^{\circ}\text{C}$.

Поскольку коэффициент лучеиспускания абсолютно чёрного тела равен 4,95 и принимая, что лучеиспускающая и лучевоспринимающая поверхности равны и параллельны, приведённый выше коэффициент лучеиспускания для данного случая теплообмена грубо ориентировочно получается равным:

$$C_0 = \frac{1}{\frac{1}{4,4} + \frac{1}{4,4} + \frac{1}{4,95}} \approx 4 \text{ кал/м}^2 \cdot \text{час} \cdot ^\circ\text{С}.$$

При факельном способе сжигания топлива (мазут) пользование формулой Стефана—Больцмана может привести к ещё большим ошибкам, так как в этом случае, кроме трудности правильного определения коэффициента лучеиспускания, в большой степени зависящего от состава лучеиспускающих газов, — весьма затруднительной является более или менее правильная оценка средней температуры лучеиспускающего факела.

Что касается величины H_s , т. е. поверхности котла, воспринимающей тепло путём лучеиспускания, то для внутренних топок огнетрубных котлов считают, что лучевоспринимающей поверхностью при факельном способе сжигания является полная поверхность жаровых труб, свободная от футеровки, а при слоевом — поверхность жаровых труб, равная площади колосниковой решётки.

Входящая в формулу Стефана—Больцмана температура котельной стенки при употребительных на речных судах давлениях пара составляет в нормальных условиях работы не более 250°С . Поэтому, пользуясь таблицей 112, находим, что величину $\left(\frac{t_{cm} + 273}{100}\right)^4$ можно принять равной 500. Приняв также, согласно изложенному выше, $C_0 = 4$, получаем следующую упрощённую формулу для определения количества тепла, отдаваемого в топке путём лучеиспускания:

$$Q_s = 4 \cdot H_s \left[\left(\frac{T_{mon} + 273}{100} \right)^4 - 500 \right] \text{ кал/час.} \quad (121)$$

Для определения коэффициента прямой отдачи при этом получаем следующую формулу:

$$\sigma = \frac{4 \cdot H_s \left[\left(\frac{T_{mon} + 273}{100} \right)^4 - 500 \right]}{B \cdot Q_p^*}. \quad (122)$$

При проектировании котельных установок и производстве тепловых расчётов, учитывая сложность явлений теплообмена в топке, для определения величины σ в большинстве случаев предпочитают пользоваться не формулами Стефана—Больцмана, а эмпирическими уравнениями, дающими связь между H_s , часовым расходом топлива B и величиной прямой отдачи σ , основанными на многочисленных опытных данных.

Одной из таких формул, часто применяемых для расчёта в огнетрубных котлах, является формула Оррока-Гурвича (предложена в 1934 году).

Формула эта даёт практически достаточно точные результаты, если принять, что в прямой отдаче участвует не только поверхность нагрева жаровой трубы, но и внутренняя поверхность огневой камеры, свободная от футеровки.

Формула даётся в следующем виде:

$$\sigma = \frac{\eta'_{\text{т}}}{1 + \frac{\gamma \cdot \alpha \cdot V_0 \sqrt{\frac{B \cdot Q^u_p \cdot \eta'_{\text{т}}}{H_{\Sigma}}}}{A_0}} \quad (123)$$

где: H_{Σ} — суммарная радиационная поверхность топок (жаровых труб) и огневых камер котла;

V_0 — теоретически необходимый объём воздуха на 1 кг топлива в м³/час;

$\eta'_{\text{т}}$ — коэффициент эффективности топки, представляющий отношение количества тепла, действительно выделенного в топке и вносимого с воздухом к теплотворной способности топлива.

Вводя буквенные обозначения, коэффициент эффективности топки можно представить так:

$$\eta'_{\text{т}} = \frac{Q^u_p (1 - q_2 - q_4 - q_5^m) + \alpha V_0 \cdot C_s \cdot t_s}{Q^u_p} \quad (124)$$

A_0 в формуле Гурвича—Оррока «радиационный фактор», зависящий от величины полезного тепловыделения в топке на 1 кг сжигаемого топлива и определяемый по формуле:

$$A_0 = 0,75 Q^u_p \cdot \eta'_{\text{т}} \quad (125)$$

Для быстрого определения величины A_0 можно пользоваться также таблицей 113, в которой величина A_0 дана в зависимости от полезного тепловыделения в топке:

$$Q_{\text{пол}} = Q^u_p \cdot \eta_{\text{т}} + \alpha V_0 \cdot t_s \cdot C_s \text{ кал/час.} \quad (126)$$

Таблица 113

Значения радиационного фактора в формуле Оррока—Гурвича

$Q_{\text{пол}}$ кал/час на 1 кг топлива	A_0
4000	3000
5000	3800
6000	4600
7000	5400
8000	6000
9000	6700
10000	7200
11000	7700
12000	8000

§ 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ГАЗОВ ПО ВЫХОДЕ ИЗ ТОПКИ

При тепловых расчётах судовых котельных установок с огнетрубными котлами бывает важно оценить ожидаемую температуру газов и теплосодержание их при входе в дымогарные трубки

котла. Теплосодержание газов перед трубной решёткой определяется, как разность количества тепла, введённого в топку с топливом и воздухом, и тепла, отданного в топке поверхности нагрева котла. При этом для упрощения расчётов, а также принимая во внимание, что доля отдачи тепла в топке путём конвекции относительно мала, условно считают, что тепло в топке передаётся поверхности нагрева только путём лучеиспускания.

Лучевоспринимающей поверхностью в этом случае обычно считается суммарная поверхность жаровых труб и огневых камер, за вычетом части поверхности, имеющей кирпичную футеровку (а для слесовых топок — за вычетом части поверхности, находящейся под колосниковой решёткой).

Для этого случая коэффициент прямой отдачи можно определить из уравнения теплового баланса топki, составленного с учётом лучеиспускания,

$$\underbrace{Q_p^H + \gamma_m + \alpha V_m \cdot C_g \cdot t_g}_{\text{Тепло, полезно выделяемое в топке при сжигании 1 кг топлива и вносимое с воздухом}} = \underbrace{Q_p^H \cdot \sigma}_{\text{Количество тепла, отдаваемого поверхности радиации путём лучеиспускания}} = \underbrace{V_z \cdot C_z \cdot T_z}_{\text{Тепло, уносимое с газами из топki (теплосодержание газов перед трубной решёткой)}} \quad (127)$$

В этом уравнении:

V_z — объём газов на 1 кг топлива в м³/кг,

C_z — теплоёмкость газов в кал/м³ при температуре газов T_z , перед трубной решёткой (температура газов T_z предварительно оценивается для нахождения C_z).

При тепловых расчётах из этого уравнения находится $T'_{\text{газ}}$ по заранее вычисленному коэффициенту прямой отдачи σ . Если, наоборот, известна действительная величина T'_z , то коэффициент прямой отдачи может быть найден по формуле:

$$\sigma = \frac{(Q_p^H + \gamma_m + \alpha \cdot V_m \cdot C_g \cdot t_g) - V_z \cdot C_z \cdot T'_z}{Q_p^H} \quad (128)$$

Действительная температура газов, найденная из уравнения теплового баланса топki, составит:

$$T_z = \frac{Q_p^H + \gamma_m + \alpha \cdot V_m \cdot C_g \cdot t_g - Q_p^H \cdot \sigma}{V_z \cdot C_z} \quad (129)$$

§ 5. ОБЩЕЕ КОЛИЧЕСТВО ТЕПЛА, ПОЛУЧАЕМОГО КОТЛОМ

Тепло, затрачиваемое в котле на нагревание воды и парообразование, воспринимается поверхностью нагрева котла путём лучеиспускания и конвекции. В жаровых трубах и огневой камере температура газов высока (1200—800° С), а раскалённый слой топлива на решётке, факел пламени и продукты сгорания обладают большой лучеиспускающей способностью. Поэтому поверхность нагрева жаровых труб и огневых камер котлов воспринимает тепло главным образом путём лучеиспускания и называется лучевоспри-

нимающей или радиационной поверхностью. Влияние теплоотдачи путём конвекции для этих частей поверхности нагрева сравнительно невелико. Поэтому при тепловых расчётах условно принимается, что радиационная часть поверхности нагрева котлов воспринимает тепло только путём лучеиспускания. Трубная часть поверхности нагрева котлов омывается газами, имеющими значительно меньшую температуру (700—300°C). При вступлении газов в дымогарные трубки общий поток продуктов сгорания разделяется на отдельные струи, идущие по трубкам и имеющие малую толщину газового слоя. Лучеиспускающая способность газов в этой части поверхности нагрева значительно слабее, теплопередача же в дымогарных трубках идёт главным образом за счёт непосредственного соприкосновения частиц газа с поверхностью нагрева (за счёт конвекции). Трубная часть поверхности нагрева котла называется поэтому конвекционной.

Принимая, что радиационная часть поверхности нагрева воспринимает тепло путём лучеиспускания, а конвекционная — как путём лучеиспускания газов в трубах, так и за счёт конвекции (главным образом), общее количество тепла, получаемого поверхностью нагрева, можно представить в виде уравнения:

$$Q = Q_A + Q_{тр} \text{ кал/час,} \quad (130)$$

где: Q_A — тепло, получаемое радиационной частью поверхности нагрева, в кал/час;

$Q_{тр}$ — тепло, получаемое поверхностью нагрева дымогарных трубок котла, в кал/час.

Если известен коэффициент прямой отдачи, то количество тепла, воспринимаемого радиационной частью поверхности нагрева, определяется из выражения:

$$Q_A = B \cdot Q_p \cdot c \text{ кал/час.} \quad (131)$$

Количество тепла, воспринимаемого поверхностью нагрева дымогарных трубок:

$$Q_{тр} = H_{тр} \cdot K \cdot \Delta t \text{ кал/час.} \quad (132)$$

В этой формуле K кал/м² · час · °C — коэффициент теплопередачи, который, в свою очередь, может быть представлен в виде формулы:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_A + \alpha_c} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (133)$$

где: α_A — коэффициент теплоотдачи от газов к стенке за счёт лучеиспускания, в кал/м² · час · °C,

α_c — коэффициент теплоотдачи соприкосновением, в кал/м² · час · °C,

для судовых огнетрубных котлов в среднем:

$\alpha_A = 2,5 \div 3,5 \text{ кал/м}^2 \cdot \text{час} \cdot ^\circ\text{C},$

$\alpha_c = 12,5 \div 13,5 \text{ кал/м}^2 \cdot \text{час} \cdot ^\circ\text{C},$

α_2 — коэффициент теплоотдачи от стенки к воде кал/м² · час · °C.

Общий коэффициент теплопередачи при чистых котельных стенках, в зависимости от скорости газов, их температуры, рода сжигаемого топлива и т. д., для судовых пролётных и оборотных котлов составляет:

$$K = 15 \div 17 \text{ кал/м}^2 \cdot \text{час.} \cdot ^\circ\text{C},$$

где: H_{mp} — поверхность нагрева дымогарных трубок;

Δt — средняя разность температур между газами и стенкой, вычисляемая для трубной части поверхности нагрева котла по формуле:

$$\Delta t = \frac{T'_g - T_{yg}}{\ln \frac{T'_g - t}{T_{yg} - t}}, \quad (134)$$

где: T'_g — температура газов при входе в дымогарные трубки (температура газов перед трубной решёткой);

T_{yg} — температура газов по выходе из дымогарных трубок (температура газов в дымнике);

t — температура стенок дымогарных трубок.

Общее теплопоглощение всей поверхностью нагрева котла будет:

$$Q = B \cdot Q''_{p \cdot c} + H_{mp} \cdot K \cdot \Delta t \text{ кал/час.} \quad (a)$$

С другой стороны, общее количество тепла, получаемого котлом и затрачиваемого на нагревание воды до температуры кипения при данном давлении в котле (при получении влажного насыщенного пара), составит:

$$Q = D (q + x r - t_1) \text{ кал/час,} \quad (б)$$

где: t_1 — температура питательной воды.

Приравняв правые части уравнений (a) и (б), получаем:

$$\underbrace{D (q + x r - t_1)}_{\text{Тепло, воспринимаемое водой}} = \underbrace{B \cdot Q''_{p \cdot c}}_{\text{Тепло, воспринимаемое радиационной частью поверхности нагрева}} + \underbrace{H_{mp} \cdot K \cdot \Delta t}_{\text{Тепло, воспринимаемое трубной частью поверхности нагрева.}} \quad (135)$$

§ 6. ТЕПЛОВАЯ НАГРУЗКА ОТДЕЛЬНЫХ ЧАСТЕЙ ПОВЕРХНОСТИ НАГРЕВА

Количество тепла, воспринимаемого в час 1 м² поверхности нагрева, называется удельной тепловой нагрузкой поверхности нагрева. Величина тепловой нагрузки единицы поверхности нагрева зависит от степени форсировки котла и от того, как преимущественно (лучеиспусканием или конвекцией) воспринимает тепло данная часть поверхности нагрева и какую температуру имеют газы, омывающие рассматриваемый участок поверхности нагрева.

Чем ближе рассматриваемый участок поверхности нагрева к топке, тем больше влияние лучеиспускания, тем больше его тепловая нагрузка для данного режима работы, т. е. при одной и той же величине форсировки. С увеличением форсировки топку тепло-

вая нагрузка повышается, так как увеличиваются температура и количество газов, возрастает их лучеиспускающая способность и скорость движения.

Тепловая нагрузка всей поверхности нагрева котла в среднем может быть вычислена по формуле (см. также выше раздел «Характеристика напряжённости работы парового котла»):

$$\frac{\text{Тепло, воспринятое поверхностью нагрева и использованное на парообразование}}{\text{Поверхность нагрева котла}} = \left(\frac{Q}{H} \right)_K = \frac{D(q + x r - t_1)}{H_K} = \frac{D(t - t_1)}{H_K}. \quad (186)$$

Средняя тепловая нагрузка для всей радиационной поверхности нагрева котла, если известен коэффициент прямой отдачи, вычисляется по уравнению:

$$\left(\frac{Q}{H} \right)_A = \frac{B \cdot Q_p^H \cdot \sigma}{H_A} \text{ кал/м}^2 \cdot \text{час.} \quad (187)$$

Если известна температура газов в топке, то тепловая нагрузка 1 м² поверхности нагрева жаровых труб котла, воспринимающая тепло почти исключительно путём лучеиспускания, может вычисляться приближённо по формуле Стефана—Больцмана:

$$\left(\frac{Q}{H} \right)_A = C \left[\left(\frac{T_{\text{топ}} + 273}{100} \right)^4 - 500 \right] \text{ кал/м}^2 \cdot \text{час.} \quad (188)$$

где: $C \approx 4$ — приведённый коэффициент лучеиспускания.

Тепловая нагрузка 1 м² трубной части поверхности нагрева вычисляется по формуле:

$$\left(\frac{Q}{H} \right)_{\text{тр}} = K \cdot \Delta t = K \frac{T'_g - T_{yx}}{\ln \frac{T'_g - t}{T_{yx} - t}}, \quad (189)$$

где: K — коэффициент теплопередачи от газов к воде, в кал/м² · час · °С;

Δt — средняя разность температур;

T'_g — температура газов перед дымогарными трубками;

T_{yx} — температура газов в дымнике;

t — температура стенки котла.

Насколько отличается тепловая нагрузка для различных частей поверхности нагрева одного и того же котла, видно из следующего конкретного числового примера.

Пример. При испытании огнетрубного судового котла получены следующие данные:

напряжение поверхности нагрева $\frac{D}{H_K} = 23 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{час.}$

температура питательной воды $t_1 = 60^\circ \text{С.}$

температура газов в топке $T_{\text{топ}} = 1140^\circ \text{С.}$

коэффициент теплопередачи для трубной части поверхности нагрева котла $K = 15 \text{ кал/м}^2 \cdot \text{час.}$

температура газов перед дымогарными трубками $T'_g = 900^\circ \text{С.}$

температура газов по выходе из дымогарных трубок $T_{gx} = 400^\circ \text{C}$,
 температура стенки котла $t = 150^\circ \text{C}$,
 теплоемкость пара, даваемого котлом, $i = 660 \text{ кал/кг}$.

Определяя тепловую нагрузку в среднем для всей поверхности нагрева, получим:

$$\left(\frac{Q}{H}\right)_k = \frac{D(i - t_g)}{H_k} = 23(660 - 60) = 13800 \text{ кал/м}^2 \cdot \text{час.}$$

Средняя тепловая нагрузка 1 м² поверхности нагрева жаровой трубы, воспринимающей тепло путём лученспускания газов, и раскалённого слоя топлива в топке:

$$\begin{aligned} \left(\frac{Q}{H}\right)_{\text{ж.т.}} &= 4 \left[\left(\frac{T_{\text{топ}} + 273}{100} \right)^4 - 500 \right] = \\ &= 4 \left[\left(\frac{1140 + 273}{100} \right)^4 - 500 \right] = 159000 \text{ кал/м}^2 \cdot \text{час.} \end{aligned}$$

Средняя тепловая нагрузка поверхности нагрева дымогарных трубок:

$$\left(\frac{Q}{H}\right)_{\text{тр}} = K \cdot \Delta t = 15 \frac{900 - 400}{\ln \frac{900 - 150}{400 - 150}} = 6840 \text{ кал/м}^2 \cdot \text{час.}$$

Из сравнения тепловой нагрузки жаровой трубы и трубной части поверхности нагрева видно, что в данном случае тепловая нагрузка 1 м² поверхности жаровой трубы более чем в 23 раза превышает среднюю нагрузку трубной части.

§ 7. ТЕМПЕРАТУРА МЕТАЛЛА КОТЛА

Тепло, воспринимаемое поверхностью нагрева котла от продуктов горения путём конвекции и лученспускания, далее путём теплопроводности переходит к внутренней поверхности котельной стенки и отдаётся находящейся в котле воде. Если стенка котла не покрыта изнутри слоем накипи и масла, то температура металла стенки близка к температуре воды в котле, зависящей от давления, и составляет для потребительных на речных судах давлений пара 150—200°С. Такая температура, как показывает опыт, выдерживается металлом без нарушения его прочности.

При наличии на стенках накипи, сажи и других загрязнений, вследствие плохой теплопроводности последних, температура металла может оказаться значительно выше температуры воды в котле. Исследования показывают, что с повышением температуры сверх 300°С металл котла начинает терять свои механические свойства и прочность его понижается. При наличии большого слоя накипи стенка может перегреться настолько сильно, что эксплуатация котла становится небезопасной, а в случае непринятия необходимых мер не исключается возможность получения отдушины и разрыва стенки со всеми вытекающими отсюда последствиями.

Таким образом, температура металла котла, в основном, зависит:

- 1) от величины тепловой нагрузки поверхности нагрева котла;
- 2) от состояния стенки (большей или меньшей загрязнённости стенки накипью и маслом) и теплопроводности слоя загрязнений.

При одной и той же величине форсировки котельной установки элементы поверхности нагрева, расположенные ближе к топке (например, поверхности жаровых труб), имеют всегда большую тепловую нагрузку, чем элементы поверхности нагрева, расположенные ближе к дымоходу (например, дымогарные трубки), омываемые газами с более низкой температурой (см. приведённый выше числовой пример).

У судовых огнетрубных котлов в наиболее тяжёлых условиях работает металл жаровых труб в районе топки, так как эти части поверхности нагрева весьма интенсивно воспринимают тепло путём лучеиспускания и имеют тепловую нагрузку в 15—20 раз большую, чем поверхность нагрева дымогарных трубок.

Температура наружной поверхности стенки, не имеющей загрязнений, вычисляется по уравнению:

$$t_{cm} = t_s + \frac{Q}{H} \left(\frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta_{мет}}{\lambda_{мет}} \right) \cdot ^\circ\text{C}, \quad (140)$$

где: t_s — температура воды в котле;

α_2 — коэффициент теплоотдачи от стенки к воде в $\text{кал/м}^2 \cdot \text{час} \cdot ^\circ\text{C}$ (обычно принимается $5000 \text{ кал/м}^2 \cdot \text{час} \cdot ^\circ\text{C}$);

$\delta_{мет}$ — толщина металлической стенки в метрах;

$\lambda_{мет}$ — коэффициент теплопроводности металла в $\text{кал/м}^2 \cdot \text{час} \cdot ^\circ\text{C}$;

$\frac{Q}{H}$ — тепловая нагрузка 1 м^2 поверхности нагрева в $\text{кал/м}^2 \cdot \text{час}$.

Температура наружной поверхности стенки при наличии слоя накипи вычисляется по уравнению:

$$t'_{cm} = t_s + \frac{Q}{H} \left(\frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta_{мет}}{\lambda_{мет}} + \frac{\delta_n}{\lambda_n} \right), \quad (140')$$

где: δ_n — толщина слоя накипи в метрах;

λ_n — коэффициент теплопроводности слоя накипи.

Температура наружной поверхности котельной стенки при наличии на внутренней её поверхности слоя накипи и масла вычисляется по уравнению:

$$t''_{cm} = t_s + \frac{Q}{H} \left(\frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta_m}{\lambda_m} + \frac{\delta_n}{\lambda_n} + \frac{\delta_{мас}}{\lambda_{мас}} \right), \quad (140'')$$

где: $\delta_{мас}$ — толщина слоя масла в метрах;

$\lambda_{мас}$ — коэффициент теплопроводности слоя масла в $\text{кал/м}^2 \cdot \text{час} \cdot ^\circ\text{C}$;

Вычислим для примера температуру металла жаровой трубы и дымогарной трубки огнетрубного котла при условии тепловых нагрузок предыдущего примера. Котельные стенки предполагаем чистыми.

Принимаем:

коэффициент теплоотдачи от стенки к воде $\alpha_2 = 5000 \text{ кал/м}^2 \text{ час } ^\circ\text{C}$;

толщина стенки $\delta_{ст} = 0,01 \text{ м}$;

коэффициент теплопроводности стенки $\lambda_{ст} = 40 \text{ кал/м}^2 \cdot \text{час } ^\circ\text{C}$.

Получаем:

$$\begin{aligned}(t_{ст})_{ж.м.} &= 150 + 159\,000 \left(\frac{1}{5000} + \frac{0,01}{40} \right) = \\ &= 150 + 159\,000 \times 0,00045 = 221,5^\circ\text{C}.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}(t_{ст})_{в.м.-тр} &= 150 + 6840 \left(\frac{1}{5000} + \frac{0,01}{40} \right) = \\ &= 150 + 6840 \times 0,00045 = 153,07^\circ\text{C}.\end{aligned}$$

Насколько повышается температура стенки от наличия загрязнений, видно из следующего числового примера.

Пример. Подсчитать температуру стенки, имеющей тепловую нагрузку $\frac{Q}{H} = 20\,000 \text{ кал/м}^2 \cdot \text{час}$, для случая совершенно чистой стенки и стенки, загрязнённой изнутри котла слоем накипи и масла, при следующих условиях:

$t_g = 169,6^\circ\text{C}$; $\alpha_2 = 5000 \text{ кал/м}^2 \cdot \text{час}$; $\delta_{ст} = 0,01 \text{ м}$; $\lambda_{ст} = 40 \text{ кал/м}^2 \cdot \text{час } ^\circ\text{C}$;
 $\delta_{нак} = 0,005 \text{ м}$; $\lambda_{нак} = 2,0 \text{ кал/м}^2 \cdot \text{час } ^\circ\text{C}$; $\delta_{мас} = 0,001 \text{ м}$; $\lambda_{мас} = 0,1 \text{ кал/м}^2 \cdot \text{час } ^\circ\text{C}$.

Получаем для чистой стенки:

$$\begin{aligned}t_{ст} &= 169,6 + 20\,000 \left(\frac{1}{5000} + \frac{0,01}{40} \right) = \\ &= 169,6 + 9,0 = 178,6^\circ\text{C}.\end{aligned}$$

То же, для загрязнённой стенки:

$$\begin{aligned}t''_{ст} &= 169,6 + 20\,000 \left(\frac{1}{5000} + \frac{0,01}{40} + \frac{0,005}{2} + \frac{0,001}{0,1} \right) = \\ &= 169,6 + 259,0 = 428,6^\circ\text{C}.\end{aligned}$$

ХV. ЭЛЕМЕНТАРНЫЙ ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ РЕЧНОГО ОГНЕТРУБНОГО КОТЛА ПО ИЗВЕСТНЫМ КОНСТРУКТИВНЫМ РАЗМЕРАМ

§ 1. ЦЕЛИ РАСЧЕТА

Тепловой расчёт, необходимый в случае установки котла вновь или при изменении условий работы котла, уже имеющегося на судне, даёт возможность выявить зависимость между расходом топлива и паропроизводительностью котла при его работе на заданном виде топлива, т. е. найти величину паропроизводительности D кг/час при известном расходе топлива B кг/час, или наоборот.

При установке на судно нового котла или при проведении модернизации существующей котельной установки (например, при оборудовании котлов пароперегревателями, введении подогрева

воздуха и т. п.) требуемая паропроизводительность и вид сжигаемого топлива являются обычно заданными, и путём теплового расчёта нужно оценить величину ожидаемого коэффициента полезного действия котельной установки и найти часовой расход топлива.

Наоборот, при изменении топливного режима котла, например, при переводе котла с мазута на дрова или какое-либо низкосортное топливо, важно бывает до начала работы котла, путём теплового расчёта, выявить достижимую паропроизводительность при заданном расходе топлива, устанавливаемом, исходя из возможной или допустимой величины форсировки (напряжённости работы) топочного устройства.

Чтобы выявить, как изменятся ожидаемая паропроизводительность и качественные показатели работы котла (к. п. д., испарительность топлива) при различной напряжённости работы топочного устройства и поверхности нагрева, тепловой расчёт производят для различных режимов работы (недогрузка, нормальный режим, перегрузка или форсированная работа); по полученным данным строят кривые, характеризующие зависимость паропроизводительности и качественных показателей работы котла от расхода топлива и теплового напряжения топочного устройства.

Проведение подробных тепловых расчётов котлов разных типов для различных режимов их работы при проектировании судовых котельных установок или их модернизации представляет специальную задачу, рассматриваемую в отдельных руководствах по расчёту и проектированию котлов.

Здесь приводится порядок элементарного теплового расчёта применительно к наиболее простой и чаще всего встречающейся на речных судах котельной установке, а именно — для огнетрубных котлов без перегревателя. (Расчёт перегревателей для огнетрубных котлов дан в главе «Пароперегреватели»).

§ 2. ДАННЫЕ, НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА

1. Полная поверхность нагрева котла H_n м².
2. Расчётная радиационная поверхность котла (поверхность нагрева жаровых труб и огневых камер с учётом имеющейся футеровки), воспринимающая тепло путём излучения H_r м².
3. Поверхность нагрева трубной части котла (конвекционная поверхность нагрева) $H_{тр}$ м².
4. Число топок z .
5. Диаметр жаровых труб $D_{ж.т}$ м.
6. Суммарная площадь колосниковых решёток ΣR м².
7. Число дымогарных трубок n .
8. Внутренний диаметр дымогарных трубок $d_{ди}$ м.
9. Площадь суммарного газового окна $\Sigma F_{ж.т} = 0,785 \cdot D_{ж.т}^2 \cdot z$ м².
10. Рабочее давление пара в котле P кг/см² — задаётся.

11. Степень сухости вырабатываемого пара X (для огнетрубных котлов принимается $X=0,97 \div 0,98$).

12. Температура питательной воды $t_1^\circ\text{C}$ — задается.

13. Характеристика сжигаемого топлива.

Для расчёта задаются: род топлива, на котором должен работать котёл, низшая рабочая теплотворная способность топлива и рабочий состав топлива в процентах по весу:

$$\begin{array}{rcl} C_p & = & \dots \% \\ H_p & = & \dots \% \\ O_p & = & \dots \% \\ N_p & = & \dots \% \\ S_p^I & = & \dots \% \\ W_p & = & \dots \% \\ A_p & = & \dots \% \\ \hline \text{Всего} & = & 100\% \end{array}$$

§ 3. ХАРАКТЕРИСТИКА НАПРЯЖЕННОСТИ РАБОТЫ ТОПКИ

При расчёте должно быть принято:

в случае работы на жидком топливе и дровах — расчётное напряжение суммарного газового окна топок: $\frac{Q_p^H \cdot B}{\Sigma F_{\text{гк.т}}}$ тыс. кал/м² · час, а при работе на угле — тепловое напряжение площади колосниковой решётки: $\frac{B \cdot Q_p^H}{\Sigma R}$ тыс. кал/м² · час;

в случае работы на мазуте обычно допускается (верхний предел) $\frac{Q_p^H \cdot B}{\Sigma F_{\text{гк.т}}} \leq 3500$ тыс. кал/м² · час;

в случае работы на дровах с искусственной тягой (паросифоном в дымовой трубе) и при колосниковых или фартучных топках в жаровых трубах $\frac{Q_p^H \cdot B}{\Sigma F_{\text{гк.т}}} \leq 2000 \div 2200$ тыс. кал/м² · час;

в случае работы на угле с паровым или вентиляторным дутьём под решётку $\frac{Q_p^H \cdot B}{\Sigma R} \leq 1000 \div 1100$ тыс. кал/м² · час.

§ 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНОГО РАСХОДА ТОПЛИВА

Установив величину $\frac{B \cdot Q_p^H}{\Sigma F_{\text{гк.т}}}$ или $\frac{B \cdot Q_p^H}{\Sigma R}$ и зная размеры суммарного газового окна или суммарной площади колосниковой решётки, определяем ожидаемый расход топлива по формуле:

$$B = \frac{B \cdot Q_p^H}{\Sigma F_{\text{гк.т}}} \left(\frac{\Sigma F_{\text{гк.т}}}{Q_p^H} \right) \text{ кг/час}$$

или

$$B = \frac{B \cdot Q_p^H}{\Sigma R} \left(\frac{\Sigma R}{Q_p^H} \right) \text{ кг/час,}$$

где:

$$\Sigma F_{\text{гк.т}} = 0,785 D_{\text{гк.т}}^2 \cdot Z \text{ м}^2.$$

и

$$\Sigma R = R \cdot Z \text{ м}^2.$$

§ 5. ПРИНИМАЕМЫЕ ВЕЛИЧИНЫ

Принимаемыми величинами являются: коэффициент полезного действия топки η_m , коэффициент избытка воздуха, с которым ведётся процесс горения α , и температура t , поступающего в топку воздуха. При работе без подогрева воздуха температура воздуха принимается $t_s = 30 \div 40^\circ \text{C}$.

Величины η_m и α выбираются в зависимости от рода сжигаемого топлива по имеющимся опытным данным; желательно использование данных испытаний котлов, однотипных с рассчитываемым, при работе на том же виде топлива. Необходимо при этом учитывать, что так как величина тепловых потерь в топке в значительной степени зависит от величины форсировки, то желательна оценка η_m и α по данным испытаний при тепловом напряжении, по величине близком к принимаемому в расчёте. При выборе η_m и α в случае работы на жидком и твёрдом топливе можно пользоваться помещёнными выше данными испытаний и приведёнными (в таблицах 109 и 110) ориентировочными значениями тепловых потерь.

§ 6. ПОСТРОЕНИЕ IT ДИАГРАММЫ

(диаграммы теплосодержаний)

Приведённый ниже расчёт теплоотдачи в отдельных частях поверхности нагрева и определение температур газов по их теплосодержанию (например, температуры уходящих газов) значительно облегчаются в сравнении с чисто аналитическим методом расчёта при наличии IT диаграммы, которая предварительно должна быть построена для данного вида топлива и принятого расчётного коэффициента избытка воздуха α .

Диаграмма IT даёт зависимость теплосодержания продуктов сгорания, полученных при сжигании 1 кг топлива, от их температуры.

Для построения зависимости I от T с точностью, достаточной для теплового расчёта, приняв, что I изменяется от T по закону прямой линии, следует задаться двумя значениями температуры газов (например, 200° и 800°C) и для этих температур определить теплосодержание газов по формуле:

$$I = V_2 \cdot C_2 \cdot T_{\text{газ}} \text{ кал/кг.}$$

Объём газов, получаемых от сжигания 1 кг топлива, можно подсчитывать при этом по приближённой формуле (см. раздел «Процесс горения»):

$$V_2 = x \frac{Q_p^H \cdot \alpha}{1000} + 0,112 + 0,0124 W_p \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Объёмную теплоёмкость газов можно определять в зависимости от температуры по приближённой формуле Теплотехнического института:

$$C_g = 0,323 + 0,00018 T_{\text{гнз}} \text{ кал/м}^3,$$

Нанося на графике точки, соответствующие теплосодержанию газов при $T=200^\circ\text{C}$ и $T=800^\circ\text{C}$, и соединяя их прямой, получаем диаграмму IT для данного вида топлива при принятом коэффициенте избытка воздуха (см. рис. 17).

§ 7. РАСЧЕТ ПРЯМОЙ ОТДАЧИ В ТОПКЕ

Расчёт прямой отдачи заключается в определении количества тепла, отдаваемого путём лученспускания в топке и огневой камере, и в нахождении температуры газов перед их входом в конвекционную часть котла (перед входом в дымогарные трубки).

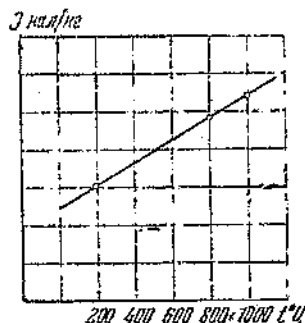


Рис. 17. Построение диаграммы теплосодержаний.

Порядок расчёта следующий:

а) определяют объём воздуха, вводимого в топку на 1 кг топлива, по формуле:

$$V_a = \frac{1,1Q_p^H}{1000} \text{ м}^3 \text{ кг};$$

б) определяют тепло, вносимое в топку с воздухом, на 1 кг сжигаемого топлива:

$$Q_{\text{воз}} = V_a \cdot C_a \cdot t_a \text{ кал/кг},$$

где: $C_a=0,31$ — теплоёмкость воздуха в кал/м³;

t_a — температура воздуха, входящего в топку, в $^\circ\text{C}$;

в) определяют полезное тепловыделение в топке на 1 кг сжигаемого топлива:

$$Q_{\text{пол}} = Q_p^H \cdot \eta_m + V_a \cdot C_a \cdot t_a \text{ кал/кг},$$

где η_m — к. п. д. топки;

г) определяют полезное тепловыделение в топке в течение часа, как произведение

$$Q_{\text{пол}} \cdot B \text{ кал/ч},$$

где: B — расход топлива в час в кг;

д) определяют коэффициент эффективности топки:

$$\eta_{\text{пл}} = \frac{Q_{\text{пол}}}{Q_p^H};$$

е) определяют коэффициент прямой отдачи в топке и огневой камере по формуле Оррока—Гурвич:

$$\epsilon = \frac{\gamma'_{\text{т}}}{\gamma \cdot V_{\text{г}} \sqrt{\frac{B \cdot Q_{\text{г}}^{\text{н}} \cdot \gamma'_{\text{т}}}{H_{\text{г}}}}}, \quad 1 + \frac{A_0}{A_0}$$

где: $\gamma \cdot V_{\text{г}}$ —вес воздуха на 1 кг топлива, кг/кг.

Плотность воздуха может быть принята $\gamma = 1,2$ кг/м³.

A_0 —радиационный фактор определяется в зависимости от величины полезного тепловыделения по формуле:

$A_0 = 0,75 \cdot Q_{\text{г}}^{\text{н}} \cdot \gamma'_{\text{т}}$ или по таблице 113 (см. стр. 195);

ж) определяют теплопоглощение топкой и огневой камерой в течение часа:

$$Q_{\text{г}} = B \cdot Q_{\text{г}}^{\text{н}} \cdot \sigma \text{ кал/час;}$$

з) определяют теплосодержание газов у трубной решётки как разность между теплом, полезно выделённым в топке и внесённым с воздухом на 1 кг топлива, и теплом, отданным лучевоспринимающей поверхности топок и огневых камер:

$$I_{\text{г}} = Q_{\text{пог}} - Q_{\text{г}}^{\text{н}} \cdot \sigma \text{ кал/кг;} \quad (141)$$

и) пользуясь ранее построенной IT диаграммой, находят температуру газов $T'_{\text{г}}$ перед трубной решёткой (перед входом газов в дымогарные трубки), соответствующую теплосодержанию $I_{\text{г}}$, кал/кг.

§ 8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОПОГЛОЩЕНИЯ В КОНВЕКЦИОННОЙ ЧАСТИ ПОВЕРХНОСТИ НАГРЕВА

Расчёт конвекционной (трубной) части поверхности нагрева заключается в определении количества тепла, которое отнимается от продуктов сгорания и передаётся поверхности нагрева дымогарных трубок.

Зная теплосодержание продуктов сгорания перед дымогарными трубками, путём вычитания из него количества тепла, отданного газами в районе дымогарных трубок, определяют теплосодержание уходящих газов, а по ней температуру газов.

Для определения теплопоглощения в конвекционной части поверхности нагрева следует предварительно задаться температурой уходящих газов $T''_{\text{г}}$.

Порядок расчёта теплоотдачи в трубной части поверхности нагрева должен быть следующий:

а) определяют объём газов, проходящих в течение часа через дымогарные трубки котла, по формуле:

$$V_{\text{газ}} = V_{\text{г}} \cdot B \frac{273 + t_{\text{ср}}}{273} \text{ м}^3/\text{час}, \quad (142)$$

где: V_1 — объём газов на 1 кг сжигаемого топлива при нормальных условиях в $\text{м}^3/\text{кг}$;

$\frac{273 + t_{cp}}{273}$ — поправка на увеличение объёма газов;

t_{cp} — температура газов в трубках, определяемая как среднее арифметическое из температур газов перед дымогарными трубками T'_z и после их T''_z ;

$$t_{cp} = \frac{T'_z + T''_z}{2};$$

б) объём газов, проходящий в секунду, будет:

$$V_{сек} = \frac{V_{нас}}{3600} \text{ м}^3/\text{сек}; \quad (143)$$

в) определяют площадь сечения дымогарных трубок по формуле:

$$O_{д-тр} = 0,785 d_{ан}^2 \cdot n \text{ м}^2, \quad (144)$$

где: $d_{ан}$ — внутренний диаметр дымогарных трубок в метрах;
 n — число дымогарных трубок;

г) находят среднюю скорость газов в дымогарных трубках по формуле:

$$W = \frac{V_{сек}}{O_{д-тр}}; \quad (145)$$

д) определяют коэффициент теплопередачи в дымогарных трубках по приближённой формуле проф. Сыромятникова:

$$K = 6 + 4,4 \sqrt{W} \text{ кал/м}^2 \cdot \text{час} \cdot ^\circ\text{C}; \quad (146)$$

е) подсчитывают среднюю логарифмическую разность температур между газами и стенкой в дымогарных трубках по формуле:

$$\Delta t = \frac{T'_z - T''_z}{\ln \frac{T'_z - t}{T''_z - t}},$$

где: t — температура стенки дымогарной трубки (принимается приближённо равной температуре воды при заданном давлении в котле);

логарифм выражения $\frac{T'_z - t}{T''_z - t}$ вычисляется с помощью таблиц натуральных логарифмов (см. приложение 1);

ж) определяют теплотеплопоглощение конвекционной частью поверхности нагрева на 1 кг сжигаемого топлива по формуле:

$$q_{тр} = \xi \frac{H_{тр} \cdot K \cdot \Delta t}{B} \text{ кал/кг} \cdot \text{час}, \quad (147)$$

где: ξ — коэффициент, учитывающий неполное омывание газами поверхности нагрева вследствие загрязнения труб и т. д. и называемый часто коэффициентом использования

газового потока. По опытным данным можно ориентировочно принимать — $\xi = 0,95$ — для судовых оборотных котлов, $\xi = 0,85$ — для судовых пролётных котлов;

з) определяют потери тепла в калориях на 1 кг сжигаемого топлива вследствие охлаждения поверхности котла (потеря в окружающую среду). При тепловом расчёте, учитывая среднее качество тепловой изоляции котла, эту потерю обычно принимают $q_{\text{из}} = 2,5\%$ теплотворной способности топлива. Следовательно:

$$Q_{\text{окл}} = \frac{q_{\text{из}} \cdot Q_{\text{пр}}}{100} \text{ кал/час;} \quad (148)$$

и) определяют теплосодержание уходящих газов на 1 кг топлива:

$$I'_{\text{г}} = I'_{\text{г}} - q_{\text{пр}} - Q_{\text{окл}} \text{ ккал/кг,} \quad (149)$$

где $I'_{\text{г}}$ — теплосодержание газов перед трубной частью поверхности нагрева;

к) определив $I'_{\text{г}}$, находят температуру уходящих газов, пользуясь IT диаграммой.

Если эта температура будет отличаться от предварительно принятой температуры более чем на $5-10^\circ \text{C}$, следует повторить расчёт теплоотдачи в конвекционной части поверхности нагрева, задавшись новой температурой уходящих газов, более близкой к полученной предыдущим расчётом. Подобные цифровые расчёты требуется повторить несколько раз до тех пор, пока, пользуясь этим методом последовательного приближения, не получим почти полного совпадения найденной расчётом температуры уходящих газов с предварительно принятой.

Для ускорения расчёта можно пользоваться графоаналитическим методом, приняв с достаточной для практики точностью, что теплосодержание отходящих газов изменяется в зависимости от температуры по закону прямой линии.

Диаграмма IT даёт возможность определить температуру уходящих газов путём проведения цифровых подсчётов всего для двух предварительной оценке температуры уходящих газов, требуется тельного приближения, при отсутствии достаточного навыка в предварительной оценке температуры уходящих газов, требуется иногда сделать в указанной выше последовательности 3—4 и более цифровых расчёта теплоотдачи в конвекционной части поверхности нагрева.

При расчёте теплоотдачи с помощью IT диаграммы следует задаваться двумя значениями температур уходящих газов таким образом, чтобы ожидаемая истинная температура газов находилась в интервале между принятыми значениями температур. Для большинства огнетрубных котлов при упрощённых тепловых нагрузках удобно задаваться значениями температур газов в дымнике 300° и 400°C .

Результаты необходимых подсчётов для двух температур по формулам, приведённым выше, помещаются в сводной таблице 114.

Сводная таблица результатов подсчётов теплотолочения в конвекционной части поверхности нагрева

[illegible]

Нанося далее на IT диаграмму полученные значения I'' , для температур 300° и 400° С (см. рис. 18) и проводя прямую через полученные точки A и B , в месте пересечения этой прямой с ранее построенной линией теплосодержания газов в зависимости от

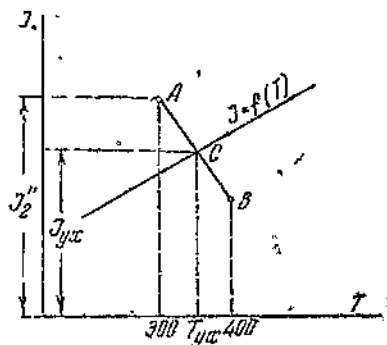


Рис. 18. Графическое определение температуры уходящих газов.

температуры (точка C), получим действительное теплосодержание уходящих газов I_{yx} и их температуру T_{yx} . Тогда действительное теплотогощение конвекционной части поверхности нагрева найдем из выражения:

$$Q = B(I_c - I_{yx} - Q_{ох.г}) \text{ кал/час.}$$

§ 9. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФИЦИЕНТА ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ КОТЛА

Зная теплотогощение радиационной и конвекционной частей поверхности нагрева и общее количество тепла, содержащегося в топливе, вносимом в топку котла в час, определяем к. п. д. котла брутто по формуле:

$$\eta_{бр} = \frac{Q_{\lambda} + Q_{мп}}{B \cdot Q_{н.р.}} \quad (150)$$

§ 10. ЧАСОВАЯ ПАРПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ КОТЛА

Для принятого в расчёте часового расхода топлива часовая производительность котла определяется по формуле:

$$D = \frac{Q_{\lambda} + Q_{мп}}{(q + xr - t_1)} \text{ кг/час,} \quad (151)$$

где t_1 — температура питательной воды, поступающей в котел, в $^\circ\text{C}$.

§ 11. НАПРЯЖЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ НАГРЕВА КОТЛА

Видимое напряжение поверхности нагрева котла

$$d = \frac{D}{H_c} \text{ кг/м}^2 \cdot \text{час.}$$

То же по нормальному пару — $d_n = d \frac{(q + xr - t_1)}{640} \text{ кг/м}^2 \cdot \text{час,}$
где 640 — теплосодержание нормального пара в кал/кг.

§. 12. ИСПАРИТЕЛЬНОСТЬ ТОПЛИВА

При расчётном расходе топлива (расчётной нагрузке котла):

видимая испарительность — $u = \frac{D}{B}$ кг/кг;

то же по нормальному пару $u_n = \frac{Q_p^u \cdot \eta_{p_k}^{60}}{640}$ кг/кг.

На этом заканчивается тепловой расчёт котла для заданного режима. Если задаться несколькими значениями теплового напряжения топки (не менее трёх) и для каждого из них провести тепловой расчёт в указанном выше порядке, то в зависимости от

$\frac{B \cdot Q_p^u}{\Sigma F_{жст}}$ или $\frac{B \cdot Q_p^u}{\Sigma R}$ можно построить кривые изменения паропроизводительности D кг/час, η_n и испарительности. По этим кривым можно быстро установить ожидаемые основные показатели для любого режима работы топки, или, задаваясь потребной паропроизводительностью, найти требуемый расход топлива и ожидаемый к. п. д. котла.

Ниже даётся схема теплового расчёта котла по приведённому выше методу (см. стр. 213).

Пользуясь тремя полученными величинами D , B и η_n^{60} соответствующими трём принятым значениям $\frac{B \cdot Q_p^u}{\Sigma F_{жст}}$, строим кривые

расхода топлива B , к. п. д. котла η_n^{60} и паропроизводительности D кг/час. Зная по заданию требуемую расчётную паропроизводительность D_u кг/час, находим из построенного графика соответствующий расход топлива B_u кг/час и ожидаемый к. п. д. котла (см. график на рис. 19).

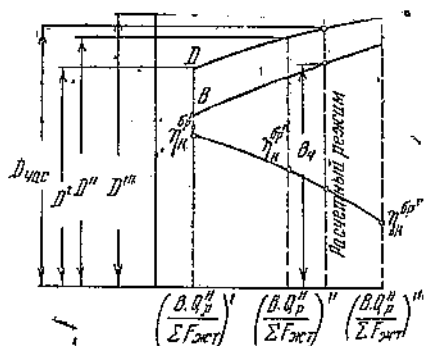


Рис. 19. Графическое определение часового расхода топлива и к. п. д. при тепловом расчёте котла.

§ 13. СХЕМА ТЕПЛОВОГО РАСЧЕТА СУДОВОГО ОГНЕТРУБНОГО КОТЛА

		Обозначение	Размерность
1. Характеристика котла и топлива	1. Система котла		
	2. Рабочее давление	P_1	кг/см ²
	3. Температура питательной воды	t_1	°C
	4. Степень сухости пара	X	—
	5. Род топлива	—	—
	6. Состав топлива	C_p	%
		H_p	%
		O_p	%
		N_p	%
		S_p^s	%
		W_p	%
		A_p	%
	7. Рабочая теплотворная способность	Q_p^u	кал/кг
2. Конструктивные данные по котлу	Поверхность нагрева	H_k	м ²
	Радиационная поверхность	H_r	м ²
	Поверхность трубной части	$H_{тр}$	м ²
	Число топок	n	—
	Число дымогарных трубок	n	—
	Внутренний диаметр дымогарных трубок	$d_{вн}$	м
	Площадь сечения дымогарных трубок	$Q_{д.тр}$	м ²
	Диаметр жаровых трубок	$D_{ж.т}$	м
	Площадь суммарного газового окна	$\Sigma F_{ж.т}$	м ²
	Требуемая расчётная паропроизводительность	$D_{час}$	кг/час

№ п/п	Наименование определяемой величины	Расчётная формула
1	Тепловое напряжение суммарного газового окна	Задаётся несколькими значениями
2	Расход топлива, соответствующий принятым значениям теплового на- пряжения газового окна	$B = \frac{B}{\Sigma F_{ж.т}} \frac{Q_p^n}{\left(\frac{\Sigma F_{ж.т}}{Q_p^n} \right)}$
3	Потеря от химической неполноты горения в долях килограмма	Принимается по опытным данным, в зависимости от конструкции топки, рода топлива и теплового напря- жения
4	Потеря тепла от механической не- полноты горения в долях кило- грамма	Принимается по опытным данным в зависимости от конструкции топки, рода топлива и теплового напря- жения
5	Потеря тепла топкой в окружаю- щую среду.	Принимается по опытным данным
6	К. п. д. топки	$\eta_m = 1 - (q_3 + q_4 + q_5^T)$
7	Коэффициент избытка воздуха	Принимается по опытным данным в зависимости от типа топки, рода сжигаемого топлива и степени фор- сировки топки
8	Температура воздуха, поступающе- го в топку	В установках без подогрева возду- ха принимается 30—40° С
9	Задаётся двумя значениями тем- ператур газов и производим построе- ние IT диаграммы	Принимаем для каждого из трёх режимов $T_2 = 200^\circ\text{C}$ $T_2 = 800^\circ\text{C}$
10	Объём продуктов сгорания	$V_2 = x \frac{Q_p^n \cdot \alpha}{1000} + 0,112 H_p + 0,0124 W_p$
11	Теплоёмкость продуктов сгорания	$C_2 = 0,323 + 0,000018 T_2$
12	Теплосодержание продуктов сгора- ния	$I = V_2 \cdot C_2 \cdot T_2$
По найденным значениям I строим IT и диаграмму для трёх режимов, соответствующих α' , α'' , α''' .		
13	Объём воздуха, вводимый в топку на 1 кг топлива	$V_a = \frac{1,1 Q_p^n \cdot \alpha}{1000}$
14	Теплоёмкость воздуха	$C_a \text{ принимается } 0,31 \text{ кал/м}^3$
15	Тепло, вносимое с воздухом на 1 кг сжигаемого топлива	$Q_{ввз} = V_a \cdot C_a \cdot t_a$

Обозначение	Размерность	Числовые значения для трёх режимов					
$\frac{B \cdot Q_p^H}{\Sigma F_{жс, м}}$	тыс. кал/м ² · час	$\left(\frac{B \cdot Q_p^H}{\Sigma F_{жс, м}} \right)'$		$\left(\frac{B \cdot Q_p^H}{\Sigma F_{жс, м}} \right)''$		$\left(\frac{B \cdot Q_p^H}{\Sigma F_{жс, м}} \right)'''$	
B	кг/час	B'		B''		B'''	
q_3	—	q_3'		q_3''		q_3'''	
q_4	—	q_4'		q_4''		q_4'''	
q_5^m	—	$q_5^{m'}$		$q_5^{m''}$		$q_5^{m'''}$	
η_m	—	η_m'		η_m''		η_m'''	
α	—	α'		α''		α'''	
t_g	°C	t_g'		t_g''		t_g'''	
T_2	°C	200	800	200	800	200	800
V_2	м ³ /кг	$(V_2)_{\alpha'}^{200}$	$(V_2)_{\alpha'}^{800}$	$(V_2)_{\alpha''}^{200}$	$(V_2)_{\alpha''}^{800}$	$(V_2)_{\alpha'''}^{200}$	$(V_2)_{\alpha'''}^{800}$
C_2	кал/м ³	$(C_2)_{200}$		$(C_2)_{800}$			
I	кал/кг	$(I)_{\alpha'}^{200}$	$(I)_{\alpha'}^{800}$	$(I)_{\alpha''}^{200}$	$(I)_{\alpha''}^{800}$	$(I)_{\alpha'''}^{200}$	$(I)_{\alpha'''}^{800}$
V_g	м ³ /кг	V_g'		V_g		V_g	
C_g	кал/м ³	$C_g = 0,31 \text{ кал/м}^3$					
$Q_{гор}$	кал/кг	$(Q_{гор})'$		$(Q_{гор})''$		$(Q_{гор})'''$	

№ п/п	Наименование определяемой величины	Расчётная формула
16	Полезное тепловыделение в топке на 1 кг сжигаемого топлива	$Q_{по.т} = Q_p^n \cdot \eta_m + Q_{дог}$
17	Коэффициент эффективности топки	$\eta_m' = \frac{Q_{по.т}}{Q_p^n}$
18	Полезное тепловыделение в топке в час	$Q = B \cdot Q_p^n \cdot \eta_m'$
19	Радиационный фактор	$A_0 = 0,75 \cdot Q_p^n \cdot \eta_m'$
20	Коэффициент прямой отдачи по формуле Гурвич—Оррока	$\sigma = \frac{\eta_m'}{1 + \frac{\gamma \cdot V_g \sqrt{\frac{Q}{H_A}}}{A_0}}$
21	Теплопоглощение топочной и огне- вой камерой за счёт лучеиспускания	$Q_d = B \cdot Q_p^n \cdot \sigma$
22	Теплосодержание газов на 1 кг топлива у трубной решётки	$I_2' = Q_{по.т} - Q_p^n \cdot \sigma$
23	Температура газов перед трубной решёткой	Определяется по I_2' с помощью IT диаграммы
24	Задаёмся двумя значениями температур уходящих газов в дымнике для каждого из просчитываемых режимов. Принимаем $T_2'' = 300^\circ\text{C}$ и $T_2' = 400^\circ\text{C}$	
25	Средняя арифметическая темпера- тура газов для трубной части по- верхности нагрева	$t_{cp} = \frac{T_2' + T_2''}{2}$
26	Объём газов, проходящих в час вдоль трубной поверхности нагрева	$V_{час} = V_2 \cdot B \frac{273 + t_{cp}}{273}$
27	Секундный объём газов	$V_{сек} = \frac{V_{час}}{3600}$
28	Средняя скорость газов в дымо- гарных трубах	$w = \frac{V_{сек}}{O_{д.тр}}$
29	Коэффициент теплопередачи	$K = 6 + 4,4 \sqrt{w}$

Обозначение	Размерность	Числовые значения для трёх режимов					
		$(Q_{пол})'$		$(Q_{пол})''$		$(Q_{пол})'''$	
$Q_{пол}$	кал/кг	$(Q_{пол})'$		$(Q_{пол})''$		$(Q_{пол})'''$	
η_m'	—	$(\eta_m)'$		$(\eta_m)''$		$(\eta_m)'''$	
Q	кал/час	Q'		Q''		Q'''	
A_0	—	A_0'		A_0''		A_0'''	
σ	—	σ'		σ''		σ'''	
Q_A	кал/кг	Q_A'		Q_A''		Q_A'''	
l_2'	кал/кг	$(l_2)'$		$(l_2)''$		$(l_2)'''$	
T_2'	°C	$(T_2)'$		$(T_2)''$		$(T_2)'''$	
T_2''	°C	300	400	300	400	300	400
t_{cp}	°C	$(t_{cp})_{300}'$	$(t_{cp})_{400}'$	$(t_{cp})_{300}''$	$(t_{cp})_{400}''$	$(t_{cp})_{300}'''$	$(t_{cp})_{400}'''$
$V_{час}$	м³/час	$(V_n)_{300}'$	$(V_n)_{400}'$	$(V_n)_{300}''$	$(V_n)_{400}''$	$(V_n)_{300}'''$	$(V_n)_{400}'''$
$V_{сек}$	м³/сек.	$(V_c)_{300}'$	$(V_c)_{400}'$	$(V_c)_{300}''$	$(V_c)_{400}''$	$(V_c)_{300}'''$	$(V_c)_{400}'''$
w	м/сек.	$(w)_{300}'$	$(w)_{400}'$	$(w)_{300}''$	$(w)_{400}''$	$(w)_{300}'''$	$(w)_{400}'''$
K	кал/м² · час · °C	$(K)_{300}'$	$(K)_{400}'$	$(K)_{300}''$	$(K)_{400}''$	$(K)_{300}'''$	$(K)_{400}'''$

№ п/п	Наименование определяемой величины	Расчётная формула
30	Температура стенки дымогарной трубки	Принимается равной температуре воды при данном давлении в котле на таблиц насыщенного пара
31	Средняя логарифмическая разность температур для конвекционной части поверхности нагрева	$\Delta t = \frac{T_2' - T_2''}{\ln \frac{T_2' - t}{T_2'' - t}}$
32	Коэффициент использования газово- го потока	Принимается в зависимости от си- стемы котла одинаковым для всех режимов
33	Теплопоглощение конвекционной частью поверхности нагрева на 1 кг сжигаемого топлива	$q_{mp} = \epsilon \frac{H_{mp} \cdot K \cdot \Delta t}{B}$
34	Потеря на охлаждение котла в районе дымогарных трубок в кало- риях на 1 кг топлива	$Q_{охл}^* = \frac{q_5^* + Q_p^*}{100}$
35	Теплосодержание уходящих газов на 1 кг топлива	$I_2'' = I_2' - q_{mp} - Q_{охл}^*$
36	Действительная температура ухо- дящих газов для каждого режима	Определяется по IT диаграмме
37	Действительное теплосодержание уходящих газов в дымоходе для каж- дого режима	Определяется по IT диаграмме
38	Действительное теплопоглощение конвекционной части поверхности на- грева	$Q_{mp} = B (I_2' - I_{yx} - Q_{охл}^*)$
39	Коэффициент полезного действия котла (брутто)	$\eta_{kp} = \frac{Q_A + Q_{mp}}{B \cdot Q_p^*}$
40	Прирост теплосодержания в котле	$\Delta i = (q + xr - i_1)$
41	Часовая паропроизводительность котла брутто	$D = \frac{Q_A + Q_{mp}}{\Delta i}$

Обозначение	Размерность	Числовые значения
t	°C	$t^{\circ}\text{C}$ — для всех режимов
Δt	°C	$(\Delta t)'_{300}$ $(\Delta t)'_{400}$ $(\Delta t)''_{300}$ $(\Delta t)''_{400}$ $(\Delta t)'''_{300}$ $(\Delta t)'''_{400}$
ξ	—	ξ — для всех режимов
$q_{тр}$	кал/кг · час	$(q_{тр})'_{300}$ $(q_{тр})'_{400}$ $(q_{тр})''_{300}$ $(q_{тр})''_{400}$ $(q_{тр})'''_{300}$ $(q_{тр})'''_{400}$
$Q_{охл}^*$	кал/кг	$Q_{охл}^*$ принимается одинаковой для всех режимов
I_2''	кал/кг	$(I_2'')'_{300}$ $(I_2'')'_{400}$ $(I_2'')''_{300}$ $(I_2'')''_{400}$ $(I_2'')'''_{300}$ $(I_2'')'''_{400}$
T_{yx}	кал/кг	T'_{yx} T''_{yx} T'''_{yx}
I_{yx}	кал/кг	I'_{yx} I''_{yx} I'''_{yx}
$Q_{тр}$	кал/час	$Q'_{тр}$ $Q''_{тр}$ $Q'''_{тр}$
τ_{κ}^{6p}	—	$(\tau_{\kappa}^{6p})'$ $(\tau_{\kappa}^{6p})''$ $(\tau_{\kappa}^{6p})'''$
Δi	кал/кг	Δi — одинаковое для всех режимов
D	кг/час	D' D'' D'''

XVI. ПОДОГРЕВАТЕЛИ ВОЗДУХА

§ 1. ВЛИЯНИЕ ПОДОГРЕВА ВОЗДУХА НА к. п. д. КОТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И РАСХОД ТОПЛИВА

Использование тепла отходящих газов для подогрева воздуха, подаваемого в топку, является весьма эффективным средством повышения к. п. д. котельных установок.

Практикой установлено, что подогрев воздуха:

1) снижает потерю тепла с уходящими газами, тепло которых дополнительно используется на нагревание воздуха;

2) повышает температуру в топке, улучшая процесс горения (снижает химический недожог);

3) даёт возможность вести процесс горения с меньшим коэффициентом избытка воздуха, что в свою очередь сказывается на величине потери с отходящими газами при полном горении; суммарным коэффициентом избытка воздуха потеря с уходящими газами снижается;

4) даёт возможность использовать в топках котлов низкосортные и сильно влажные топлива (например, сырые дрова и т. д.);

5) способствует повышению достигаемого теплового напряжения топки и, следовательно, повышению паропроизводительности котла.

По опытным данным экономия топлива от введения подогрева воздуха на речных судах составляет 6—8%, доходя в отдельных случаях до 10% и выше.

§ 2. КОНСТРУКЦИЯ ПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ ВОЗДУХА ДЛЯ РЕЧНЫХ СУДОВЫХ КОТЛОВ

Наибольшее распространение для подогрева воздуха на речных судах получили трубчатые воздухоподогреватели, состоящие из труб диаметром 56—76 мм, концы которых укрепляются в трубных досках толщиной 12—15 мм. Для изготовления воздухоподогревателей часто используются дымогарные трубки. Внутри труб проходят дымовые газы, поступающие в подогреватель из дымовой коробки (дымника) котла, а нагреваемый воздух омывает трубки снаружи. Холодный воздух подаётся к подогревателю вентилятором, напор которого должен быть достаточным для преодоления газового сопротивления подогревателя, воздухопроводов между воздухоподогревателем и топкой и сопротивления слоя топлива.

Широкое распространение трубчатых воздухоподогревателей, несмотря на их относительно большой вес и габариты, объясняется простотой и дешевизной их изготовления, простотой ремонта судовыми средствами, сравнительно малой засоряемостью и лёгкостью очистки. Конструкция трубчатого воздухоподогревателя и его установка у огнетрубного котла даны на рис. 20. На рис. 21 представлена установка трубчатого воздухоподогревателя для водотрубного котла с двухсторонним ходом газов.

§ 3. ТЕМПЕРАТУРА ПОДОГРЕВА ВОЗДУХА

Теплотехнические преимущества подогрева воздуха увеличиваются с увеличением температуры подаваемого в топку воздуха. Однако опытом установлено, что с повышением температуры

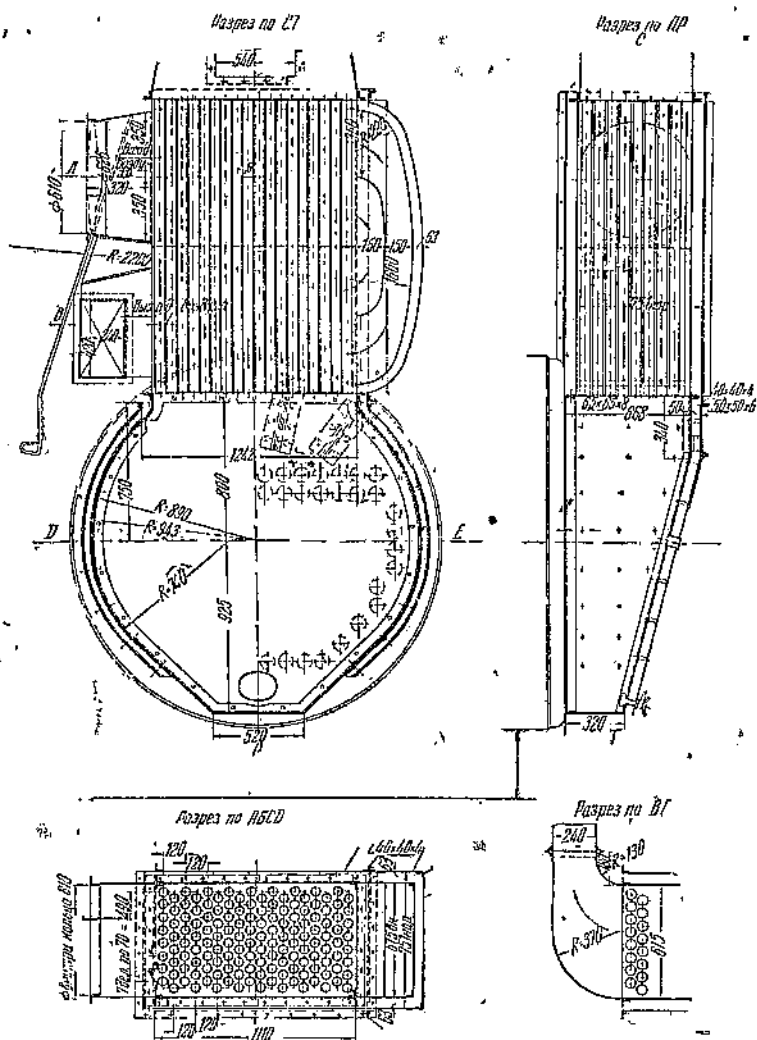


Рис. 20. Конструкция трубчатого воздухоподогревателя у
судового огнетрубного котла.

воздуха условия работы колосниковой решётки становятся более тяжёлыми, колосники перегорают, обмуровка топки быстрее разрушается. Кроме того, с увеличением температуры подогрева воз-

духа требуется и большая поверхность нагрева подогревателя, разместить которую, учитывая ограниченность габаритов судовых машинно-котельных отделений, становится затруднительно. Наконец, опыты показали также, что польза подогрева воздуха резко

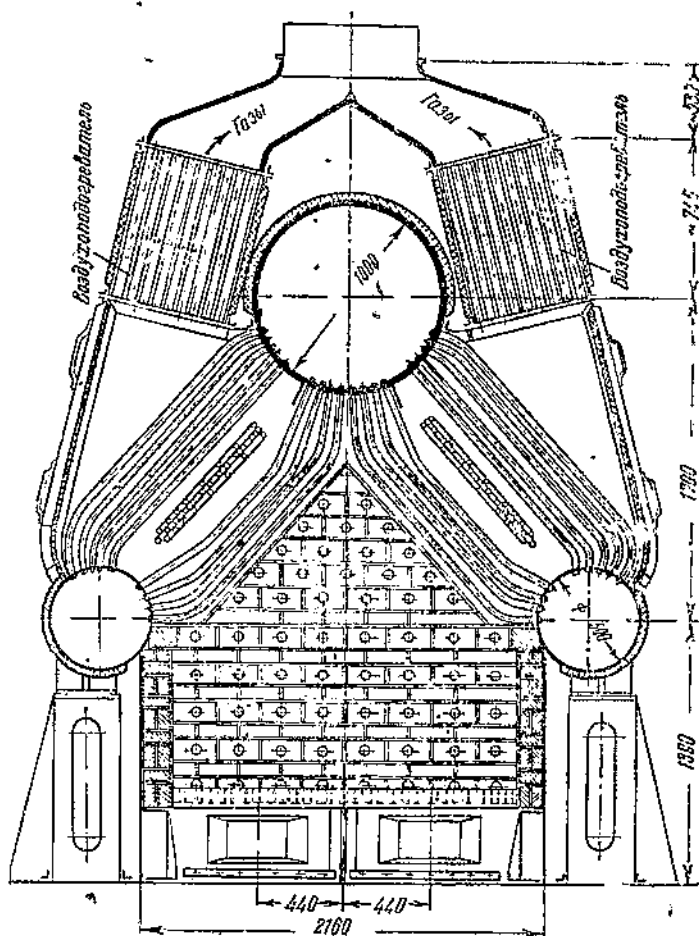


Рис. 21. Установка трубчатого воздухоподогревателя для судового водотрубного котла.

сказывается только при подогреве в пределах первых 50—100° С, а дальше преимущества возрастают настолько медленно, что дальнейший подогрев становится излишним. Поэтому для котельных установок речных судов температура подогреваемого воздуха обычно составляет 120—130° С, доходя лишь в отдельных случаях до 160—170° С.

§ 4. ОЖИДАЕМОЕ ПОВЫШЕНИЕ к. п. д. КОТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И ЭКОНОМИЯ ТОПЛИВА ОТ ВВЕДЕНИЯ ВОЗДУХОПОДОГРЕВА

Влияние подогрева воздуха на увеличение коэффициента полезного действия котельной установки при неизменной нагрузке котла может быть установлено, исходя из понижения температуры уходящих газов или по количеству тепла, воспринятого воздухом, проходящим через подогреватель.

Зная количество нагреваемого воздуха и его температуру, а также теплотворную способность сжигаемого топлива, повышение к. п. д. можно найти из формулы:

$$\Delta\eta = \frac{L_m \cdot \alpha \cdot C_a(t_2 - t_1)}{Q_p^n} \cdot 100\%, \quad (152)$$

где: L_m — теоретический необходимое количество воздуха на 1 кг сжигаемого топлива в кг/кг;

α — коэффициент избытка воздуха;

$C_a = 0,24$ кал/кг — весовая теплоёмкость воздуха;

t_1 — температура воздуха перед воздухоподогревателем;

t_2 — температура воздуха после воздухоподогревателя.

Если известен также к. п. д. котла, то экономия в топливе найдётся из формулы:

$$\mathcal{E} = \frac{\Delta\eta}{\eta_{к.у}}. \quad (153)$$

Пример: $t_1 = 20^\circ\text{C}$; $t_2 = 110^\circ\text{C}$; $\alpha = 1,6$; $L_m = 10,18$ кал/кг;
 $Q_p^n = 7170$ кал/кг; $\eta_{к.у} = 0,78$.

При этих данных повышение к. п. д. составит:

$$\Delta\eta = \frac{10,18 \cdot 1,6 \cdot 0,24(110 - 20)}{7170} \cdot 100\% = 4,93\%.$$

Экономия в топливе будет:

$$\mathcal{E} = \frac{\Delta\eta}{\eta_{к.у}} = \frac{4,93}{0,78} = 6,3\%.$$

Получаемая расчётом цифра экономии оказывается обычно ниже действительной, выявляемой в эксплуатации и при теплотехнических испытаниях, так как при подсчёте экономии тепла, использованного на подогрев воздуха, не учитывается ряд указанных выше преимуществ подогрева воздуха, влияющих на улучшение работы котельной установки: уменьшение потери от химического недожога, повышение температуры в топке, возможное снижение коэффициента избытка воздуха и т. д.

§ 5. ОРИЕНТИРОВОЧНЫЙ РАСЧЕТ ПОТРЕБНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НАГРЕВА ПОДОГРЕВАТЕЛЯ ВОЗДУХА

Ориентировочно можно считать, что на речных судах поверхность нагрева трубчатых подогревателей воздуха составляет 25—30% поверхности нагрева котла. При конструировании подогревателя и определении живого сечения для прохода газов и воздуха скорость движения газов и воздуха рекомендуется выбирать в пределах 5—7 м/сек. Увеличение скорости улучшает теплопередачу, но эффект, получаемый от увеличения коэффициента теплопередачи, при больших скоростях в значительной степени снижается увеличением потребной мощности тягодутьевого устройства вследствие повышения газового сопротивления подогревателя. С целью получения наилучшей теплопередачи трубы следует располагать в шахматном порядке.

Поверхность нагрева подогревателя, необходимая для котла, оборудуемого воздухоподогревателем, приближённо подсчитывается следующим образом.

Пусть T_1 — температура уходящих газов за котлом (температура газов перед воздухоподогревателем, по данным испытаний котла, до установки воздухоподогревателя) и t_1 — начальная температура воздуха.

Если задаться конечной температурой воздуха t_2 , то температуру уходящих газов за подогревателем можно найти, если согласно данным опыта приближённо принять, что при охлаждении дымовых газов на 1°C воздух подогревается в среднем на $1,3^\circ\text{C}$.

Получаем формулу:

$$t_2 - t_1 = 1,3 (T_1 - T_2). \quad (154)$$

Из этой формулы определяем ожидаемую температуру газов за воздухоподогревателем T_2 .

Зная температуры газов и воздуха, поверхность нагрева подогревателя $H_{в.п.}$ определяем из формулы:

$$H_{в.п.} = \frac{B \cdot L_m \cdot a \cdot C_p (t_2 - t_1)}{K \left(\frac{T_1 + T_2}{2} - \frac{t_1 + t_2}{2} \right)} \text{ м}^2. \quad (155)$$

При скорости воздуха и газов 4—5 м/сек. коэффициент теплопередачи для трубчатого подогревателя $K = 10 \div 12 \text{ кал/м}^2 \cdot \text{час} \cdot ^\circ\text{C}$.

Для более точного определения T_2 и поверхности нагрева подогревателя следует произвести тепловой расчёт котла с учётом влияния подогретого воздуха на работу, топки.

§ 6. ДАННЫЕ ИСПЫТАНИЙ РЕЧНЫХ КОТЛОВ, ОБОРУДОВАННЫХ ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛЯМИ

В табл. 115—118 приводятся результаты теплотехнических испытаний паровых котлов и качественные показатели речных котельных установок при работе на горячем воздухе, а также влияние подогрева воздуха на к. п. д. котельной установки.

Таблица 115

Результаты испытаний парохода «Трудовой» с подогревом воздуха
(1934 год, Северное пароходство)

№ опытов	7	8	9
Топливо — еловые дрова с влажностью	25%	20,4%	29,0%
Теплотворная способность топлива в кал/кг	3320	3470	3010
Напряжение поверхности нагрева по нормальному пару в $\text{кг/м}^2 \cdot \text{час}$	24,1	20,3	16,95
Температура газов перед воздухоподо- гревателем в $^{\circ}\text{C}$	282	247	265
Температура газов после воздухоподо- гревателя в $^{\circ}\text{C}$	212	185	179
Коэффициент избытка воздуха	1,72	2,16	2,14
Температура воздуха перед подогревате- лем в $^{\circ}\text{C}$	71,5	73,5	75,0
Температура воздуха за подогревателем в $^{\circ}\text{C}$	152	146	138
К. п. д. котельной установки в % . .	69,0	74,0	75,5

В таблице 116 приведены к. п. д. котлов при работе на дровах, взятые из испытаний двух серийных пароходов Северного речного пароходства. Один из котлов работал без подогрева, другой с подогревом воздуха. В таблице 117 даны результаты испытаний парохода «Выгегда» с подогревателем воздуха. В таблице 118 даны результаты испытаний судовых огнетрубных котлов на дровах с применением горячего воздуха.

Таблица 116

Пример повышения к. п. д. от применения подогрева воздуха при работе
огнетрубного котла на дровах

Условия работы	Без форсировки		При форсированной работе	
	без подо- грева воз- духа	с подогре- вом воздуха	без подо- грева воз- духа	с подогре- вом воздуха
Напряжение поверхно- сти нагрева в $\text{кг/м}^2 \cdot \text{час}$	15,5—14,9	19,0	17,5	23,2—22
К. п. д. котла в %	58—61	74—75	52,5	68—71

Результаты балансовых испытаний парового котла парохода «Высвигда»
при работе на горячем воздухе (испытание 1941 года)

Характеристика установки. Водотрубный котёл треугольного типа, $H = 70,45$ м², с пароперегревателем и воздухоподогревателем. Топка с горизонтальной колосниковой решёткой и вентиляционным дутьём.

Топлива — Кузнецкий камешный уголь ПС с теплотворной способностью $Q_p^u = 6474$ кал/кг.

Наименование	Обозначение	Размерность	Режим 1	Режим 2	Режим 3
Видимая испарительность топлива	$\frac{D_u}{B}$	кг/кг	7,00	7,26	6,93
Весовое напряжение колосниковой решётки	$\frac{R}{B}$	кг/м ² · час	83,2	105,0	126,0
Видимое тепловое напряжение колосниковой решётки	$\frac{B \cdot Q_p^u}{R}$	тыс. кал/м ² · час	538,5	678,5	815,0
Напряжение поверхности нагрева по нормальному пару	$\frac{R}{D_u}$	кг/м ² · час	19,3	24,1	27,8
Среднее давление пара в котле по манометру	P_k	кг/см ²	13,94	13,95	13,8
Температура пара после перегревателя	t_n	°C	265,6	264,3	259,6
Температура питательной воды после воздухоподогревателя	t_1	°C	67,26	93,3	96,8
Температура воздуха при входе в топку	t_a	°C	166,4	176,5	167,8
Среднее давление в поддувале	S_1	мм вод. ст.	10,9	20,5	23,7
Разрежение за котлом	S_2	мм вод. ст.	3,8	8,0	6,2
Температура уходящих газов	T_{yx}	°C	293,0	333,0	353,0
Анализ газов	RO_2	%	9,1	9,1	9,9
	O_2	%	10,4	10,4	9,3
	CO	%	0,6	0,6	0,9
Коэффициент избытка воздуха	α	—	1,99	1,99	—
Тепловой баланс					
Полезно используется котлом и перегревателем	q_1	%	69,4	68,95	65,6
Потеря с отходящими газами	q_2	%	18,2	17,3	18,4
Потери от химической неполноты горения	q_3	%	3,91	3,89	6,93
Потери от механической неполноты горения	q_4	%	6,60	5,76	5,53
Потери в окружающую среду и невязка баланса	q_5	%	1,89	4,1	8,54
Итого	100	%	100	100	100

Результаты испытаний судовых огнетрубных котлов при работе на дровах с подогревом воздуха

Название паровозов	Характеристики топлива		Температура воздуха, поступающего в топку в °С	Коэффициент избытка воздуха, α	Тепловое напряжение газового окна $\frac{B \cdot Q}{F_{ж.т}}$ тыс. кал/м ² · час	К. п. д. котла в %
	влажность в %	теплотворная способность $Q_{н.р}$ кал/кг				
„Трудовой“	34,1	2675	130	1,55	1610,0	73,1
„Заводский“	39,7	2446	168	1,3	1475,0	79,4
	31,6	2892	171	1,295	2265,0	72,8

§ 7. РАСЧЕТ ОГНЕТРУБНОГО КОТЛА, ОБОРУДОВАННОГО ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛЕМ

1. Расчет процесса горения, прямой отдачи тепла в топке и теплоотдачи в дымогарных трубках производится так же, как в случае расчета котла без воздухоподогревателя. Температуру подогрева воздуха принимают в среднем 100—120° С.

При расчете прямой отдачи тепла путем лученспускания учитывают тепло нагретого воздуха, вводимого в топку.

2. Зная из теплового расчета котла температуру уходящих газов за котлом (соответствующую принятым в расчете значениям тепловых нагрузок $\frac{Q}{R}$ или $\frac{Q}{F_{ж.т}}$) и теплосодержание уходящих газов за котлом ($I_{з.к}$), определяют теплосодержание уходящих газов за воздухоподогревателем (за установкой) по формуле:

$$I_{з.у} = I_{з.к} - Q_{воз} - Q_{3^{с.н}}, \quad (156)$$

где: $Q_{воз}$ — тепло, сообщаемое воздуху в воздухоподогревателе на 1 кг сжигаемого топлива:

$$Q_{воз} = 1,03 \cdot L_m \cdot \alpha_m \cdot C_p (t_{з.в} - t_{х.в}); \quad (157)$$

$t_{з.в}$ — температура воздуха после воздухоподогревателя;

$t_{х.в}$ — температура холодного воздуха до подогревателя;

1,03 — коэффициент, учитывающий увеличение количества нагреваемого воздуха вследствие потерь и утечек через неплотности;

$Q_{3^{с.н}}$ — потеря тепла воздухоподогревателем в окружающую среду на 1 кг сжигаемого топлива.

В среднем можно принимать:

$$Q_{3^{с.н}} = 0,5 \frac{Q_{н.р}}{100} \text{ кал/кг}. \quad (158)$$

3. Определив $I_{з.у}$ для различных режимов работы установки, принятых при тепловом расчете котла, находят температуру уходящих газов за установкой $T_{з.у}$ (за воздухоподогревателем), пользуясь ИТ диаграммой.

4. Определяют потерю тепла с уходящими газами после воздухоподогревателя для различных тепловых нагрузок $\frac{Q}{R}$ или $\frac{Q}{F_{ж.п}}$ по формуле:

$$q_2 = \frac{I_{ж.п} - I_{ж.в}}{Q_{ж.п}}$$

5. Определяют к. п. д. котельной установки при работе с воздухоподогревателем по формуле:

$$\eta_k = 1 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5^m + q_5^g + q_5^{g.п}), \quad (159)$$

где: $q_5^{g.п} = \frac{Q_5^{g.п}}{Q_{ж.п}}$.

6. Определяют паропроизводительность котла при разных $\frac{Q}{F_{ж.п}}$ или $\frac{Q}{R}$ по формуле:

$$D = \frac{B \cdot \eta_k}{(t - t_1)} \quad (160)$$

7. Строят график D , B , η_k , $T_{ж.к}$ и $T_{ж.п}$ (температуры газов за установкой) в зависимости от тепловой нагрузки топki $\frac{Q}{R}$ или $\frac{Q}{F_{ж.п}}$. Зная требуемую нормальную паропроизводительность котла, находят B , η_k , $T_{ж.п}$ и $T_{ж.к}$, соответствующие расчётной нормальной нагрузке котла.

8. Определяют среднюю разность температур в воздухоподогревателе:

$$\Delta t_{cp} = T_{г.ср} - t_{в.ср},$$

где: $T_{г.ср}$ — средняя температура газов в воздухоподогревателе,
 $t_{в.ср}$ — средняя температура нагреваемого воздуха.

Средняя температура газов:

$$T_{г.ср} = \frac{T_{г.к} + T_{г.п}}{2}$$

Средняя температура воздуха:

$$t_{в.ср} = \frac{t_{в.в} + t_{в.п}}{2}$$

9. По конструктивным данным имеющегося или проектируемого воздухоподогревателя определяют площадь для прохода газов ($F_{газ}$ м²) и площадь для прохода воздуха ($F_{воз}$ м²), т. е. живое сечение воздухоподогревателя по воздушной и газовой стороне.

Для трубчатых воздухоподогревателей при движении газов внутри труб живое сечение подогревателя по газовой стороне определяется по формуле:

$$F_{газ} = \frac{\pi d^2}{4} \cdot n, \quad (161)$$

где: d — внутренний диаметр труб подогревателя в метрах,
 n — число труб.

10. Определяют среднюю скорость газов в воздухоподогревателе:

$$W_{газ} = \frac{V_{сек}}{F_{газ}} = \frac{\text{секундный объем газов в м}^3}{\text{площадь для прохода газов в м}^2}$$

или

$$W_{газ} = \frac{B \cdot V_g (273 + T_g^{ср})}{3600 \cdot 273 \cdot F_{газ}} \text{ м/сек.} \quad (162)$$

11. Определяют среднюю скорость воздуха:

$$W_{воз} = \frac{1,03 \cdot B \cdot V_m \cdot \alpha (273 + t_a^{ср})}{3600 \cdot 273 \cdot F_{воз}} \text{ м/сек.} \quad (163)$$

12. Зная скорость газов и воздуха в подогревателе, определяют коэффициент теплопередачи в воздухоподогревателе, пользуясь таблицей 119.

Таблица 119

Средние значения коэффициентов теплопередачи в воздухоподогревателе при чистых металлических стенках

Скорость газов в м/сек.	При скорости воздуха в м/сек				
	1	2,5	5,0	10,0	15,0
5,0	6,1	8,6	11,0	13,8	15,2
7,5	6,7	9,2	12,5	16,3	18,8
10,0	7,0	9,9	13,8	18,3	21,3
12,5	7,2	10,2	14,5	20,0	23,7
15,0	7,4	10,7	15,2	21,2	25,1

Таблица 119 дает K для совершенно чистых стенок (отсутствие загрязнений по воздушной и газовой стороне поверхности нагрева). Пользуясь этими данными, следует вводить поправку на загрязнение подогревателя, снижающее величину коэффициента теплопередачи. Коэффициент загрязнения подогревателя, в зависимости от сорта топлива и условий работы воздухоподогревателя, а также его конструкции, следует принимать в пределах

$$\xi = 0,85 \div 0,75.$$

13. Находят требуемую поверхность воздухоподогревателя по формуле:

$$F_{гр} = \frac{Q_{воз} \cdot B}{K \cdot \Delta t^{ср}} \text{ м}^2. \quad (164)$$

ХVII. ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛИ

§ 1. ПРЕИМУЩЕСТВА ПЕРЕГРЕТОГО ПАРА

Перегревание пара есть процесс повышения температуры пара (сверх температуры насыщения при данном давлении) при постоянном давлении. Процесс перегревания пара сопровождается увеличением удельного объема пара и повышением его теплосодержания. Конечная температура, до которой пар перегрет, называется температурой перегретого пара, а разность между температурой перегретого пара и температурой насыщенного пара при данном давлении называется величиной перегрева пара.

Перегретый пар в сравнении с насыщенным имеет следующие преимущества:

1) установлено, что 1 кг пара, расширяясь в машине до одного и того же конечного давления, может совершить тем больше механической работы, чем больше его теплосодержание, увеличивающееся с возрастанием температуры. Поэтому 1 кг перегретого пара при том же давлении, что и насыщенный, обладает большей работоспособностью;

2) перегретый пар обладает при охлаждении меньшей способностью к конденсации. Прежде чем перегретый пар начнет конденсироваться, он должен охладиться настолько, чтобы обратиться в насыщенный пар и потерять всю теплоту перегрева; поэтому применение его для работы в паровой машине сопровождается меньшими потерями, чем это имеет место при насыщенном паре.

Перегрев пара совершается на речных судах за счёт тепла тех же продуктов сгорания, которые обогревают поверхность нагрева котла. Поэтому перегреватель дополнительно использует некоторую часть тепла продуктов сгорания, и к. п. д. котельной установки при наличии перегревателя оказывается обычно на несколько процентов (4—6%) выше, чем к. п. д. котла без перегревателя.

Удельный расход перегретого пара в паровых машинах значительно меньше, чем насыщенного. Так, в паровых машинах двойного расширения с конденсацией, по данным Бернера, каждые 50°С перегрева дают экономию в расходе пара на 6,5%.

По данным доц. П. Г. Руфанова, речные паровые машины мощностью 300—700 л. с., работающие на перегретом паре с температурой 300°С, имеют удельный расход пара на 11—13% меньше, чем паровые машины той же мощности и при том же начальном давлении, но работающие насыщенным паром.

В итоге применение перегретого пара значительно повышает экономичность судовой паросиловой установки.

Ориентировочные значения экономии топлива от применения перегретого пара в зависимости от начального давления и температуры перегретого пара даны в таблице 120.

В таблице 121 приведены данные о стальных трубах, применяемых для изготовления пароперегревателей.

Экономия топлива в судовой паросиловой установке от применения перегретого пара в процентах, в зависимости от давления и температуры пара (по отношению к расходу топлива при работе насыщенным паром)

Температура перегретого пара в °C	Рабочее давление пара в кг/см²				
	6	8	10	12	14
200	5,2	3,7	2,4	1,3	0,4
240	10,0	8,6	7,3	6,3	5,5
280	14,3	12,9	11,5	10,3	9,0
320	17,9	16,6	15,5	14,6	13,7
360	20,7	19,8	18,8	18,0	17,1

Трубы, стальные, бесшовные, гладкие, перегревательные
(технические условия ОУГ НКПТ 6388)

Наружный диаметр в мм	Толщина стенок в мм	Теоретический вес 1 пог. м в кг	Наружный диаметр в мм	Толщина стенок в мм	Теоретический вес 1 пог. м в кг
22	2,5	1,2	29	2,5	1,63
	3,0	1,41		3,0	1,92
	3,5	1,60		3,5	2,20
				4,0	2,47
24	2,5	1,33	32	2,5	1,82
	3,0	1,55		3,0	2,15
	3,5	1,77		3,5	2,46
				4,0	2,76
25	2,5	1,39	35	2,5	2,00
	3,0	1,63		3,0	2,37
	3,5	1,86		3,5	2,72
	4,0	2,07		4,0	3,06

§ 2. ТИПЫ ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЕЙ И ИХ СРАВНЕНИЕ

В судовых водотрубных котлах треугольного типа перегреватель обычно размещается симметрично внутри обоих пучков водогрейных трубок, причём трубки перегревателя могут быть расположены вдоль или поперёк водогрейных трубок.

У судовых огнетрубных котлов конструктивные особенности газового тракта допускают установку перегревателя в огневой камере, дымогарных трубках или в дымнике.

Характеристика различных типов пароперегревателей речных огнетрубных котлов дана в таблице 122. Наибольшее применение на речных судах с огнетрубными котлами до настоящего времени имеют пароперегреватели, размещённые в дымогарных трубках.

При диаметре дымогарных труб 76 мм диаметр труб перегревателя принимается 20 мм, а при 83 мм — 22 мм.

Типы пароперегревателей судовых огнеотрубных котлов и их характеристика

Наименование перегревателя	Характеристика перегревателя	Достоинства	Недостатки
Раднационный ¹	Размещается в огневой камере, в зоне высоких температур. Воспринимает тепло главным образом за счёт лученспускания (радиации) раскалённого слоя топлива и продуктов сгорания	Будучи расположенным в зоне высоких температур, перегреватель данного типа работает с высокой тепловой нагрузкой и поэтому поверхность нагрева получается относительно меньшей, чем у всех других типов перегревателей Допускает получение перегретого пара высокой температуры	Тяжёлые температурные условия работы трубок. Пониженные требования к качеству материала и качеству питательной воды во избежание загрязнения трубок, так как загрязнение ставит перегреватель в ещё более тяжёлые условия работы и легко может привести к перегоранию трубок
Конвекционный (в дымогарных трубках)	Размещается в дымогарных трубках небольшого размера (сист. Шмидта) или в специальных трубках увеличенного диаметра 100—150 мм (перегреватели типа Неймайера, Ноткина и др.). Воспринимает тепло как конвекцией, так и от лученспускания газов в дымогарных трубках. Наиболее распространённый тип перегревателя речных котлов	Дает возможность получить температуру перегретого пара 300—350°С. Температурные условия работы легче, чем у перегревателей чисто радиационных	Будучи расположенными в дымогарных трубках, перегреватели этого типа уменьшают живое сечение дымогарных трубок и увеличивают газовое сопротивление трубой части поверхности нагрева. Затрудняют очистку поверхности нагрева дымогарных трубок от сажи и золы Трубки перегревателя подвержены наружным загрязнениям, особенно при отоплении котла твердым топливом Подвержены авариям вследствие обгорания концов змеевиков

¹ Практического широкого применения до настоящего времени на речных судах не получил.

Наименование перегревателя	Характеристика перегревателя	Достоинства	Недостатки
Конвекционный (в дымоходе)	Размещается в дымоходе и использует тепло отходящих газов. Вследствие низкой температуры газов в дымоходе и ничтожной их лучеиспускающей способности воспринимает тепло главным образом за счёт теплопроводности и конвекции газов и называется конвекционным (контактным).	При установке конвекционного перегревателя, вследствие возможности охлаждения газов до более низкой температуры, достигается больший к. п. д. установки в сравнении с другими типами перегревателей. Трубки перегревателя, располагаясь в зоне газов низких температур, подвержены перегоранию в значительной меньшей степени, чем у перегревателей других типов. В сравнении с перегревателем типа Шмидта имеет то преимущество, что не затрудняет дымогарные трубки котла.	Вследствие малого температурного перепада между газом и паром требуется большая поверхность нагрева и, следовательно, большое количество металла на изготовление перегревателя. Вследствие громоздкости и трудности размещения в габаритах дымохода большой поверхности нагрева непригоден для получения высокой температуры пара (обычно не более 230—250° С).

Установка труб перегревателя внутри дымогарных трубок, особенно при работе котлов на твёрдом топливе, должна сопровождаться установкой надёжно действующих паровых банников (аппаратов для обдувки паром поверхности нагрева котла) во избежание заноса (забивания) дымогарных трубок, сажей и золой и ухудшения работы котла.

В таблице 123 дана величина поверхности нагрева перегревателей для котлов некоторых пароходов.

Таблица 123

Величина поверхности нагрева перегревателей, расположенных в дымогарных трубках, для некоторых работающих котлов

Название парохода	„Маныч-строй“	„Баш-верх-совет“	„Андрей Петраш“	„Спартак“	„Память Котовского“	„Карл Маркс“
Поверхность нагрева котла в м ²	220	100	120	188	80,0	172,0
Система перегревателя	Шмидта	Наумова	Шмидта	Неймайера	Шмидта	Неймайера
Поверхность нагрева перегревателя в м ²	95	33	43	58	36	55

Для возможности сравнения различных типов перегревателей с теплотехнической точки зрения в дополнение к таблице 122 даётся также таблица 124. В этой таблице приведены расчётные данные перегревателей трёх типов к одному и тому же котлу, причём род сжигаемого топлива, нагрузка котла, количество пара, подлежащее перегреву, тепловые потери в топке и конечная температура перегретого пара приняты одинаковыми для всех типов перегревателей.

Таблица 124

Конструктивные и теплотехнические данные перегревателей различных типов для одной и той же судовой котельной установки (проектные данные)

Основные характеристики	Поверхность нагрева котла $H_k = 155,3$ м². Топливо — уголь ПДЖ, теплотворной способностью $Q^*_{p} = 6940$ кал/кг. Часовой расход перегретого пара 3840 кг/час. Температура перегретого пара 250°С. Видимое напряжение поверхности нагрева 29,4 кал/м² · час. Потеря от химического недожога $q_3 = 6\%$. Потеря в шлаках и провале $q_4^{шт} = 3,5\%$. Потеря с уносом $q_4^{уш} = 7,5\%$. Потеря в окружающую среду $q_5 = 2,4\%$
-------------------------	---

	Тип перегревателя		
	Радиационный (в огневой камере) Диаметр труб 26/32 мм	Шмидта (в дымогарных трубках) Диаметр труб 16/22 мм	Конвекционный (в дымоходе) Диаметр труб 31/38 мм
Температура газов за перегревателем в °С	778	307	250
Средняя разность температур между газами и паром в °С	663	229	84
Коэффициент теплопередачи от газов к пару K кал/м ² · час · °С	13,2	16,9	21,3
Тепловая нагрузка 1 м ² поверхности нагрева в кал/м ² · час	45000	3880	1790
Требуемая поверхность нагрева перегревателя в м ²	3,9	45,1	101
Потери тепла с отходящими газами при наличии пароперегревателя в процентах	15,5	14,77	10,5

Конструкции пароперегревателей различных типов даны на рисунках 22, 23, 24, 25 и 26. На рис. 22 представлен пароперегреватель типа Шмидта в дымогарных трубках. На рис. 23 и 24 дана установка радиационного пароперегревателя в огневой камере и его детали. На рис. 25 дана схема установки радиационного перегревателя типа ЦНИИРФ 1940 года в огневой камере¹. На рис. 26 дан конвекционный пароперегреватель в дымоходе огнетрубного котла.

Для ориентировочной оценки величины поверхности нагрева перегревателя в таблице 125 даны употребительные на речных судах соотношения между поверхностью нагрева перегревателя и котла.

Таблица 125

Соотношение между величиной поверхности нагрева котла и перегревателя для речных судовых котлов

Тип котлов	Расположение перегревателя	Отношение $\frac{H_p}{H_k}$	Температура пара в °С
Огнетрубные	В дымогарных трубках	0,25—0,35	280—320
Огнетрубные	В дымоходе	0,3—0,38	225—250
Водотрубные	После нескольких рядов водогрейных труб	0,18—0,22	300

¹ Перегреватель спроектирован и установлен для перегрева только части пара, вырабатываемого котлом.

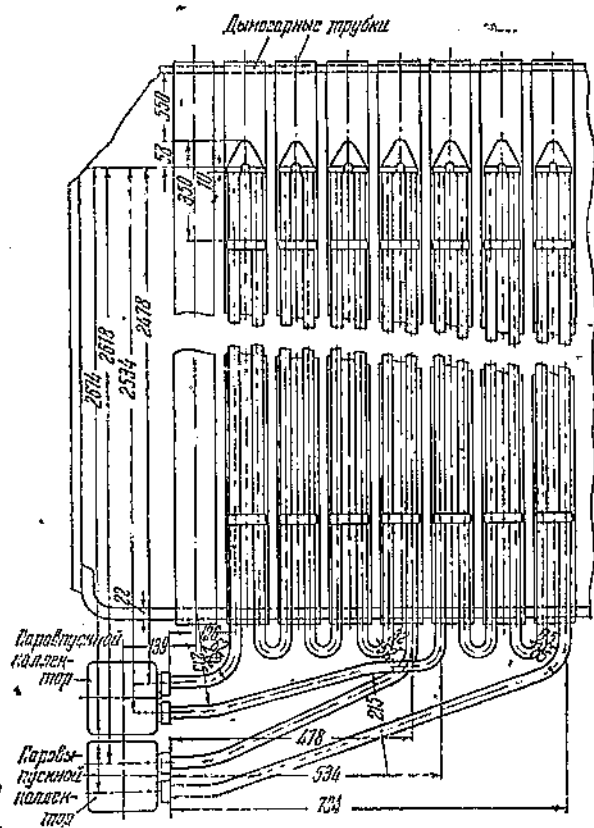


Рис. 22. Установка паронерегревателя типа Шмидта в дымогарных трубах котла.

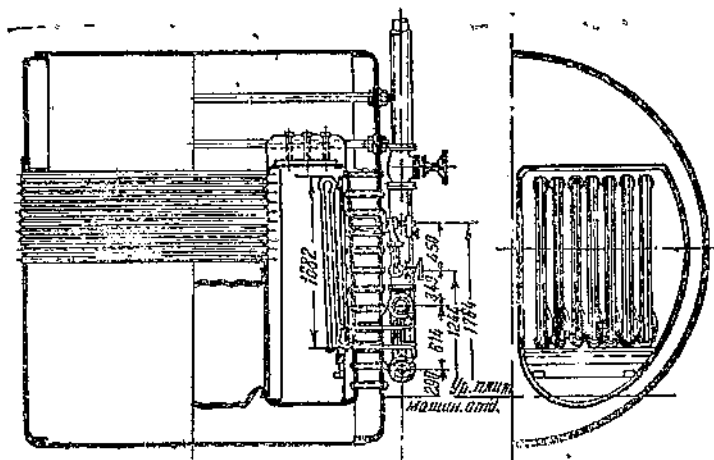


Рис. 23. Радиационный паронерегреватель в огневой камере оборотного котла.

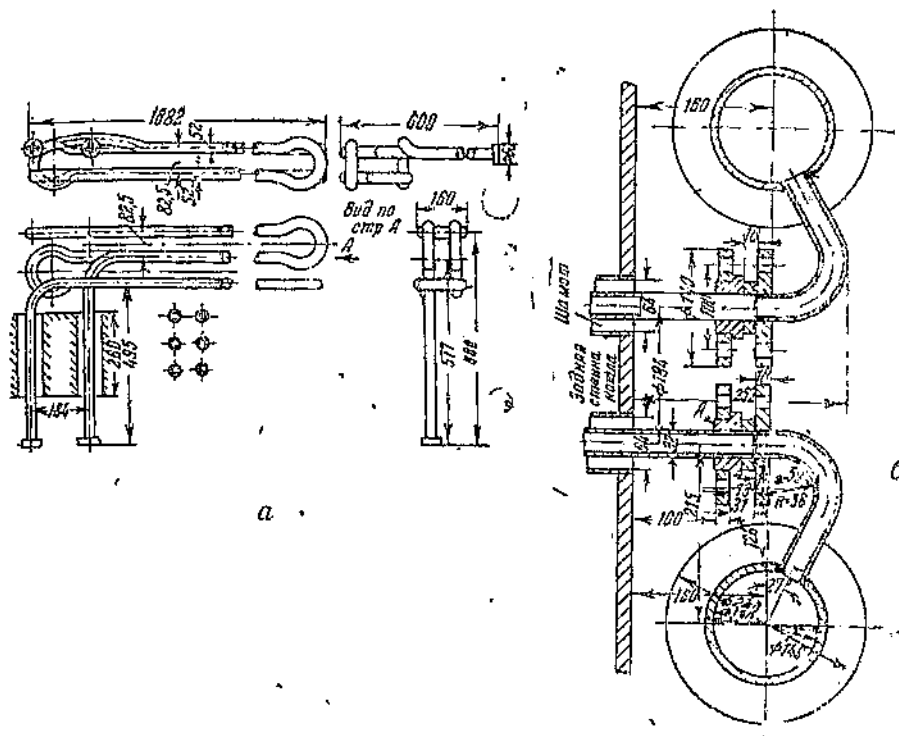


Рис. 24. Детали радиационного перегревателя (к рис. 23):
а—змеевик перегревателя, б—фланцевое соединение змеевика с коллекторами.

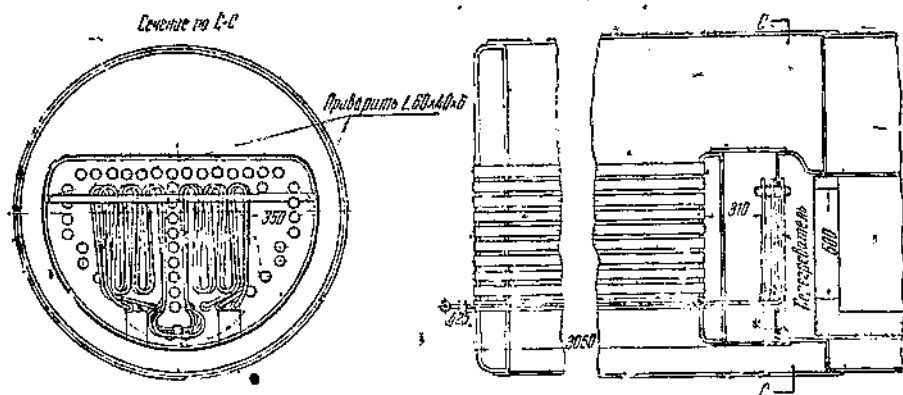


Рис. 25. Радиационный пароперегреватель в огневой камере пролётного котла конструкции ЦНИИРФ (для котла, переоборудованного на отопление угольной пылью). Ввод трубок перегревателя в огневую камеру выполнен через дымогарные трубки котла.

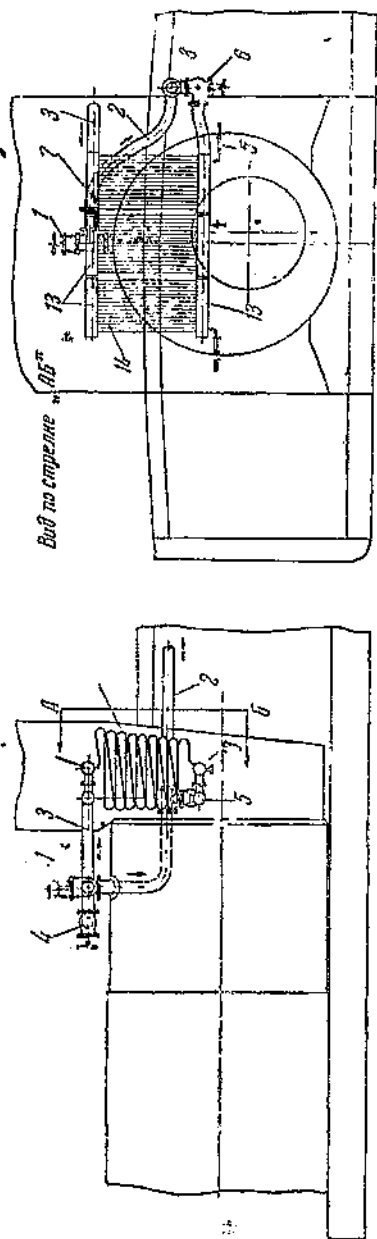
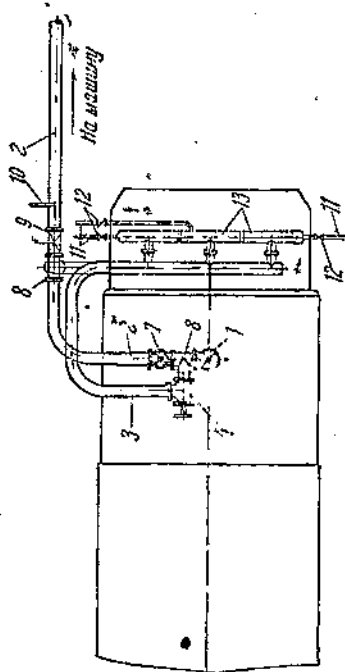


Рис. 26. Схема установки конвекционного пароперегревателя в дымнике огнетрубного котла:

1 — боковой вентиль на котле; 2 — главный паропровод; 3 — паропровод насыщенного пара к перегревателю; 4 — угловой вентиль паропровода; 5 — паропровод перегретого пара от перегревателя; 6 — угловой вентиль паропровода; 7 — вентиль на главном паропроводе; 8 — тройники; 9 — предохранительный клапан; 10 — термометр; 11 — трубопроводы продувания секций пароперегревателя; 12 — вентили трубопроводов; 13 — коллекторы пароперегревателя; 14 — змеевики пароперегревателя.



Коэффициент теплопередачи для конвекционного перегревателя, расположенного в дымогарных трубках. Коэффициент теплопередачи от газов к перегретому пару для перегревателей огнетрубных котлов в дымогарных трубках, в зависимости от скорости газов, может быть приближённо определён по следующей эмпирической формуле проф. Долголенко:

$$K = 5 + 2,5 \cdot W^{0,75} \text{ кал/м}^2 \cdot \text{час} \cdot ^\circ\text{C}. \quad (165)$$

Учитывая загрязнение перегревателя в работе и ухудшение теплопередачи, получаемые значения K следует практически lowering, вводя коэффициент загрязнения ξ , ориентировочно равный 0,8. Тогда формула для определения коэффициента теплопередачи с учётом загрязнений будет:

$$K = 0,8 \cdot (5 + 2,5 W^{0,75}) \text{ кал/м}^2 \cdot \text{час} \cdot ^\circ\text{C}. \quad (165')$$

В среднем, для ориентировочных подсчётов, величину K для перегревателей в дымогарных трубках можно принимать:

W м/сек.	3	4	5	6
K кал/м ² · час · °C .	15,4	17,6	18,8	19,8

§ 3. РАСЧЕТ ПЕРЕГРЕВАТЕЛЯ, РАСПОЛОЖЕННОГО В ДЫМОГАРНЫХ ТРУБКАХ

Задача расчёта: 1) определить количество тепла, отдаваемого от газов к дымогарным трубкам и трубкам перегревателя; 2) подобрать поверхность нагрева перегревателя, обеспечивающую перегрев пара до требуемой температуры;

3) выявить температуру уходящих газов.

Данные для расчёта: 1) температура газов перед трубной решёткой $T'_\text{г}$, °C;

2) $D_\text{п}$ — количество перегреваемого пара в кг/час;

3) $i_\text{г}$ — теплосодержание насыщенного пара, поступающего в перегреватель, в кал/кг;

4) $t_\text{п}$ — требуемая температура перегретого пара;

5) B — количество топлива, сжигаемого в час, в килограммах;

6) $V_\text{г}$ — объём продуктов сгорания на 1 кг сжигаемого топлива в м³/кг;

$t_\text{г}$ — температура насыщенного пара.

Ниже приводится порядок приближённого расчёта пароперегревателя по средней скорости газов в дымогарных трубках и эмпирическим формулам для определения коэффициента теплопередачи.

Порядок расчёта. 1. Выбирают диаметр труб перегревателя, составляют эскиз размещения его в дымогарных трубках (рис. 27) и устанавливают предварительную поверхность нагрева перегревателя $H_\text{по}$ м², исходя из конструктивных соображений.

2. Устанавливают, какое количество дымогарных трубок будет заполнено элементами перегревателя (n_1), какое будет свободно от элементов (n_2).

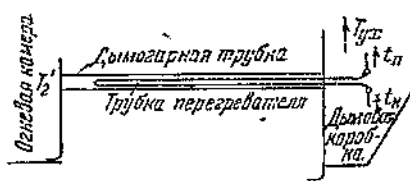


Рис. 27. Схема расположения элемента перегревателя в дымогарной трубке.

3. Определяют суммарную площадь сечения дымогарных трубок, свободную от прохода газов, для перегревателей типа Шмидта по формуле:

$$F = n_1 \left(\frac{\pi d_o^2}{4} - 2 \frac{\pi d_{ne}^2}{4} \right) + n_2 \frac{\pi d_o^2}{4} \text{ м}^2,$$

где: d_o — внутренний диаметр дымогарных трубок в м²,
 d_{ne} — наружный диаметр труб перегревателя в м².

Расчёт перегревателя проводят для двух произвольно взятых температур уходящих газов в дымонике, например:

$$T'_{yx} = 280^\circ \text{C и } T''_{yx} = 340^\circ \text{C}$$

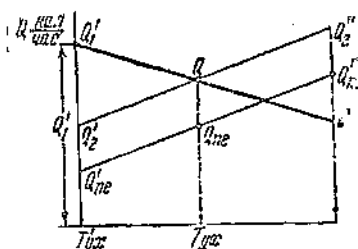
и определяют теплосодержание уходящих газов по IT диаграмме или по формуле:

$$I_{yx} = V_g \cdot C_g \cdot T'_{yx} \text{ кал/кг.}$$

Далее подсчитывают теплосодержание газов перед трубной решёткой также по IT диаграмме или по формуле:

$$I_2 = V_2 \cdot C_2 \cdot T_2.$$

Расчёт для принятых температур газов в дымонике ведут по следующей схеме (см. стр. 241).



№ п/п	Наименование расчётной величины	Обозначение	Размерность	Значения
1	Температура газов в дымоходе (задается)	T_{yx}	$^{\circ}\text{C}$	T_{yx}
2	Теплосодержание газов в дымоходе	I_{yx}	кал/кг	I'_{yx}
3	Теплосодержание газов перед дымогарными трубками	I_2	кал/кг	I'_2
4	Разность теплосодержаний	$I_2 - I_{yx}$	кал/кг	$I'_2 - I'_{yx}$
5	Теплота газов, полезно используемых на парообразование и перегрев пара в районе дымогарных трубок (тепло, отданное газам) $Q_1 = 0,98 \cdot B (I_2 - I_{yx})$ (1—0,98) — коэффициент потери тепла котлом в районе дымогарных трубок	Q_1	кал/час	Q'_1
6	Начальная разность температур между газами и стенкой дымогарной трубки $\Delta_1 = T_2 - t_k$ t_k — температура стенки трубы, соответствующая давлению в котле	Δ_1	$^{\circ}\text{C}$	Δ_1
7	Конечная разность температур $\Delta_2 = T_{yx} - t_k$	Δ_2	$^{\circ}\text{C}$	Δ'_2
8	Средняя логарифмическая разность температур $\Delta t = \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{\ln \Delta_1 / \Delta_2}$	Δt	$^{\circ}\text{C}$	$\Delta t'$

Продолжение

№ п/п	Наименование расчётной величины	Обозначение	Размерность	Значения
9	Расчётная температура газов $t_p = \Delta t + t_n$	t_p	°C	t''_p
10	Секундный объём газов: $V_{сек} = \frac{B \cdot V_z}{3600} \cdot \frac{273 + t_p}{273}$	$V_{сек}$	м³/сек.	$V''_{сек}$
11	Расчётная средняя скорость газов $W_z = \frac{V_{сек}}{F}$	w_z	м/сек.	w''_z
12	Коэффициент теплопередачи от газов к воде в зависимости от скорости газов $K_{д-тр} = 6 + 4,4 \sqrt{W_z}$	$K_{д-тр}$	кал/м² · час °C	$K''_{тр}$
13	Количество тепла, переданное дымогарным трубкам $Q_{тр} = \Delta t \cdot K_{д-тр} \cdot d \cdot L \cdot n$, где: L — длина трубки в метрах, n — число дымогарных трубок	$Q_{тр}$	кал/час	$Q''_{тр}$
14	Начальная разность температур газов и пара у перегревателя $\Delta_{1ис} = T''_z - \frac{t_p + t_n}{2}$	$\Delta_{1ис}$	°C	$\Delta_{1ис}$

№ п/п	Наименование расчётной величины	Обозначение	Размерность	Значения
15	Конечная разность температур газов и пара у перегревателя $\Delta t_{ne} = T_{yx} - \frac{t_n + t_h}{2}$	Δt_{ne}	°C	$\Delta t'_{ne}$
16	Средняя логарифмическая разность температур в перегревателе; $\Delta t_{ne} = \frac{\Delta t_{1ne} - \Delta t_{2ne}}{\ln \frac{\Delta t_{1ne}}{\Delta t_{2ne}}}$	Δt_{ne}	°C	$\Delta t'_{ne}$
17	Коэффициент теплопередачи от газов и пара в трубках перегревателя в зависимости от скорости газов по формуле: $K_{ne} = 0,8 (5 + 2,5 \cdot W_2^{0,75})$	K_{ne}	кал/м² · час · °C	K'_{ne}
18	Количество тепла, передаваемого перегревателю: $Q_{ne} = H_{ne} \cdot K_{ne} \cdot \Delta t_{ne}$	Q_{ne}	кал/час	Q'_{ne}
19	Общее количество тепла, полезно использованного трубками котла и перегревателя: $Q_2 = Q_{np} + Q_{ne}$	Q_2	кал/час	Q'_2

газами при изменении температуры уходящих газов от T'_{yx} до T''_{yx} (изменение количества тепла полагают происходящим по закону прямой линии).

Линия $Q'_2 \rightarrow Q''_2$ даёт изменение количества тепла, воспринятого трубками котла и перегревателя. Пересечение этих двух прямых даёт точку Q , снося которую по горизонтали на вертикальную ось данного графика получают количество тепла, действительно воспринятого газами. Снося точку Q по вертикали вниз, находят истинную температуру уходящих газов при данных условиях.

На этом же графике откладывают количества тепла Q'_{ne} и Q''_{ne} , соответствующие температурам уходящих газов T'_{yx} и T''_{yx} , и определяют Q_{ne} , соответствующее найденной действительной температуре уходящих газов T_{yx} .

Найдя таким способом (путём интерполирования) величину Q_{ne} , т. е. количество тепла, переданного перегревателю в час, делают проверку, достаточно ли тепла воспринято данным перегревателем для перегрева пара до требуемой температуры.

Требуемое для перегрева пара в час количество тепла составляет:

$$D_n (i_n - i_x) \text{ кал/час,}$$

где: D_n — количество перегреваемого пара в кг/час,

i_n — теплосодержание перегретого пара в кал/кг,

i_x — теплосодержание влажного насыщенного пара, поступающего в перегреватель, в кал/кг.

С другой стороны, фактически воспринятое количество тепла равно Q_{ne} кал/кг.

Поэтому, если имеет место равенство $\frac{Q_{ne}}{D_n} = i_n - i_x$, то перегреватель подобран правильно. В противном случае надо изменить поверхность нагрева или при данной поверхности (если, руководствуясь конструктивными соображениями, нельзя изменить H_{ne}) ограничиться меньшим перегревом пара и переделать расчёт по приведённой схеме для новой H_{ne} или t_n .

ХVIII. ТЯГА И ТЯГОДУТЬЕВЫЕ УСТРОЙСТВА

§ 1. НАЗНАЧЕНИЕ И ИЗМЕРЕНИЕ ТЯГИ

Для горения топлива в топке требуется, чтобы к топливу всегда подводился в необходимом количестве воздух. При сжигании топлива на колосниковой решётке любой конструкции воздух должен быть подведён под решётку, а затем должен пройти через слой топлива, преодолевая его сопротивление. Поступление воздуха в топку оказывается возможным только в том случае, если будет существовать разность давлений под решёткой и над решёткой. Указанная разность давлений тратится на преодоление сопротивления решётки и слоя топлива.

Далее, для того чтобы заставить продукты сгорания удаляться из топки и проходить по газоходам котла, необходимо, чтобы давление в дымнике, куда удаляются газы, было меньше, чем давле-

ние газов в топке. Эта разность давлений тратится на преодоление сопротивлений от трения и поворотов газов в дымоходах.

Следовательно, при работе котельной установки давление в поддувале топочного устройства (или давление наружного воздуха перед фронтом топки) должно быть больше давления в топочном пространстве, а давление в топке — больше, чем за котлом в дымнике.

В зависимости от типа тягодутьевой установки давление в зольнике речных котлов поддерживается равным атмосферному или больше его (в установках с дутьём), а давление в газоходах и дымнике — меньше атмосферного.

Из сказанного следует, что для осуществления притока воздуха в топку и непрерывного движения продуктов сгорания по газоходам должно быть создана некоторая разность давлений поступающего в топку воздуха и покидающих установку дымовых газов. Движущая сила, получающаяся в результате указанной разности давлений, называется силой тяги.

Сила тяги выполняет следующее:

1) обеспечивает подвод в топку воздуха, необходимого для горения;

2) просасывает образующиеся в топке продукты сгорания по газоходам, преодолевая сопротивление газового тракта;

3) выводит уходящие газы с необходимой скоростью из трубы в атмосферу.

По способу получения разности давлений воздуха перед топкой и газов у основания трубы различают естественную тягу, создаваемую дымовой трубой, и искусственную или механическую, вызываемую специальными аппаратами — побудителями тяги (вентиляторами или пароструйными приборами).

Величина силы тяги измеряется в миллиметрах водяного столба (1 мм вод. столба = 0,0001 кг/см²).

§ 2. ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ ТЯГИ

Величина необходимой разности давлений между поступающим в топку воздухом и уходящими газами, т. е. величина необходимой силы тяги зависит от величины сопротивлений топочного устройства и газового тракта, которые имеются в данной установке.

Сила тяги должна быть достаточна для преодоления всех сопротивлений в топке и на протяжении газового тракта.

Потребная сила тяги подсчитывается по сумме сопротивлений:

$$\underbrace{\Delta p}_{\text{сила тяги}} = \underbrace{\sum S}_{\text{сумма сопротивлений}} \text{ мм вод. столба.}$$

В этой формуле $\sum S = S_m + S_{\text{газ, тр}}$,

где: S_m — сопротивление топки в мм вод. ст.,

$S_{\text{газ, тр}}$ — сумма всех сопротивлений по газовому тракту в мм вод. ст.

Для судовых огнетрубных котлов полное сопротивление по газовому тракту составляется из: сопротивления топочного порога перед огневыми камерами, сопротивления от поворота газов в огневой камере (для оборотных котлов), сопротивления при входе газов в дымогарные трубки и при выходе из них, гидравлического сопротивления от трения при движении газов по дымогарным трубкам, сопротивления дымника и регистра, сопротивления от трения при движении газов в дымовой трубе.

При проектировании установки и определении необходимой силы тяги отдельные сопротивления подсчитывают обычно по эмпирическим формулам, исходя из полной нагрузки установки. В эксплуатации, при работе котельной установки с недогрузкой, дросселирование (снятие) избыточной тяги производится дымовой заслонкой (регистром) за котлом.

§ 3. ГАЗОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ТОПКИ

Сопротивление топочного устройства и слоя топлива (при сжигании твёрдого топлива) является наиболее крупным сопротивлением, для преодоления которого обычно требуется значительная разность давлений под колосниковой решёткой, откуда поступает воздух и в топочном пространстве. Величина сопротивления топки доходит практически, например при сжигании антрацита, до нескольких десятков миллиметров водяного столба.

В основном величина сопротивления топки зависит от:

- 1) конструкции топочного устройства,
- 2) рода сжигаемого топлива и его особенностей (содержание мелочи, спекаемость, большая или меньшая способность к шлакованию),
- 3) толщины слоя топлива на решётке,
- 4) величины форсировки работы топки (количества топлива, сжигаемого в час на 1 м² площади решётки).

Ориентировочно общее сопротивление топочного устройства может быть выражено следующей эмпирической формулой Л. К. Рамзина:

$$S_m = A \left(\frac{B}{RO_2} \right)^2 \text{ мм вод. столба,}$$

где: $\frac{B}{R}$ — весовое напряжение площади решётки в кг/м². час,

RO_2 — содержание суммы $CO_2 + SiO_2$ в продуктах горения в проц. по объёму,

A — коэффициент, зависящий от конструкции топки и свойств топлива.

Структура приведённой выше формулы ясна. Чем больше $\frac{B}{R}$, тем больше пойдёт воздуха на горение, тем выше потребуется скорость воздуха через слой топлива, тем значительнее получится газовое сопротивление, которое приблизительно пропорционально квадрату скорости. Чем больше содержание RO_2 в продуктах го-

рения, тем меньше избыток воздуха и, следовательно, при прочих равных условиях, меньше получается газовое сопротивление слоя.

Коэффициент A в указанной выше формуле принимается:

$A=0,03$ — при сжигании неспекающегося угля на колосниковой решётке с ручным обслуживанием;

$A=0,05$ — при сжигании спекающегося угля;

$A=0,037$ при сжигании дров на колосниковой решётке.

Теплотворная способность топлива, расход которого B кг/час входит в формулу, принят:

для углей $Q^u_p = 7000$ кал/кг,

для дров $Q^u_p = 3000$ кал/кг.

Если в действительности теплотворные способности отличаются от указанных, то при пользовании формулой для определения S_m следует делать пересчёт расхода топлива на принятую в формуле теплотворную способность, пользуясь соотношениями:

$$\text{для углей } B = \frac{B' \cdot Q^u_p}{7000},$$

$$\text{для дров } B = \frac{B' \cdot Q^u_p}{3000}.$$

В этих формулах:

B' — фактический расход топлива,

B — расход топлива, подставляемый в формулу газового сопротивления толки.

Для ориентировочной оценки сопротивления толки при сжигании твёрдых топлив могут быть использованы формулы, данные в таблице 126.

В таблице 127 даны величины сопротивления слоя топлива для фартучных судовых топков при сжигании дров, подсчитанные для различных тепловых нагрузок толки. Сопротивление топков судовых котлов при сжигании мазута незначительно и по опытным данным не превышает 2—3 мм водяного столба.

§ 4. ГАЗОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ КОТЛА

Сопротивление газового тракта котла зависит, в основном, от:

1) системы котла,

2) степени форсировки работы данной котельной установки, т. е. величины расхода топлива в кг/час. С увеличением форсировки увеличивается количество получающихся продуктов сгорания и скорость движения их в газоходах, а следовательно, возрастает и газовое сопротивление котла пропорционально приблизительно квадрату скорости движения газов;

3) состояния поверхности нагрева котла, т. е. большей или меньшей загрязнённости поверхности нагрева уносом, золой, сажей и т. д.; при наличии загрязнений изменяется величина сопротивления от трения и, кроме того, уменьшается живое сечение газоходов для прохода продуктов сгорания, вследствие чего повышается их скорость и, следовательно, возрастает сопротивление.

Эмпирические формулы для определения сопротивления топки -

Топливо	Тип топочного устройства	Сопротивление колосниковой решётки в мм водяного столба	Примечание
Дрова	Горизонтальная колосниковая решётка	$S_m = 3 \left(\frac{B}{40J} \right)^3 \cdot \left(\frac{12}{RO_2} \right)^2$	$\frac{B}{\Sigma F}$ — весовое напряжение суммарного газового окна
	Фартучная топка, типа профессора Кирша	$S_m = 13 \left(\frac{B}{1000} \right)^2 \left(\frac{14}{RO_2} \right)^2$	
Спекающийся каменный уголь	Горизонтальная колосниковая решётка с ручным обслуживанием	$S_m = 5 \left(\frac{1}{100} \cdot \frac{B}{R} \right)^2 \left(\frac{10}{RO_2} \right)^2$	
Антрацит	Горизонтальная колосниковая решётка	$S_m = K \left(\frac{1}{150} \cdot \frac{B}{R} \right)^2$	Коэффициент K — в зависимости от степени плавкости шлаков изменяется в пределах 15—45; среднее значение $K = 30$

Таблица 127

Газовое сопротивление слоя топлива в мм водяного столба для фартучной дровяной топки при различных напряжениях зеркала горения (газового окна)
Теплотворная способность дров принята 3000 кал/кг

Весовое напряжение газового окна $\frac{B}{F_{\text{г.т.}}}$ кг/м ² · час	300	400	500	600	700	800	900
Тепловое напряжение газового окна $\frac{B \cdot Q^H}{F_{\text{г.т.}}}$ тыс. кал/м ² · час	900,0	1200,0	1500,0	1800,0	2100,0	2400	2700
Сопротивление слоя дров в фартучной топке в мм водяного столба при коэффициенте избытка воздуха:							
$\alpha = 1,6$	1,47	2,62	4,1	5,9	8,02	10,5	13,3
$\alpha = 1,8$	1,86	3,3	5,16	7,44	10,1	13,4	16,8
$\alpha = 2,0$	2,34	4,07	6,5	9,16	12,4	16,3	20,6

Для подсчёта отдельных составляющих общего сопротивления газового тракта судовых котлов (сопротивления в дымогарных трубках, сопротивлений от изменения сечения, поворота газов и т. д.) существуют эмпирические формулы, которыми пользуются при проектировании. Однако практика показывает, что пользование этими формулами весьма кропотливо и даёт результаты, нередко значительно расходящиеся с действительностью.

Необходимо учитывать, что все эти формулы дают величину сопротивлений для незагрязнённого котла. Опыт показывает, что наличие загрязнений, в большей или меньшей степени почти неизбежное в эксплуатационных условиях, нередко в несколько раз повышает расчётные газовые сопротивления. В среднем можно принять, что сопротивление огнетрубных судовых котлов при отсутствии значительных загрязнений поверхности нагрева составляет обычно 2—4 мм водяного столба.

§ 5. ЕСТЕСТВЕННАЯ ТЯГА ДЫМОВОЙ ТРУБЫ

Действие дымовой трубы, создающей так называемую естественную тягу, основано на разности удельных весов наружного воздуха и горячих газов в трубе.

Разрежение, создаваемое дымовой трубой (ΔS мм), зависит от: 1) высоты трубы, 2) температуры газов в трубе, 3) температуры наружного воздуха, а также степени его влажности и барометрического давления.

Для данной установки тяга, даваемая трубой, увеличивается с повышением температуры уходящих газов, так как при повышении температуры удельный вес газов в трубе уменьшается. При неизменной температуре уходящих газов тяга увеличивается с понижением температуры наружного воздуха, так как это повышает удельный вес воздуха, а следовательно, при этом увеличивается и разность весов столба наружного воздуха, высотой равного высоте дымовой трубы и горячих газов в трубе. С понижением барометрического давления воздуха в пасмурную и дождливую погоду удельный вес атмосферного воздуха падает, и сила тяги несколько уменьшается.

Разрежение, создаваемое трубой у её основания, т. е. в дымнике¹, или создаваемая трубой тяга в мм водяного столба (теоретическая) подсчитывается по формуле:

$$\Delta S_{\text{теор}} = \left(H \cdot \frac{\gamma_a}{1 + \alpha t_a} - H \frac{\gamma_g}{1 + \alpha T_{\text{тр}}} \right) \frac{b}{760} \text{ мм вод. столба,} \quad (166)$$

где: H — высота дымовой трубы в метрах;

$\alpha = 1/273$ — коэффициент объёмного расширения газов;

t_a — температура наружного воздуха;

$T_{\text{тр}}$ — средняя температура газов в трубе;

b — действительное барометрическое давление, при котором подсчитывается тяга, в мм рт. столба.

¹ За основание дымовой трубы для речных котельных установок в дальнейшем условно принимается среднее сечение дымника. Высота дымовой трубы измеряется по вертикали от этого сечения до устья трубы.

При определении $T_{тр}$ следует пользоваться формулой:

$$T_{тр} = \frac{T_{ух} + T_{уст}}{2},$$

где: $T_{ух}$ — температура уходящих газов в дымнике,

$T_{уст}$ — температура газов у устья трубы.

Зная высоту трубы H м, температуру у устья её можно определить приблизительно путём вычитания из температуры газов у основания трубы 3°C на каждый метр её высоты (для железных труб судовых установок).

Принимая удельный вес уходящих газов в трубе и воздуха при 0° одинаковым и равным 1,3 (ошибка при этом получается ничтожной, менее 1%) и заменяя $\alpha = 1/273$, получим упрощенную формулу для определения силы тяги трубы в следующем виде:

$$\Delta S_{теор} = 0,47 H \left(\frac{1}{273 + t_g} - \frac{1}{273 + T_{тр}} \right) b \text{ мм вод. ст.} \quad (166)$$

Величины теоретической тяги на 1 м высоты трубы даны в таблице 129. Принятое барометрическое давление для средних условий $b=750$ мм рт. столба.

В таблице 128 даны величины теоретического разрежения у основания трубы в зависимости от высоты трубы и температуры газов.

Необходимо отметить, что практически действительное разрежение оказывается меньшим, чем то, которое получается при подсчёте по вышеприведённой формуле или дано в таблицах 128 и 129. Это объясняется тем, что часть тяги теряется в самой трубе (трение газов в трубе и т. д.).

Для судовых установок действительное разрежение газов у основания трубы при полностью открытой дымовой заслонке в среднем на 0,8—1,2 мм меньше теоретического разрежения, указанного в таблице 128. Порядок подсчёта потери тяги в самой трубе см. ниже.

Таблица 128

Теоретическое разрежение (тяга) в мм водяного столба у основания трубы, в зависимости от температуры газов в трубе и от высоты трубы

Средняя температура газов в трубе $^\circ\text{C}$	Высоты трубы в метрах							
	5	6	7	8	9	10	11	12
	Разрежение в мм вод. столба при температуре наружного воздуха $+20^\circ\text{C}$							
240	2,4	3,88	3,36	3,84	4,32	4,8	5,28	5,76
260	2,55	3,06	3,57	4,08	4,59	5,1	5,61	6,12
280	2,65	3,18	3,71	4,24	4,77	5,3	5,83	6,36
300	2,8	3,36	3,92	4,56	5,13	5,7	6,16	6,82
320	2,9	3,48	4,06	4,64	5,22	5,8	6,38	6,96
340	3,0	3,6	4,2	4,8	5,4	6,0	6,6	7,2
360	3,08	3,7	4,3	4,93	5,55	6,17	6,78	7,34
380	3,15	3,78	4,41	5,04	5,67	6,3	6,93	7,56

Теоретическая тяга в мм водяного столба на 1 м высоты трубы
в зависимости от температуры газов в трубе и температуры наружного
воздуха

Температура газов в трубе в °С	Температура воздуха в °С								
	-20	-10	-5	+0	+5	+10	+15	+20	+25
200	0,62	0,572	0,545	0,521	0,497	0,473	0,451	0,427	0,405
220	0,65	0,602	0,575	0,551	0,527	0,503	0,481	0,457	0,435
240	0,678	0,63	0,603	0,579	0,555	0,531	0,509	0,485	0,463
260	0,705	0,657	0,630	0,606	0,582	0,558	0,536	0,512	0,490
280	0,728	0,68	0,653	0,629	0,605	0,581	0,559	0,535	0,513
300	0,751	0,703	0,676	0,652	0,628	0,605	0,582	0,558	0,536
320	0,772	0,724	0,697	0,673	0,649	0,625	0,603	0,579	0,557
340	0,792	0,744	0,717	0,693	0,669	0,645	0,623	0,599	0,577
360	0,810	0,762	0,735	0,711	0,687	0,663	0,641	0,617	0,595
380	0,827	0,779	0,752	0,728	0,704	0,680	0,658	0,634	0,612

Диаметр дымовой трубы. Определение требуемого сечения дымовой трубы производится по объёму газов и их скорости по формуле:

$$f = \frac{B \cdot V_g (1 + 0,00367 T_{гвх})}{3600 \cdot W_g}, \quad (167)$$

где: V_g — объём уходящих продуктов сгорания на 1 кг сжигаемого топлива в $\text{м}^3/\text{кг}$,

W_g — скорость газов у устья трубы в м/сек. (обычно принимается 5—8 м/сек.),

$T_{гвх}$ — температура газов у устья трубы.

Зная поперечное сечение трубы, подсчитывают диаметр трубы в свету по формуле:

$$d = \sqrt{\frac{4f}{\pi}} \text{ м.}$$

Если известны размеры трубы, приведённая выше формула может быть использована для подсчёта скорости газов в трубе при разных режимах работы котла.

Создаваемое дымовой трубой разрежение в дымоходе и сопротивление газового тракта котла. При работе котельной установки разрежение, создаваемое дымовой трубой у её основания, т. е. в дымоходе, должно быть равно сумме сопротивлений газового тракта котла от топки до основания трубы.

Регулирование создаваемого дымовой трубой разрежения (регулирование силы тяги) при изменении форсировки работы топки совершают дымовой заслонкой. Прикрывая дымовую заслонку (шибер за котлом), создают добавочное сопротивление движению газов в трубе, вследствие чего разрежение в дымоходе уменьшается. Так как давление наружного воздуха перед топкой при этом

не меняется, то с уменьшением разрежения в дымнике разность давлений в топке и в дымнике делается меньше; с уменьшением разности давлений уменьшается как количество поступающего в топку воздуха, так и скорость отводимых из топки продуктов сгорания и снижается форсировка топки, т. е. уменьшается напряжение зеркала горения и площади колосниковой решётки.

Разрежение в дымнике, требуемое для работы котла при заданной нагрузке, может быть найдено по формуле:

$$\Delta S_{\text{тр}} = S_{\text{топ}} + S_{\text{котла}} - \Delta S_{\kappa} \text{ мм вод. столба,}$$

где: $S_{\text{топ}}$ — сопротивление топочного устройства, зависящее от рода топки и топлива, режима работы и т. д.,

$S_{\text{котла}}$ — сопротивление газоходов котла,

ΔS_{κ} — самотяга котла, т. е. разрежение, создаваемое за счёт столба горячих газов в газоходах котла высотой от уровня колосниковой решётки (при отоплении мазутом от оси жаровой трубы) до среднего сечения дымника.

Самотяга котла может быть вычислена по той же формуле, по которой вычисляется сила тяги, даваемая дымовой трубой, а именно:

$$\Delta S_{\kappa} = 0,47 \cdot H_{\kappa} \left[\frac{1}{273 + t_a} - \frac{1}{273 + T_2} \right] \text{ мм,}$$

где: H_{κ} — расстояние по вертикали от уровня колосниковой решётки до среднего сечения дымника в метрах (для пролётных котлов принимается равным нулю),

t_a — температура воздуха,

T_2 — средняя температура газов в газоходах. Можно принимать:

$$T_2 = \frac{T_{\text{топ}} + T_{\text{ух}}}{2},$$

где: $T_{\text{топ}}$ — температура газов при входе в огневую камеру,

$T_{\text{ух}}$ — температура уходящих газов в дымнике.

Требуемое разрежение в дымнике в основном зависит:

1) от типа топки, рода и свойств сжигаемого топлива, также режима работы топки (напряжение решётки и зеркала горения, величина коэффициента избытка воздуха, с которым ведётся процесс горения);

2) от системы котла, большей или меньшей загрязнённости его поверхности нагрева уносом и золой, а также от того, имеется ли в дымогарных трубках котла перегреватель.

Разрежение, создаваемое дымовой трубой в дымнике, зависит от температуры газов в трубе, высоты трубы, скорости газов, а также от величины сопротивлений (на преодоление которых расходуется часть создаваемой трубой теоретической силы тяги) на участке от дымника до устья трубы и может быть представлено формулой:

$$\Delta S_{\text{д.м.н.}} = \Delta S_{\text{теор}} - (S_{\text{тр}} + S_{\text{в.т.}} + S_{\text{зас.т.}} + S_{\text{дог}}), \quad (168)$$

где: $\Delta S_{теор.}$ — теоретическая сила тяги, создаваемая дымовой трубой,

$S_{тр}$ — потеря тяги (в мм вод. столба) в трубе на трение газов,

$S_{вых}$ — затрата тяги на создание скорости газов при выходе,

$S_{засл.}$ — сопротивление дымовой заслонки в мм вод. столба,

$S_{доб}$ — добавочные сопротивления в трубе, вызывающие потерю тяги (сетка, искрогасительное устройство и т. д.).

Потеря тяги на создание скорости газов подсчитывается приближенно по формуле:

$$S_{вых} = \frac{\gamma_g \cdot w^2}{2g} \text{ мм вод. столба,}$$

где: w — скорость газов в м/сек.,

γ_g — удельный вес газов,

g — ускорение силы тяжести в м/сек.². Для средних скоростей газов в трубе 4—6 м/сек. эту потерю приближенно можно оценивать по таблице 130.

Таблица 130

Потеря тяги в мм вод. столба на создание скорости газов

Скорость газов w м/сек.	Средняя температура газов в трубе в °C		
	200	300	400
4	0,6	0,5	0,43
6	1,36	1,12	0,96

Потеря тяги на трение в трубе подсчитывается по формуле:

$$S_{тр} = \beta \frac{\gamma_g \cdot w^2}{d} H,$$

где: d — диаметр трубы в метрах,

H — высота трубы в метрах,

β — опытный коэффициент, зависящий от диаметра трубы:

$$d = 0,5$$

$$\beta = 0,0009$$

$$d = 1$$

$$\beta = 0,0007$$

$$d = 1,5$$

$$\beta = 0,0006$$

Ввиду малой величины потери $S_{тр}$ в судовых установках потеря на трение в зависимости от высоты и диаметра трубы без существенной ошибки может приниматься по таблице 131.

Потеря тяги в мм вод. столба на трение газов в трубе

Скорость газов	Высота трубы в метрах							
диаметр трубы	5	6	7	8	9	10	11	12
$w = 4$ м/сек.								
$d = 0,5$ м	0,18	0,22	0,26	0,30	0,33	0,37	0,40	0,44
$d = 1,0$ м	0,07	0,08	0,1	0,11	0,126	0,14	0,15	0,17
$d = 1,5$ м	0,04	0,048	0,056	0,064	0,072	0,08	0,088	0,096
$w = 6$ м/сек.								
$d = 0,5$ м	0,42	0,50	0,58	0,67	0,75	0,84	0,92	1,0
$d = 1,0$ м	0,16	0,19	0,22	0,25	0,29	0,32	0,35	0,4
$d = 1,5$ м	0,09	0,108	0,126	0,144	0,162	0,182	0,20	0,216

Сопротивление дымовой заслонки зависит от её конструкции и положения в трубе при данном режиме работы котла. При полностью открытой задвижке можно полагать: $S_{засл} = 0$.

Зная разрежение в дымнике, создаваемое дымовой трубой, и разрежение, требуемое для преодоления сопротивления газового тракта, можно написать равенство, которое должно существовать для любого режима работы котла:

$$\Delta S_{дымн} = \Delta S_{треб} \text{ мм вод. столба.}$$

§ 6. ИСКУССТВЕННАЯ ТЯГА

В речных судовых установках высота столба горячих газов, создающих тягу, считая от уровня колосниковой решётки до устья трубы, в зависимости от типа судна и высоты трубы, в среднем составляет 7—10 м. Получаемое при этом разрежение при температуре уходящих газов 300—350°С составляет 3,5—5 мм вод. столба. Такая величина разрежения достаточна для преодоления сопротивления топки и газового тракта котла только в случае сжигания мазута или же твёрдого топлива (каменный уголь, дрова) при условии сжигания последнего тонким слоем и при очень малой форсировке работы топочного устройства. Если принять, что в дымнике разрежение равно 5 мм вод. столба и вычесть из него сумму всех сопротивлений газового тракта котла, которую ориентировочно примем равной 2 мм вод. столба при чистой поверхности нагрева, то на топку остается разрежение в 3 мм вод. столба.

Это значит, что если давление в поддувале равно приблизительно атмосферному, то в топочном пространстве будет существовать разрежение в 3 мм вод. столба. При сжигании, например, каменного угля в топке с горизонтальной колосниковой решёткой указанной разности давлений практически достаточно при условии нагрузки топки не более 60—70 м²/час, т. е. на каждом

квадратном метре колосниковой решётки при данном разрежении можно сжигать 60—70 кг угля в час. Для получения больших форсировок указанного разрежения в топке, создаваемого дымовой трубой, уже не хватает и приходится применять искусственную тягу.

В речных котельных установках применяется искусственная тяга следующих типов:

1. Нагнетательная.

Воздух нагнетается под колосниковую решётку вентилятором или специальным паструйным прибором. В поддувале благодаря действию дутьевого аппарата создается давление воздуха, достаточное для преодоления сопротивления колосниковой решётки и слоя топлива.

Дутьё регулируется так, чтобы давление в топочном пространстве во время нормальной работы топки было приблизительно равно атмосферному. Сопротивление газового тракта преодолевается обычно в этом случае за счёт естественной тяги, создаваемой дымовой трубой, т. е. разностью давлений в топке — дымнике (рис. 29, схема 1).

2. Вытяжная (эжекторная). Продукты сгорания отсасываются из топки и протягиваются по газовому тракту), установленного в собственной тяги давление не и по всему газовому счёт эжекции струи пар трубе и увлекающего по тракту увеличивается в схема II).

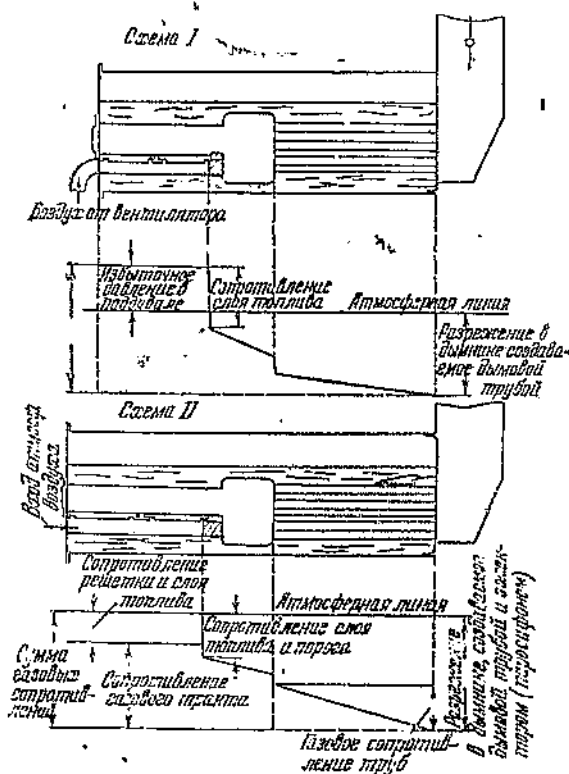


Рис. 29. Графическое изображение сопротивления топки и газового тракта котла:
I — топка, с нагнетанием воздуха под колосниковую решётку вентилятором; II — топка без дутья.

3. Комбинированная, или так называемая уравновешенная тяга. Этот тип тяги представляет собою комбинацию искусственного дутья под решётку с отсасыванием продуктов сгорания из дымохода эжектором или дымососом.

§ 7. ПАРОСТРУЙНАЯ ВЫТЯЖНАЯ УСТАНОВКА (СИФОН)

Паровой сифон, устанавливаемый в дымовой трубе, является наиболее простым по конструкции, но крайне неэкономичным аппаратом для искусственного создания тяги.

По опытным данным, на эжекцию газов расходуется с помощью паросифона до 12% пара, вырабатываемого котлом.

Все устройство состоит обычно из одного парового сопла типа Лаваля (расширяющегося), к которому подводится пар из котла и диффузора. Для правильной работы аппарата особенно важно размещение сопла точно по оси диффузора.

Широкое применение на речных судах паросифон получил при сжигании дров в котлах без вентиляционного дутья. Общим разрежением, создаваемым в таких установках сифоном и дымовой трубой, преодолевается как сопротивление топки, так и газового тракта котла.

При сжигании мазута сифоны, как правило, не устанавливаются, так как разрежение, создаваемое трубой, оказывается обычно достаточным для практически применяемых на речных судах форсировок работы мазутных топок.

При сжигании каменных углей и антрацита искусственная паросифонная тяга может быть применена в комбинации с дутьём, в виде так называемой уравновешенной тяги, в установках, где требуется большая форсировка топочного устройства. При уравновешенной тяге подпор, создаваемый в зольнике дутьёвым устройством, расходуется на преодоление сопротивления колосниковой решётки, шлаковой подушки и слоя топлива. Остальные сопротивления в котле преодолеваются за счёт разрежения, создаваемого сифоном и дымовой трубой. При такой системе давление газов в топочном пространстве равно атмосферному или незначительно меньше его. Однако в большинстве случаев и при сжигании антрацита оказывается возможным обойтись без сифона. Сопротивление слоя топлива при этом преодолевается с помощью дутья под колосниковую решётку, сопротивление же газового тракта почти целиком преодолевается за счёт естественной тяги. При этом давление в топочном пространстве бывает равно атмосферному или несколько больше его.

По конструкции паросифонные вытяжные аппараты различают так: аппараты с диффузором, занимающим только часть поперечного сечения дымовой трубы, и аппараты, заполняющие всё поперечное сечение трубы (см. рис. 30 и 32). В первом случае при работе сифона часть газов, увлекаемых струей пара, выходящей из сопла, проходит через диффузор, а часть проходит по кольцевому пространству между дымовой трубой и диффузором. Во втором случае все газы проходят через горло диффузора.

В 1943 году Московским отделением ЦНИИРФ разработана конструкция сифонов с цилиндрической вставкой (стабилизирующей трубой) вместо расширяющегося диффузора.

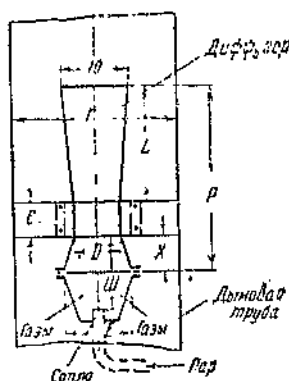


Рис. 30. Схема расположения диффузора и сопла в дымовой трубе по проекту Верхне-Волжского пароходства.

Паровытяжное устройство занимает только часть сечения трубы; газы могут проходить через диффузор, и по кольцевому пространству между трубой и диффузором.

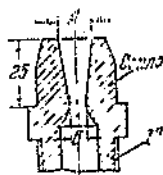


Рис. 31. Сопло к паросифонному устройству по рис. 30.

Результаты испытаний этих устройств, проведенных Горьковским институтом инженеров водного транспорта в 1943 году, показали, что применение стабилизирующей трубы взамен кольцевых сифонов или сифонов с коническими диффузорами уменьшает расход пара на создание тяги и даёт возможность получить более сильную тягу.

В таблице 132 даны размеры диффузоров и сопел для паросифонного вытяжного аппарата по проекту Верхне-Волжского пароходства, применяемые при работе речных котлов на дровах и угле (рис. 30 и 31).

В таблице 133 даны размеры сопел и диффузоров другого типа, применяемых на судах Волжского флота (все газы проходят через диффузор). Схемы диффузора и сопла этого типа даны на рис. 32 и 33.

¹ Данные об устройстве и расчете этих сифонов см. в брошюре «Инструктивные указания по расчёту, монтажу и эксплуатации пароструйных тяговых устройств». «Речиздат». 1944 год.

Таблица 132

Размеры диффузоров и сифонов по проекту Верхне-Волжского пароходства при работе котлов на дровах

Размеры диффузора и сопла	Типы диффузоров			
	I	II	III	IV
	диаметр дымовой трубы 700—800 мм	диаметр дымовой трубы 800—1000 мм	диаметр дымовой трубы 1000—1200 мм	диаметр дымовой трубы 1200—1400 мм
Диффузор E	315	355	435	515
D	220	250	305	360
Ю	320	360	440	520
L	750	840	1050	1220
C	115	130	160	190
X	190	210	260	310
P	1055	1180	1470	1720
III	240	270	330	390
Паровая форсунка A	9	10	11	12
B	6	6,5	7,5	8,5
Длина сопла l	24,0	28,0	28,0	28,0

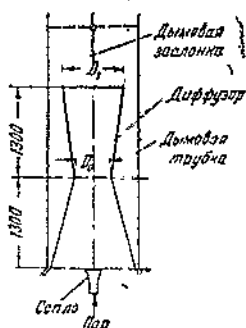


Рис. 32. Схема расположения диффузора, занимающего всё сечение дымовой трубы.

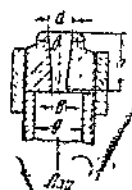


Рис. 33. Сопло к паросифонному устройству по рис. 32.

Таблица 133

Размеры сопла и диффузора в зависимости от мощности машины парохода

Мощность машины в и. л. с.	Диаметр узкого места диффузора D_0 , мм	Диаметр выходного отверстия диффузора D_1 , мм	Расстояние от устья сопла до горла диффузора в мм	Размеры сопла				
				a	b	в	д	h
				мм	мм	мм	дюйм	мм
До 100	350	490	1300	7,5	4,5	20	3/4	25
100—200	500	640		10,0	6,0	20	3/4	30
200—300	600	740		11,0	7,0	20	3/4	30
300—500	700	845		12,5	8,0	20	3/4	35
500—750	785	930		16,5	10,5	20	1,0	45

§ 8. ПАРОВОЕ ДУТЬЕ ПОД КОЛОСНИКОВУЮ РЕШЕТКУ

Подача в топку воздуха, необходимого для горения, и создание в поддувале давления, достаточного для преодоления сопротивления колосниковой решетки и слоя топлива, с помощью пароструйных дутьевых аппаратов широко применяется на речных судах при сжигании каменноугольного топлива. Особенно широкое применение паровое дутье получило при сжигании антрацита, так как подача водяного пара вместе с воздухом под решетку способствует как охлаждению колосниковой решетки (которая легко перегревается вследствие высокой температуры слоя горящего антрацита), так и разрыхлению накапливающихся на решетке шлаков.

Пароструйные дутьевые аппараты представляют собою хотя и несложную, но тоже неэкономичную дутьевую установку, так как практика показывает, что на действие парового дутья на речных судах расходуется 8—10% пара, производимого котлом. Этот пар смешивается с воздухом, подаваемым в топку, и поэтому является для паросиловой установки невосвратно потерянным.

Пароструйное дутьевое устройство может быть осуществлено либо с помощью группы диффузоров малого размера, располагаемых непосредственно в поддувале топки, либо с помощью одного диффузора большого размера, вынесенного за пределы топки (выносной диффузор) и установленного горизонтально или вертикально.

При топках малого диаметра применение групповых диффузоров затрудняется. Кроме того, выносные диффузоры имеют, как это показывает практика, некоторые преимущества и в отношении расхода пара.

Для антрацитовых топок быв. Стандартоводом Наркомвода разработаны выносные дутьевые аппараты с одним соплом на каждый диффузор. Размеры сопла и диффузора выработаны для различных диаметров жаровых труб и для различной паропроизводительности дутьевого аппарата. При расчете основных размеров аппарата подпор в поддувале принят в 60 мм водяного столба. Давление пара перед соплом — 5 атм. Рабочее давление пара перед дутьевым аппаратом практически обычно более 6 атм. Выбор указанного расчетного давления пара перед соплом обусловлен необходимостью создать достаточный резерв форсирования дутьевого устройства на случай зашлакования решетки и т. д.

Основные размеры выносных дутьевых аппаратов типа Стандартовода даны в таблице 134 (см. рис. 34).

В 1940 году Днепровским пароходством разработаны выносные пародутьевые аппараты с диффузорами квадратного сечения, пар к которым подводится через группу сопел (обычно устанавливается 4 сопла), вставляемых в раструб диффузора. Практика применения на судах Днепровского пароходства дутьевых аппаратов квадратного сечения с группой сопел показала, что преимуществами их перед другими типами дутьевых аппаратов являются экономия в расходе пара и малый шум, создаваемый дутьевым

Размеры выносных диффузоров и сопел по проекту Стандарта

Диаметр топок огнетрубных котлов	Расчётная производи- тельность аппарата в м³/час	Размеры сопла в мм				Размеры диффузора в мм			
		d_1	d_2	l	L_{ϕ}	D	$D_1=D_2$	L	L_1
До 500 мм	2000,0	8,9	11,6	27,0	843—438 (миним. максим.)	145	240	1060	$L_1 = 0,25L$
750 — 950 мм	3000,0	10,7	13,9	32,0	415—530	175	315	1280	$L_1 = 0,25 L$
Выше 950 мм	4000,0	12,7	16,5	38,0	473—604	200	360	1520	$L_1 = 0,25 L$

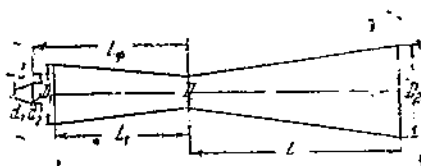


Рис. 34. Основные размеры сопла и выносного диффузора для парового дутья (к таблице 134).

аппаратом при работе, что улучшает условия труда обслуживающего персонала в котельной.

Разработано два типа пародутьевых аппаратов с квадратными диффузорами для установки их на судах при сжигании антрацита. Производительность их указана в таблице 135, а основные размеры диффузоров — в таблице 136 (рис. 35). На каждую топку устанавливается один аппарат.

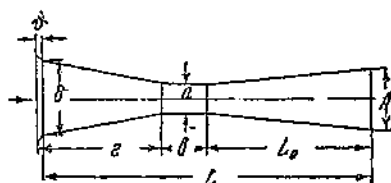


Рис. 35. Основные размеры выносных пародутьевых аппаратов квадратного сечения (к таблице 136).

При конструировании указанных аппаратов принято: подпор (давление в поддувале), создаваемый аппаратом, равным 30 мм вод. столба; количество воздуха, необходимого для горения 1 кг антрацита, — 14 м³/кг; рабочее давление пара, подаваемого к соплу, — 5 кг/см².

Таблица 135

Производительность дутьевых аппаратов, предложенных Днепровским пароходством

Площадь колосниковой решетки одной топки в м ²	Максимально необходимая производительность аппарата в м ³ /час	Максимальный часовой расход пара на дутьё в кг/час
До 1,7	2400	120
1,7—2,0	3000	152

Таблица 136

Основные размеры квадратных диффузоров многосопловых пародутьевых аппаратов Днепровского пароходства

Производительность в м ³ /час	a	A	b	в	г	д	L ₀	~ L
2400	120	290	150	120	225	75	1700	2150
3000	130	320	160	130	295	75	1900	2400

Размеры сопел многосопловых дутьевых аппаратов Днепровского пароходства указаны в таблице 137. К каждому диффузору должна устанавливаться группа сопел (4 сопла) с размерами, указанными в этой таблице.

Таблица 137

Размеры сопел многосоплового дутьевого аппарата Днепровского пароходства

Производительность аппарата до	Размеры сопел в мм		
	диаметр при входе	диаметр при выходе	длина сопла
2400 м ³ воздуха в час	2,5	3,5	9
3000 м ³ воздуха в час	3	4	9

Установка группы сопел к квадратному диффузору дана на рис. 36.

§ 9. ВЕНТИЛЯТОРНОЕ ДУТЬЕ

При воздушном дутье необходимый для горения воздух подаётся в зольниковое пространство топки под давлением, достаточным для преодоления сопротивления слоя топлива, с помощью вентилятора, приводимого в движение специальной вспомогательной паровой машиной или электромотором. Передача движения к вентилятору осуществляется ремнем или через редуктор. Практика показывает, что вентиляторное дутьё, требующее, правда, более сложного оборудования, является значительно более экономичным, чем паровое. Расход тепла на воздушное дутьё оказывается в 5—8 раз меньше, чем расход на паровое дутьё, так как при последнем тепло отработавшего пара не может быть использовано, тогда как при воздушном дутье отработавший пар движка вентилятора может быть использован на предварительный подогрев питательной воды (в подогревателях смешивающего или поверхностного типа). Снижая расход тепла на собственные нужды котла, вентиляторное дутьё позволяет, при сохранении полезной паропроизводительности котла, работать с меньшими форсировками топок, что вызывает снижение связанных с форсировкой дополнительных потерь тепла (уменьшение потери с уносом и с отходящими газами). На речных судах вентиляторное дутьё получило широкое применение при сжигании каменных углей. Что касается антрацита, то прак-

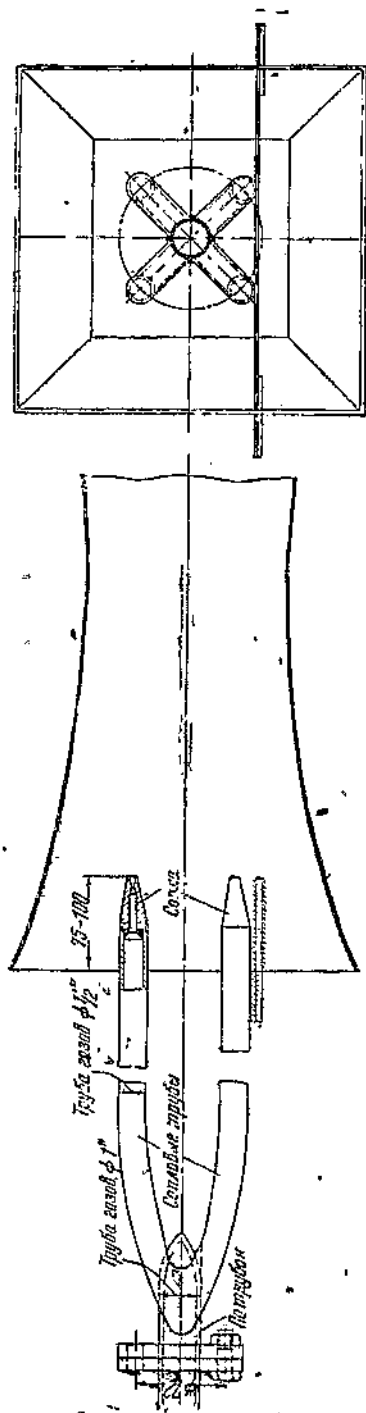


Рис. 36. Установка группы сопел к квадратному выносному диффузору пародутьевой установки.

тика показала, что, несмотря на все преимущества вентиляторного дутья, непрерывная работа антрацитовой топки только на воздушном дутье оказывается невозможной, так как колосниковая решётка при этом сильно перегревается, температура горящего слоя повышается, воздушные каналы решётки заплывают шлаками, сопротивление решётки резко возрастает. Вследствие этого в случае сжигания антрацита при подаче вентилятором воздуха под решётку необходимо производить подпаривание, т. е. подавать в продувало либо острый пар от котла, либо отработавший пар от пародвигка вентилятора.

Подбор вентиляторов для воздушного дутья. Для воздушного дутья под колосниковую решётку при статическом напоре воздуха в 30—80 мм вод. столба на речных судах обычно применяются центробежные вентиляторы типа «Сирокко», нагнетательные, низкого давления.

При выборе для данной конкретной установки соответствующего номера вентилятора из каталогов заводов-изготовителей необходимы следующие данные:

- 1) необходимая производительность в м³/час,
- 2) необходимый статический напор в мм водяного столба,
- 3) род проектируемого привода вентилятора (ременная передача или редуктор).

Необходимая производительность вентиляторов при действительной температуре воздуха определяется по формуле:

$$Q = 1,2 \cdot BV_0 \frac{273 + t}{273} \text{ м}^3/\text{час}, \quad (169)$$

где: B — количество сжигаемого топлива в кг/час,

V_0 — действительное количество воздуха, подаваемое в топку на 1 кг топлива, в м³/час,

1,2 — коэффициент запаса производительности на форсировку работы топки и утечки в воздухопроводе,

$\frac{273 + t}{273}$ — температурная поправка к объёму воздуха V_0 , взятого при 0° С.

Статический напор определяется из расчёта преодоления сопротивлений на пути воздуха, от вентилятора до колосниковой решётки и сопротивления самого слоя топлива.

Необходимый статический напор зависит главным образом от сопротивления решётки и, следовательно, от величины $\frac{B}{R}$ для данного вида топлива.

Обычно выбирают:

$H_{ст} = S_T + (15 + 20 \text{ мм водяного столба})$, для возможности форсировки.

S_T мм вод. столба — сопротивление слоя.

Необходимая мощность на валу вентилятора может быть подсчитана по формуле:

$$N_{\text{вент}} = \frac{Q \cdot H_{\text{ст}}}{3600 \cdot 75 \cdot \eta_{\text{вент}}} \text{ и. л. с.}, \quad (170)$$

где: Q — производительность вентилятора в м³/час,
 $H_{\text{ст}}$ — напор вентилятора в мм вод. столба,
 $\eta_{\text{вент}}$ — коэффициент полезного действия вентилятора.

В таблицах 138, 139, 140, 141, 142 приведены данные о производительности, числе оборотов и потребной мощности вентиляторов Сирокко низкого давления, наиболее употребительных номеров.

Подбор вентиляторов дутьевой установки производят следующим образом: найдя необходимую производительность и напор вентилятора, по таблицам выбирают вентилятор и находят соответствующие данной производительности и напору число оборотов и мощность на валу вентилятора.

Чтобы получить потребную для привода вентилятора мощность парового движка в индикаторных лошадиных силах, следует табличную мощность для выбранного типа вентилятора разделить на к. п. д. передачи, механический к. п. д. движка и увеличить мощность на 10%, чтобы иметь запас мощности. Следовательно, формула для определения мощности пародвижка будет:

$$N_{\text{дв}} = 1,1 \frac{N_{\text{вент}}}{\eta_{\text{пер}} \cdot \eta_{\text{мех}}} \text{ и. л. с.}, \quad (171)$$

где: $\eta_{\text{пер}}$ — к. п. д. ременной передачи,
 $\eta_{\text{мех}}$ — механический к. п. д. движка.

Если по условиям передачи фактическое число оборотов, с которым должен работать выбранный вентилятор, будет отличаться от указанного в таблице, следует пересчитать число оборотов и напор. Производительность и напор вентилятора при изменении числа оборотов подсчитываются по формулам:

$$Q = \frac{Q_1 n_1}{n}, \quad (172)$$

$$H = \left(\frac{n}{n_1} \right)^2 H_1, \quad (173)$$

где: Q_1 и H_1 — производительность и напор вентилятора при числе оборотов n_1 ,

Q и H — производительность и напор при новом числе оборотов n .

Значения коэффициентов полезного действия при выборе вентилятора и определении потребной мощности движка принимаются:

к. п. д. вентилятора $\eta_{\text{вент}} = 0,55$,

к. п. д. ременной передачи $\eta_{\text{пер}} = 0,9 \div 0,93$,

к. п. д. редуктора (среднего по качеству исполнения) $\eta_{\text{ред}} = 0,9 \div 0,85$,

к. п. д. пародвижка (механический) $\eta_{\text{дв}} 0,8 \div 0,85$.

Таблица 138

Характеристика центробежного вентилятора Сирокко низкого давления № 2

Диаметр колеса 200 мм

C	H _{cm}	50		60		70		80		90		100	
		n	N	n	N	n	N	n	N	n	N	n	N
12	1110	2170	0,45	2340	0,50	2480	0,55	2620	0,65	2750	0,75	2850	0,85
14	1280	2230	0,55	2400	0,60	2550	0,70	2690	0,75	2850	0,80	3000	0,90
16	1470	2300	0,65	2470	0,75	2620	0,85	2760	0,95	2900	1,10	3050	1,20
18	1650	2380	0,80	2550	0,80	2700	1,00	2840	1,10	3000	1,20	3150	1,30
20	1830	2520	1,05	2660	1,05	2780	1,20	2920	1,30	3050	1,45	3200	1,50

Таблица 139

Характеристика центробежного вентилятора Сирокко низкого давления № 3

Диаметр колеса 300 мм

C	H _{cm}	50		60		70		80		90		100	
		n	N	n	N	n	N	n	N	n	N	n	N
12	2500	1450	1,00	1560	1,10	1660	1,30	1750	1,45	1850	1,50	2000	1,6
14	2900	1490	1,20	1600	1,35	1700	1,55	1800	1,75	1900	1,85	2050	1,9
16	3320	1530	1,45	1640	1,65	1750	1,90	1840	2,10	1950	2,30	2100	2,5
18	3750	1590	1,80	1700	2,00	1800	2,25	1890	2,50	2000	2,75	2150	2,9
20	4150	1630	2,35	1770	2,40	1860	2,65	1950	2,90	2100	3,20	2200	3,5

Характеристика центробежного вентилятора Сирокко низкого давления № 4

Диаметр колеса 400 мм

C	50		60		70		80		90		100	
	H_{cm}	Q	n	N	n	N	n	N	n	N	n	N
12	4320	1035	1120	1,95	1190	2,20	1270	2,45	1350	2,75	1430	3,0
14	5040	1070	1150	2,40	1225	2,75	1295	3,05	1375	3,30	1450	3,5
16	5760	1105	1180	2,95	1250	3,25	1325	3,65	1400	3,90	1475	4,2
18	6480	1150	1230	3,10	1290	3,90	1360	4,35	1430	4,70	1500	5,2
20	7200	1190	1265	3,75	1330	4,60	1400	5,10	1475	5,60	1550	6,2

Характеристика центробежного вентилятора Сирокко низкого давления № 5

Диаметр колеса 500 мм

C	50		60		70		80		90		100	
	H_{cm}	Q	n	N	n	N	n	N	n	N	n	N
12	6900	820	895	2,75	960	3,10	1030	3,50	1100	4,0	1175	4,4
14	8050	835	905	3,30	970	3,80	1050	4,25	1125	4,7	1200	5,2
16	9210	855	915	4,00	985	4,55	1070	5,15	1150	5,6	1230	6,3
18	10370	855	940	4,95	1005	5,50	1100	6,10	1180	6,7	1260	7,3
20	11520	925	980	6,30	1050	6,50	1130	7,15	1210	7,6	1300	8,0

Обозначения к таблицам 138—141:

 G — выходящая скорость воздуха в м/сек., H_{cm} — статический напор в мм вод. столба, n — потребное число оборотов, N — потребляемая мощность на валу вентилятора, Q — производительность в м³/час.

Центробежные вентиляторы Сирокко малой производительности
(завода „Красная Пресня“)

Номер	Диаметр колеса и размеры выходного патрубка в мм	Скорость в выходном патрубке в м/сек.	Производительность в м ³ /час	Статический напор в мм вод. столба					
				20		30		40	
				n	N	n	N	n	N
2	200 160×160	12	1100	1560	0,21	1740	0,28	1950	0,36
		14	1290	1690	0,31	1860	0,37	2040	0,45
		16	1470	1860	0,44	1980	0,50	2130	0,57
		18	1650	2040	0,64	2100	0,68	2250	0,73
		20	1830	2190	0,80	2250	0,98	2400	1,02
3	300 240×240	12	2500	1040	0,48	1160	0,63	1300	0,81
		14	2900	1130	0,69	1240	0,83	1350	1,00
		16	3320	1240	0,98	1320	1,12	1420	1,28
		18	3750	1360	1,45	1400	1,54	1500	1,64
		20	4150	1460	1,80	1500	2,20	1600	2,30
4	400 320×320	12	4320	725	0,87	850	1,11	960	1,45
		14	5040	775	1,13	880	1,43	980	1,73
		16	5760	830	1,45	920	1,81	1025	2,12
		18	6480	890	1,86	970	2,2	1075	2,70
		20	7200	950	2,36	1040	2,82	1125	3,30
5	500 400×400	12	6900	580	1,12	670	1,40	740	1,85
		14	8060	620	1,32	700	1,73	765	2,20
		16	9210	660	1,75	735	2,15	795	2,67
		18	10370	710	2,05	770	2,90	830	3,40
		20	11520	750	3,20	820	3,90	870	4,50

ХІХ. ПОДОГРЕВ ПИТАТЕЛЬНОЙ ВОДЫ ПАРОВЫХ КОТЛОВ ОТРАБОТАВШИМ ПАРОМ

§ 1. ЗНАЧЕНИЕ ПОДОГРЕВА ПИТАТЕЛЬНОЙ ВОДЫ

Подогрев поступающей в котёл воды за счёт тепла отработавшего пара вспомогательных механизмов является наиболее распространённым методом подогрева питательной воды на речных судах. Для нагревания воды используется: пар осветительной пародинамо, пар от рулевой машины (пароштурвала), паровой машины вентиляторно-дутьевой установки и т. д.

Подогрев питательной воды является эффективным средством повышения коэффициента полезного действия речных паросиловых установок и сокращает расход топлива на 5—8% и выше, в зависимости от мощности установки, количества имеющегося отработавшего пара, режима работы механизмов и т. д. Подогрев питательной воды снижает форсировку работы котлов, так как чем выше теплосодержание воды, поступающей в котлы, тем меньше тепла должно быть затрачено в самом котле на получение 1 кг пара и тем меньше может быть тепловое напряжение поверхности нагрева при заданной паропроизводительности котла.

Кроме того, при повышении температуры питательной воды уменьшаются температурные напряжения металла котлов, что способствует удлинению срока их службы.

Наконец, подогрев питательной воды при применении подогревателей смешения способствует деаэрации, т. е. освобождает воду от растворённых в ней газов — кислорода и углекислоты.

§ 2. ТИПЫ ВОДОПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ

Для использования тепла отработавшего пара на речных судах применяются: 1) подогреватели смешения и 2) поверхностные подогреватели (трубчатые).

Подогрев питательной воды методом смешения воды, подаваемой из мокровоздушного насоса, с отработавшим паром может производиться либо непосредственно в так называемых тёплых ящиках, в которых также производятся отстой и фильтрация воды при атмосферном давлении, либо в специальных смешивающих (эжекционных) подогревателях типа Фокина и др., в которых в процессе работы создается давление несколько выше атмосферного за счёт работы пароструйного эжектора или специального насоса. Подогреватели смешения включаются в питательную линию до питательного насоса. Подогретая вода из тёплого ящика подогревателя подаётся к питательному насосу и нагнетается последним в котёл.

В поверхностных подогревателях теплообмен между отработавшим паром и питательной водой происходит через стенки латунных, медных или стальных труб. Как правило, вода протекает по трубам, а пар омывает трубы снаружи и, отдавая свою теплоту нагреваемой воде, конденсируется. Трубчатые подогреватели устанавливаются на питательной линии после питательных насосов (т. е. между насосом и котлом); поэтому вода в них находится

Сравнение типов подогревателей

Поверхностные подогреватели		Смешивающие подогреватели	
преимущества	недостатки	преимущества	недостатки
1. При наличии достаточного количества пара обеспечивают выскокой подогрев воды 2. Не загрязняют питательную воду маслом, поступающим в подогреватель вместе с паром из вспомогательных механизмов	1. Высокая стоимость 2. Необходимость применения дефицитных латунных трубок. (В последнее время применяются трубки из медистой стали.) 3. Расстройство мест соединения трубок с трубными решетками и соединений крышек вследствие работы подогревателей под давлением и вследствие изменения температурного режима подогревателя в эксплуатации 4. Худшее использование тепла отработавшего пара в сравнении со смешивающими подогревателями, так как пар из поверхностного подогревателя обычно уходит за борт и полностью сконденсированным (часть скрытой теплоты паробразованья не используется). Полное использование тепла отработавшего пара при всех режимах работы вспомогательных механизмов и главной машины имеет место тогда, когда исходящая из подогревателя смесь пара с водой направляется из поверхностного подогревателя в теплый ящик, где и используется на подогрев воды по методу смешения, но это влетит за собой дополнительное загрязнение питательной воды маслом	1. Меньшая стоимость установки 2. Нет необходимости дефицитных материалов 3. Более полное использование тепла отработавшего пара	1. Загрязнение питательной воды маслом 2. При использовании теплых ящиков в качестве смешивающих подогревателей, вне зависимости от количества отработавшего пара, май подогрев питательной воды, так как при температуре 60—65°С при нахождении воды под атмосферным давлением насосы перестают всасывать воду из теплового ящика (возможен срыв работы питательных насосов или «запаривание» их) 3. В смешивающих подогревателях, работающих при повышенном давлении 1,5—2 ата, при наличии достаточного количества пара возможен подогрев до 110—120°С и выше, но стоимость подогревательной установки увеличивается и усложняется уход за ней, так как требуется применение дополнительного насоса для создания давления в подогревателе

под давлением несколько большим, чем в котле, а в паровой полости подогревателя, в зависимости от режима работы и количества поступающего пара, избыточное давление составляет обычно 0,5—1,5 кг/см².

§ 3. ТЕМПЕРАТУРА ПИТАТЕЛЬНОЙ ВОДЫ ПРИ ВЫХОДЕ ИЗ ПОДОГРЕВАТЕЛЯ

При смешивающих подогревателях температура питательной воды после подогрева определяется приближённо из уравнения:

$$\frac{D \cdot t_2}{\text{Тепло воды, выходящей из подогревателя}} = \frac{D_g \cdot t_1}{\text{Тепло воды, входящей в подогреватель}} + \frac{D_n \cdot i_n}{\text{Тепло пара, поступающего в подогреватель}}$$

Отсюда:

$$t_2 = \frac{D_g \cdot t_1 + D_n \cdot i_n}{D}, \quad (174)$$

где: D — общий расход пара на главную машину, вспомогательные механизмы и собственные нужды в кг/час,

D_g — количество воды, поступающей в подогреватель из мокровоздушного насоса, в кг/час,

D_n — количество греющего пара в кг/час,

t_1 — температура воды, поступающей в подогреватель,

i_n — теплосодержание отработавшего пара в кал/кг (приближенно $i_n = 600$ кал/кг).

При подогреве воды в поверхностном подогревателе температура выходящей из подогревателя воды определяется по формуле:

$$t_2 = \frac{D \cdot t_1 + D_n (i_n - t_1) \gamma_n}{D}, \quad (174')$$

Здесь, кроме обозначений, указанных выше, γ_n — коэффициент использования пара в подогревателе:

$$\gamma_n = \frac{D_n (i_n - i_{\text{вых}})}{D_n (i_n - t_1)}, \quad (175)$$

где $i_{\text{вых}}$ — теплосодержание смеси конденсата с паром, выходящим из поверхностного подогревателя, в кал/кг.

Коэффициент использования тепла пара в подогревателе, по опытным данным, колеблется в пределах 0,7—0,9 и зависит при данной поверхности нагрева подогревателя от режима его работы и количества греющего пара.

Практика показывает, что при работе правильно рассчитанного поверхностного подогревателя и при условии использования пара только от паростурвала, давление в подогревателе бывает около 0,5—1 ати, утечка пара за борт незначительна, коэффициент использования пара в подогревателе может быть принят 0,85—0,9. При поступлении в подогреватель большого количества пара (что имеет место в ночное время, когда работает пародинамо) давление в перегревателе возрастает. Во избежание значительного повышения противодавления, что отражается на работе вспомогательных механизмов, следует увеличивать открытие вентиля на

спускной (заборной) линии подогревателя, причём пар удаляется из подогревателя полностью сконденсировавшимся. При этом коэффициент использования тепла отработавшего пара в подогревателе падает, составляя ориентировочно 0,7—0,8.

Для определения температуры воды после подогрева нужно знать количество подогреваемой воды и количество греющего пара. Количество нагреваемой воды определяется по потребной паропроизводительности котельной установки, соответствующей работе главной машины судна полной мощностью.

Количество греющего пара зависит от количества работающих на подогреватель вспомогательных механизмов, режима работы, мощности установленных механизмов, удельного расхода пара в них и т. д.

Количество нагреваемой в подогревателе воды равно:

$$D = D_{\text{маш}} + D_{\text{в.м}} + D_{\text{соб. нуж}} \text{ кг/час,}$$

где: $D_{\text{маш}}$ — расход пара на главную машину,

$D_{\text{в.м}}$ — расход пара на вспомогательные механизмы (пародинамо, паростурвал, паровая машина вентиляторного дутья),

$D_{\text{соб. нуж}}$ — расход пара на собственные нужды котла и бытовые нужды по судну.

Для оценки расхода пара на вспомогательные механизмы можно воспользоваться данными, приведёнными (в зависимости от мощности и типа судна) в таблицах 92, 93, 34.

Расход пара на главную машину подсчитывается по формуле:

$$D_{\text{м}} = d_i \cdot N_i \text{ кг/час,} \quad (176)$$

где d_i — удельный расход пара в кг/час на 1 и. л. с. главной машины.

В зависимости от типа машины и её мощности удельный расход пара может быть принят по таблице 143 (данные автора) или таблице 144 (данные доц. П. Г. Руфанова).

Таблица 143

Удельный расход пара на речные паровые машины

Типы машины	Мощность машины в и. л. с.	Давление пара P_1 кг/см ²	Удельный расход пара d_i кг/и. л. с. час
Двойного расширения с конденсацией при насыщенном паре . . .	200—800	8—12	9,7—8,1
Двойного расширения с конденсацией при перегретом паре $t = 280 \div 320^\circ \text{C}$	300—600	10—14	7,0—6,1
Тройного расширения с конденсацией при насыщенном паре . . .	400—1000	10—13	7,5—6,5
Тройного расширения с конденсацией при перегретом паре	400—1200	14,0	6,2—5,5

Примечание. Меньшие значения — для машин большей мощности, лучших конструкций и при работе с большим давлением и температурой перегрева пара.

Расход пара на главные машины речных колёсных пароходов, по данным доцента Ч. Г. Руфанова

Тип машины	Мощность в л. с.		
	150—300	300—700	700—1200
	Расход пара в кг на 1 л. с./час		
Машины лучших конструкций тройного расширения с перегретым паром до 300°С	—	6,0—7,0	5,2—6,0
Машины лучших конструкций тройного расширения на насыщенном паре	—	6,7—7,8	6,0—7,0
Обычные машины тройного расширения на насыщенном паре	—	7,2—8,2	6,7—8,0
Обычные машины тройного расширения на перегретом паре до 300°С	—	6,7—7,5	6,0—7,0
Машины компаунд лучших конструкций с перегретым паром до 300°С	6,5—8,0	6,2—7,2	5,4—6,2
Машины компаунд лучших конструкций на насыщенном паре	7,5—9,0	7,0—8,5	6,3—7,5
Обычные машины компаунд на перегретом паре до 300°С	7,0—8,5	6,7—8,0	6,2—7,2
Обычные паровые машины компаунд на насыщенном паре	8,0—10,0	7,7—9,0	7,1—8,5

Для ориентировочной оценки ожидаемой температуры питательной воды при подогреве воды отработавшим паром могут быть использованы также данные технического отдела Наркомречфлота по расходу пара на главную машину и основные вспомогательные механизмы-паропотребители, приведённые в таблице 145.

Подсчитанные по данным таблицы 145 конечные температуры питательной воды (после подогревателя) для установок различных мощностей приведены в таблице 146 (температура воды, поступающей в подогреватель, принята равной 35°С).

Как видно из этой таблицы, с увеличением мощности машины ожидаемый подогрев воды снижается, так как на судах большой мощности расход пара на вспомогательные механизмы относительно меньше, чем на судах малой мощности.

Таблица 145

Расход пара в зависимости от мощности машин, по данным технического отдела Наркомвсехфлота

Мощность машины	150	200	300	400	600	800	1200
Расход пара на главную машину в кг/час	1240	1640	2290	2960	4070	5170	7410
На паровой штурвал в кг/час	60	60	60	80	100	100	100
На пародинамо в кг/час	100	100	150	180	200	250	300
Общий расход пара	1400	1800	2500	3220	4370	5520	7870

Таблица 146

Температура питательной воды после подогрева в поверхностном подогревателе (Расход пара принят по данным таблицы 145)

Мощность в к. л. с.	150	200	300	400	600	800	1200
Днем (в подогреватель поступает пар только от параштурвала)	54	51	50	47	45	43	41
Ночью (в подогреватель поступает пар от параштурвала и пародинамо)	81	81	73	68	62	59	54

Указанные в таблице 146 значения температуры питательной воды следует рассматривать как ориентировочные. На многих судах при тех же мощностях главных машин, которые указаны в таблице 146, удаётся при наличии поверхностного подогревателя достигнуть значительно более высокой температуры питательной воды, особенно в ночное время (до 90—110°C и выше).

Чем выше температура питательной воды, поступающей в котёл, тем меньше тепла в самом котле приходится затрачивать на получение 1 кг пара заданного давления и температуры. Отношение теплосодержания 1 кг пара к теплу, сообщаемому 1 кг пара

в котле и перегревателе, называется коэффициентом возвращения тепла (коэффициентом регенерации)

$$K_{рег} = \frac{i}{i - t_n}, \quad (177)$$

где: i — теплосодержание пара в кал/кг,
 t_n — температура питательной воды.

Для речных паросиловых установок коэффициент K колеблется в пределах:

$$K_{рег} = 1,075 \div 1,18.$$

Основным методом повышения температуры питательной воды является возможно лучший предварительный подогрев её в сборном баке питательной воды (тёплом ящике) до поступления в поверхностный подогреватель за счёт исходящей из поверхностного подогревателя смеси пара с водой, направляемой в тёплый ящик и вводимой с помощью пароструйного аппарата (эжектора), а также за счёт использования в тёплом ящике исходящего тепла от парового отопления, кубов и т. д.

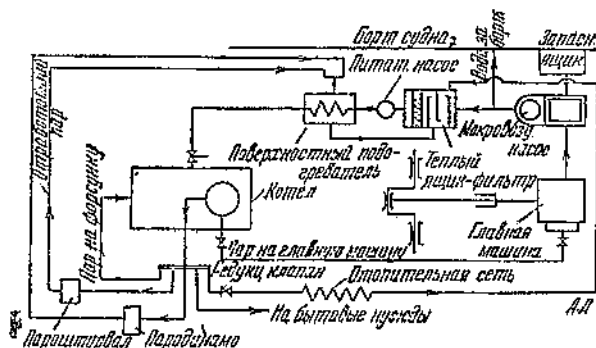


Рис. 37. Тепловая схема речной паросиловой установки с использованием отработавшего пара на подогрев питательной воды.

На рис. 37 дана принципиальная тепловая схема паросиловой установки речного парохода с подогревом питательной воды.

§ 4. ЭКОНОМИЯ ТЕПЛА В ПАРОСИЛОВОЙ УСТАНОВКЕ ОТ ПОДОГРЕВА ПИТАТЕЛЬНОЙ ВОДЫ

Для подсчёта прямой экономии от подогрева питательной воды отработавшим паром вспомогательных механизмов (экономии от утилизации исходящего тепла) следует пользоваться формулой:

$$\Delta \eta = \frac{(i - t'_2) - (i - t''_2)}{(i - t'_2)} 100\%, \quad (178)$$

где: i — теплосодержание пара, вырабатываемого котельной установкой, в кал/кг,

t'_2 — температура питательной воды при отсутствии подогрева,

t''_2 — температура питательной воды после установки подогревателя.

Если неизвестна температура питательной воды после подогревателя, то для оценки ожидаемой экономии от введения водоподогрева можно пользоваться также формулой:

$$\Delta\eta = \frac{D_n (t_n - t_1) \eta_n}{L (t - t_1)}, \quad (179)$$

где: D_n — количество греющего пара, поступающего в подогреватель, в кг/час,

i_n — теплосодержание греющего пара в кал/кг,

t_1 — температура воды по выходе из мокровоздушного насоса,

D — паропроизводительность котла в кг/час,

i — теплосодержание пара, вырабатываемого котельной установкой, в кал/кг,

η_n — коэффициент использования тепла пара на подогрев; можно принимать: $\eta_n = 0,8 \div 0,85$ — при использовании пара только в поверхностном подогревателе (смесь пара с водой из подогревателя выбрасывается за борт); $\eta_n = 0,9 \div 0,95$ — для смешивающих или поверхностных подогревателей при условии, что исходящая смесь пара с водой из корпуса поверхностного подогревателя используется в тёплом ящике по принципу подогрева смешением (замкнутый цикл).

Экономия топлива за счёт прямого использования отработавшего тепла для подогрева питательной воды паром вспомогательных механизмов можно ориентировочно оценивать по данным, приведённым в таблице 147.

Таблица 147

Экономия топлива в процентах от применения подогрева питательной воды

Начальная температура до подогрева	Температура питательной воды после подогрева в °C					
	50	60	70	80	90	100
35	2,5—2,1	3,5—4,0	5—5,5	6,5—7,5	8—9	9—10
45	0,7—0,8	2,1—2,5	3,5—4,0	5—5,5	6,5—7,5	8—9

Для грубой прикидочной оценки экономии топлива от применения подогрева воды отработавшим паром вспомогательных механизмов можно считать, что каждые 6—7° повышения температуры питательной воды дают примерно 1% экономии топлива.

Экономия топлива, получаемая в действительности от введения в цикл паросиловой установки подогрева питательной воды отработавшим паром вспомогательных механизмов, может быть и выше указанной, так как подача в котёл подогретой воды улучшает его работу, снижает требуемую форсировку, в результате чего к. п. д. котлов повышается. Это особенно относится к установкам, которые по своей конструкции или вследствие малой поверхности нагрева имеющих котлов работают с большими форсировками топок и поверхности нагрева. В таких установках при понижении форсировки вследствие подачи в котёл подогретой воды можно ожидать значительного повышения к. п. д. за счёт снижения потери тепла от неполноты горения и с уходящими газами при уменьшении форсировки работы.

§ 5. ВЫБОР ПОВЕРХНОСТИ НАГРЕВА ТРУБЧАТЫХ ПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ

Поверхность подогревателя нужно выбирать, исходя из условий поступления в подогреватель максимального количества греющего пара при работе машины полной мощностью так, чтобы и при этом режиме обеспечить возможно более полное использование тепла отработавшего пара.

Для определения требуемой для данной установки поверхности нагрева трубчатых подогревателей питательной воды пользуются формулой:

$$H_{\text{под}} = \frac{D(t_2 - t_1)}{K \cdot \Delta t} \text{ м}^2, \quad (180)$$

где: D — количество нагреваемой воды, проходящей через подогреватель, в кг/час,

t_1 — температура воды перед подогревателем,

t_2 — температура воды после подогревателя,

Δt — средняя разность температур между паром и водой в подогревателе.

Приближённо:

$$\Delta t = \left(t_n - \frac{t_1 + t_2}{2} \right), \quad (181)$$

где: t_n — температура пара в подогревателе (определяется по давлению в корпусе подогревателя). Обычно $t_n = 105 + 115^\circ \text{C}$.

Более точно разность температур между паром и водой в подогревателе определяется по формуле:

$$\Delta t = \frac{t_2 - t_1}{\ln \frac{t_n - t_1}{t_n - t_2}}. \quad (181')$$

Коэффициент теплопередачи в подогревателе определяется по следующей формуле в зависимости от скорости воды:

$$K = \xi \cdot 1700 \sqrt{w} \text{ кал/м}^2 \cdot \text{час}^\circ\text{C}, \quad (182)$$

где: w — скорость воды в трубках в м/сек.,

$\xi = 0,8 \div 0,85$ — коэффициент, учитывающий ухудшение теплопередачи вследствие загрязнения подогревателя.

Скорость воды в трубках подсчитывается по формуле:

$$w = \frac{D}{3600 \cdot 0,785 \left(\frac{d}{1000} \right)^2 \cdot n} \text{ м/сек.}, \quad (183)$$

где: D — количество воды, проходящей через подогреватель, в т/час,

d — внутренний диаметр труб в мм,

n — число трубок в одном ходе подогревателя,

$0,785 \left(\frac{d}{1000} \right)^2$ — площадь сечения одной трубки для прохода воды в м².

При проектировании нового подогревателя скорость воды в трубках принимается в $0,1 \div 0,25$ м/сек.

Размеры латунных труб для изготовления поверхностных подогревателей указаны в таблице 148.

Таблица 148

Латунные бесшовные трубы нормальных размеров

Наружный диаметр в мм	Внутренний диаметр в мм	Толщина стенок в мм	Вес 1 пог. м в кг
19	15	2	0,908
19	16	1,5	0,701
22	18	2,0	1,07
22	19	1,5	0,821
22	20	1,0	0,561
25	21	2,0	1,230
24	22	1,0	0,610

Тыловые поверхностные подогреватели питательной воды, рекомендуемые техническим отделом Наркомречфлота, по проекту Московского судоремонтного и судостроительного завода Наркомречфлота (1940 год) приведены в таблице 149.

Подогреватели — четырёхходовые, с одной подвижной трубной решёткой.

Типовые подогреватели по проекту экспериментального цеха Московского судоремонтного и судостроительного завода

Тип подогревателя	I	II	III	IV
Мощность судов в и.д.с.	200 и меньше	300—400	600—800	До 1200
Число ходов	4	4	4	4
Число труб в одном ходе	17	23	40	40
Расчётная пропускная способность подогревателя в м ³ /час	1,4	2,5	4,35	7,8
Расчётный коэффициент теплопередачи в кал/м ² · час · °С	580	680	680	970
Необходимая поверхность нагрева труб в м ²	3,66	5,88	9,68	12,2
Расчётная скорость воды в трубках в м/сек.	0,11	0,15	0,15	0,27
Длина между трубными решётками в мм	900	1000	1000	1300
Потребное количество в метрах труб $d=16/19$ мм для изготовления подогревателя	65,0	96,5	168,0	214,0

§ 6. СХЕМА РАСЧЕТА ПОВЕРХНОСТНОГО ВОДОПОДОГРЕВАТЕЛЯ

Данные	Обозначение	Размерность	Числовая величина
Количество нагреваемой питательной воды	D	кг/час	
Количество отработавшего пара, поступающего в подогреватель	D_n	кг/час	
Температура питательной воды, поступающей в подогреватель	t_1	°С	
Влажность отработавшего пара вспомогательных механизмов (принимается $x=0,95$)	x	—	
Давление греющего пара	P	кг/см ²	
Теплосодержание отработавшего пара по формуле $i=q+xr$	i_n	кал/кг	
Теплосодержание конденсата отработавшего пара, выходящего из подогревателя принимается 100—120 кал/кг	$i_{вх/к}$	кал, кг	

Рассчитываемые величины

Определяемая величина	Обозначение	Размерность	Расчётная формула	Числовое значение
Температура питательной воды после водоподогревателя	t_2	°C	$t_2 = t_1 + \frac{0,98(t_n - t_{вх.х})D_n}{D}$ 0,98 — коэффициент, учитывающий потерю тепла подогревателем в окружающую среду	
Температура греющего пара, поступающего в подогреватель	t_n	°C	Находится из таблиц сухого насыщенного пара по давлению в подогревателе	
Средняя разность температур в подогревателе	Δt	°C	$\Delta t = \frac{t_2 - t_1}{\ln \frac{t_n - t_1}{t_n - t_2}}$	
Скорость воды в трубках подогревателя	w	м/сек.	Принимается обычно в пределах 0,1—0,25 м/сек.	
Общий коэффициент теплопередачи от конденсирующегося пара к воде через трубки подогревателя	K	кал/м²·час·°C	$K = \xi \cdot 1700 \sqrt{w}$	
Поверхность нагрева подогревателя	$H_{под}$	м²	$H_{под} = \frac{D(t_2 - t_1)}{K \cdot \Delta t}$	
Число ходов подогревателя (число протоков)	z	—	Принимается обычно для судовых водоподогревателей: $z = 3 - 4$	

Определяемая величина	Обозначение	Размерность	Расчётная формула	Числовое значение
Площадь сечения труб в одном проточке, необходимая для получения принятой скорости воды в трубах	f	м ²	$f = \frac{D}{1000} \cdot 3600 \cdot w$	
Площадь сечения одной трубки для прохода воды	f_1	м ²	$f_1 = 0,785 \left(\frac{d_1}{1000} \right)^2$	
Необходимое число трубок для одного хода	n	шт.	$n = \frac{f}{f_1}$	
Общее число труб подогревателя	$n_{общ}$	шт.	$n_{общ} = n \cdot z$	(округляется до ближайшего большего числа)
Поверхность охлаждения 1 пог. м трубки	S	м ²	$S = \frac{\pi d_2}{1000}$	
Общая длина труб	l	м	$l = \frac{H_{под}}{S}$	
Необходимая активная длина одной трубки (расстояние между трубными решётками)	l_1	м	$l_1 = \frac{l}{n_{общ}}$	
Расстояние (шаг) между центрами трубок	t	мм	Определяется по эмпирическим формулам: $t = d_1 + 9 \text{ мм}$ (по Бауэру) или $t = d_2 + 6 \text{ мм}$	
Паровая нагрузка подогревателя	$\frac{D_n}{H_{под}}$	кг/м ² · час	—	

§ 7. КОНСТРУКЦИЯ ВОДОПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ

Конструкции основных типов водоподогревателей, применяющихся на речных судах, с указанием размеров даны на рис. 38—41. На рис. 38 дан смешивающий водоподогреватель с эжектором, а на рис. 39 — смешивающий водоподогреватель дождевого типа конструкции инж. Т. И. Фокина. На рис. 40 показан поверхностный подогреватель с двумя неподвижными трубными досками. На рис. 41 дан поверхностный водоподогреватель в изготовлении Московского судостроительного и судоремонтного завода.

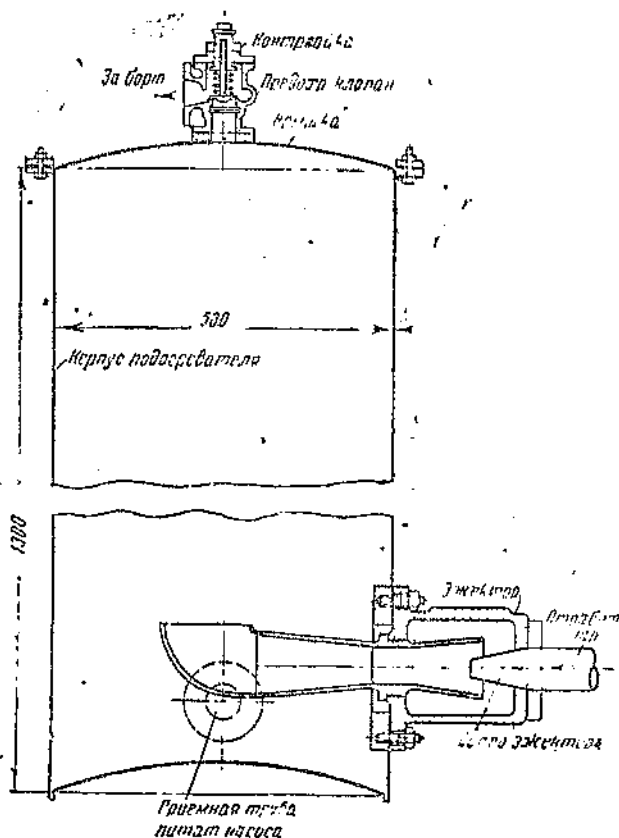
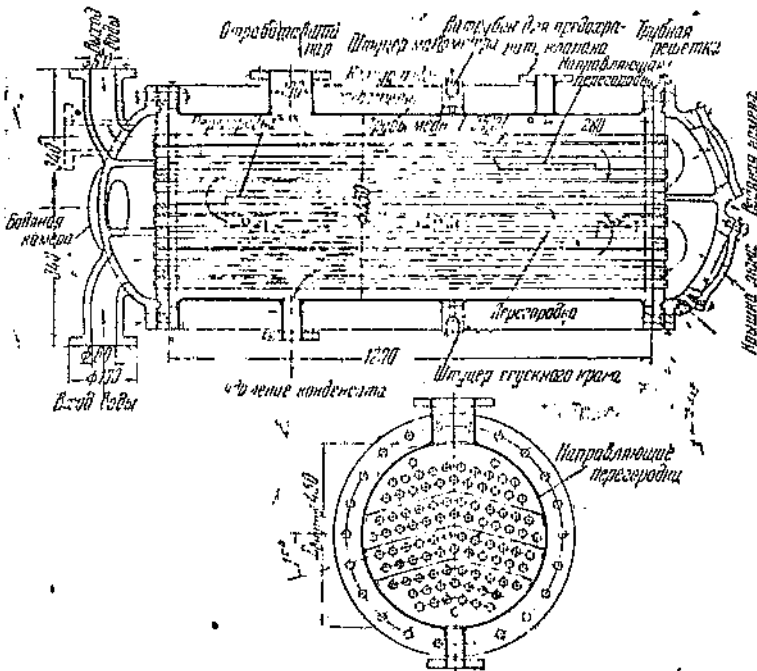


Рис. 38. Эжекционный водоподогреватель.

В таблице 150 указаны (применительно к данным таблицы 149) основные размеры для четырех типов водоподогревателей.

Основные размеры типовых водоподогревателей

Размеры	A	B	C	D	E
Тип I	1235	480	900	380	944
Тип II	1345	515	1000	415	1044
Тип III	1380	620	1000	500	1053
Тип IV	1680	620	1300	500	1353



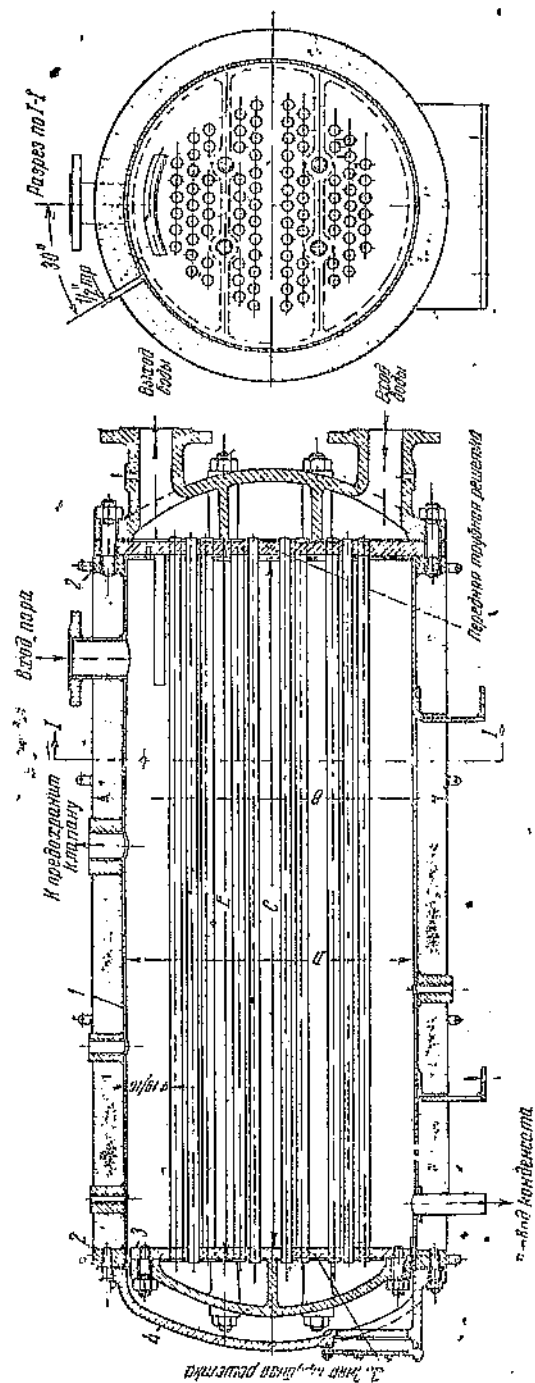


Рис. 41. Типовой поверхностный водоподогреватель конструкции экспериментального цеха Московского судоремонтного и судостроительного завода Наркомвсфлота:
 1 — корпус подогревателя; 2 — фланцы; 3 — подвижная трубная доска; 4 — крышка подогревателя.

- 2) манометр для контроля давления в паровой части подогревателя;
- 3) водомерное стекло для наблюдения за уровнем конденсата

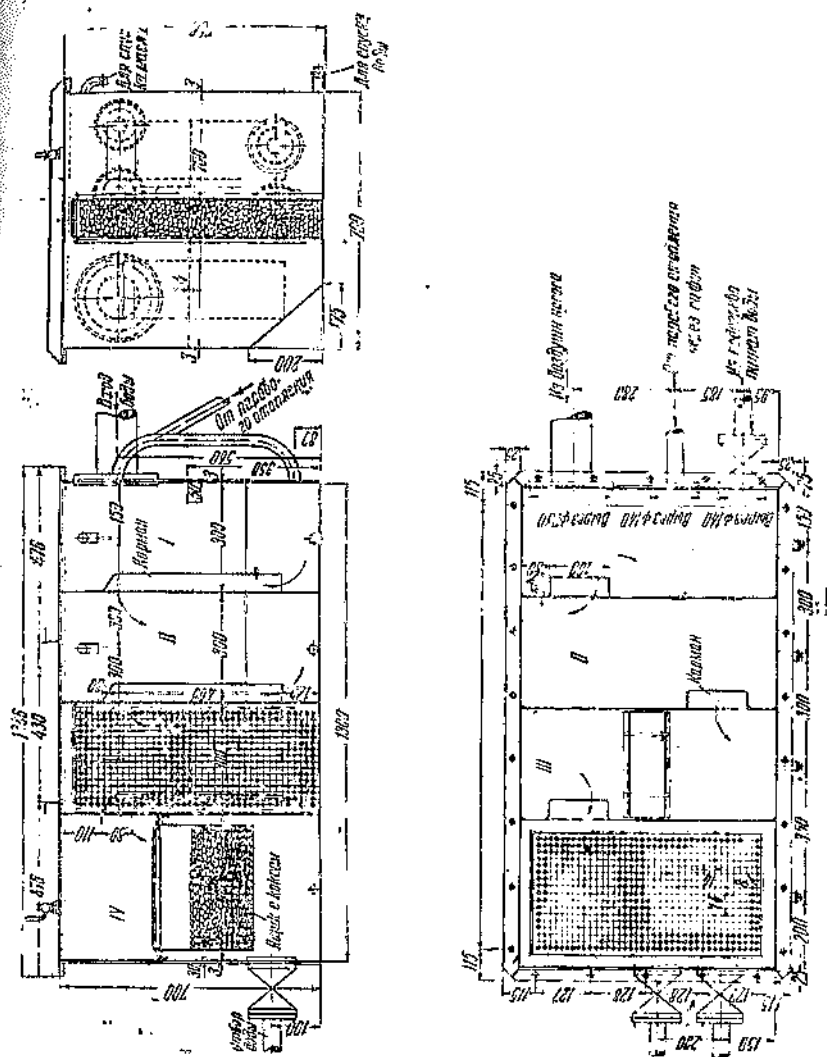


Рис 42. Тёплый ящик.

в подогревателе (уровень конденсата в подогревателе должен поддерживаться не выше нижних рядов труб);

4) воздушные краны водяного и парового пространства подогревателя (для выпуска воздуха).

Для контроля температуры воды должны быть также установлены термометры на питающей линии перед подогревателем и за ним.

§ 8. УХОД ЗА ТЕПЛЫМИ ЯЩИКАМИ И ВОДОПОДОГРЕВАТЕЛЯМИ

Тёплый ящик. 1. Для обеспечения исправной работы тёплого ящика уход за ним во время действия должен быть следующий:

а) необходимо наблюдать за уровнем воды в ящике;

б) если тёплый ящик служит также и подогревателем воды (т. е. в него попадает отработавший пар вспомогательных механизмов), необходимо контролировать температуру воды в ящике, не допуская повышения её сверх $60-65^{\circ}\text{C}$ во избежание срыва работы питательных насосов (чтобы насосы не запарились);

в) каждую вахту через верхние краники ящика следует спускать верхний слой воды для удаления скапливающегося на поверхности масла, попадающего в ящик из мокровоздушного насоса вместе с водой;

г) не реже одного раза в сутки следует выпускать из отсеков часть воды вместе с грязью и осадками через нижние сливные патрубки.

2. При остановке судна на промывку и чистку котлов следует осматривать ящик внутри и очищать его от грязи. Если ящик имеет фильтрующий слой из угля или кокса, то кокс следует промывать или заменять новым.

Поверхностный водоподогреватель. 1. Во время работы подогревателя необходимо:

а) наблюдать за давлением пара в подогревателе, не допуская его более $0,5-1$ атм. по манометру и, во всяком случае, не допуская повышения давления до того предела, при котором в данной установке нарушается нормальная работа вспомогательных механизмов (паровой машины, динамо, штурвальной машины) вследствие увеличения противодействия. При увеличении количества отработавшего пара, поступающего в подогреватель (например, в ночное время, когда увеличивается количество одновременно работающих вспомогательных механизмов), и, следовательно, при повышении в нём давления следует, в зависимости от схемы включения подогревателя, либо отводить часть пара вспомогательных механизмов из паросборной батареи прямо в тёплый ящик, либо увеличить открытие вентиля на спускной линии из подогревателя;

б) наблюдать за температурой воды до и после подогревателя по термометрам, которые обязательно должны быть у подогревателя, и вести систематическую запись температур.

2. При остановке судна на промывку котлов нужно вскрыть подогреватель и очистить его трубки изнутри от накипи и илстых отложений, а снаружи от масла, которое попадает в паровую полость подогревателя вместе с паром от вспомогательных механизмов.

Если конструкция подогревателя позволяет, то следует вынуть его трубную часть из корпуса и очистить трубки снаружи вручную. Если трубную часть вынуть из корпуса нельзя, следует отнять фланец трубы, подводящей отработавший пар, в отверстие вставить брандспойт и сильной струёй воды смывать масло. Грязь-

ную воду при этом нужно спускать за борт по трубе исходящего пара. Для очистки труб внутри от осадков следует отнять крышку подогревателя и прочистить трубки ершом, после чего промыть струёй воды из брандспойта.

3. Для максимального использования тепла отработавшего пара на подогрев питательной воды никоим образом не следует допускать бездействия подогревателя. В случае аварии с подогревателем (например, если прошибло прокладку крышки или обнаружилась течь трубок) машинная команда обязана своими силами в возможно короткий срок произвести ремонт подогревателя на ходу парохода. Питание котлов во время ремонта должно производиться помимо подогревателя по обводной трубе. Нельзя откладывать ремонт подогревателя до очередной котлоочистки и или, тем более, до зимнего ремонта судна.

XX. ТЕПЛОВАЯ ИЗОЛЯЦИЯ

§ 1. НАЗНАЧЕНИЕ ТЕПЛОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ

Тепловая изоляция горячих поверхностей агрегатов теплосилового хозяйства речных судов выполняется с целью уменьшения потерь тепла в воздух.

Тепловой изоляцией достигается:

1) уменьшение потерь тепла в окружающую среду, что способствует экономии топлива;

2) создание нормальных санитарно-гигиенических условий труда для обслуживающего персонала в котельном и машинном помещениях вследствие уменьшения температуры в рабочих помещениях, достигаемого изоляцией теплоизлучающих поверхностей.

Все горячие поверхности котлов, трубопроводов, подогревателей и т. д. на речном судне должны изолироваться, если температура поверхностей превышает $50-60^{\circ}\text{C}$, вне зависимости от того, находится ли этот объект в работе непрерывно или периодически.

§ 2. ТРЕБОВАНИЯ К ИЗОЛЯЦИОННЫМ МАТЕРИАЛАМ

Материалы, которыми покрываются горячие поверхности для уменьшения потерь тепла, называются теплоизоляционными.

Слой изоляционного материала, нанесённый на поверхность изолируемого объекта и укреплённый на нём с помощью специальных приспособлений (проволока, разборный металлический каркас и т. д.), называется теплоизоляционной конструкцией.

К современному теплоизоляционному материалу для горячих теплоотдающих поверхностей предъявляются следующие основные требования:

1) температуроустойчивость, т. е. отсутствие порчи материала от действия высокой температуры и стойкость в отношении загорания;

2) возможно меньший объёмный вес, определяющий высокую пористость материалов при возможно меньшем размере самих пор;

3) низкий и постоянный коэффициент теплопроводности;

4) достаточная механическая прочность.

К изоляционной конструкции в целом и к изоляционным материалам предъявляются, помимо указанных выше, следующие требования:

1) прочность всей конструкции (изоляционный слой должен прочно держаться на котле и не отставать при вибрации и сотрясении изолированного объекта);

2) возможность лёгкого монтажа и разборки, особенно в тех местах изолированного объекта, которые нуждаются в периодическом осмотре (заклёпочные швы паровых котлов, фланцы трубопроводов и т. д.);

3) поверхность изолирующего слоя не должна впитывать сырости, разрушающей изоляцию и ухудшающей её тепловые свойства, так как с повышением влажности коэффициент теплопроводности изоляционных материалов увеличивается.

§ 3. ХАРАКТЕРИСТИКА ИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Чтобы потеря тепла горячими поверхностями была возможно меньшей, на судах разного флота должна применяться, как правило, высокоэффективная изоляция.

Теплоизоляционный материал называется высокоэффективным, если он имеет малый коэффициент теплопроводности ($\lambda \leq 0,1$ кал/м. час[°]С) и обеспечивает низкие потери тепла изолируемым объектом при небольшой толщине самой изоляции. Существующие теплоизоляционные материалы по характеру изготовления и способу их использования при монтаже делятся на две группы: мастичные материалы и формованные изделия. Мастичные материалы, которые поступают к месту монтажа в виде порошкообразной, сыпучей массы, замешиваются с водой, полученная таким образом пластичная масса — мастика — наносится на изолируемый объект (котёл, паропровод). Обладая способностью принимать форму изолируемого объекта, мастичные материалы могут быть применены для изоляции любой поверхности как плоской, так и криволинейной. Изоляция котлов и трубопроводов, выполненная из таких материалов, называется мастичной изоляцией. Формованные изделия выпускаются в виде готовых деталей различной формы: кирпичей, скорлуп, плит и т. д. Эти изделия могут применяться лишь для поверхностей соответствующей формы. Однако применение формованных изделий значительно облегчает и ускоряет процесс изоляции.

При производстве теплоизоляционных работ на речных судах рекомендуется применять следующие материалы: а) совелит мастичный, б) совелит формованный, в) вулканит мастичный (беспропарочный), г) вулканит формованный.

Характеристика этих материалов приведена в табл. 151.

Чтобы предохранить изоляционный материал от повреждений и атмосферных влияний, поверхность изоляции должна покрываться специальным покровным слоем толщиной 5—10 мм. Покровный слой изготавливается на месте монтажа, как смесь из следующих компонентов:

Характеристика теплоизоляционных материалов высокой эффективности

Наименование материала	Внешняя характеристика, компоненты и т. д.	Температура применения в °С	Средний объёмный вес в кг/м³	Коэффициент теплопроводности
Совелит мастичный	Порошкообразная масса белого цвета с наличием асбестового волокна Состав: смесь магниевых и кальциевых солей 85% и пушеного асбеста III или IV сорта—15% Формованные из совелита плиты имеют тот же цвет и состав, что и порошок. Плиты изготавливаются размером 500 × 170 мм, толщиной 30 и 40 мм	450	440	$\lambda = 0,0857 + 0,0073 \frac{t_{cp} - 100}{100}$
Совелит формованный	Изоляция изготавливается непосредственно на монтаж из сырья следующего состава: 1. Диатомит или трепел любых месторождений 55% 2. Асбест V сорта 19% 3. Хлопчатобумажная пыль 8% 4. Известь-пушонка 13% 5. Жидкое стекло 5% (расчёт ведётся по весу компонентов в сухом состоянии)	450	445	$\lambda = 0,071 + 0,0161 \frac{t_{cp} - 100}{100}$
Вулканит мастичный (беспрочный)	Плиты светлосерого цвета изготавливаются размером 500 × 170 мм, толщиной 25, 30, 45 и 50 мм Плиты изготавливаются из компонентов: Диатомит 60% Асбест 15% Ватные очесы 5% Известь 20%	500	Объёмный вес 425 кг/м³ в конструктивной достигается при водорастворении 350% 425	$\lambda = 0,097 + 0,01 \frac{t_{cp} - 100}{100}$
Вулканит формованный		500	400	$\lambda = 0,0773 + 0,01 \frac{t_{cp} - 100}{100}$

диатомита или трепела	10%
каустического магнезита	50%
асбеста V сорта	40%

В случае отсутствия высокоэффективных изоляционных материалов, а также для изоляции поверхностей с температурой до 150—180° С, можно применять обычную мастичную изоляцию, называемую асбозуритом, в составе: диатомита (инфузорная земля) — 80—85%, асбестита (асбестовое волокно) — 15—20%.

В отдельных случаях в качестве изоляции горячих поверхностей удобно использовать диатомовый кирпич с применением простейшего каркасирования. Вес изоляции из диатомового кирпича на 10—15% меньше веса изоляции из асбозурита (при одинаковой толщине).

В формулах коэффициента теплопроводности (табл. 151) — t_{cp} — средняя температура изоляционного слоя, определяемая, как среднее арифметическое из температур внутренней (температура теплоносителя) и наружной поверхности изоляции:

$$t_{cp} = \frac{t_{вн} + t_{н}}{2}$$

Температура на поверхности изоляции t_n расчётным путём определяется по формуле:

$$t_n = \frac{Q}{\alpha_n} + t, \quad (184)$$

где: Q — допускаемые потери тепла в кал/м² · час,

t — температура окружающего воздуха,

α_n — коэффициент теплоотдачи от поверхности изоляции, к воздуху в кал/м² · час · °С,

$$\alpha_n = 10 + 6 \sqrt{w}, \quad (185)$$

где w — скорость движения воздуха, окружающего изолирующий объект, в м/сек.; для судовых условий принимается 3—5 м/сек.

Необходимая толщина изоляции для плоской или цилиндрической стенки с диаметром более 2 м (бочки котлов), обеспечивающая заданные теплопотери Q , определяется по формуле:

$$\delta = \frac{(t_a - t_n)}{Q} \lambda \text{ м.} \quad (186)$$

где t_a — температура изолируемой поверхности, принимаемая равной температуре теплоносителя (пара, воды).

Порядок расчёта необходимой толщины изоляции следующий:

1) определяют t_n , задаваясь расчётной теплопотерей Q и зная температуру окружающего воздуха;

2) зная t_n и t , определяют среднюю температуру изоляционного слоя t_{cp} ;

3) определяют коэффициент теплопроводности λ по формулам для соответствующего материала (см. табл. 151);

4) определяют толщину изоляции δ .

§ 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ИЗОЛЯЦИИ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ

Для нахождения коэффициента теплопроводности выполненной изоляционной конструкции и для сравнения её с нормированным коэффициентом теплопроводности производят испытание изоляции при помощи тепломера системы Шмидта. При этом испытании измеряют: тепловой поток на 1 м² поверхности изоляции в час (теплопотеря с 1 м²/час), температуру голы трубы, температуру поверхности изоляции и окружающего воздуха.

Имея найденные из опыта теплопотери с 1 м² поверхности изоляции в час Q , определяют расчётом коэффициент теплопроводности изоляционной конструкции по следующим формулам:

для плоской и цилиндрической стенки с диаметром более 2000 мм

$$\lambda = \frac{Q}{t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}}} \quad (187)$$

для цилиндрических поверхностей с диаметром менее 2000 мм

$$\lambda = \frac{Q \cdot d_{\text{нар}} \cdot \ln \frac{d_{\text{нар}}}{d_{\text{вн}}}}{2(t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}})} \quad (188)$$

где: $t_{\text{нар}}$ — температура наружной поверхности изоляции,
 $t_{\text{вн}}$ — температура внутренней поверхности изоляции (температура теплоносителя),

$d_{\text{нар}}$ — наружный диаметр изоляции в метрах,
 $d_{\text{вн}}$ — внутренний диаметр изоляции в метрах.

§ 5. ПОТЕРИ ТЕПЛА НЕИЗОЛИРОВАННОЙ ГОРЯЧЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Потери тепла неизолрированным трубопроводом приведены в таблице 152.

Таблица 152

Потери тепла в кал/час погонным метром неизолрированного трубопровода при температуре окружающего воздуха 20°C

Наружный диаметр го-лого трубо-провода в мм	Разность температур между теплоносителем и воздухом в °C									
	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300
32	160	220	270	320	380	450	520	600	640	775
38	210	260	320	380	460	540	620	700	800	900
57	290	370	460	550	660	775	875	1000	1240	1300
89	450	560	700	850	980	1150	1300	1500	1700	1940
108	525	675	825	975	1150	1340	1550	1780	2000	2300
133	650	825	1000	1200	1400	1650	1700	2180	2400	2800
159	750	925	1120	1380	1650	1900	2200	2500	2900	3240
191	875	1100	1350	1630	1900	2200	2600	3000	3400	4000

Потеря тепла одним неизолированным вентиляем соответствует приблизительно потере тепла 1 пог. м паропровода.

Потеря тепла одной парой голых фланцев, эквивалентной длине голой трубы того же паропровода, по опытам инженера Каммерер, выбирается по следующим данным:

Диаметр паропровода в мм	50	100	200	300
Эквивалентная (равноценная по теплопотере) длина трубы для одной пары фланцев в м	0,4	0,5	0,58	0,57

Потери тепла 1 м² неизолированной плоской стенки при температуре окружающего воздуха 20° С в кал/час даны в таблице 153.

Т а б л и ц а 153

	Разность температур между теплоносителем и воздухом в °С									
	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300
Потери тепла в кал/час	1700	2100	2600	3100	3800	4400	5000	5700	6500	7400

Потери тепла, указанные в таблицах 152 и 153, отнесены к температуре окружающего воздуха 20° С. При иной температуре найденные по вышеуказанным таблицам потери следует разделить на коэффициенты, которые, в зависимости от температуры воздуха, могут быть взяты по таблице 154.

Т а б л и ц а 154

Поправочные коэффициенты на температуру воздуха
(к данным таблиц 152 и 153)

Температура воздуха в °С	Разность температур теплоносителя и воздуха		
	100°	200°	400°
0,0	0,91	0,91	0,92
10,0	0,95	0,96	0,97
30,0	1,05	1,05	1,04
40,0	1,10	1,09	1,08

§ 6. ВЕЛИЧИНА ДОПУСТИМЫХ ПОТЕРЬ ТЕПЛА С 1 м² ПОВЕРХНОСТИ ИЗОЛЯЦИИ

Потери тепла через изоляцию в кал/м² её внешней поверхности, в зависимости от температуры теплоносителя, для современной конструкции изоляции из высокоэффективных материалов не должны превышать величин, указанных в таблице 155 (при условно спокойном состоянии окружающего воздуха).

Таблица 155

Потери тепла с 1 м² поверхности при изоляции высокоэффективными материалами в кал/час

	Температура теплоносителя в °С							
	50	100	150	200	250	300	350	400
Трубопроводы	55	100	130	150	170	185	200	215
Плоская стенка и цилиндрическая поверхность с диаметром более 600 мм	55	100	130	150	175	200	225	250

§ 7. КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ИЗОЛЯЦИИ (КОЭФФИЦИЕНТ СБЕРЕЖЕНИЯ ТЕПЛА)

Коэффициент полезного действия изоляции показывает, сколько процентов тепла, теряемого объектом, сберегается в случае его изоляции.

Этот коэффициент определяется по формуле:

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \cdot 100, \quad (189)$$

где: Q_1 — тепло, теряемое неизолированным объектом,

Q_2 — тепло, теряемое тем же объектом после его изоляции.

Коэффициент сбережения тепла для современных изоляционных конструкций с применением высокоэффективных материалов составляет 93—95%.

В таблице 156 указана толщина изоляционного слоя для современных теплоизоляционных материалов высокой эффективности, обеспечивающие теплотери не выше приведённых в таблице 155.

XXI. ОГНЕУПОРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

В таблицах 157 и 158 даны характеристики материалов, применяемых для футеровки котельных топок, обмуровки котлов, а также характеристики различных огнеупорных растворов.

Таблица 156

Толщина изоляционного слоя в мм из различных материалов, обеспечивающая теплотери не выше указанных в таблице 155

	Совелит плитовый	Вулканист матич- ный (беспронароч- ный)	Вулканист плито- вый	Температура воды или пара °C					
				150	200	250	150	200	250
				150	200	250	150	200	250
Плоские стенки и поверхности с диаметром более 2000 мм	75	95	100	90	110	130	70	90	105
Трубопроводы с диаметром 100— 150 мм	55	70	80	65	80	90	55	65	75
Трубопроводы с диаметром 50— 100 мм	50	65	75	60	75	85	50	60	70
Трубопроводы с диаметром до 50 мм	45	55	65	55	60	70	45	55	60

Таблица 157

Характеристика огнеупорного и красного кирпича

Наименование кирпича	Огнеупор- ность °C	Сопротив- ление раз- давлению в холодном состоянии в кг/см ²	Объёмный вес в кг/м ³	Температура начала деформа- ции под нагрузкой в 2 кг/см ²
Диаз	1670—1730	125—180	1550—1800	Высшего каче- ства 1650, обыч- ного 1450—1650
Кварцево-глинистый К-Г (из огнеупор- ной глины, ото- щённой кварцевым песком)	1630—1750	80	1800	1400—1450
Кварцево-шамотный К-Ш (из огнеупор- ной глины, ото- щённой шамотом и кварцевым песком)	1630—1750	100	—	—
Красный строительный	900—1000	80	1750—2000	—
Шамотный	1530—1750	150—200	1750—1900	Высшего качества 1350—1400, обычного 1130—1350

1. Огнеупорность есть способность длительно выдерживать действие высоких температур (более 1580°C) с сохранением формы при отсутствии нагрузки.

2. Динасовый и шамотный кирпич по огнеупорности и удельному весу делится на следующие классы:

Динасовый кирпич			Шамотный		
Класс	Огнеупорность не ниже	Уд. вес	Класс	Огнеупорность не ниже	
А	1730° С	2,37—2,38	А	1750	
Б	1710° С	2,39	Б	1710	
В	1670° С	2,40	В	1670	
Г	1670° С	2,43	Г	1580	

3. Для огнеупорного кирпича, применяемого при кладке топок, топочных сводов и т. д., важнейшие требования следующие:

- а) одинаковость размеров,
- б) прочность, термическая стойкость (способность переносить резкие колебания температуры без разрушения),
- в) высокая температура размягчения.

Свойства шамотного кирпича по ОСТ 75

1. Температура плавления 1580—1750°C.

2. Размеры кирпича:

	Большой размер	Малый размер
Обыкновенный (прямой)	250×123×65	230×112×65
Сводчатый (клин)	250×123×65—55	230×112×65—55

Отклонение от размеров допускается $\pm 2\%$.

3. Усадка не более 0,5% для сводчатого и 0,75% для прямого.

4. Кирпич должен хорошо противостоять колебаниям температуры, не давая трещин.

XXII. ПРОКЛАДОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Прокладочные материалы употребляются для уплотнения соединений трубопроводов (паровых, водяных, масляных, топливных) фланцев, люков и т. д.

Материалы, применяемые на речных судах в качестве прокладок, должны удовлетворять следующим требованиям:

- 1) обеспечивать плотность соединения,
- 2) не выжиматься через внутренние края фланца при нажатии,
- 3) быть эластичны и мягки для хорошего заполнения углублений и уплотняющих канавок фланцев,
- 4) не пригорать к фланцам.

В зависимости от температуры, а также от рода вещества, воздействующего на прокладку (пар, газ, жидкость), в качестве прокладок в различных случаях должны применяться материалы, указанные в таблице 159.

Состав некоторых огнеупорных растворов

Название	Область применения	Крупность помола компонентов в мм	Объёмный состав сухой массы в %	Количество воды в л на 1 м³ сухой массы
1. Шамотный густой	Кладка фундаментов (шамотная)	Глины огнеупорной — до 3, кварцевого песка — до 3	Огнеупорной глины — 30, Кварцевого песка (или шамотной крупы 3—4 мм) — 70	400
2. Шамотный полугустой	Обыкновенная шамотная кладка	Всех компонентов — до 2	Глины — 30, Песка — 50, Шамотного порошка — 20	500
3. Шамотный жидкий	Тщательная кладка	Всех компонентов — до 1	Глины — 20, Песка — 20, Шамотного порошка — 60	600
4. Динасовый полугустой	Обыкновенная динасовая кладка	Всех компонентов — до 2	Глины — 15, Песка — 85	500
5. Огнеупорная масса для кладки	Кладка топочных перегородок и колен в судовых котлах	—	Глины — 25, Шамота — 25, Асбеста — 25, Иллюзорной земли — 25	Затворение массы водой до густого теста

Характеристика и область применения различных прокладочных материалов

Наименование прокладочного материала	Характеристика	Область применения	Примечание
Клингерит	Патентованный импортный прокладочный материал, изготовляемый из асбеста и резины	Является универсальным прокладочным средством для паровых соединений как при перегретом, так и при насыщенном паре	
Паронит «Экстра»	Прокладочный материал из асбеста и резины отечественного изготовления. Выпускается листами толщиной 1, 1,5, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 мм или в виде уже готовых кольцевых прокладок разных размеров	Применяется при давлении до 15 кг/см ² и выше при насыщенный и перегретом паре	Непригоден для соединений, подверженных действию нефти и керосина
Паронит обыкновенный	Составные части те же, что паронита «Экстра», но более низкого качества	Применяется для соединений при давлении до 10 кг/см ²	
Асбест	Применяется для прокладок в виде асбестового картона, шнура или ленты. Хорошо выносит высокую температуру газов Для высоких давлений изготовляются асбестовые листы и ленты с основой из медной проволоки	Для прокладок под крышками паровых цилиндров, горловинами котлов и т. д.	Непригоден для соединений при соприкосновении с нефтью и ее продуктами

Наименование прокладочного материала	Характеристика	Область применения	Примечание
Резина	Изготавливается в виде шнура или листов различной толщины	Для соединений, соприкасающихся с водой, при невысокой температуре	Резина не выносит работы при высокой температуре воды, портится от нефти и масла
Кожа	—	Для прокладок на воду при невысокой температуре воды, например, для фланцев холловых цилиндров насосов и т. д.	
Картон бумажный		Для соединений, подвергающихся действию нефти и масел при низком давлении Применяется также для водяных труб, для чего перед постановкой на месте пропитывается в олифе	

XXIII. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ КОТЛОВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ ЭКОНОМИЮ ТОПЛИВА В РЕЧНОЙ ПАРОСИЛОВОЙ УСТАНОВКЕ

Требование	Мероприятия по выполнению требования	Как влияет выполнение или невыполнение требования на экономию топлива
1. При всех режимах работы главной машины парохода поддерживать нормальное давление пара в котлах, не допуская его снижения	1. При отоплении мазутом: а) поддерживать форсунки и кирпичные выкладки топок в исправном состоянии б) внимательно регулировать работу форсунок, согласовывая их форсировку с режимом работы машины 2. При отоплении твердым топливом своевременно и возможно быстрее забрасывать топливо. Регулярно чистить топки, не допуская её зашлаковывания и прогаров. Если котёл имеет несколько топок, загрузку их и шуровку топлива производить поочередно, не допуская одновременного открытия дверей нескольких топок 3. Внимательно регулировать поступление питательной воды в котёл; поддерживать нормальный уровень воды; не допускать периодической подачи воды большими порциями и перекачки воды выше допустимого уровня («перепитывания») 4. Поддерживать в чистоте поверхность нагрева котла. Не допускать забивания дымогарных трубок и огневых камер уносом и золой 5. Обеспечивать правильность показаний манометра, периодически проверяя его работу	Снижение котельного давления вызывает понижение мощности машин и расхода топлива. В установках с давлением пара 10—14 атм. снижение давления на 1 атм. против нормального вызывает повышение удельного расхода пара машин и соответственно расхода топлива на силу в час на 2,5—3% Загрязнение поверхности нагрева изнутри накипью, а снаружи — сажей и золой заставляет форсировать горение в топках; поддержание пара на марке вследствие этого затрудняется. С увеличением форсировки увеличиваются обычно потери тепла с уходящими газами и от нештатного горения топлива, увеличивается химический недожог, унос в трубу и т. д., вследствие чего к. п. д. котельной установки понижается, а расход топлива на каждый килограмм вырабатываемого пара возрастает. Кроме того, при работе топки на твердом топливе форсировка (увеличение количества сжигаемого топлива) достигается за счёт усиленной работы парового дутья и сифона в дымовой трубе, вследствие чего чрезмерно возрастает служебный расход пара на котёл, что также приводит к перерасходу топлива

Требование	Мероприятия по выполнению требования	Как влияет выполнение или невыполнение требования на экономию топлива
2. Обеспечивать почти бездымное сгорание топлива; не допускать присутствия недогоревших газов в уходящих в трубу продуктах сгорания	6. Обеспечивать исправное состояние предохранительных клапанов, правильно регулировать их на установленное давление пара, регулярно проверять их состояние, приподнимая клапан с седла (чтобы убедиться, что клапан не «прикипел»)	Подача в котёл вода. Большими порциями резко охлаждает котёл и снижает его паропроизводительность. Если, прогревание пара в этот момент не уменьшится, снижение паропроизводительности во время усиленного питания котла и некоторое время после него приводит к падению давления пара в котле Поддержание воды на чрезмерно высоком уровне уменьшает паровое пространство котла, увеличивает влажность вырабатываемого пара; качество пара при этом ухудшается, а расход его в машине увеличивается, или же снижается мощность машины (чем больше влажность пара, тем меньше его работоспособность) Если вода в котле находится на уровне выше нормального, то это может привести, особенно при форсированной работе, к попаданию воды в паропровод и машину и вызвать аварийно последней При недостатке воздуха в топке и полном сгорании в продуктах сгорания содержится окись углерода CO (угарный газ). Содержание в газах всего 1% CO (по объёму) вызывает перерасход топлива на 4—5%. При образовании, кроме CO, еще и дыма перерасход топлива от неполного сгорания может достигать 10—15%
2. Обеспечивать почти бездымное сгорание топлива; не допускать присутствия недогоревших газов в уходящих в трубу продуктах сгорания	1. Правильно регулировать приток воздуха в топку При отоплении маслом — с увеличением подачи в топку топлива увеличивать приток распыляемого пара и подачу воздуха через топочный фронт. Регулировать поступление воздуха и тягу дымовой заслонкой (регистром) за котлом.	

Требование	Мероприятия по выполнению требования	Как влияет выполнение или невыполнение требования на экономию топлива
3. При наличии у котла перегревателя поддерживать нормальную для данной установки температуру перегретого пара, поступающего к машине не допуская её снижения	<i>При твёрдом топливе</i> — регулировать тягу и дутьё, увеличивая поступление воздуха после загрузки и постепенно уменьшая его (ослаблением тяги и дутья) по мере прогорания топлива. При работе на угле не допускать зашлаковывания решётки, своевременно производить загрузку топлива часто и небольшими порциями (не допуская прогаров) 2. При работе топки — контролировать процесс горения по цвету пламени и уходящих продуктов сгорания, пользуясь смотровыми окнами в топочной дверце, в огневой камере и в крышке дымника. Пламя в топке и огневой камере не должно быть красным с дымными прослойками, так как это указывает на недостаток воздуха. Продукты сгорания при выходе из трубы должны быть почти бесцветными или иметь лёгкий сероватый цвет 1. Поддерживать все элементы перегревателя в исправном состоянии 2. Поддерживать поверхность нагрева перегревателя в чистоте, регулярно обдувая сажу и золу фуфуром или стационарными паровыми банниками 3. Не допускать поддержания воды в котле на чрезмерно высоком уровне, так как увеличение влажности пара снижает температуру перегрева	Черная окраска выходящих из трубы продуктов сгорания объясняется содержанием в газах недогоревших углеводородов и присутствием частиц сажи и уноса. Причина образования дыма и сажи: излишняя форсировка горения, недостаток воздуха, понижение температуры в топке вследствие охлаждения её холодным воздухом через открытые топочные дверцы или подача в топку очень влажного топлива Снижение температуры перегретого пара на 10° С против нормальной для данной установки даёт перерасход топлива на 1,5—2%

Требование	Мероприятия по выполнению требования	Как влияет выполнение или невыполнение требования на экономичность топлива	Продолжение
4. Не допускать образования накипи и скопления в котлах грязи	1. Регулярно вводить в котёл вместе с питательной водой средства, препятствующие образованию накипи (антидекал, антيناкипин) 2. Регулярно (4--6 раз в сутки) продувать котлы через краны нижнего продувания 3. В установленные сроки (а для пассажирских пароходов -- по возможности в конечных пунктах рейсов) производить промывку котлов и осмотр поверхности нагрева во избежание случайного останова местных скоплений грязи	Наличие накипи затрудняет теплопередачу от продуктов сгорания к находящейся в котле воде и ухудшает использование тепла газов Для поддержания пара на марке приходится форсировать горение, что способствует перерасходу топлива. Наличие накипи толщиной в 1 мм даёт перерасход топлива 2,5--3%, а толщиной 2 мм -- 4--5% и более Помимо перерасхода топлива, накипь, вследствие плохой теплопроводности, может быть причиной порчи и аварии котла от перегрева металла в том месте, где скапливается накипь	Продолжение
5. Не допускать скопления в котлах масла, попадающего в последующие вместе с питательной водой	1. До поступления питательной воды в котлы фильтровать её с помощью фильтров или в тёплом ящике-фильтре через кокс, древесный активированный уголь или любу Обеспечивать чистоту фильтрующего слоя 2. Для уменьшения содержания масла в питательной воде следить, чтобы в цилиндры машин не подавалось масла в изышном количестве 3. Для удаления масла с поверхности воды в котле ежедневно производить верхнее продувание котлов через кран верхнего продувания (пенковый кран)	Наличие на стенках котла плёнки масла толщиной в 0,2 мм даёт перерасход топлива до 4--6% Помимо перерасхода топлива, присутствие масла на стенках котла вследствие исключительно плохой теплопроводности может быть причиной порчи и аварии котла	Продолжение

Требование	Мероприятия по выполнению требования	Как влияет выполнение или невыполнение требования на экономичность топлива
6. Не допускать загрязнения поверхности нагрева котла сажей и летучей золой	Регулярно производить очистку (бабеление) труб паровыми ершами или обдирку труб паровыми переносными фурами. Ни в коем случае не допускать отсечки чистки труб до тех пор, пока это не скажется на шуровке котла (пар с трудом начнёт держаться на марке). При работе на твердом топливе регулярно удалять унос из огневой камеры и дымника	Загрязнение поверхности нагрева сажей и золой вследствие плохой их теплопроводности ухудшает использование тепла газов; температура уходящих газов в трубу, и, следовательно, потеря тепла в трубу повышается. Повышение температуры уходящих газов на 20°C против нормальной для данного котла вызывает соответственно перерасход топлива на 1,3—1,5%
7. Не допускать течи дымогарных трубок	(См. выше в главе VIII параграф 15 — «Необычайные явления в работе парового котла»)	Даже небольшая течь дымогарных трубок вызывает всегда значительный перерасход топлива, так как вода, попадающая в топку, испаряется, тепло топлива затрачивается непроизводительно, температура в топке снижается. При возникновении течи пар в котле не держится на марке, форсирование работы топок способствует ещё большей течи труб, что может вывести котёл из строя.
8. Не допускать пропаривания фланцев, сальников и других соединений	Внимательно наблюдать за плотностью соединений трубопроводов, подогревателей и других деталей. В случае обнаружения пропуска пара или горячей воды произвести при первой возможности соответствующий ремонт для устранения неисправностей (подтягивание сальников, перестановку прокладок, заварку обнаруженных трещин, саншей и т. д.)	Наличие пропусков увеличивает непроизводительный расход пара. Увеличение расхода пара заставляет дополнительно форсировать работу котлов, что и приводит к перерасходу топлива.

Требование	Мероприятия по выполнению требования	Как влияет выполнение или невыполнение требования на экономно топлива
9. Обеспечивать использование всего отработавшего пара вспомогательных механизмов пархода на подогрев питательной воды в подогревателе. Поддерживать температуру питательной воды, выходящей из поверхностного подогревателя, возможно более высокой	Поддерживать поверхностный подогреватель в чистоте и исправности. Контролировать работу водоподогревателя по термометрам, устанавливаемым на питательной линии перед подогревателем и за ним. Наблюдать за давлением пара в подогревателе. При повышении давления пара сверх нормального не отводить пар из подогревателя за борт, а использовать его для предварительного подогрева воды в тёплом ящике методом смешения	Каждые 6—7° С повышения температуры питательной воды за счёт тепла отработавшего пара вспомогательных механизмов даёт уменьшение удельного расхода топлива в паросиловой установке на 1% Выключение из действия имеющегося на судне водоподогревателя приводит при той же мощности машины к перерасходу топлива не менее чем на 5—7% Повышение температуры воды, поступающей в котлы, помимо экономии топлива, способствует спокойной, без излишней форсировки, работе котлов и облегчает поддержание в котлах нормального давления
10. Обеспечивать исправное состояние теплоизоляции котлов, трубопроводов, подогревателей и т. п.	При обнаружении разрушения изоляции в кратчайший срок восстановить повреждённое место. Предупреждать возможность разрушения изоляции от сырости, не допуская пропаривания заклёпок, фланцев, кранов, сальников, вентиля и т. д. Бережно относиться к имеющейся изоляции как в эксплуатации, так и при производстве ремонта	При изоляции высокоэффективными материалами (советит, вулканит) потеря тепла с каждого квадратного метра горячей поверхности уменьшается в 15—20 раз по сравнению с потерями тепла неизолированной поверхностью

Требование	Мероприятия по выполнению требования	Как влияет выполнение или невыполнение требования на экономичность топлива
11. Не допускать излишнего расхода пара на вспомогательные механизмы и бытовые нужды (куб, баня и т. д.)	Поддерживать все механизмы в хорошем техническом состоянии. Устанавливать и поддерживать на судне в течение всей навигации строгий режим в расходовании пара на освещение, отопление и бытовые нужды	Плохое техническое состояние вспомогательных механизмов (протечки пара и т. д.), вызывающее повышенный расход пара, а также излишняя продолжительность работы механизмов увеличивают потребность паропроизводительности котлов, что и приводит к перерасходу топлива. Перерасход топлива на судне вследствие запущенного состояния вспомогательных механизмов и нерационального их использования, особенно в том случае, если не весь отработанный пар используется на подогрев питательной воды, может достигать 5% и более

XXIV. КОНСТРУКТИВНЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ КОТЛОВ И ЭКОНОМИЮ ТОПЛИВА

306

Наименование мероприятий	В каких случаях рекомендуется	Влияние данного мероприятия на работу котла
1. Установка водоподогревателей, использующих отработавший пар вспомогательных механизмов для подогрева питательной воды	Для всех паросиловых установок речных судов	Увеличение достигаемой паропроизводительности котла или уменьшение потребной форсировки. Уменьшение тепловых напряжений, увеличение срока службы котла без ремонта. Экономия топлива
2. Установка тёплых ящиков для питательной воды	Для всех паросиловых установок речных судов	Отстой питательной воды и частичное освобождение от механических примесей. Предварительный подогрев питательной воды по методу смешения за счёт тепла конденсата от отопления, кубов и испаряющего тепла поверхностных водоподогревателей. Способствует поддержанию в чистоте поверхности нагрева котлов
3. Устройство фильтрующих отсеков в тёплых ящиках (фильтрация через кокс, активированный уголь, лиуфу)	Для всех паросиловых установок речных судов, особенно при работе на загрязнённой воде и на мелководье	Освобождение питательной воды от взвешенных механических примесей и масла. Предохранение котла от скопления грязи и отложения масла на поверхности нагрева
4. Устройство внутри котла в месте поступления воды в котёл карманов-грязевиков	В пролётных котлах, где имеется место для размещения грязевика в водяном пространстве котла	Освобождение питательной воды от грязи и легко растворимых солей, выпадающих из воды при нагревании в карманах-грязевиках и удаляемых через продувочный кран грязевика. Уменьшение загрязнения котла и предотвращение накипобразования

Наименование мероприятий	В каких случаях рекомендуется	Влияние данного мероприятия на работу котла
5. Постановка дополнительных (вторых) кранов нижнего продувания под огневой камерой или у заднего днища котла 6. Изоляция котлов высоко-эффективными теплоизоляционными материалами	У длинных продольных котлов, имеющих один продувочный кран у переднего или заднего днища Для всех котлов, не имеющих высоко-эффективной изоляции	Облегчение удаления грязи и шлама из нижней части котла. Способствует поддержанию поверхности нагрева в чистоте
7. Тщательное уплотнение дымоходов (дымовых коробок)	У всех котлов, имеющих неплотности в месте прилегания крышек дымоходов	Уменьшение потери тепла котлами в окружающую среду и вследствие этого повышения к. п. д. котла. Снижение температуры в котельном помещении и улучшение условий труда кочегаров
8. Постановка стационарных паровых банников-сажесудателей в огневой камере	В продольных и оборотных котлах при работе на угле и дровах	Улучшение тяги. При искусственной тяге паросифоном уменьшение расхода пара на сифон для создания необходимого разрежения в дымоходе
9. Постановка точечных фронтонных веерообразного типа	При работе котлов на жидком топливе	Поддержание в чистоте поверхности нагрева с газовой стороны
10. Замена изношенных и устаревших конструкций форсунок более совершенными и экономичными сист. «Бест», Васильева, Габеля	При работе котлов на жидком топливе	Улучшение теплопередачи, повышение паропроизводительности котла и к. п. д. Более правильный подвод воздуха к горящему мазутному факелу, более удобная регулировка воздуха, поступающего в топку. Повышение к. п. д. котельного установок
11. Установка паровытяжных аппаратов (паросифонов) в дымовой трубе	При недостаточной тяге, особенно при работе на дровах без дутьевого вентилятора	Более совершенное распыливание топлива, удобство регулировки и чистки форсунок в эксплуатации. Уменьшение расхода пара на распыливание топлива и вследствие снижения служебного расхода пара — повышение к. п. д. котла «нетто»

Наименование мероприятий	В каких случаях рекомендуется	Влияние данного мероприятия на работу котла
12. Установка воздухоподогревателя	Для всех котлов. В первую очередь при работе на дровах	Улучшение процесса горения. Повышение температуры в топке. Повышение к. п. д. котельной установки
13. Установка выносных пародутьевых аппаратов (диффузоров с соплами)	При работе котлов на антраците. Рекомендуется обмен групповых диффузоров, устанавливаемых в поддувале топки	Уменьшение расхода пара на дутьё. Повышение к. п. д. котла «нетто»
14. Устройство воздушного искрового дутья с приводом дутьевого вентилятора от вспомогательной паровой машины и с использованием отработавшего пара дутьевой установки на подогрев питательной воды в воздухоподогревателе	При наличии воздухоподогревателя необходимо при работе на всех видах топлива. В случае отсутствия воздухоподогревателя рекомендуется при работе на каменном угле и дровах	В сравнении с паровым дутьём — значительное уменьшение расхода тепла на дутьевую установку. При использовании отработавшего пара пародувка вентилятора на подогрев воды — уменьшение расхода тепла в 5—8 раз в сравнении с расходом на паровое дутьё. Увеличение паропроизводительности котла. Повышение к. п. д. установки
15. Устройство в огневой камере люков для выгребя золы	У пролётных котлов при работе на угле и антраците	Удаление отложений в огневой камере. Облегчение обслуживания топки. Улучшение работы котла
16. Устройство наставок длиной 400—600 мм на жаровые трубы	При работе на мазуте и дровах у котлов, имеющих короткие жаровые трубы — для увеличения объёма топочного пространства	Улучшение процесса горения. Повышение паропроизводительности котла
17. Установка пароперегревателей	В дымоварных трубках — при работе котлов на мазуте в установках, где машины приспособлены для работы на перегретом паре.	Перевод паросиловой установки на перегретый пар даёт снижение расхода топлива на 6—10% и вытекает в зависимости от температуры пара, начального давления, конструкции машины и т. д.
	В дымниках — для подсушки пара на всех котлах, в первую очередь на жидком топливе при достаточной тяге.	

Таблица для нахождения натуральных логарифмов по заданному числу

Число	ln	Число	ln	Число	ln	Число	ln	Число	ln
1,0	0,000	2,8	1,029	4,6	1,526	6,4	1,856	8,2	2,104
1,1	0,095	2,9	1,064	4,7	1,547	6,5	1,871	8,3	2,116
1,2	1,182	3,0	1,098	4,8	1,568	6,6	1,887	8,4	2,128
1,3	0,262	3,1	1,131	4,9	1,589	6,7	1,902	8,5	2,140
1,4	0,336	3,2	1,163	5,0	1,609	6,8	1,916	8,6	2,151
1,5	0,405	3,3	1,193	5,1	1,629	6,9	1,931	8,7	2,163
1,6	0,470	3,4	1,223	5,2	1,648	7,0	1,945	8,8	2,174
1,7	0,530	3,5	1,252	5,3	1,667	7,1	1,960	8,9	2,186
1,8	0,587	3,6	1,280	5,4	1,686	7,2	1,974	9,0	2,197
1,9	0,641	3,7	1,308	5,5	1,704	7,3	1,987	9,1	2,208
2,0	0,693	3,8	1,335	5,6	1,722	7,4	2,001	9,2	2,219
2,1	0,741	3,9	1,361	5,7	1,740	7,5	2,014	9,3	2,230
2,2	0,788	4,0	1,386	5,8	1,757	7,6	2,028	9,4	2,240
2,3	0,832	4,1	1,411	5,9	1,775	7,7	2,041	9,5	2,251
2,4	0,875	4,2	1,435	6,0	1,791	7,8	2,054	9,6	2,261
2,5	0,916	4,3	1,458	6,1	1,808	7,9	2,066	9,7	2,272
2,6	0,955	4,4	1,481	6,2	1,824	8,0	2,079	9,8	2,282
2,7	0,993	4,5	1,504	6,3	1,840	8,1	2,091	9,9	2,292
								10,0	2,302

УКАЗАТЕЛЬ ЛИТЕРАТУРЫ ПО СУДОВЫМ КОТЕЛЬНЫМ УСТАНОВКАМ

1. Абрамов В. Н. — Как устранить течь дымогарных труб, изд. «Водный транспорт», 1939 г.
2. Александров А. С. — Топливо Речного флота, Речиздат, 1943 г.
3. Александров А. С. — Основные требования по обеспечению экономии топлива на речном пароходе, Речиздат, 1942 г.
4. Александров А. С. — Работа речных пароходов на дровах, Речиздат, 1943 г.
5. Александров А. С. — Экономия топлива в эксплуатации судового котла, Речиздат, 1941 г.
6. «Типовые проекты переоборудования речных судовых котлов под антрацит», «Водный транспорт», 1937 г.
7. Гусев С. В. — Судовые паровые котлы, «Водный транспорт», 1939 г.
8. Долголенко В. Я. — Судовые паровые установки, Часть 1. Котлы, изд. «Морской транспорт», 1940 г.
9. Калинин В. В. — Повреждения судовых котлов, Гострансиздат, 1937 г.
10. Куликовский П. П. — Технический минимум судового кочегара, Речиздат, 1941 г.
11. Куликовский П. П. — Памятка судового кочегара, Речиздат, 1943 г.
12. Куликовский П. П. — Испытания судовых паросиловых установок, Речиздат, 1943 г.
13. Лакшин, Киселев — Обработка питательной воды судовых котлов, Речиздат, 1941 г.
14. Фкин Т. И. — Подогрев питательной воды — источник экономии топлива, Речиздат, 1942 г.
15. Френкель, Лисенко, Швед, Бурышкин — Эксплуатация паросиловых установок морских судов, том 1, Госмориздат, 1940 г.
16. Петрова Л. В. — Щелочные вытяжки из торфа, как заменители антинакипина, Речиздат, 1944 г.
17. «Справочник по судостроению — том 7, изд. ОНТИ, Главная редакция судостроительной литературы, 1935 г.
18. Правила эксплуатации паровых котлов, Речиздат, 1942 г.
19. Инструкция по очистке паровых котлов, установленных на речных и озерных судах, Речной Регистр СССР, Речиздат, 1943 г.
20. Инструктивные указания по подбору, установке и эксплуатации обдувочных устройств для судовых котлов, Издательство Наркомречфлота, 1943 г.
21. Инструктивные указания по расчёту, монтажу и эксплуатации пароструйных тяговых устройств, Речиздат, 1944 г.

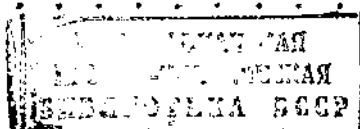
СОДЕРЖАНИЕ

	<i>Стр.</i>
Предисловие	3
I. Общие сведения	5
§ 1. Давление	5
§ 2. Удельный вес и плотность	6
§ 3. Удельный объём	9
§ 4. Температура	9
§ 5. Объём и удельный вес газов в зависимости от температуры	12
§ 6. Закон эквивалентности тепла и работы	12
§ 7. Эквивалент 1 ккал-часа и 1 квт-часа	12
§ 8. Теплоёмкость	13
§ 9. Температура смеси	14
II. Водяной пар	15
III. Теплопередача	21
IV. Топливо для паровых котлов	31
§ 1. Состав топлива	31
§ 2. Характеристики топлива	33
§ 3. Теплотворная способность топлива	34
§ 4. Условное топливо и калорийные эквиваленты	46
§ 5. Выветривание и самовозгорание углей	51
§ 6. Выбор средней пробы твёрдого и жидкого топлива	52
V. Процесс горения	56
§ 1. Теоретическое количество воздуха, необходимое для горения	56
§ 2. Коэффициент избытка воздуха. Действительное количество воздуха, поступающего в топку	58
§ 3. Состав продуктов сгорания при полном и неполном горении	60
§ 4. Анализ газов	61
§ 5. Основное уравнение горения	62
§ 6. Определение коэффициента избытка воздуха	64
§ 7. Контроль горения	64
§ 8. Условия правильного экономичного режима горения топлива в топках паровых котлов	65
§ 9. Полный объём продуктов сгорания и теплосодержание их	66

VI. Топочные устройства речных судовых котлов	73
§ 1. Типы топок, распространённые на речных судах	73
§ 2. Характеристики напряжённости работы топочного устройства	77
VII. Уход за топками в эксплуатации	82
§ 1. Уход за топкой при сжигании мазута	82
§ 2. Уход за топкой при сжигании антрацита	84
§ 3. Уход за топкой при сжигании спекающихся кузнечных углей	86
§ 4. Уход за топкой при сжигании дров	88
VIII. Речные паровые котлы	90
§ 1. Типы котлов	90
§ 2. Рабочее давление пара	96
§ 3. Поверхность нагрева котлов	96
§ 4. Материал для изготовления судовых паровых котлов	98
§ 5. Испытание металла речных котлов	98
§ 6. Данные о размерах судовых котлов	103
§ 7. Данные о весах судовых котлов	106
§ 8. Формулы для приближённого определения габаритных размеров и веса огнетрубных котлов	107
§ 9. Дымогарные и водогрейные трубы котлов	108
§ 10. Характеристика напряжённости работы парового котла	109
§ 11. Тепловая нагрузка поверхности нагрева	111
§ 12. Питательные средства паровых котлов	111
§ 13. Арматура паровых котлов	113
§ 14. Уход за паровыми котлами в эксплуатации	116
§ 15. Ненормальные явления в работе парового котла и меры их предупреждения	123
§ 16. Освидетельствование паровых котлов	130
IX. Качественные характеристики котельной установки	133
§ 1. Коэффициент полезного действия котельной установки	133
§ 2. Испарительность топлива по нормальному пару	135
X. Потери тепла в котельной установке и уравнение теплового баланса	136
§ 1. Потеря от механической неполноты горения	138
§ 2. Потеря с уходящими газами	140
§ 3. Потеря от химической неполноты сгорания	142
§ 4. Потеря в окружающую среду	143
§ 5. Уравнение теплового баланса котла	145
§ 6. Изменение элементов теплового баланса котельной установки в зависимости от нагрузки	153
XI. Испытание парового котла	155
§ 1. Цели и порядок испытаний	155
§ 2. Методы измерений при испытании речных котлов	157

XII. Обработка питательной и котловой воды	164
§ 1. Питательная вода речных судовых котлов	166
§ 2. Вещества, содержащиеся в питательной воде, и их влияние на работу котла	164
§ 3. Жёсткость питательной воды	166
§ 4. Вред накипи	168
§ 5. Назначение и методы обработки питательной воды	170
§ 6. Химическая очистка питательной воды	170
§ 7. Внутрикотловая обработка воды	172
§ 8. Действие антيناкипина	173
§ 9. Щёлочность котловой воды	175
§ 10. Определение натронного числа котловой воды	176
XIII. Продувание и промывка котлов	177
§ 1. Продувание котлов	177
§ 2. Промывка котлов	179
§ 3. Сепарация шлама из котла	184
XIV. Теоретическая температура горения. Прямая отдача тепла в топке. Теплопоглощение в отдельных частях поверхности нагрева котла	186
§ 1. Теоретическая температура горения	186
§ 2. Температура в топке	188
§ 3. Расчёт прямой отдачи в топке	192
§ 4. Определение температуры газов по выходе из топки	195
§ 5. Общее количество тепла, получаемого котлом	196
§ 6. Тепловая нагрузка отдельных частей поверхности нагрева	198
§ 7. Температура металла котла	200
XV. Элементарный тепловой расчёт речного огнетрубного котла по известным конструктивным размерам	202
§ 1. Цели расчёта	202
§ 2. Данные, необходимые для расчёта	203
§ 3. Характеристика напряжённости работы топки	204
§ 4. Определение расчётного расхода топлива	204
§ 5. Принимаемые величины	205
§ 6. Построение IT диаграммы (диаграммы теплосодержаний)	205
§ 7. Расчёт прямой отдачи в топке	206
§ 8. Определение теплопоглощения в конвекционной части поверхности нагрева	207
§ 10. Массовая паропроизводительность котла	211
§ 10. Часовая паропроизводительность котла	211
§ 11. Напряжённость поверхности нагрева котла	211
§ 12. Испарительность топлива	212
§ 13. Схема теплового расчёта судового огнетрубного котла	213

XVI. Подогреватели воздуха	220
§ 1. Влияние подогрева воздуха на к.п.д. котельной установки и расход топлива	220
§ 2. Конструкция подогревателей воздуха для речных судовых котлов	220
§ 3. Температура подогрева воздуха	221
§ 4. Ожидаемое повышение к.п.д. котельной установки и экономия топлива от введения воздухоподогрева	223
§ 5. Ориентировочный расчёт потребной поверхности нагрева подогревателя воздуха	224
§ 6. Данные испытаний речных котлов, оборудованных воздухоподогревателями	224
§ 7. Расчёт огнетрубного котла, оборудованного воздухоподогревателем	227
XVII. Пароперегреватели	230
§ 1. Преимущества перегретого пара	230
§ 2. Типы пароперегревателей и их сравнение	231
§ 3. Расчёт перегревателя, расположенного в дымогарных трубках	239
XVIII. Тяга и тягодутьевые устройства	244
§ 1. Назначение и измерение тяги	244
§ 2. Основное уравнение тяги	245
§ 3. Газовое сопротивление топки	246
§ 4. Газовое сопротивление котла	247
§ 5. Естественная тяга дымовой трубы	249
§ 6. Искусственная тяга	254
§ 7. Пароструйная вытяжная установка (сифон)	256
§ 8. Паровое дутьё под колосниковую решётку	259
§ 9. Вентиляторное дутьё	262
XIX. Подогрев питательной воды паровых котлов отработавшим паром	268
§ 1. Значение подогрева питательной воды	268
§ 2. Типы водоподогревателей	268
§ 3. Температура питательной воды по выходе из подогревателя	270
§ 4. Экономия тепла в паросиловой установке от подогрева питательной воды	274
§ 5. Выбор поверхности нагрева трубчатых водоподогревателей	276
§ 6. Схема расчёта поверхностного водоподогревателя	278
§ 7. Конструкции водоподогревателей	281
§ 8. Уход за тёплыми ящиками и водоподогревателями	286
XX. Тепловая изоляция	287
§ 1. Назначение тепловой изоляции	287
§ 2. Требования к изоляционным материалам	287
§ 3. Характеристика изоляционных материалов	288
§ 4. Определение коэффициентов теплопроводности изоляции при испытаниях	291



	<i>Стр.</i>
§ 5. Потери тепла неизолзированной горячей поверхностью	291
§ 6. Величина допустимых потерь тепла с 1 м ² поверхности изоляции	293
§ 7. Коэффициент полезного действия изоляции	293
XXI. Огнеупорные материалы	293
XXII. Прокладочные материалы	295
XXIII. Основные требования по эксплуатации котлов, обеспечивающие экономно топлива	299
XXIV. Конструктивные мероприятия, обеспечивающие повышение производительности котлов и экономно топлива	306
П р и л о ж е н и я:	
1. Таблица для нахождения натуральных логарифмов по заданному числу	309
2. Указатель литературы по судовым котельным установкам	310

КОПИЯ
 СЛУЖЕБНОГО
 ПОДЛИННИКА

ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Следует читать	По чьей вине
7	1 сверху	в процентах и объему	в процентах по объему,	корректора
7	4 "	$\gamma_{cz} = 1,349$	$\gamma_{cz} = 1,393$	автора
15	10 снизу	меньший	большой	автора
35	8 сверху	Q_p	Q_p^H	типографии
66	1 снизу	$V =$	$V_H =$	корректора
68	17 "	$C_p \%$	$C' \%$	типографии
68	21 "	от величины зависит	от величины α зависит	типографии
77	9 сверху	кал/м ³ час,	кал/м ³ час,	автора
135	11 "	$0,65 \div 0,7$	$0,65 \div 0,75$	автора
141	22 "	Q_3	Q_2	корректора
161	3 колонка табл.	$\eta_{\kappa} = \frac{D_H O_x - t_1}{B \cdot Q_p^H}$	$\eta_{\kappa} = \frac{D (t_x - t_1)}{B \cdot Q_p^H}$	типографии
162	3 колонка табл. строка 7 сверху	$C_2 \cdot T_{yx}$	$C_2 (T_{yx} - t_c)$	типографии
162	3 колонка табл. строка 10 сверху	Q_4^H	Q_4^{yH}	типографии
187	28 сверху	кал/кг;	кал/м ³ ;	автора
189	24 сверху	τ_e	τ_m	автора
193	16 снизу	H_2	H_x	корректора
194	9 сверху	H_2	H_x	корректора
196	18 снизу	C'_2	C_2	корректора
207	3 сверху	H_x^p	H_x	корректора
209	16 снизу	предварительной оценке температуры уходящих газов, требуется	произвольно принятых температур, тогда как методом последова-	типографии
271	24 сверху	34	94	корректора
288	17 "	разного	речного	типографии
313	5 снизу	§ 10. Часовая паропроизводительность котла	§ 9. Определение коэффициента полезного действия котла	типографии

