Библиотека СОК

Федеральное агентство по образованию РФ
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Красноярский государственный технический университет

Е.А. Бойко

ОСНОВЫ ТЕПЛОТЕХНИКИ

(учебное пособие)

Красноярск 2004

Содержание

1. Учебная цель 3
1.1. Основные термины 3
2. Содержание учебного элемента 10
2.1. Законы газового состояния 10
2.2. Основные физические параметры пара 11
2.3. Энергия и её виды 13
2.4. Виды теплообмена 15
2.5. Топливо 16
2.5.1. Состав топлива 17
2.5.2. Характеристики твердых топлив 20
2.5.3. Классификация и условные обозначения углей 22
2.5.4. Характеристика мазута 22
2.6. Вода и водяной пар 23
3. Резюме 34
4. Контрольные вопросы 34
5. Литература 36

1. УЧЕБНАЯ ЦЕЛЬ

Научить оперативный персонал ТЭС применять теоретические основы теплотехники в своей профессиональной практической деятельности, помочь достичь гармонии при пользовании теории в практике.

1.1. Основные термины

Теплота (тепло) Q – энергия, передаваемая от более нагретого тела менее нагретому при непосредственном соприкосновении или излучением. Единицы измерения энергии аналогичны единицам измерения работы (см. табл. № 1). Тепловая энергия может также передаваться в форме работы, т. е. при механическом воздействии одного тела на другое. Превращение тепла в работу и работы в тепло происходит в одном и том же строго постоянном соотношении, соответствующем тепловому эквиваленту работы **A** или

Механическому эквиваленту тепла **E= 1 / A**.

Значения эквивалентов (округлённо):

A = 1/427 ккал/(кгс м) = $0{,}239 \cdot 10^{-3}$ ккал/Дж = 860 ккал/(квт· ч) = 623 ккал/(л.с.·ч);

E = 427 кгс·м /ккал = $4{,}1878 \cdot 10^{3}$ Дж/ккал = 1/860 квт ч/ккал = 1/632 л.с.·ч/ккал.

В соответствии с первым законом термодинамики тепло, сообщённое газу (пару), расходуется на увеличение внутренней энергии тела и на совершение газом (паром) внешней работы.

Энтальпия I – сумма внутренней энергии тела и потенциальной внешней работы.

$$\mathbf{I = U + A \times P \times V;}$$

где **U** - внутренняя энергия;
P – давление, кгс/м^2;
V – объём газа (пара), м^3;

Изменение энтальпии отличается от количества тепла, переданного от одного тела к другому, характеризующего эффект процесса. Энтальпия является функцией температуры и не зависит от других параметров. Изменение энтальпии определяется начальным и конечным состоянием рабочего тела и не зависит от промежуточных состояний. Удельной энтальпией **í** называется энтальпия, отнесённая к единице вещества.

Темпераура T (t) – мера средней кинетической энергии поступательного движения молекул. Температуру измеряют по двум шкалам: термодинамической (абсолютной) в кельвинах и международной практической в градусах Цельсия.

$\mathbf{T_к} = \mathbf{t_c} + 273.$

Теплоёмкость С – количество тепла, которое нужно сообщить телу, чтобы повысить его температуру на 1 ^oC.

Удельная теплоёмкость **С** – количество тепла, сообщаемое единице вещества (1кг, 1м^3, 1 кмоль)для повышения температуры на 1 ^oC. В зависимости от условий, при которых сообщается тепло, различают теплоёмкость C_p при постоянном давлении C_v при постоянном объёме. В табл. 2 приведены средние удельные объёмные теплоёмкости газов при постоянном давлении в интервале от 0 до 1200 ^oC. если газ нагревают не от 0^oC, а от какой-либо промежуточной температуры t_1, то количество тепла, необходимое для нагрева 1м^3 газа от t_1 до t_2,

$$q = {}^{t2}_{0}Cp \cdot t_2 - {}^{t1}_{0}Cp \cdot t_1$$

где $C_p^{t2}\ t_2$, $C_p^{t1}\ t_1$ – удельные теплоёмкости для соответствующих интервалов температур (табл. 2).

Средневзвешенная теплоёмкость смеси газов

$$\mathbf{C_{см} = 0{,}01\chi(N_2\chi C_{N2} + O_2\chi C_{O2} +);}$$

где $\mathbf{N_2, O_2}$…..- содержание отдельных составляющих в смеси, в %;

$\mathbf{C_{N2}, C_{O2}}$ – теплоёмкость этих составляющих, (ккал/(мЗ ^oC) .

Температурное поле – распределение температур в данный момент времени в рассматриваемом пространстве или материальной системе. Изменяющееся температурное поле является нестационарным, или неустановившимся, а неменяющееся температурное поле – стационарным или установившимся. В котельной практике имеет место раздельное и совместное действие трёх основных явлений теплообмена: теплового излучения, теплопроводности, конвекции.

Таблица 1

Соотношения между единицами работы (энергии)

Единицы	Дж	эрг	кгс ·м	ккал	кВт ·ч	л.с. ·ч
1Дж	1	10^7	0,102	$239\cdot 10^{-6}$	$0{,}278\cdot 10^{-6}$	$0{,}378\cdot 10^{-6}$
1эрг	10^{-7}	1	$10{,}2\cdot 10^9$	$23{,}9\cdot 10^{-13}$	$27{,}8\cdot 10^{-15}$	$37{,}8\cdot 10^{-15}$
1кгс ·м	9,81	$9{,}81\cdot 10^6$	1	$2{,}343\cdot 10^{-3}$	$2{,}7243\cdot 10^{-6}$	$3{,}704\cdot 10^{-6}$
1ккал	$4{,}187\cdot 10^3$	$41{,}87\cdot 10^9$	427	1	$1{,}163\ 10^{-3}$	$1{,}582\cdot 10^{-3}$
1кВт· ч	$3{,}6\cdot 10^6$	$36\cdot 10^{12}$	$367{,}1\cdot 10^3$	859,8	1	1,36
1л.с.· ч	$2{,}65\cdot 10^6$	$26{,}5\cdot 10^{12}$	$270\cdot 10^3$	632,4	0,736	1

© Бойко Е.А. *Основы теплотехники*

Соотношения между единицами мощности

Единицы	Вт	кВт	эрг/с	кгс м/с	кал/с	ккал/ч	л.с.
1Вт	1	10^{-3}	10^{7}	0,102	0,239	0,86	$1{,}36\cdot 10^{-3}$
1кВт	10^{3}	1	10^{10}	102	239	860	1,36
1эрг/с	10^{-7}	10^{-10}	1	$10{,}2\ 10^{-9}$	$23{,}9\cdot 10^{9}$	$86\ 10^{-9}$	$0{,}136\ 10^{-9}$
1кгс м/с	9,81	$9{,}81\cdot 10^{-3}$	$98{,}1\cdot 10^{6}$	1	2,343	8,435	$13{,}33\ 10^{-3}$
1кал/с	4,187	$4{,}187\cdot 10^{-3}$	$41{,}87\cdot 10^{6}$	$427\cdot 10^{-3}$	1	3,6	$5{,}69\ 10^{-3}$
1ккал/ч	1,163	$1{,}163\cdot 10^{-3}$	$11{,}63\cdot 10^{6}$	$118{,}5\cdot 10^{-3}$	0,2778	1	$1{,}58\ 10^{-3}$
1л.с.	735,5	$1{,}163\cdot 10^{-3}$	$7{,}3555\cdot 10^{9}$	75	175,7	632,4	1

Таблица 2

Средняя удельная объёмная теплоёмкость газов $c_{ср}$ в интервале температур от 0 до t, ккал /($м^3$ °C)

t, °C	CO_2	H_2O	N_2	O_2	CO	H_2	CH_4	C_2H_6	**Воздух**
0	0,382	0,357	0,309	0,312	0,310	0,305	0,370	0,528	0,310
100	0,406	0,360	0,309	0,315	0,311	0,308	0,392	0,596	0,311
200	0,427	0,364	0,310	0,319	0,312	0,310	0,420	0,663	0,312
300	0,445	0,368	0,312	0,324	0,315	0,310	0,451	0,727	0,315
400	0,461	0,374	0,314	0,330	0,317	0,311	0,481	0,790	0,317
500	0,475	0,380	0,317	0,334	0,321	0,312	0,512	0,848	0,321
600	0,488	0,386	0,320	0,338	0,324	0,313	0,540	0,902	0,324
700	0,499	0,392	0,323	0,342	0,328	0,314	0,568	0,952	0,327
800	0,509	0,398	0,327	0,346	0,331	0,315	0,596	0,99	0,331
900	0,518	0,405	0,330	0,350	0,334	0,316	0,622	1,042	0,334
1000	0,526	0,412	0,332	0,353	0,337	0,317	0,645	1,082	0,337
1100	0,534	0,418	0,335	0,356	0,340	0,319	0,665	1,119	0,340
1200	0,541	0,424	0,338	0,358	0,343	0,321	0,684	1,153	0,342

Излучение – (лучеиспускание, радиация) – теплообмен между телами, на расстоянии друг от друга, посредством лучистой энергии, носителями которой являются электромагнитные колебания (ультрафиолетовые, инфракрасные и световые лучи).

Теплопроводность – перенос тепла между частицами твердых, жидких и газообразных тел при непосредственном соприкосновении частиц, обусловленных разностью температур этих частиц.

Конвекция – перенос тепла перемещением или перемешиванием частиц между собой (теплообмен, свойственный жидкостям и газам).

Передача тепла поверхностям нагрева, обращенным в сторону топки, происходит в основном за счёт излучения от факела и продуктов горения.

В газоходах котла передача тепла от уходящих газов поверхностям нагрева происходит в основном за счёт конвекции. В связи этим поверхность нагрева котла подразделяется на радиационную и конвективную части.

К радиационной части относят экранные трубы и другие поверхности котла, обращённые в топку.

Если экранные трубы пересекают топочное пространство и воспринимают лучистое тепло с двух сторон, то такой экран называют двухсветным (см. рис. 1)

Двухсветный экран

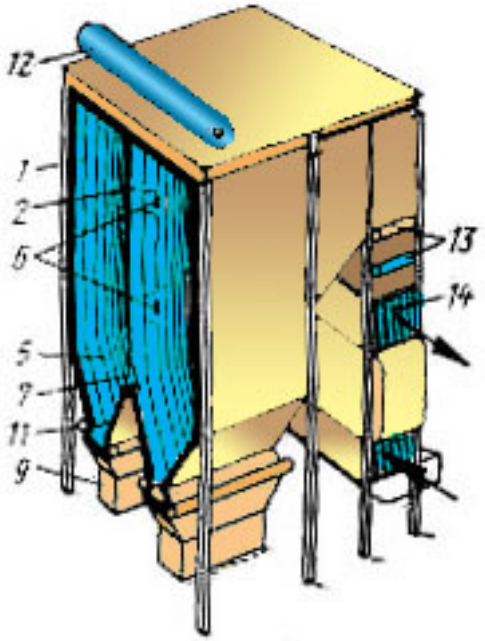


Рис. 1

Теплообмен в топке, отнесённый к 1 м^2 поверхности нагрева и перепаду температуры 1^{o}С в 10-12 раз эффективнее, чем в газоходах. Удельное количество тепла, передаваемого излучением (радиацией), определяется по формуле, основанной на законе Стефана – Больцмана:

$$\mathbf{Q_л = a_т c_s[(T_ф/100)^4 - (T_{ст}/100)^4],}$$

где $\mathbf{a_т}$ – условный коэффициент степени черноты топки;
$\mathbf{c_s}$ – коэффициент излучения абсолютно черного тела, равный 4,9 ккал/(м2 ·ч·°С)^4;
$\mathbf{T_ф}$ – температура газов на выходе из топки (за фестоном), ^{o}С;
$\mathbf{T_{ст}}$ - температура лучевоспринимающей поверхности (стен топки), ^{o}С.

Условный коэффициент степени черноты колеблется от 0,4 для несветящегося газового факела до 0,85 для светящегося (например, мазутного факела.

Так как $\mathbf{T_{ст}}$ зависит от температуры нагреваемой воды и колеблется в узких пределах, то основное влияние на количество тепла, передаваемое излучением оказывает температура газов.

Под температурой газов на выходе из топки понимают температуру при входе в первый газоход. Для котлов, имеющих камеру догорания (например, котлы ДКВР), температурой газов на выходе из топки считают температуру за камерой догорания.

Количество тепла, передаваемое в конвективных поверхностях, определяется основным уравнением теплопередачи:

$$\mathbf{Q = k \cdot H \cdot \Delta t}$$

Где **k** - коэффициент теплопередачи, ккал/(м^2 ч ^{o}С);

H – поверхность теплобмена, м2;

Δt – средний температурный перепад между уходящими газами и нагреваемой водой, ^{o}С;

Уходящие газы – под уходящими газами следует понимать продукты сгорания (полного или неполного), разбавленные воздухом за счет его присоса в топке, газоходах котла и газовом тракте котельной.

Коэффициент теплопередачи – k – количество тепла, передаваемое от нагревающего потока к нагреваемому в единицу времени через единицу поверхности плоской стенки при разности температур в 1^{o}С.

$$k = \frac{1}{1/a_1 + d_c/l_c + d_{CT}/l_{CT} + d_H/l_H + 1/a_2} \qquad (1)$$

где $ά_1$, $ά_2$ - коэффициенты теплоотдачи от уходящих газов к поверхности нагрева и от внутренней поверности нагрева к нагреваемой воде, ккал/м2·ч·^{o}С;

δ1, δ2 – толщина слоя сажи, металлической стенки, слоя накипи, м;

λс, λст, λн - коэффициенты теплопроводности соответствующих слоёв, ккал/м ч ^{o}С.

Коэффициент теплоотдачи α - количество тепла, передаваемого в единицу времени единице поверхности нагрева от нагревающего потока, или от единицы поверхности нагрева нагреваемому потоку.

Представляет собой сумму теплоотдачи конвекций $α_к$ и излучением $α_л$; зависит от режима движения потока, плотности перемещаемой среды, размеров и формы каналов, взаимного направления потоков и других условий. Соотношения между коэффициентами теплоотдачи (теплопередачи) различных систем единиц измерений приведены в таблице №3.

Примерные значения коэффициентов теплоотдачи в котлоагрегатах ккал/(м^2 ч ^{o}С): $α_1 \approx 20 \div 50$; $α_2$ – от стенки к водяному пару –500 ÷3000; к не кипящей воде – 5000÷15000; к кипящей воде –10000÷100000.

Коэффициент теплопроводности λ – количество тепла, передаваемого в единицу времени через единицу поверхности на 1 метр пути теплового потока при перепаде температур 1 ^{o}С. Теплопроводность материала зависит от его химического состава, пористости, влажности, температуры и давления (для жидкостей и газов).

Слагаемые знаменателя формулы (1) называются частными тепловыми сопротивлениями. Чем больше сумма тепловых сопротивлений, тем меньше коэффициент теплопередачи. Очень малым тепловым сопротивлением харак-

теризуется передача тепла от внутренней поверхности нагрева к воде (величина $1/\alpha_2$), а также передача тепла через стальные или чугунные стенки, у которых $\lambda_{ст}$ = 40÷50 ккал/(м ч °С), при δ = 0,0025 ÷ 0,01 м.

Большое влияние на теплопередачу оказывает тепловое сопротивление слоя накипи. Значение коэффициента теплопроводности накипи колеблется от 5 до 0,05 ккал/(м ч °С), т. е. в10 – 1000 раз меньше теплопроводности стали и чугуна. Наименее теплопроводна и потому наиболее опасна пористая (силикатная накипь, особенно если она неплотно сцеплена с поверхностью металла.

Очень низкой теплопроводностью, примерно в 400 раз меньше теплопроводности стали, отличается сажа. Помимо ухудшения условий теплопередачи отложения накипи и сажи повышают сопротивление котла по водяному и газовому трактам.

Таблица 3

Соотношения между единицами коэффициентов теплоотдачи (теплопередачи)

Единицы	вт/см^2· К	кВт/м^2 ·К	эрг/см^2 ·с ·°С	кал/см ·с ·оС	ккал/м^2·ч·°С
1 вт/см^2· К	1	10	107	0,239	8600
1 кВт/м^2 ·К	0,1	1	106	$23{,}9\cdot10^{-3}$	860
1эрг/см^2·с ·°С	10^{-7}	10^{-6}	1	$23{,}9\cdot10^{-9}$	$860\cdot10^{-6}$
1кал/см·с ·оС	4,187	41,87	$41{,}87\cdot10^{6}$	1	36000
1ккал/м^2·ч·оС	$116\cdot 10^{-6}$	$1{,}16\cdot10^{-3}$	$1{,}16\cdot10^{3}$	$27{,}8\cdot10^{-6}$	1

Поверхность нагрева котла или водяного экономайзера **Н** – поверхность через которую происходит теплообмен, т. е. поверхность, нагреваемая с одной стороны продуктами горения и уходящими газами и омываемая с другой стороны нагреваемой водой или паром (в пароперегревателе)

Для чугунных котлов применяют также и другой теплотехнический показатель – квадратный метр условной поверхности нагрева (м^2 УПН): поверхность , которая при сжигании сортированного антрацита в топке с ручным обслуживанием и тепловым напряжением зеркала горения 500 Мкал/м^{2}ч даёт КПД котла 70%.

Тепло – паропроизводительность котла **Q** или **G** – общее количество тепла (пара), выработанное в котле.

Теплосъём (паросъём) q_y – усреднённое по котлу количество тепла (пара), полученное в единицу времени с 1 м^2 поверхности нагрева: **q=Q/H**

Номинальная производительность – наибольшая производительность, которую может обеспечить котёл в течение длительной эксплуатации без расстройства режима его работы и при соблюдении заданных технологических параметров.

Кратность циркуляции $К_ц$ – отношение массы воды $Q_в$, вошедшей в циркуляционный контур котла, к массе образовавшегося пара:

$$К_ц = Q_в / Q_п$$

Кратность циркуляции зависит от давления пара, а также от конфигурации, интенсивности обогрева и высоты контура циркуляции.

Номинальное давление пара – наибольшее давление за пароперегревателем (при его отсутствии – перед паропроводом к потребителю) при номинальной производительности.

Номинальная температура питательной воды – температура, принятая при проектировании котла для номинальной производительности, перед входом в экономайзер, а при его отсутствии – перед входом в котёл.

Тепловая нагрузка котельной, ккал/ч (Гкал/ч), – потребность в тепле (паре, горячей воде), представляющая собой сумму расходов отдельными потребителями и на собственные нужды, транспортные потери. Различают расчётную нагрузку, по которой определяют производительность и количество котлов в котельной, и текущую нагрузку, соответствующую данному периоду времени, по которой определяют режимы работы котлов.

Тепловая нагрузка котла, ккал/ч, – произведение количества $\mathbf{V_н}$, $м^3$/ч, сожженного за 1 ч газа на его низшую теплоту сгорания $\mathbf{Q_н}$, ккал/$м^3$.

Форсировка – повышение (изменение) производительности котла по сравнению с номинальной**.** На практике под форсировкой понимают изменение часового количества сжигаемого топлива.

Тепловое напряжение топочного объёма (камеры горения) – отношение количества выделившегося в единицу времени тепла **Q**, ккал/ч, к объему $\mathbf{V_т}$, $м^3$, топки или камеры:

$$\mathbf{q_v = Q/V_t}$$

Тепловое напряжение огневого сечения - (устья горелки, туннеля, щели) – отношение количества тепла Q ккал, к площади рассматриваемого поперечного сечения $F_с$, $м^2$:

$$\mathbf{q_v = Q/F_c}$$

Испарительность – отношение количества выработанного пара Д, кг к объёму израсходованного за это же время газа $V_н$, $м^3$ (условная характеристика, часто применяемая в котельной практике):

$$\mathbf{d_н = D/V_н}$$

Теплота сгорания – количество тепла, выделяющегося при полном сгорании топлива. Различают удельную и объёмную теплоту сгорания низшую $\mathbf{Q_н}$, в которой не учитывается скрытая теплота образования водяных паров, содержащихся в продуктах горения, и высшую $\mathbf{Q_в}$ когда эта теплота учитывается. Разность между $\mathbf{Q_в}$ и $\mathbf{Q_н}$ зависит от количества водяных паров, образующихся при сгорании топлива, и составляет примерно 600 ккал на 1 кг или 470 ккал на 1 $м^3$ водяных паров.

В России теплотехническую оценку эффективности сжигания топлива принято вести по низшей теплоте сгорания. Работу установок, в которых вода нагревается при непосредственном контакте с уходящими газами, следует оценивать по высшей теплоте сгорания, так как при расчётах по низшей теплоте сгорания эффективность использования топлива может оказаться выше 100 %.

Жаропроизводительность t_{max} – максимальная температура горения, развиваемая при полном сгорании топлива, в условиях, когда всё выделяющееся тепло расходуется на нагрев образующихся продуктов полного сгорания, без учёта диссоциации (распада) CO_2 и H_2O, вызываемой высокой температурой факела. При подсчёте жаропроизводительности принимают, что температура газа t_2 и воздуха $t_в$ участвующих в горении, равна 0^oC, а количество абсолютно сухого воздуха точно соответствует теоретически необходимому.

$$T_{max} = Q_н / \Sigma V' C_o \div t_{max}$$

где V' – объёмы компонентов продуктов полного сгорания, $м^3/м^3$;

$C_o \div t_{max}$ – средняя теплоёмкость отдельных компонентов в интервале температур от 0 до t_{max}, ккал/$м^3 \cdot {}^oC$;

Калориметрическая температура горения – максимальная температура, подсчитанная без учёта диссоциации продуктов горения. Зависит от расхода воздуха, температуры газа и воздуха. Жаропроизводительность является частным случаем калориметрической температуры, когда

$\acute{\alpha} = 1$ и $t_в = t_г = 0\ ^oC$.

Теоретическая температура горения – максимальная температура, подсчитанная с учётом диссоциации CO_2 и H_2O при $\acute{\alpha} = 1$ и $t_в = t_г = 0\ ^oC$.

Расчётная температура горения – максимальная температура, подсчитанная с учётом диссоциации CO_2 и H_2O, а также действительных коэффициентов избытка воздуха.

Температура воспламенения – минимальная начальная температура, при которой начинается процесс горения. Не является физической константой, т. е. строго определённой величиной, а зависит от состава, степени перемешивания и давления газовоздушной смеси, размеров и формы ёмкости, заполненной этой смесью, и других факторов.

2. СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО ЭЛЕМЕНТА

2.1. Законы газового состояния

Состояние газов характеризуется совокупностью значений характерных величин – основных параметров: удельного объёма V (плотности), давления **P** и температуры **T**.

Изменение одного из них вызывает изменение других параметров, причём зависимости этих изменений подчинены определённым законам.

Закон Шарля: при постоянном объёме давление данной массы газа прямо пропорционально его абсолютной температуре.

$$P_1/P = T_1/T, \text{ или } P_1 = P(T_1/T),$$

Закон Бойля-Мариотта: при неизменных температуре и массе произведение численных значений удельного объёма газа и абсолютного давления – величина постоянная, т. е.

$$pv = p_1v_1 = const,$$

$\mathbf{v/v_1 = p_1/p}$ **или** $\mathbf{v = v_1(p_1/p)}$,

т. е. удельный объём газа обратно пропорционален его давлению.

Закон Гей-Люссака: при постоянном давлении объём данной массы газа прямо пропорционален его абсолютной температуре.

$$\mathbf{V/V_1 = T/T_1 \quad или \quad V= V_1(T/T_1)}$$

Объединённый закон Мариотта – Гей-Люссака: при одновременном изменении всех параметров произведение давления на объём, отнесённое к абсолютной температуре, остаётся постоянной величиной.

$$\mathbf{PV/T = P_1V_1/T_1},$$

$$\mathbf{V=V_1 \cdot P_1/P \cdot T/T_1} \qquad (2)$$

Формула (2) позволяет приводить объёмы газов к одним и тем же условиям для сопоставления, в частности к нормальным (р = 760 мм.рт.ст., Т = 273 К) и стандартным (р = 760 мм.рт.ст., Т = 293 К). В частности, объём газа, определённый по измерительному устройству (счётчик, расходомер), приводят к нормальным условиям по формуле

$$V_н = V_{изм} \frac{273}{T_р} \times \frac{P_{бар} + P_2 - P_{в.п.}}{760} \qquad (3)$$

где $\mathbf{V_{изм}}$ – объём газа, измеренный по прибору при рабочих условиях, $м^3$;

$\mathbf{P_{бар}}$ – атмосферное (барометрическое) давление, мм рт. ст;

$\mathbf{P_2}$ – избыточное давление газа, измеренное манометром, мм рт. ст.;

$\mathbf{P_{в.п.}}$ – парциальное давление водяных паров в газе, мм рт. ст.; (при изменении объёма осушенного газа, а также в приближенных расчётах можно не учитывать);

$\mathbf{T_р}$ – абсолютная рабочая температура газа, К.

Для приведения объёма газа к стандартным условиям надо число 273 в формуле (3) заменить на 293, т. е. переводной коэффициент из нормальных условий в стандартные равен 293/273, а из стандартных в нормальные – 273/293.

2.2. Основные физические параметры пара

Основными параметрами газа или пара являются: давление **P**, температура **T**, **t** и удельный объем **V**.

Давление. Сила, действующая на единицу поверхности, называется удельным давлением Р.

В системе СИ за единицу измерения давления принят паскаль (Па). Паскаль – давление, создаваемое силой в 1 ньютон (Н), которая равномерно распределена по поверхности площадью 1 $м^2$. 1Па =1 $Н/м^2$.

В системе МКГСС давление измеряют в $кгс/см^2$ и называют *технической атмосферой*. 1 $кгс/см^2 = 10^4$ $кгс/м^2$.

Давление измеряют также высотой столба жидкости в метрах водяного столба (м вод. ст) или миллиметрах ртутного столба (мм рт. ст.)

Давление 760 мм.рт.ст. называют *физической атмосферой*. Давление разделяют на *атмосферное, избыточное и абсолютное*.

Атмосферное давление измеряют барометрами и называют *барометрическим – $P_{бар}$*. Если на поверхность, кроме атмосферного давления, действуют какие-либо другие силы они создают *избыточное давление – $P_{изб}$*. Избыточное давление измеряют манометрами и поэтому называют *монометрическим*.

Абсолютное давление $\mathbf{P_{абс}}$ определяют путём суммирования избыточного $\mathbf{P_{изб}}$ и атмосферного давлений $\mathbf{P_{бар}}$.

$$\mathbf{P_{абс} = P_{изб} + P_{абс}}$$

Давление ниже барометрического (вакуум или разрежение) измеряют вакуумметром. Разрежение определяют по формуле:

$$\mathbf{P_{вак} = P_{бар} - P_{бар}}.$$

Соотношение между единицами измерения давления различных систем приведено в табл. 4.

Таблица 4

Соотношения между единицами давления

Единицы	Н/м^2(Па)	дин/см2	кгс/м^2(мм вод. ст)	бар	ат	атм	мм.рт.ст.
1н/м^2	1	10	0,102	10^{-5}	$1{,}02\cdot10^{-5}$	$9{,}87\cdot10^{-4}$	$7{,}5\cdot10^{-3}$
1дин/см^2	0,1	1	$10{,}2\cdot10^{3}$	10^{-6}	$1{,}02\cdot10^{-6}$	$0{,}987\cdot10^{-6}$	$750\cdot10^{-6}$
1кгс/м^2(мм вод. ст.)	9,81	98,1	1	$9{,}81\cdot10^{-5}$	10^{-4}	$0{,}968\cdot10^{-4}$	$73{,}56\cdot10^{-3}$
1 бар	10^5	10^6	$10{,}2\cdot10^{3}$	1	1,02	0,987	750
1ат(техническая атмосфера)	$9{,}81\cdot10^{4}$	$981\cdot10^{3}$	10^4	0,981	1	0,968	735,6
1атм(физическая атмосфера)	$10{,}13\cdot10^{4}$	$1013\cdot10^{3}$	$1{,}033\cdot10^{4}$	1,013	1,033	1	760
1мм рт. ст.	133,3		13,6	$133{,}2\cdot10^{-5}$	$1{,}36\cdot10^{-3}$	$1{,}31\cdot10^{-3}$	1

Температура. Температура характеризует степень нагретости тела и измеряется в градусах Цельсия (^{o}C), а в кельвинах – от абсолютного нуля, температура которого принята –273,15^{o}C

Связь между температурой, измеренной в кельвинах ($\mathbf{T_к}$) и градусах Цельсия ($\mathbf{t_c}$), определяют соотношениями:

$$\mathbf{T_к - tc = 273{,}15\ К}$$

$$\mathbf{t_c = T_к - 273{,}15\ ^oC}$$

Удельный объём. Объём в 1м^3, заполненный однородным телом массой в 1 кг, называют удельным объёмом.

$$u = \frac{V}{m}\ м^3 / кг$$

где **V** – объём тела, м^3;

m – масса тела, кг.

Величина, обратная удельному объёму, называется плотностью **ρ**.

$$r = \frac{m}{u}, \text{ кг/м}^3$$

2.3. Энергия и её виды

Энергия – это способность тела или системы тел совершать работу. Энергию разделяют на первичную (солнечная энергия, ветровые потоки, движение воды, энергия топлива, внутренняя теплота земли, радиоактивные излучения и т.д.) и вторичную, которая вырабатывается за счёт первичной, например на тепловых электростанциях.

Материя состоит из молекул и атомов, которые находятся в беспорядочном хаотическом движении.

Под энергией понимают различные формы движения материи. В зависимости от формы движения материи энергию принято разделять на механическую, ядерную, тепловую, электрическую, внутреннюю и др.

Тепловая энергия, или теплота тела – это энергия беспорядочного движения микрочастиц. Чем выше интенсивность движения этих частиц, тем большей тепловой энергией, или теплотой, располагает тело. Можно сказать, чем, выше температура данного тела, тем большей тепловой энергией оно располагает.

В системе СИ за единицу измерения энергии, в том числе и тепловой, принят джоуль (Дж).

Для измерения тепловых величин применяют и внесистемные единицы, за основу которых взята калория (ка) или килокалория (ккал). Килокалория – (ккал) равна количеству тепла, которое необходимо передать 1кг воды при атмосферном давлении для повышения его температуры на 1^oC.

1ккал = $4{,}18 \cdot 10^3$ Дж.

Все виды энергии одни в большей, другие в меньшей мере, обладают способностью переходить (превращаться) в другие виды, причём при переходе одного вида энергии в другой её1 суммарное количество остаётся неизменным.

Это свойство энергии формируется как основной закон природы – **закон сохранения и превращения энергии,** открытый М. В. Ломоносовым: *движение материи (энергия) не возникает из ничего и не исчезает бесследно, а превращается из одной формы в другую в строго определённых количествах*.

Разновидностью закона сохранения энергии является **первый закон термодинамики**: *теплота и работа при определённых условиях могут преобразовываться друг в друга в эквивалентных количествах*.

Другими словами, за счёт некоторого количества тепла можно совершить эквивалентную работу, т. е.

Q = A∛E

где **Q** – количество теплоты, ккал;

A – совершаемая работа, кгс м;

Е – тепловой эквивалент работы, полученный опытным путём и равным 1/427 ккал/кгс м.

В общем случае тепло, подведённое к телу, может не полностью затрачивается на совершение работы, а частично расходоваться на изменение внутренней энергии тела. Это происходит, например, если к цилиндру с поршнем, заполненному газом, подвести некоторое количество тепла.

В этом случае газ изменит свою внутреннюю энергию (нагреется), расширяясь, совершит работу и переместит поршень.

Внутренняя энергия – тела складывается из энергии поступательного и вращательного движения молекул, составляющих тело, энергии внутри молекулярных колебаний, потенциальной энергии сил сцепления между молекулами, внутримолярной, внутриатомной (энергии электронных оболочек атомов) и внутриядерной энергии.

Первый закон термодинамики устанавливает соотношение между теплом и работой при их взаимном превращении. Условия, при которых происходят эти превращения определяются **вторым законом термодинамики**.

Согласно второму закону термодинамики невозможно превратить в работу всё тепло, подведённое к рабочему телу.

Часть тепла необходимо отдать другому телу с более низкой температурой, т. е. холодному источнику (конденсатору турбины или окружающей среде, в которую выбрасываются выхлопные газы двигателей внутреннего сгорания, с уходящими газами из котлов, рассеиванием тепла в окружающую среду, неполным сгоранием топлива, затратами на преодоление сил трения и т. д.)

С точки зрения преобразования тепловой энергии в механическую, эта часть тепла оказывается потерянной. Таким образом, для периодически действующей машины-двигателя необходимо иметь два источника тепла: горячий, получаемый, например, за счёт сгорания топлива, и холодный, например конденсатор турбины.

Закону сохранения энергии подчинены все энергетические изменения, как в естественном виде в природе, так и в технике.

Примером действия закона превращения энергии в технике служит получение электричества.

На тепловой электрической станции первичная внутренняя энергия топлива при сжигании его в топках котлов превращается в тепло продуктов сгорания. Это тепло нагревает воду и превращает её в пар, который подаётся в турбину.

В турбине тепловая энергия пара переходит в кинетическую энергию движущейся струи пара. Пар, проходя с большой скоростью между лопатками турбины, заставляет турбину вращаться.

Механическая энергия вала турбины передаётся электрогенератору, в котором она превращается в электрическую. Однако в процессе перехода энергии из одного вида в другой часть её не удаётся использовать. Это объясняется потерями энергии в конденсаторе турбины, с уходящими из котельного агрегата газами и др.

Степень полезного использования энергии при её превращениях в устройствах и механизмах определяет коэффициент полезного действия (КПД) машины или установки. Таким образом, КПД характеризует степень совершенства паросиловой установки, её механизмов и устройств.

В современных паровых котлах удаётся использовать 90-95% внутренней энергии топлива.

2.4. Виды теплообмена

Теплообмен, т. е. процесс переноса тепла осуществляется тремя способами: теплопроводностью, конвекцией и излучением.

Теплопроводность – процесс переноса тепла от более нагретых тел к менее нагретым при их соприкосновении. Примером теплопроводности является распространение тепла Q через плоскую разделительную стенку толщиной δ (рис.2) количество тепла, проходящего через стенку, будет равно:

$$Q = \frac{l}{d}(t_1 - t_2)F$$

где Q – количество тепла проходящего через стенку, ккал/ч;

l – коэффициент теплопроводности, ккал/м ·ч· ^{o}C;

$t_1 - t_2$ – разность температур между противоположными поверхностями разделительной стенки, ^{o}C;

F – поверхность разделительной стенки, м^2.

Из формулы видно, что разность температур ($t_1 – t_2$) противоположных поверхностей стенки при прочих равных условиях будет тем больше, чем меньше коэффициент теплопроводности.

Конвекция, излучение – (см. раздел термины и определения).

В котельном агрегате тепло от продуктов сгорания к воде и пару передаётся при сложном теплообмене, т.е. всеми тремя способами.

Теплоёмкость газов зависит от их природы, температуры и условий, в которых протекает нагревание или охлаждение.

Если процесс подвода тепла происходит при постоянном давлении, то тепло расходуется на нагревание газа и его расширение, т. е. совершение работы.

При нагревании газа при постоянном объёме все тепло затрачивается на увеличение его внутренней энергии, т.е. на повышение температуры газов.

Внешней работы, связанной с расширением газа, в этом случае не происходит.

В связи с этим теплоёмкость газа (пара) при постоянном давлении $\mathbf{C_p}$ всегда больше теплоёмкости при постоянном объёме $\mathbf{C_v}$.

В котельных установках чаще пользуются теплоёмкостью при постоянном давлении, которую находят для определённых условиях по таблицам и графикам.

Распределение температур в плоской стенке

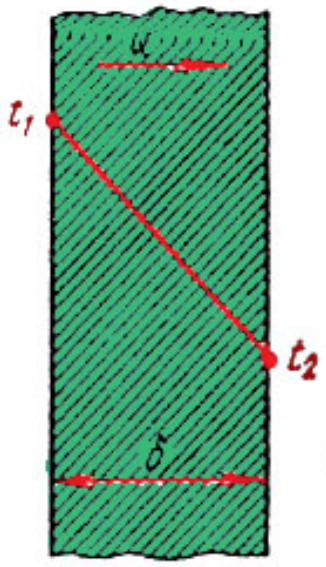


Рис. 2

Энтальпия (от греческого слова нагревать) (i) определяет работоспособность рабочего тела и для процессов, протекающих при постоянном давлении (C_p), численно равна количеству тепла, передаваемого рабочему телу в процессе его нагревания:

$$\mathbf{i = C_p \cdot t;}$$

где **i** – энтальпия, ккал/кг;

$\mathbf{C_p}$ – удельная теплоёмкость газа(пара) при постоянном давлении, ккал/кг·°С;

t – температура, °С;

Из формулы видно, что с повышением температуры физического тела его энтальпия, а следовательно, и работоспособность увеличиваются.

2.5. Топливо

Сжигаемые под паровыми котлами электростанций многочисленные виды топлива разделяются на три группы: на твёрдые топлива – антрацит, полуантрацит, каменные и бурые угли, торф и сланцы; на жидкие топлива – мазут и (изредка) различные смолы и на газообразные топлива – природный газ, попутный газ, получаемый из недр земли при добыче из неё нефти, доменный и (изредка) коксовый газы, сжигаемые под котлами на заводах чёрной металлургии.

Из районов добычи твёрдого топлива в России важное значение имеет Донецкий угольный бассейн, часть которого находится в Ростовской области. Значительное место по добыче угля принадлежит Кузбассу в Западной Сибири.

В последнее время приобрели значение новые месторождения углей, добываемых не в шахтах, а открытым способом, благодаря чему значительно

уменьшается стоимость топлива (например: канско-ачинские угли в Красноярском крае)

Сжигаемый на электростанциях мазут представляет собой остаток после извлечения из нефти бензина, керосина и других продуктов. Из нефтяных месторождений большое значение для энергетики имеют запасы нефти между р. Волгой и Уралом. Быстро возрастает добыча нефти и природного газа в богатейшем Тюменском месторождении, на севере Томской области и др.

2.5.1. Состав топлива

Все ископаемые богатства – как угли, так и нефть, сланцы и природный газ – являются остатками растений и животных организмов. Чем древнее твердое топливо, тем, как правило, меньше в нём характерных для растений смолистых веществ (так называемых *летучих*) и тем больше углерода.

Продукты распада растений и низших животных организмов образуют в твёрдом топливе его *горючую массу*, состав которой, несколько разнящийся для отдельных его месторорждений, определяется, в основном содержанием в топливе летучих веществ.

В верхней и нижней частях рис. 3 схематически показано, что в одном из древних по происхождению углей - антраците содержание углерода в горючей массе топлива наибольшее, а содержание кислорода и летучих веществ наименьшее.

На рис. 3 и 4 можно видеть, из каких элементов состоит горючая масса ископаемых топлив. Из пяти, указанных на схемах составных элементов топлива, лишь углерод, водород и сера выделяют тепло при сгорании.

Однако водород, азот и сера, взятые вместе, составляют лишь небольшую часть горючей массы. Это видно по высоте белых полосок на верхних столбиках на рис. 3

Основное количество тепла при сгорании почти всех твердых топлив выделяется при сгорании углерода.

Кроме горючей массы, в состав топлива входят и неорганические вещества; они образуют золу - угля. Горючую массу вместе с золой называют ***сухой массой*** топлива. ***Рабочей массой*** топлива называется сухая масса вместе с содержащейся в топливе влагой. Связь между горючей, сухой и рабочей массой топлива схематически изображена на рис. 3 и 4.

Количество и состав золы топлива зависит от того, среди каких минеральных веществ происходило разложение растений, из которых образовалось топливо. Содержание золы значительно разнится в топливах отдельных месторождений. Различно и содержание в них влаги. Столбики на рис. 3 приблизительно показывают средние характеристики отдельных сортов топлива.

На рис. 5 приведена характеристика отдельных газообразных топлив. Основной частью природного газа, добываемого из недр земли раздельно от нефти, является метан, (именуемый иногда «болотным газом»).

Гораздо меньше тепла выделяется при сжигании доменного газа, в котором около 70% объёма является негорючим балластом – азотом и углекисло-

той, а горючая часть состоит в основном из окиси углерода (угарного газа CO), выделяющей при сгорании сравнительно мало тепла, но чрезвычайно ядовитой.

Сравнительные характеристики мазута и различных твердых топлив

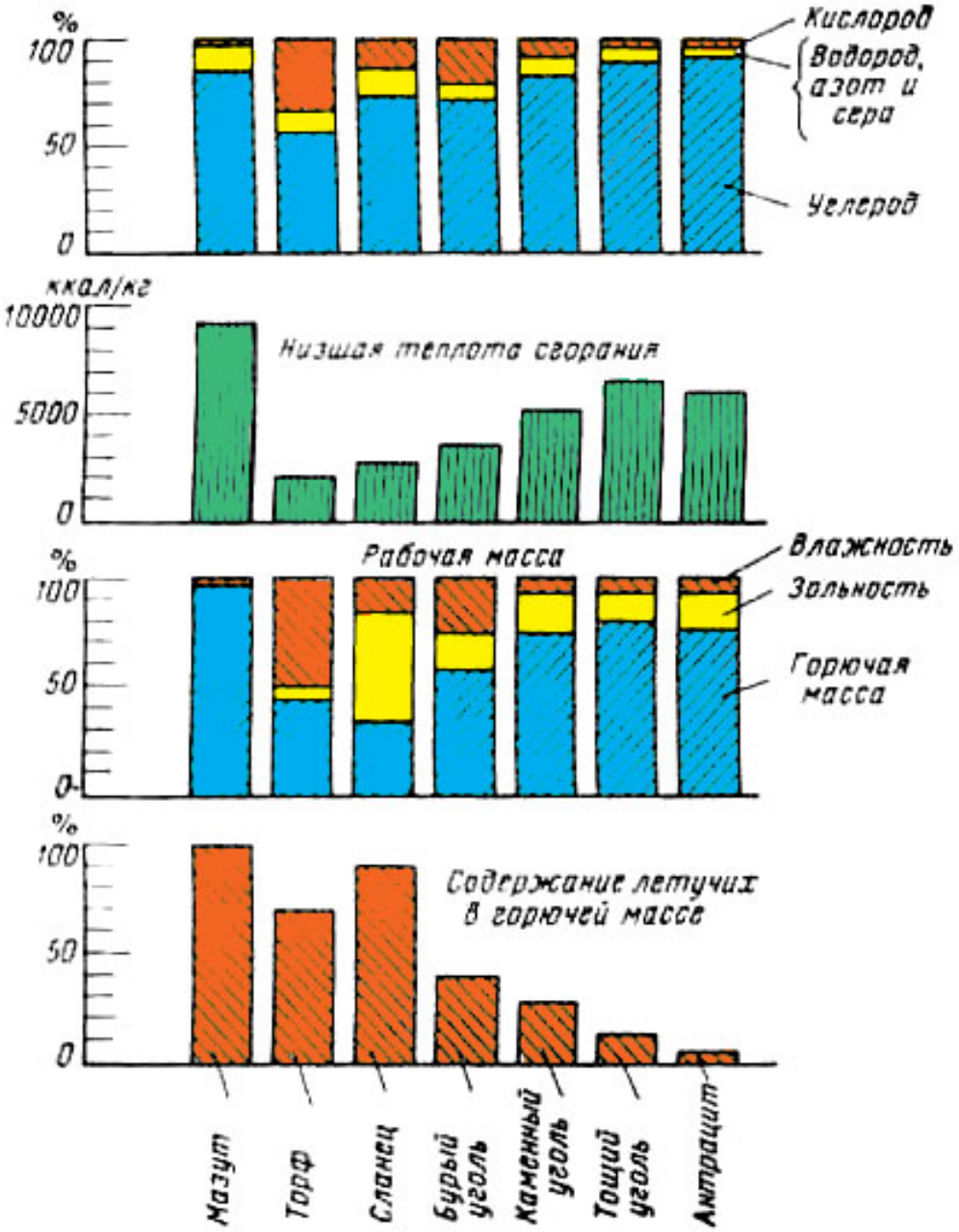


Рис. 3

Схема элементарного состава твердого топлива

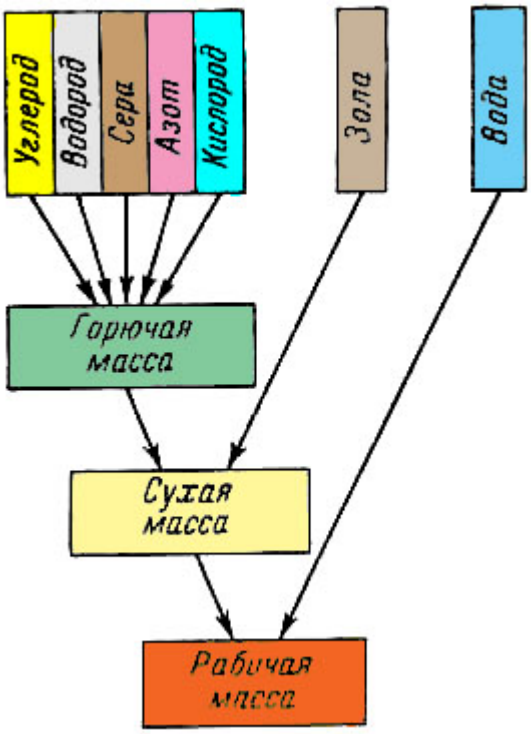


Рис. 4

При добыче нефти почти всегда вместе с ней извлекается нефтяной (попутный) газ, количество которого на 1 т нефти может изменяться в весьма широких пределах.

В нефтяном газе обычно содержится большое количество предельных углеводородов (этана, пропана, бутана и др.), являющихся ценным сырьём для химических заводов, а при сжигании обеспечивающих более высокую теплоту сгорания, чем у природного газа рис. 5

Сравнительные характеристики различных газообразных топлив

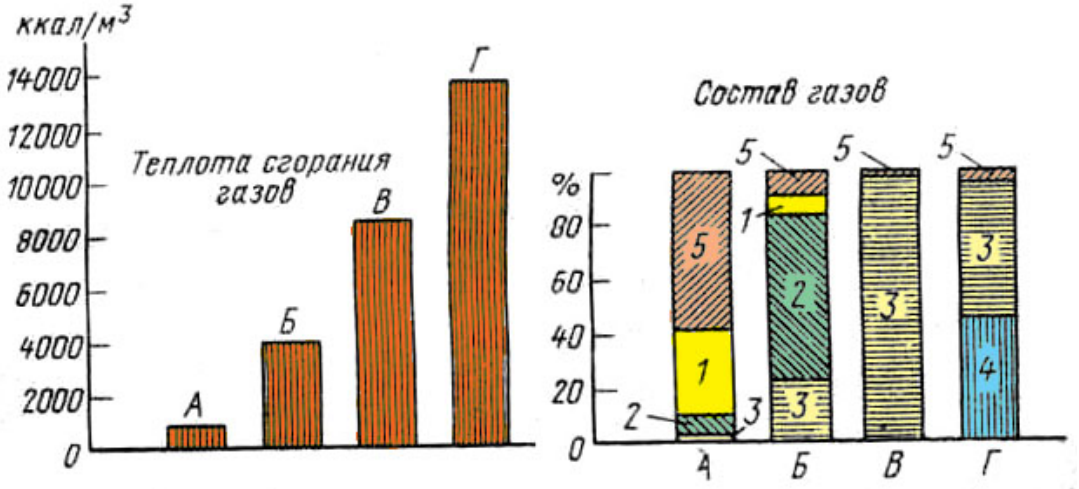


Рис. 5

А – доменный газ; Б – коксовый газ; В – природный газ Ставропольского месторождения; Г – попутный нефтяной газ Мухановского месторождения в Самарской области: 1 – окись углерода; 2 – водород; 3 – метан; 4 – этан, пропан и другие углеводороды; 5 – балласт (азот и углекислый гагз)

© Бойко Е.А. *Основы теплотехники*

Состав нефтяного газа и его теплоты сгорания могут немного изменяться даже в одном месторождении (например, теплота сгорания Туймазинского газа в Башкирии изменяется от 10380 до 13350 ккал/м^3). Имеются месторождения (например в Тюменской области и на Сахалине), где нефтяной газ содержит свыше 80% метана, вследствие чего различие между ним и природным газом оказывается незначительным.

Теплота сгорания. Количество тепла, выделившееся при полном сгорании 1 кг твердого или жидкого топлива, характеризуется его **низшей теплотой сгорания**.

Для газообразных топлив определяют количество тепла при сгорании 1 м^3 горючего газа при так называемых «нормальных условиях» (при температуре газа 0 ^{o}C и атмосферном давлении) это тепло измеряется в килоджоулях (кДж) и килокалориях (ккал). Напомню, что 1кал равна 4,187 Дж.

Из рис. 3 видно, что из твёрдых топлив малую теплоту сгорания имеют сланцы, рабочая масса которых содержит до 60-70% золы. Мала теплота сгорания и у торфа, имеющего высокую влажность.

Как правило, горючая масса поступающего на электростанцию твёрдого топлива почти одинакова для всего месторождения. Колебания низшей теплоты сгорания в основном объясняются изменением зольности и особенно влажности топлива. Наиболее сильно изменяется качество торфа. В дождливые сезоны влажность его достигает до 55 и даже 60%, вследствие чего значительно ухудшаются условия его сжигания. Каждый сорт угля имеет свою максимальную влажность; излишек воды стекает с топлива.

Для сравнительных расчётов производят перерасчёт действительного топлива на так называемое **условное топливо** с низшей теплотой сгорания 7000ккал/кг.

Например, 100тн бурого угля, имеющего низшую теплоту сгорания 3500 ккал/кг, составляют 50 т условного топлива: 100т мазута, имеющего низшую теплоту сгорания 9200 ккал/кг, составляют условного топлива.

$$100 \times \frac{9200}{7000} = 131 m.y.m.$$

2.5.2. Характеристики твердых топлив

Зольность, влажность, выход летучих и теплота сгорания являются основными техническими характеристиками твердых топлив. Но существуют и другие их характеристики.

С возрастанием влажности угля уменьшается его **сыпучесть**. Уголь с большим содержанием влаги теряет сыпучесть настолько, что забивает приёмные решётки бункеров, застревает в бункерах и течках. Иногда в бункерах и течках образуются своды, которые с трудом можно разрушить. Сыпучесть топлива восстанавливается , если его влажность удаётся уменьшить.

В северных районах, а в суровые зимы и в средней полосе нашей страны приходится бороться со *смерзанием* топлива в железнодорожных вагонах, прибывающих на станцию. Иногда топливо смерзается и в бункерах.

Таким образом, наличие в топливе влаги не только понижает его теплоту сгорания, но влияет и на другие его свойства.

Большое влияние на условия работы котла оказывает и содержащаяся в топливе зола. Большая зольность снижает теплоту сгорания топлива, соответственно увеличивает его расход и затраты на его перевозку. Значение имеет не только количество золы в угле, но и температура, при которой начинает эта зола размягчаться, из-за чего она может налипать на стенки труб в котле.

Значительную роль (особенно при наличии жидкого шлакаудаления) играет и другая характеристика золы – **температура плавления**.

Чем меньше в угле летучих, тем при более высокой температуре происходит его воспламенение.

Воспламеняемость твёрдых топлив не зависит от их теплоты сгорания. Наиболее трудновоспламеняемое топливо – антрацит – имеет весьма высокую теплоту сгорания.

Чем меньше воспламеняемость твёрдого топлива, тем тоньше его нужно размалывать в мельницах. **Тонкость помола** определяют просеиванием пробы угольной пыли через специальные металлические сита.

В России тонкость помола характеризуется остатком на сите, имеющим отверстия размером 90 мкм (0,09 мм).

При размоле антрацита требуется, чтобы остаток на этом сите не превышал 6–10% веса просеянного топлива. При более грубом помоле антрацита может возрасти потеря тепла от недожога. Недопустим и слишком тонкий помол, при котором условия горения для большинства топлив мало улучшаются, но увеличивается затрата электроэнергии на их помол.

Для сжигания тощих топлив (углей) нормальной считается тонкость помола, характеризуемая 12% остатка на сите R_{90}. для углей имеющих более высокое содержание летучих веществ и лучшую воспламеняемость, допустим ещё более грубый помол – до 40-50% остатка на этом сите.

Упомянем ещё об одной характеристике топлива – **размолоспособности,** определяемой обычно размолом пробы угля в специальных лабораторных мельницах.

Наиболее твердым из топлив, т. е. топливом с наихудшей размолоспособностью, является донецкий антрацит.

Коэффициент размолоспособности показывает, во сколько раз производительность мельницы при размоле данного угля больше, чем при размоле антрацита, коэффициент размолоспособности которого принят условно за единицу (сравнивается подсушенное топливо при одинаковой тонкости помола).

Коэффициент размолоспособности не зависит от возраста топлива и содержания в нём летучих.

Например, по данным ВТИ для челябинского бурого угля он колеблется от 1,02 до 1,33 для подмосковного бурого угля он равен 1,75, для кизеловского каменного угля 1,0, для донецкого тощего угля-1,9 .

2.5.3. Классификация и условные обозначения углей

Ископаемые угли делят на три основных типа – на антрациты, каменные и бурые угли. Переходным типом между антрацитом и каменным углями является полуантрацит.

Антрациты отличаются малым содержанием летучих веществ (до 9% на горючую массу). Каменные угли с содержание летучих от 9 до 17; называют **тощими**, а при количестве летучих свыше 37% – **длиннопламенными**. Бурые угли отличаются от каменных не столько цветом, сколько пониженной теплотой сгорания.

Мелким называют твердое топливо с кусками размером 13-25 мм, семечком с кусками от 6 до 13 мм и штыбом – менее 6 мм. рядовой штыб может иметь куски различной величины, но менее 100 мм.

Отдельные сорта угля принято условно обозначать буквами. Тощий уголь обозначают буквой Т, длиннопламенный – Д, газовый – Г, бурый – Б, антрацит – А.

К условному обозначению сорта угля часть добавляют вторую букву, характеризующую крупность его кусков и другие особенности. Например, бурый крупный уголь, обозначают БК, весьма распространённый антрацитовый штыб – АШ, паровичный жирный уголь – ПЖ и т. д.

Иногда применяют и более сложные обозначения например, антрацит рядовой со штыбом – АРШ, антрацит семечко с штыбом – АСШ.

2.5.4. Характеристика мазута

Поступающий на электростанции мазут получается на нефтеперерабатывающих заводах в результате смешения различных остаточных нефтепродуктов. Характеристики мазута зависят не только от свойств сырой нефти, но и от условий работы нефтеперерабатывающих заводов.

На электростанциях применяют мазут марок 40, 100, 200. эти марки характеризуют исчисляемую в градусах Энглера **условную вязкость мазута (ВУ)** при температуре 50 ^{o}С. с повышением температуры вязкость мазута быстро уменьшается. Поступая в топку котла при 80 ^{o}С мазут марки 40 имеет Ву, равную 8,0, у мазута марки 100ВУ равна 15,5^{o}. Наиболее вязкий мазут марки 200 должен нагреваться до большей температуры и при 100^{o}С имеет ВУ от 6,5 до 9,5^{o}. Такой мазут направляют на электростанции преимущественно по трубопроводам прямо от нефтеперерабатывающих заводов.

Большое влияние на работу котлов может оказывать даже небольшое количество содержащихся в мазуте вредных примесей – золы, серы и металла ванадия.

Так, увеличение зольности мазута от 0, 15 до 0,30% приводило к сокращению более чем в 2 раза продолжительности безостановочной работы кот-

лов до их очистки (их компании). Сера и ванадий способствуют разрушению (коррозии) отдельных стальных элементов котлов.

У малосернистого (содержащего до 0,5 серы) мазута марки 100 низшая теплота сгорания должна быть близкой к 9650 ккал/кг, а у высокосернистого, имеющего от 2 до 3,5 % серы, -близкой к 9500 ккал/кг.

2.6. Вода и водяной пар

Природная вода. Поступающая на электростанцию вода из реки, пруда или озера всегда содержит в себе некоторое количество различных примесей. Часть этих примесей растворена в воде (например, поваренная соль, соли кальция и магния, а также газообразные составляющие – кислород, углекислота и др.), другие вещества взвешены в воде в виде мелких твёрдых частиц, причём некоторые частицы настолько малы, что проходят через обычный механический фильтр. Таковы, например, многие органические вещества, являющиеся продуктом распада растительных и животных организмов.

Состав природных вод весьма разнообразен и зависит не только от того, используется ли на данной электростанции вода из реки, озера или водохранилища, но и от того, между какими горными породами протекают реки и какие вещества они вымывают, находятся ли вверх по течению фабрики, шахты, другие производства, сбрасывающие в реку свои отработавшие воды.

Так, например, количество взвешенных и растворённых веществ очень мало в р. Неве, вода которой отстаивается последовательно в Онежском и Ладожском озёрах.

Много минеральных веществ содержится в природных водах Донбасса, что объясняется наличием в почве мела и гипса. Вода рек Закавказья, текущих с гор и питающихся тающим снегом, содержит мало растворённых веществ.

Но эти реки текут с большой скоростью и увлекают с собой большое количество твердых частиц из горных пород, по которым они протекают.

В России ведётся активная борьба с загрязнением рек и озёр отходами промышленных предприятий. Опасное загрязнение воды может быть вызвано неправильными действиями работников котельного цеха электростанции (например, при сбросе в реку отходов химической очистки котла.)

Питательная и котловая вода. Природную воду подвергают на электростанции или где-то в другом месте специальной обработке в водоочистительных аппаратах. Взвешенные в воде вещества обычно почти полностью улавливаются в фильтрах и отстойниках, но значительное количество растворённых веществ (солей) может иметься в воде и после её очистки.

Вода, поступающая в котёл, называется **питательной** водой. С водой в котёл непрерывно вносится некоторое количество растворённых солей и взвешенных твёрдых частиц, в том числе окислов железа и меди, образующихся в результате ржавления (коррозии) оборудования на самой электростанции.

Условия перемещения внутри котла солей и взвешенных частиц могут быть различными и зависят прежде всего от того, в какого типа котёл они попадают. **В прямоточном котле** (см. рис. 6-в) нет движения воды по замкнуто-

му пути (циркуляции) и эти вещества движутся вместе с водой до её полного превращения в пар. Часть их уносится из котла с паром, а остальное их количество оседает на внутренней поверхности труб котла.

Чтобы избежать быстрого роста толщины слоя такого осадка, а также не допускать отложения его в паровой турбине, нужно следить за тем, чтобы содержание веществ в питательной воде прямоточных котлов не превышало норм указанных и узаконенных нормами.

Вода, находящаяся в **барабанном котле** (рис.6, а и б) и циркулирующая при его работе по замкнутому пути, называется **котловой водой.**

Обычно в барабанном котле лишь весьма малая часть солей уносится паром. Основное количество солей и почти все твёрдые частицы задерживаются в котле, из-за чего их содержание в котловой воде постепенно увеличивается. Если не удалять из котла часть воды, то **солесодержание** котловой воды может возрасти до опасных пределов. Поэтому часть воды (обычно 0,5 – 5%) удаляют из котла посредством **непрерывной продувки.**

Схемы основных типов котлов докритического давления

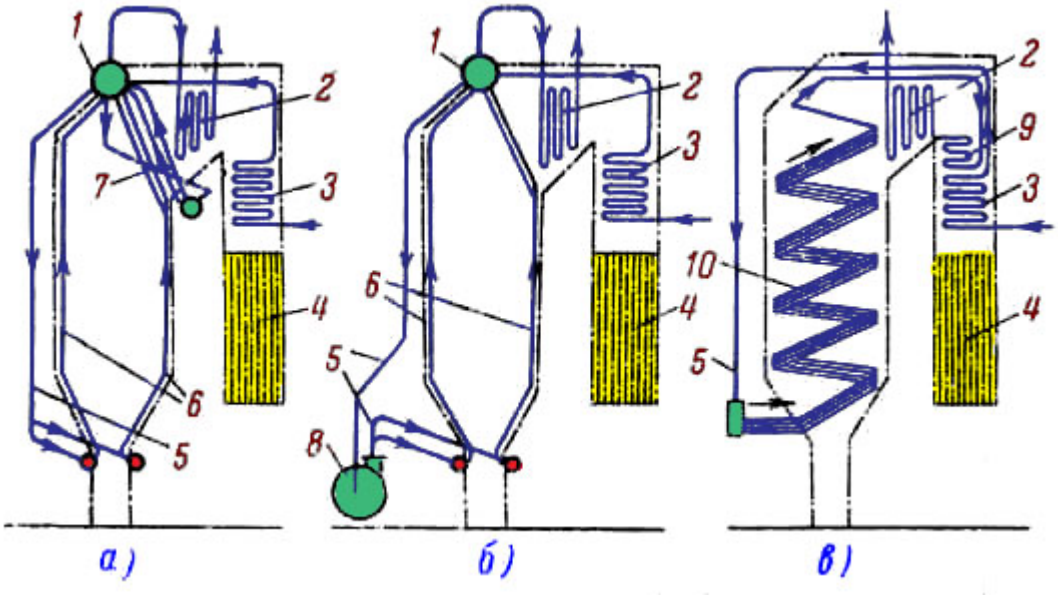


Рис. 6

а и *б* – соответственно котлы с естественной и принудительной циркуляцией воды; *в* – прямоточный котёл Рамзина: 1 – барабан; 2 – пароперегреватель; 3 – экономайзер; 4 – трубчатый воздухоподогреватель; 5 – необогреваемые водоопускные трубы; 6 – экранные испарительные трубы; 7 – конвективный трубный пакет (пучок) 8 – циркуляционный насос; 9 – переходная зона котла Рамзина; 10 – испарительные трубы (радиационная часть) котла Рамзина.

Назначение непрерывной продувки состоит, следовательно, в поддержании требуемого солесодержания котловой воды.

Кроме непрерывной продувки, производится **периодическая продувка** воды для удаления оседающих в нижней части котла твёрдых взвешенных частиц.

Накипь. Почти в каждой реке вода встречает на своём пути разнообразные известковые горные породы – мел, гипс, известковый шпат и прочее.

Эти и многие другие породы содержат окислы кальция и магния. Соприкасаясь с речной водой и растворяясь в ней, они образуют различные, но сходные по своему действию соли, именуемые солями **жесткости.**

Вследствие этого на внутренней поверхности наиболее обогреваемых труб котла появляется твердый нерастворимый осадок, именуемый **накипью**.

Как правило, накипь очень плохо проводит тепло. Покрытая изнутри слоем накипи и поэтому недостаточно охлаждаемая труба в паровом котле нагревается до высокой температуры, теряет свою прочность и может быть разрушена внутренним давлением.

Толщина накипи различного вида, при которой одинаково повышается температура стенки обогреваемой трубы

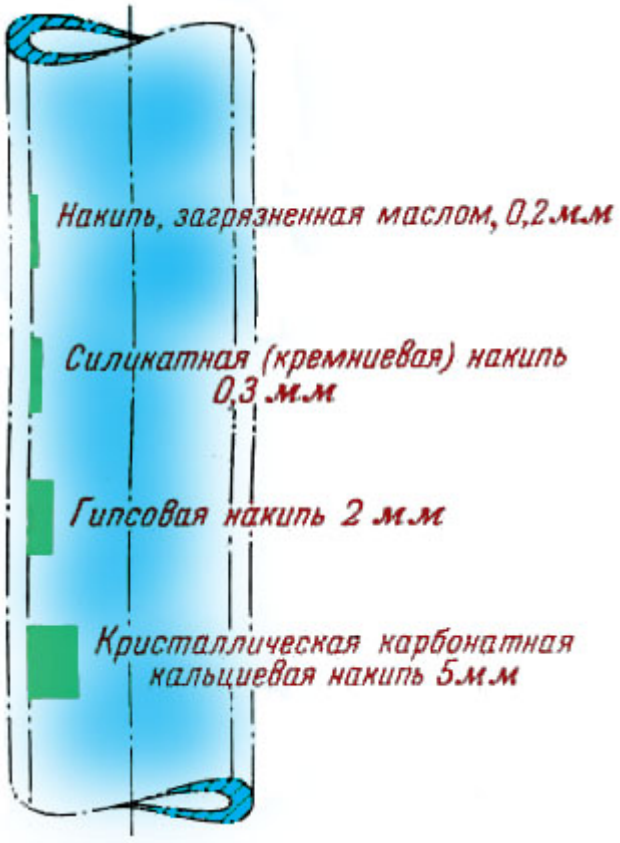


Рис. 7

Сравнение различных видов накипи показано на рис. 7 Тонкий слой кремниевой (силикатной) накипи или накипи, загрязнённой маслом, равнозначен по своему действию более толстому слою гипсовой накипи.

Современный барабанный котёл должен работать таким образом, чтобы накипь в его трубах совсем не образовывалась. В прямоточных котлах допустимой считается лишь ничтожная толщина слоя накипи.

Образование накипи предотвращается различными мероприятиями.

Предварительная очистка воды. Почти на всех электростанциях основной частью питательной воды является конденсат, возвращаемый из паро-

вых турбин и теплообменных аппаратов. В этом конденсате соли обычно почти отсутствуют. Исключением являются случаи, когда в конденсаторе турбины возникают неплотности, сквозь которые просачивается небольшое количество охлаждающей воды из реки или пруда. На всех тепловых электростанциях качество систематически контролируется. У большинства энергоблоков сверхкритического давления, у которых загрязнение питательной воды приводит к наиболее опасным последствиям, конденсат очищают на пути в котёл (рис. 8).

Упрощённые схемы движения солей в воде и паре на электростанции

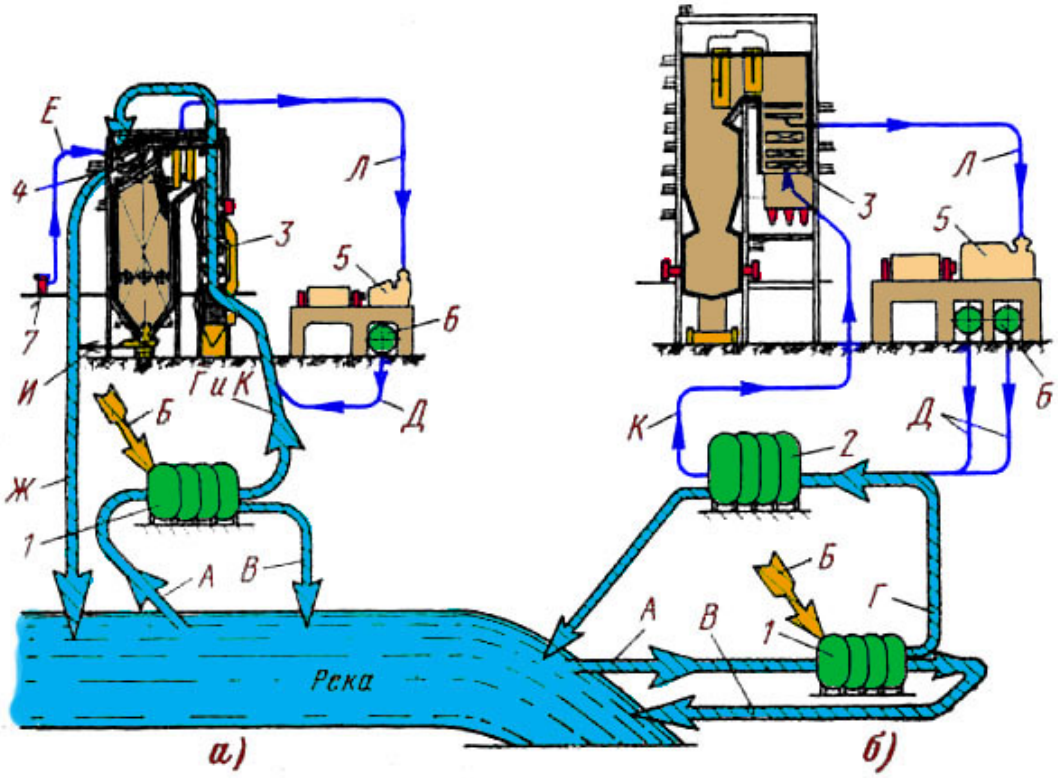


Рис. 8

а – при подаче в котел добавки очищенной воды; *б* – при очистке всего конденсата турбины (в энергоблоке свехкритического давления); А – подача сырой воды из реки; Б – добавляемые растворы поваренной и других солей ; В – сброс в реку отделяемых солей; Г – поток химически очищенной воды; Д – конденсат; Е – линия фосфатирования; Ж – непрерывная продувка; И – периодическая продувка; К – питательный трубопровод; Л – паропровод от котла к турбине: 1 – водоочистительные фильтры (осветлительные, катионитные и др.); 2 – обессоливающая установка; 3 – экономайзер;4 – барабан котла; 5 – паровая турбина; 6 – конденсатор турбины; 7 – фосфатный насос

Кроме конденсата в котлы вводится дополнительная вода, восполняющая её потерю на электростанции. Эта добавка очень мала на конденсационных станциях, но может быть значительной на теплоэлектроцентралях, где большое количество пара отдаётся потребителям безвозвратно.

Как правило, соли жёсткости и другие вещества, способные образовывать накипь, почти полностью улавливаются из воды в водоочистительных фильтрах.

Применяются различные схемы очистки воды.

Обычно вода проходит сначала через **механические** фильтры, внутри которых движется сквозь слой гравия или песка и оставляет в нём почти все нерастворённые твердые частицы. Далее вода направляется обычно в **катионитовые** фильтры, где происходит замена одних растворённых в ней веществ другими. Например, проходя через слой сульфоугля или другого специального измельчённого материала (катионит q_2, например), вода отдаёт этому катиониту растворённые в ней соли жесткости, получая вместо них поваренную соль.

Когда катионит в одном из фильтров теряет свою способность к такому обмену солей, этот фильтр отключают и промывают раствором поваренной соли, (регенерируют), благодаря чему вымываются накопленные в катионите соли жесткости и он снова заряжается поваренной солью

Применяются и иные фильтры, очищающие воду от других растворённых веществ. На рис. 8 упрощённо показано, как уловленные соли в виде потока В отводятся из фильтров обратно в реку.

В установке, изображенной на рис. 8,а, очищенная в фильтрах вода направляется в котёл. На многих электростанциях выходящую из фильтров воду испаряют, вследствие чего она оставляет почти все имевшиеся в ней соли в **испарителе** (на рис .8 не показан).

Периодическая очистка испарителя от солей жесткости была бы затруднительной, но поваренная соль легко из него вымывается.

В большинстве энергоблоков сверхкритического давления вода из фильтров вместе с конденсатом турбин проходит через **блочную обессоливающую установку (БОУ)**, чем обеспечивается ещё более полная очистка питательной воды.

Фосфатирование. При тех способах водоподготовки, которые применяются на многих электростанциях с барабанными котлами, нельзя избежать попадания в котловую воду небольшого количества солей жесткости. Для предотвращения их вредного действия рекомендуется вводить в барабан котла вещество, содержащие фосфор (**фосфаты**), которые соединяются с солями жесткости и образуют твёрдые частицы, не оседающие на поверхностях нагрева и движущиеся по трубам вместе с потоком воды. Такие частицы называют **шламом.**

Постепенно шлам оседает в нижних элементах котла и время от времени удаляется при открытии вентилей периодической продувки. При правильно организованном водном режиме котла, правильной подаче в него фосфатов и своевременном удалении шлама котёл работает без внутренней очистки.

Но если шлама накапливается большое количество, то при малой скорости воды он может прикипать к поверхностям нагрева, образуя вторичную накипь.

Увеличение содержания фосфатов сверх рекомендуемых значений может способствовать образованию слоя пены над уровнем воды в барабане, а иногда даже ускоряет образование накипи.

Подавать фосфаты в барабан котла лучше всего специальным насосом. Разведённые в воде фосфаты поступают в насос самотёком из бака. Давление, создаваемое насосом, должно быть выше давления в котле.

У прямоточных котлов вода фосфатированию не подвергается. Таким образом, для предотвращения образования в барабанном котле слоя накипи необходимы: обработка природной воды до подачи её в котёл и удаление из неё солей жёсткости, а также других вредных солей: фосфатирование котловой воды для превращения в шлам небольшого количества прошедших в котёл солей жесткости; непрерывная продувка для удаления из котла излишка солей и периодическая продувка шлама из нижних элементов котла.

Для прямоточных котлов необходимы тщательная очистка от солей питательной воды и периодическая внутренняя промывка котлов.

Кремниевая кислота. Кроме описанных выше солей жёсткости питательная вода котлов может быть загрязнена и другими веществами.

Из них большую опасность могут представлять кремниевые соли, образующиеся при растворении в природной воде различных горных пород.

Кремниевые соли могут выпадать в котле в виде накипи, которая считается одной из самых опасных.

Но эксплуатацию электростанций высокого давления осложняет другое свойство кремниевых солей.

При давлении в котле свыше 60–70 кгс/см^2 некоторое количество этих солей и прежде всего кремниевая кислота уносятся паром, причём унос кремниевой кислоты при 115 кгс/см^2 достигает примерно 1% ее содержания в котловой воде. С повышением давления унос кремниевой кислоты возрастает.

Кремниевая кислота, находясь в паре, свободно проходит через пароперегреватель, но оседает на рабочих лопатках турбины при охлаждении в ней пара.

По мере роста толщины отложений мощность турбины постепенно снижается, иногда на 5–10%. Снижается также и экономичность работы турбины. Таким образом, кремниевая кислота безвредна для котла но может нарушить работу всей электростанции.

Снижение содержания кремниевых солей в питательной воде осуществляется в испарительной и обессоливающей установках, а в паре – при его прохождении внутри барабана котла через слой питательной воды (рис. 9 и 10).

Концентрация солей. Содержание (концентрацию) в питательной и котловой воде различных солей обычно характеризуют количеством миллиграмм растворённого вещества на 1 л или 1 кг раствора.

Внутрибарабанные устройства с пароосушительными циклонами

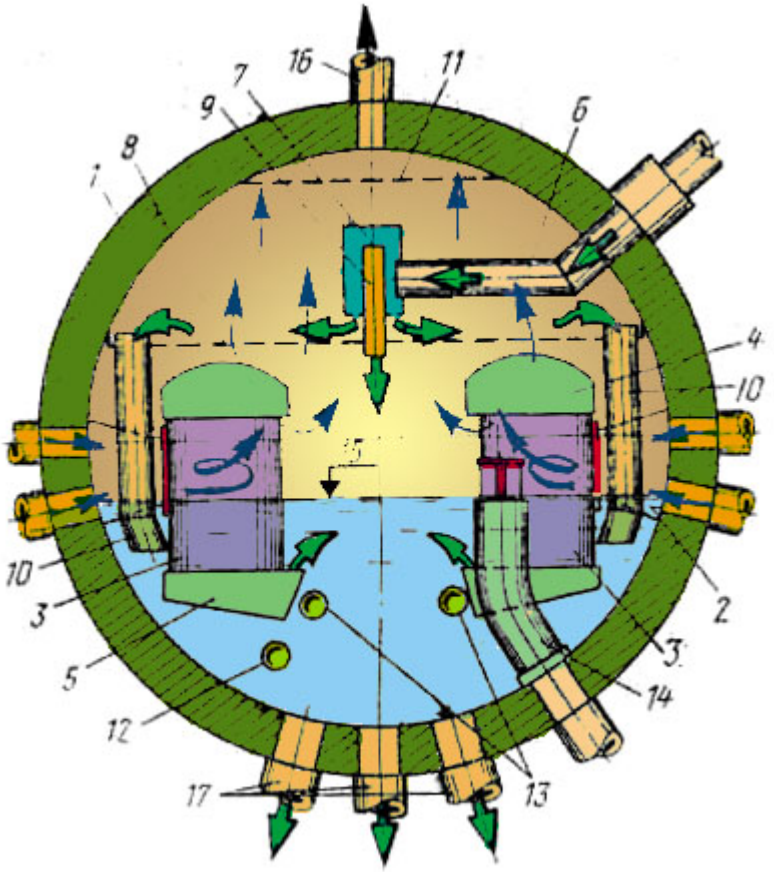


Рис. 9

1 – барабан; 2 – короб для вводимой в барабан пароводяной смеси; 3 – циклон; 4 –крышка циклона; 5 – поддон циклона; 6 – труба, подающая питательную воду; 7 – раздающий короб питательной воды; 8 – промывочный щит; 9 – насадка, отводящая воду мимо промывочных щитов; 10 – труба для слива питательной воды; 11 – верхний дырчатый лист; 12 – труба для подачи фосфатов; 13 – труба для парового разогрева барабана при растопке котла; 14 – труба аварийного сброса воды; 15 – средний уровень воды; 16 – вывод насыщенного пара; 17 – водоопускные трубы экранов

Если, например, указывают, что концентрация натриевых или иных солей к котловой воде равна 50 мг/л, то это значит, что в каждом литре котловой воды содержится 50 мг соответствующих солей. Иногда стремятся характеризовать одним числом содержание в воде различных солей, имеющих сходные свойства. Это относится, например, к различным солям жёсткости. Второй такой характеристикой общей для различных солей, является **щёлочность** воды, которая определяется количеством соляной кислоты, расходуемой на нейтрализацию содержащихся в воде щелочных солей. Если щелочность котловой воды равна нулю, такая вода разрушает металл как слабая кислота. Наличие щёлочности у котловой воды обязательно.

Схема движения питательной воды в барабане котла

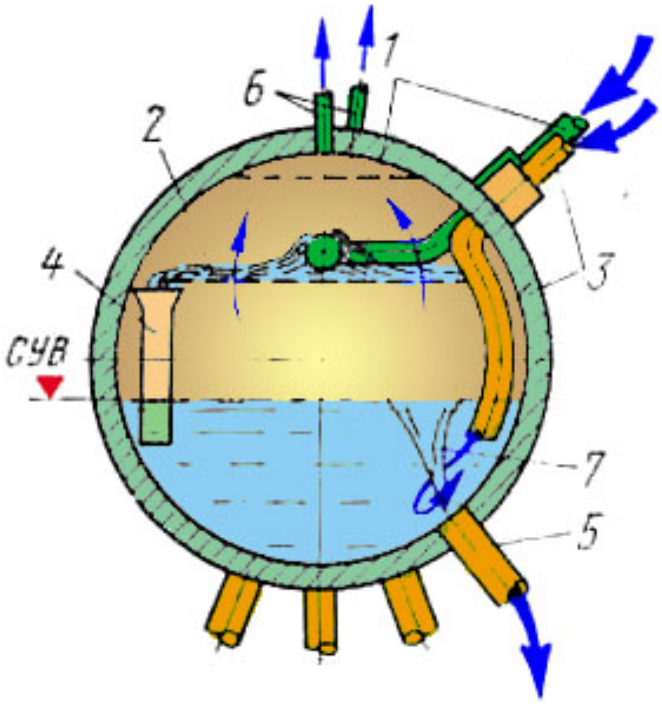


Рис. 10.

1 – труба, по которой питательная вода направляется на дырчатый лист 2 для промывки пара; 3 – труба для подачи питательной воды в водяное пространство барабана (трубы 1 и 3 изображены смещенными относительно друг друга); 4 –короб для слива воды с дырчатого листа (короб на противоположной стороне барабана условно не показан); 5 – водоопускная труба экрана; 6 – отвод пара из барабана; 7 – воронка; СУВ – средний уровень воды в барабане

Щёлочность и жёсткость воды измеряют в миллиграммах эквивалента на 1 л или на 1 кг раствора (мг-экв/л и мг-экв/кг). 1 мг-экв/л жёсткости соответствует содержание в воде 28 мг/л окиси кальция либо 20,2 мг/л окиси магния и т. д. Если, например, указывают, что жёсткость воды составляет 0,3 мг-экв/л, то это значит, что соответствующее количество разных солей может произвести то же суммарное химическое действие, что и 8,4 мг/л окиси кальция.

Очень малое содержание веществ в воде и паре измеряют в микрограммах и микрограмм-эквивалентах. Микрограмм (мкг) равен одной миллионной части грамма. Например, щелочность пара 50 микрограмм-эквивалентов на 1 кг (50 мкг-экв/кг) равна 0,05 мг-экв/кг.

Показатель pH. Этот показатель характеризует степень щелочности или кислотности воды. Считают, что концентрированная сильная кислота имеет pH = 0.

У нейтральной, т.е. лишенной как щелочности, так и кислотности воды pH = 7,0, а у концентрированной щелочи – до 14.

Таким образом, например, показатель pH = 6,0 характеризует слабо подкислённую воду, при pH = 9,5 вода умеренно щелочная и т. д.

Основные свойства водяного пара

Пар, образующийся из кипящей под давлением воды, имеет ту же температуру, что и вода, из которой он образуется. Такой пар называют **насыщенным.**

Пар, нагретый при том же давлении до более высокой температуры, называют **перегретым.**

В паровых котлах кипение воды происходит при температуре, значительно превышающей 100 °С. В котлах высокого давления (100 кгс/см ^{2} и более) вода кипит при температуре свыше 300 °С.

Если такую воду выпустить из котла наружу, то её температура понижается до температуры кипения при атмосферном давлении, т. е. примерно до 100°С. За счёт этого снижения температуры часть воды превращается в пар. Через неплотности в работающем паровом котле наблюдается парение, даже если вытекает наружу не пар , а вода.

Если кипятить воду при атмосферном давлении, то термометр будет показывать 100 °С всё время, пока вода не испарится полностью. При этом подводимое к воде тепло затрачивается на превращение её в пар без повышения температуры. Это количество тепла называется *скрытой теплотой парообразования*. С увеличением давления скрытая теплота парообразования уменьшается (табл. 5).

Таблица 5

Характеристики воды и пара

Давление, кгс/см^2	Температура кипения, °С	Энтальпия (теплосодержание)при кипении, ккал/кг		Скрытая теплота парообразования, ккал/кг	Удельный объём при температуре кипения, м^3/кг	
		воды	пара		воды	пара
16	200	204,0	667,1	463,1	0,001157	0,1261
32	236	243,7	669,6	425,9	0,001222	0,06370
116	321	350,1	644,4	294,3	0,001502	0,1530
156	344	387,4	621,6	234,2	0,001673	0,1003
190	360	420,4	593,0	172,6	0,00189	0,00694

С повышением давления пар сжимается. Соответственно уменьшается его удельный объём, т.е. измеренный в кубических метрах объём 1 кг пара. С возрастанием температуры пар расширяется и его удельный объём увеличивается.

Из той же таблицы 5 видно, что с возрастанием давления сокращается разница между удельным объёмом насыщенного пара и удельным объёмом нагретой до кипения воды. Так, при 32 кгс/см^2 такой пар легче воды в 52 раза, при 116 кгс/см^2 – в 10 раз, а при 190 кгс/см^2 – только в 3,7 раза. Пузырьки пара в работающем на электростанции котле поднимаются в воде не так интенсивно, как при кипении воды при атмосферном давлении.

Энтальпия (теплосодержание) воды и пара определяются количеством тепла, которое нужно затратить для нагрева 1 кг воды от 0 °С) до заданной температуры. Из табл. 5 видно, что при температуре до 200 °С с увеличением

температуры воды на каждый градус энтальпия воды возрастает почти на 1 ккал/кг.

При более высокой температуре увеличивается расхождение между численными значениями температуры и энтальпии воды.

Энтальпия насыщенного пара равна сумме энтальпии воды при температуре насыщения и скрытой теплоты парообразования.

Пар сверхкритического давления. если увеличивать давление ещё больше, то оказывается , что при 225,65 кгс/см2 различие между удельными объёмами кипящей воды и насыщенного пара полностью исчезает их удельные объёмы становятся равными друг другу.

Частицы такого пара не могут всплывать в воде. При этом же давлении изменяется и другое свойство пара. Исчезает скрытая теплота парообразования, которая характеризует собой затрату энергии на увеличение объема воды при её превращении в пар.

Вода, нагретая при таком давлении до температуры парообразования (374,15 ^{o}C), превращается в пар не постепенно, путём выделения отдельных пузырьков , а сразу всем своим объёмом. Такой характер парообразования опасен при меньшем давлении, поскольку выделение в короткое время большого объёма пара может привести к разрыву сосуда и значительным разрушениям. Но объёмное парообразование не опасно, когда удельные объёмы кипящей воды и насыщенного пара одинаковы.

Давление, при котором изменяются условия превращения воды в пар, называют **критическим.** Ещё более высокое давление называют **сверхкритическим**.

При сверхкритическом давлении работает большое число энергоблоков в России.

Критическое давление и температура парообразования при этом давлении (критическая температура) могут заметно изменяться при наличии в воде даже небольшого количества солей. Так добавка лишь одной молекулы едкого натра на 250 молекул воды повышает критическую температуру до 442,3^{o}C.

При движении в одних и тех же трубах котла сверхкритического давления как воды, так и пара иногда трудно установить, что именно находится в отдельных местах труб: только пар или вода, или и то и другое вместе (если, например, у стенок трубы вода нагрета немного более, чем у её оси.)

В этих условиях и вода и пар в котле сверхкритического давления называют его **рабочей средой.**

Нельзя рассматривать критическое давление как некую резкую грань между двумя различными по характеру процессами превращения воды в пар.

При давлении превышающем критическое, сохраняются, хотя и в изменённом виде, отдельные особенности, присущие процессу парообразования при меньшем давлении.

Так, в обычных условиях температура кипящей в сосуде воды перестает повышаться на всё время протекания процесса парообразования (если не изменяется давление). Когда в равномерно обогреваемой трубе котла сверхкритического давления вода нагревается почти до температуры парообразования,

то дальнейшее повышение её температуры хотя и не прекращается, но заметно замедляется.

При до критическом давлении для нагрева 1 кг воды на 1 °С затрачивается около 1ккал тепла.

При сверхкритическом давлении и температуре, близкой к температуре превращения воды в пар, приходится затрачивать в десятки раз больше тепла для нагрева на каждый градус как воды, так и пара.

При дальнейшем повышении температуры пара соответствующая затрата тепла снова сокращается.

Количество тепла, затрачиваемое на подогрев 1 кг вещества на 1 °С, называют его **теплоёмкостью.**

Теплоёмкость воды и пара сверхкритического давления в зоне парообразования

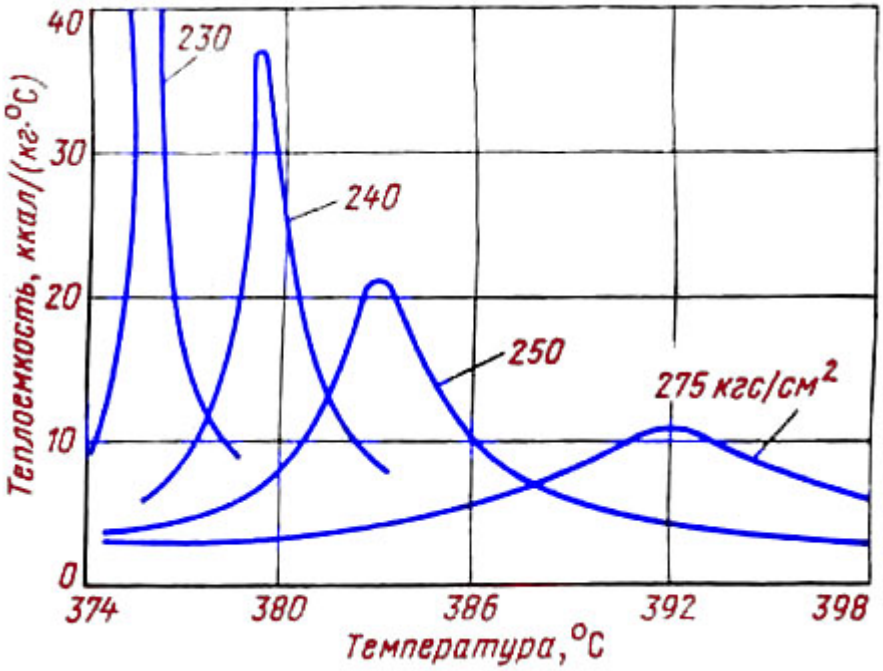


Рис. 11

На рис. 11 видно, насколько возрастает теплоёмкость воды и пара сверхкритического давления при температурах, близких к температуре парообразования.

Эту зону температур иногда называют зоной максимальной теплоёмкости.

С повышением давления более 225 кгс/см^2 продолжает увеличивается и температура превращения воды в пар, доходящая при 300 кгс/см^2 до 400 °С.

Пар выходит из серийных котлов сверхкритического давления при 225 кгс/см^2, а образуется из воды при ещё более высоком давлении и температуре около 390 °С.

Большое практическое значение имеет при сверхкритическом давлении и другая особенность превращения воды в пар. В зоне парообразования пере-

дача тепла от стенки трубы рабочей среде увеличивается при значительной скорости этой среды и резко ухудшается при снижении скорости.

Ухудшение передачи тепла может стать причиной недопустимого повышения температуры обогреваемых труб и их разрыва. Поэтому у котлов сверхкритического давления вода должна подаваться в зону парообразования с достаточно высокой скоростью при всех режимах работы, включая начальный период растопки.

3. РЕЗЮМЕ

В пособии даны элементарные понятия о теплообмене, законах газового состояния, позволяющие понять процессы превращения воды в пар, как при докритических, так и сверхкритических параметрах. Пособие поможет повысить профессиональный уровень оперативного персонала, обслуживающего энергетическое оборудование промышленных и тепловых электростанций.

4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. От чего зависит температура стенки экранной трубы?
А) От температуры в ядре факела;
Б) От температуры газов внутри топки;
В) От температуры нагреваемой воды;
Г) От температуры окружающей среды.

2. Что такое нормальные условия?
А) P = 760 мм.рт.ст. T=273 К;
Б) P = 760 мм.рт.ст. T=293 К;
В) P = 760 мм.рт.ст. T=10 ^{o}C;

3. Какое выражение выражает смысл закона Гей-Люссака?
А) $PV = P_1V_1 = \text{const}$
Б) $P_1 = P\frac{T_1}{T}$
В) $\frac{V}{V_1} = \frac{T}{T_1}$
Г) $V = V_1\frac{P_1}{P}\cdot\frac{T}{T_1}$

4. Чем измеряют атмосферное давление?
А) Ареометром;
Б) Барометром;
В) Манометром.

5. От чего зависит работоспособность рабочего тела (энтальпия)?
А) От объема тела;

Б) От давления среды;
В) От температуры тела;
Г) От массы тела.

6. Какое из перечисленных топлив самое калорийное?
А) Торф;
Б) Сланец;
В) Тощий уголь;
Г) Антрацит;
Д) Бурый уголь.

7. Какую низшую теплоту сгорания имеет условное топливо?
А) 9200 ккал/кг;
Б) 10000 ккал/кг;
В) 7000 ккал/кг;
Г) 8300 ккал/м^3.

8. Какой мазут наиболее вязкий?
А) Флотский;
Б) М-200;
В) М-100;
Г) М-40.

9. Какая накипь наиболее опасна для труб при одинаковой толщине в 1 мм?
А) Силикатная (кремниевая);
Б) Гипсовая;
В) Накипь, загрязненная маслом;
Г) Кристаллическая карбонатная кальциевая накипь.

10. Вода имеет показатель pH=10. Что нужно добавить в нее, чтобы она стала нейтральной?
А) Щелочь;
Б) Кислоту;
В) Фосфат;
Г) Каустическую соду.

11. Как изменяется коэффициент теплопередачи при увеличении скорости рабочего тела?
А) Остается постоянным;
Б) Увеличивается;
В) Уменьшается.

12. Как называют количество тепла, затраченное на подогрев 1 кг вещества на 1 ^{o}C?

А) Энтальпия;
Б) Удельная теплоемкость;
В) Теплосодержание;
Г) Тепловой эквивалент.

5. ЛИТЕРАТУРА

1. Теплоэнергетика и теплотехника. Общие вопросы. Справочник. Под общей редакцией В. А. Григорьева и В. М. Зорина.
2. М. В. Мейкляр. Паровые котлы электростанций. Энергия, 1974 г..
3. Справочник эксплутационника газовых котельных. Под редакцией Е. Б. Столпнера. «Недра», Ленинград, 1976 год
4. Ю. В. Днепров, Д. Н. Смирнов, М. С. Файнштейн. Монтаж котельных установок малой и средней мощности. «Высшая школа», Москва, 1975 г.
5. Б. В. Сазанов, В. Н. Юренев, М. И. Баженов, А. С. Богородский / под общей редакцией Е. Я. Соколова / Промышленные тепловые электростанции. «Энергия», Москва, 1967 г.