

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

**Е.А. Бойко**

# **ОСНОВЫ ТЕПЛОТЕХНИКИ**

(учебное пособие)

Красноярск 2005

## Содержание

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

## 1. УЧЕБНАЯ ЦЕЛЬ

Научить оперативный персонал ТЭС применять теоретические основы теплотехники в своей профессиональной практической деятельности, помочь достичь гармонии при пользовании теорией 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):

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

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

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.

$$I = U + A \cdot P \cdot V;$$

где  $U$  – внутренняя энергия;  
 $P$  – давление,  $\text{кгс}/\text{м}^2$ ;  
 $V$  – объём газа (пара),  $\text{м}^3$ ;

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  $i$  называется энтальпия, отнесённая к единице вещества.

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

$$T_k = t_c + 273.$$

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

Удельная теплоёмкость **С** – количество тепла, сообщаемое единице вещества (1кг, 1м<sup>3</sup>, 1 кмоль) для повышения температуры на 1 °С. 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 °С. если газ нагревают не от 0°С, а от какой-либо промежуточной температуры  $t_1$ , то количество тепла, необходимое для нагрева 1м<sup>3</sup> газа от  $t_1$  до  $t_2$ ,

$$q = C_p \cdot t_2 - C_p \cdot t_1$$

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

Средневзвешенная теплоёмкость смеси газов

$$C_{см} = 0,01 \times (N_2 \times C_{N_2} + O_2 \times C_{O_2} + \dots);$$

где  $N_2, O_2, \dots$  – содержание отдельных составляющих в смеси, в %;  
 $C_{N_2}, C_{O_2}$  – теплоёмкость этих составляющих, (ккал/(м<sup>3</sup> °С) .

**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 <sup>7</sup>	0,102	239 · 10 <sup>-6</sup>	0,278 · 10 <sup>-6</sup>	0,378 · 10 <sup>-6</sup>
1эрг	10 <sup>-7</sup>	1	10,2 · 10 <sup>9</sup>	23,9 · 10 <sup>-13</sup>	27,8 · 10 <sup>-15</sup>	37,8 · 10 <sup>-15</sup>
1кгс · м	9,81	9,81 · 10 <sup>6</sup>	1	2,343 · 10 <sup>-3</sup>	2,7243 · 10 <sup>-6</sup>	3,704 · 10 <sup>-6</sup>
1ккал	4,187 · 10 <sup>3</sup>	41,87 · 10 <sup>9</sup>	427	1	1,163 · 10 <sup>-3</sup>	1,582 · 10 <sup>-3</sup>
1кВт · ч	3,6 · 10 <sup>6</sup>	36 · 10 <sup>12</sup>	367,1 · 10 <sup>3</sup>	859,8	1	1,36
1л.с. · ч	2,65 · 10 <sup>6</sup>	26,5 · 10 <sup>12</sup>	270 · 10 <sup>3</sup>	632,4	0,736	1

### 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	$10,2 \cdot 10^{-9}$	$23,9 \cdot 10^9$	$86 \cdot 10^{-9}$	$0,136 \cdot 10^{-9}$
1кгс м/с	9,81	$9,81 \cdot 10^{-3}$	$98,1 \cdot 10^6$	1	2,343	8,435	$13,33 \cdot 10^{-3}$
1кал/с	4,187	$4,187 \cdot 10^{-3}$	$41,87 \cdot 10^6$	$427 \cdot 10^{-3}$	1	3,6	$5,69 \cdot 10^{-3}$
1ккал/ч	1,163	$1,163 \cdot 10^{-3}$	$11,63 \cdot 10^6$	$118,5 \cdot 10^{-3}$	0,2778	1	$1,58 \cdot 10^{-3}$
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 $c_{cp}$ в интервале температур от 0 до t, ккал /( $m^3 \cdot ^\circ C$ )

t, °C	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	Воз- дух
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

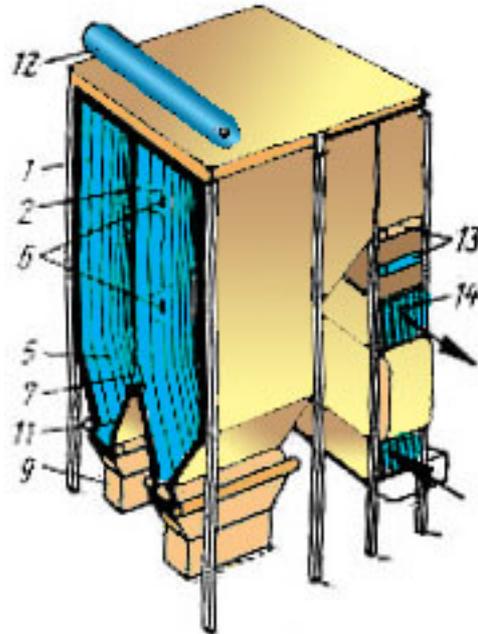


Рис. 1

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

$$Q_{л} = a_{г} \cdot c_s [(T_{ф}/100)^4 - (T_{ст}/100)^4],$$

где  $a_{г}$  – условный коэффициент степени черноты топки;

$c_s$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела, равный 4,9 ккал/(м<sup>2</sup> · ч · °С)<sup>4</sup>;

$T_{ф}$  – температура газов на выходе из топки (за фестоном), °С;

$T_{ст}$  – температура лучевоспринимающей поверхности (стен топки), °С.

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

Так как  $T_{ст}$  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:

$$Q = k \cdot H \cdot \Delta t$$

Где  $k$  - коэффициент теплопередачи, ккал/(м<sup>2</sup> ч °С);

$H$  – поверхность теплообмена, м<sup>2</sup>;

$\Delta t$  – средний температурный перепад между уходящими газами и нагреваемой водой, °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°С.

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{d_c}{\lambda_c} + \frac{d_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{d_H}{\lambda_H} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (1)$$

где  $\alpha_1, \alpha_2$  - коэффициенты теплоотдачи от уходящих газов к поверхности нагрева и от внутренней поверхности нагрева к нагреваемой воде, ккал/м<sup>2</sup>·ч·°С;

$\delta_1, \delta_2$  – толщина слоя сажи, металлической стенки, слоя накипи, м;

$\lambda_c, \lambda_{ст}, \lambda_H$  - коэффициенты теплопроводности соответствующих слоёв, ккал/м ч °С.

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

Представляет собой сумму теплоотдачи конвекцией  $\alpha_k$  и излучением  $\alpha_{л}$ ; 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<sup>2</sup> ч °С):  $\alpha_1 \approx 20 \div 50$ ;  $\alpha_2$  – от стенки к водяному пару – 500 ÷ 3000; к не кипящей воде – 5000 ÷ 15000; к кипящей воде – 10000 ÷ 100000.

**Коэффициент теплопроводности  $\lambda$**  – количество тепла, передаваемого в единицу времени через единицу поверхности на 1 метр пути теплового потока при перепаде температур 1 °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  $\lambda_{ст} = 40 \div 50$  ккал/(м ч °С), при  $\delta = 0,0025 \div 0,01$  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. в 10 – 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 <sup>2</sup> ·К	кВт/м <sup>2</sup> ·К	эрг/см <sup>2</sup> ·с·°С	кал/см·с·°С	ккал/м <sup>2</sup> ·ч·°С
1 вт/см <sup>2</sup> ·К	1	10	107	0,239	8600
1 кВт/м <sup>2</sup> ·К	0,1	1	106	$23,9 \cdot 10^{-3}$	860
1эрг/см <sup>2</sup> ·с·°С	$10^{-7}$	$10^{-6}$	1	$23,9 \cdot 10^{-9}$	$860 \cdot 10^{-6}$
1кал/см·с·°С	4,187	41,87	$41,87 \cdot 10^6$	1	36000
1ккал/м <sup>2</sup> ·ч·°С	$116 \cdot 10^{-6}$	$1,16 \cdot 10^{-3}$	$1,16 \cdot 10^3$	$27,8 \cdot 10^{-6}$	1

**Поверхность нагрева** котла или водяного экономайзера **H** – 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<sup>2</sup> УПН): поверхность, которая при сжигании сортированного антрацита в топке с ручным обслуживанием и тепловым напряжением зеркала горения 500 Мкал/м<sup>2</sup>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<sup>2</sup> 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  $K_{ц}$**  – отношение массы воды **Q<sub>в</sub>**, вошедшей в циркуляционный контур котла, к массе образовавшегося пара:

$$K_{ц} = Q_{в} / Q_{п}$$

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  $V_n$ , м<sup>3</sup>/ч, сожженного за 1 ч газа на его низшую теплоту сгорания  $Q_n$ , ккал/м<sup>3</sup>.

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

**Тепловое напряжение топчного объёма** (камеры горения) – отношение количества выделившегося в единицу времени тепла  $Q$ , ккал/ч, к объёму  $V_t$ , м<sup>3</sup>, топки или камеры:

$$q_v = Q/V_t$$

**Тепловое напряжение огневого сечения** - (устья горелки, туннеля, щели) – отношение количества тепла  $Q$  ккал, к площади рассматриваемого поперечного сечения  $F_c$ , м<sup>2</sup> :

$$q_v = Q/F_c$$

**Испарительность** – отношение количества выработанного пара  $D$ , кг к объёму израсходованного за это же время газа  $V_n$ , м<sup>3</sup> (условная характеристика, часто применяемая в котельной практике):

$$d_n = D/V_n$$

**Теплота сгорания** – количество тепла, выделяющегося при полном сгорании топлива. Различают удельную и объёмную теплоту сгорания низшую  $Q_n$ , в которой не учитывается скрытая теплота образования водяных паров, содержащихся в продуктах горения, и высшую  $Q_v$  когда эта теплота учитывается. Разность между  $Q_v$  и  $Q_n$  зависит от количества водяных паров, образующихся при сгорании топлива, и составляет примерно 600 ккал на 1 кг или 470 ккал на 1 м<sup>3</sup> 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 %.

**Для получения полноценной версии необходимо обращаться по адресу...**



«Лаборатория информационных технологий в энергетике»,  
Кафедра «Тепловые электрические станции»  
Красноярского государственного технического университета  
e-mail: [boiko@krgtu.ru](mailto:boiko@krgtu.ru)  
р.т.: (8-3912) 49-72-99, 49-74-63  
660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, 26  
Красноярский государственный технический университет