

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 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):

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

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

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), 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, 1м³, 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 1м³ 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

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

где N_2, O_2, \dots - содержание отдельных составляющих в смеси, в %;
 C_{N_2}, C_{O_2} – теплоёмкость этих составляющих, (ккал/(м³ °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 ⁷ | 0,102 | 239 · 10 ⁻⁶ | 0,278 · 10 ⁻⁶ | 0,378 · 10 ⁻⁶ |
| 1эрг | 10 ⁻⁷ | 1 | 10,2 · 10 ⁹ | 23,9 · 10 ⁻¹³ | 27,8 · 10 ⁻¹⁵ | 37,8 · 10 ⁻¹⁵ |
| 1кгс · м | 9,81 | 9,81 · 10 ⁶ | 1 | 2,343 · 10 ⁻³ | 2,7243 · 10 ⁻⁶ | 3,704 · 10 ⁻⁶ |
| 1ккал | 4,187 · 10 ³ | 41,87 · 10 ⁹ | 427 | 1 | 1,163 · 10 ⁻³ | 1,582 · 10 ⁻³ |
| 1кВт · ч | 3,6 · 10 ⁶ | 36 · 10 ¹² | 367,1 · 10 ³ | 859,8 | 1 | 1,36 |
| 1л.с. · ч | 2,65 · 10 ⁶ | 26,5 · 10 ¹² | 270 · 10 ³ | 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 ₂ | H ₂ O | N ₂ | O ₂ | CO | H ₂ | CH ₄ | C ₂ H ₆ | 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

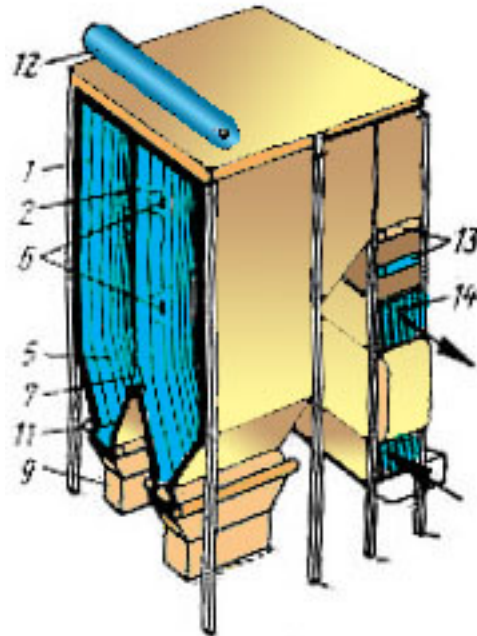


Рис. 1

Теплообмен в топке, отнесённый к 1 м² 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:

$$Q_{\text{л}} = a_{\text{т}} \cdot c_{\text{s}} [(T_{\text{ф}}/100)^4 - (T_{\text{ст}}/100)^4],$$

где $a_{\text{т}}$ – условный коэффициент степени черноты топки;

c_{s} – коэффициент излучения абсолютно черного тела, равный 4,9 ккал/(м² · ч · °С)⁴;

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

$T_{\text{ст}}$ – 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 $T_{\text{ст}}$ 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/(м² ч °С);

H – поверхность теплообмена, м²;

Δt – 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 α_1, α_2 - коэффициенты теплоотдачи от уходящих газов к поверхности нагрева и от внутренней поверхности нагрева к нагреваемой воде, ккал/м²·ч·°С;

δ_1, δ_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 α - количество тепла, передаваемого в единицу времени единице поверхности нагрева от нагревающего потока, или от единицы поверхности нагрева нагреваемому потоку.

Представляет собой сумму теплоотдачи конвекцией α_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/(м² ч °С): $\alpha_1 \approx 20 \div 50$; 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 °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 ² ·К | кВт/м ² ·К | эрг/см ² ·с·°С | кал/см·с·°С | 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 | $23,9 \cdot 10^{-3}$ | 860 |
| 1эрг/см ² ·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 ² ·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 (м² УПН): поверхность, которая при сжигании сортированного антрацита в топке с ручным обслуживанием и тепловым напряжением зеркала горения 500 Мкал/м²ч 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 м² 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_в**, 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 , м³/ч, сожженного за 1 ч газа на его низшую теплоту сгорания Q_n , ккал/м³.

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 , м³, 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 , м² :

$$q_v = Q/F_c$$

Испарительность – отношение количества выработанного пара D , кг к объёму израсходованного за это же время газа V_n , м³ (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 м³ 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
р.т.: (8-3912) 49-72-99, 49-74-63
660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, 26
Красноярский государственный технический университет