



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ КОТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ  
С ПОМОЩЬЮ КОМПЬЮТЕРА**

**Методические указания по выполнению  
расчетных заданий и курсовых работ**

**Для студентов направлений подготовки  
13.03.03 «Энергетическое машиностроение»  
и 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»**

**Казань 2015**

УДК 621  
ББК 22.1  
Т34

**Т34      Тепловой расчет котельных агрегатов с помощью компьютера:**

методические указания по выполнению расчетных заданий и курсовых работ / Сост. А.А. Федосов. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2015. – 34 с.

Методическая разработка по дисциплинам «Котельные установки и парогенераторы», «Паровые котлы», «Основы инженерного проектирования» посвящена расчету на компьютере камерных топок котлов, пароперегревателей, водяных экономайзеров и воздухоподогревателей с помощью открытых математических систем. Данная работа содержит примеры расчета объема продуктов сгорания при сжигании твердого, жидкого и газообразного топлива, расхода топлива, энергетических показателей котельного агрегата, поверочных расчетов как отдельных поверхностей нагрева, так и всего котла в целом. Освоение приведенного материала позволит студентам упростить и облегчить компьютерные расчеты котельных агрегатов в ходе выполнения расчетных заданий и курсовых работ.

Предназначены для студентов очной и заочной формы обучения направлений подготовки 13.03.03 «Энергетическое машиностроение» и 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника».

УДК 621  
ББК 22.1

## ВВЕДЕНИЕ

Подготовка квалифицированных кадров инженеров-теплоэнергетиков и конструкторов в высших учебных заведениях невозможна без овладения методами теплового расчета паровых котлов. Тепловой расчет выполняется на основе Нормативного метода теплового расчета котельных агрегатов, разработанного отечественными научно-исследовательскими институтами (ВТИ и НПО ЦКТИ) (третье издание Нормативного метода вышло в 1998 г. [1]). На сегодняшний день существует большое число методических изданий, позволяющих студентам освоить последовательность расчета котельного агрегата и провести его без использования компьютера в «ручном режиме» [2–9].

Выполнение теплового и конструктивного расчетов парового котла представляет собой достаточно трудоемкую задачу. Вполне естественным представляется использование персональных компьютеров в ходе выполнения этих расчетов. В данной методической разработке показывается на примерах как можно сделать тепловой расчет парового котла (частично или в целом) с помощью компьютера. При этом используются открытые (бесплатные) математические системы Scilab и Adequate Calculator, сходные по языку с коммерческой системой MATLAB [10–12].

Паровой котел – это основной агрегат тепловой электростанции (ТЭС). Рабочим телом в нем для получения пара является вода, а теплоносителем служат продукты горения различных органических топлив. Необходимая тепловая мощность парового котла определяется его паропроизводительностью при обеспечении установленных температуры и рабочего давления перегретого пара. При этом в топке котла сжигается расчетное количество топлива. Номинальной паропроизводительностью называется наибольшая производительность по пару, которую котельный агрегат должен обеспечить в длительной эксплуатации при номинальных параметрах пара и питательной воды, с допускаемыми по ГОСТ отклонениями от этих величин. Номинальное давление пара – наибольшее давление пара, которое должно обеспечиваться непосредственно за пароперегревателем котла. Номинальные температуры пара высокого давления (свежего пара) и пара промежуточного перегрева (вторично-перегретого пара) – температуры пара, которые должны обеспечиваться непосредственно за пароперегревателем, с допускаемыми по ГОСТ отклонениями при поддержании номинальных давлений пара, температуры питательной воды и паропроизводительности.

Номинальная температура питательной воды – температура воды перед входом в экономайзер, принятая при проектировании котла для обеспечения номинальной паропроизводительности.

При изменении нагрузки котла номинальные температуры пара (свежего и вторично-перегретого) и, как правило, давление должны сохраняться (в заданном диапазоне нагрузок), а остальные параметры будут изменяться. При выполнении расчета парового котла его паропроизводительность, параметры пара и питательной воды являются заданными. Поэтому цель расчета состоит в выборе рациональной компоновки и определении размеров всех поверхностей нагрева котла (конструктивный расчет) или же в определении температур и тепловосприятий рабочего тела и газовой среды в поверхностях нагрева заданного котла (поверочный расчет). Следует отметить, что обычно в учебных пособиях расчет радиационных и полурadiационных поверхностей нагрева котла (топочная камера, ширмовый пароперегреватель) выполняется поверочной методикой, а для конвективных поверхностей (конвективный пароперегреватель, водяной экономайзер, воздухо-подогреватель) делается конструктивный расчет.

Таким образом, тепловой расчет котлоагрегата в зависимости от поставленных задач может быть конструктивным или поверочным. Поверочный тепловой расчет выполняют для реально существующего котлоагрегата с целью выявления его тепловых характеристик при различных нагрузках, а также при переводе агрегата на другой вид топлива. Для поверочного расчета котлоагрегата нужно знать его производительность, давление и температуру перегретого пара и питательной воды. При этом известны все геометрические характеристики поверхностей нагрева и конструкция котлоагрегата в целом. Особенность поверочного расчета в том, что неизвестна температура уходящих из котла газов, а, следовательно, потеря тепла с уходящими газами и КПД котлоагрегата. Поэтому приходится предварительно задаваться величинами температуры уходящих газов и газов, а по окончании расчета определить их истинное значение. Основным методом поверочного расчета является метод последовательных приближений как при расчете отдельных поверхностей нагрева, так и всего котла в целом.

Конструктивный тепловой расчет выполняется при проектировании нового котлоагрегата. Однако при реконструкции котлоагрегата приходится часть поверхностей нагрева считать конструктивным способом, а остальные – поверочным. При конструктивном расчете котлоагрегата основной задачей расчета является определение размеров его поверхностей нагрева. При этом известны температура пара и рабочей среды на границах поверхностей нагрева, и их тепловосприятия определяются по уравнению теплового баланса однозначно. Подсчитывают коэффициент теплопередачи и из

уравнения теплообмена определяют величину поверхностей нагрева. В ходе расчета студентам обычно рекомендуется топку, ширмы, фестон и котельные пучки рассчитывать поперочным способом, а ступени конвективного пароперегревателя, экономайзера и воздухоподогревателя – конструктивно.

В настоящей работе последовательно и на примерах рассматриваются элементы теплового расчета котельного агрегата (определение объемов продуктов сгорания и необходимого воздуха, расхода топлива, коэффициента полезного действия котла, поверхности топочной камеры при конструктивном расчете). Приводится также поперочный расчет пароперегревателя, экономайзера, трубчатого или регенеративного воздухоподогревателя (эти поверхности нагрева состоят обычно из нескольких частей, рассчитываемых отдельно).

Алгоритм поперочного теплового расчета котельного агрегата в целом состоит из предварительного задания температуры уходящих из котла газов с дальнейшим уточнением в ходе итераций. Температура уходящих газов вычисляется в ходе расчета воздухоподогревателя и сравнивается с принятой предварительно. Подобный алгоритм, предполагающий многократное повторение расчета всего котельного агрегата, может быть эффективно реализован только на компьютере.

Остановимся кратко на реализации элементов теплового расчета котельного агрегата на компьютере. В работе приводятся тексты фрагментов программ для близких по языку математических систем Scilab и Adequate Calculator [10–12]. Отметим, что программу для этих математических систем очень легко переписать для таких систем, как MATLAB или Octave. Поскольку эти системы являются интерпретаторами, запуск предлагаемых фрагментов программ не составит труда. Небольшие программы можно набирать и запускать непосредственно в основном рабочем окне Scilab и Adequate Calculator.

Более целесообразным представляется набирать рассматриваемый пример в простом текстовом редакторе (Блокнот или Akel Pad) и сохранять набранный текст с расширением `sce` при использовании Scilab и `calc` при использовании Adequate Calculator.

Переменные в программе обозначаются одним или несколькими символами (обычно латинскими буквами или цифрами, первый символ обязательно буква).

Символ `*` обозначает умножение, `^` – возведение в степень, `+` и `-` – сложение и вычитание, `/` – деление. Комментарий, содержащий необходимые пояснения, начинается с символа ``` для Adequate Calculator и `//` для Scilab.

Символ ; после выполнимого оператора означает, что результаты вычисления не выводятся в рабочее окно. Отметим, что существенное отличие аналогичных фрагментов программ для Scilab и Adequate Calculator состоит в записи и вызове подпрограмм-функций.

## 1. РАСЧЕТЫ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ТОПЛИВА

### 1.1. Теоретический расход воздуха

Для твердых и жидких топлив:

– объемный расход воздуха, м<sup>3</sup>/кг,

$$V^0 = 0,0889(C^P + 0,375S^P) + 0,265H^P - 0,0333O^P; \quad (1.1)$$

– массовый расход воздуха, кг/кг,

$$L^0 = 0,115(C^P + 0,375S^P) + 0,342H^P - 0,0431O^P. \quad (1.2)$$

При сжигании природного газа объемный расход, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>,

$$V^0 = 0,0476[\Sigma (m + n/4)C_mH_n + 0,5(CO + H_2) + 1,5H_2S - O_2]. \quad (1.3)$$

Значения объема воздуха, м<sup>3</sup>, рассчитываются при нормальных условиях, то есть. при 0 °С и 760 мм рт. ст.

Для смеси двух однородных топлив (твердых, жидких или газообразных) объемы воздуха определяются по формуле:

$$V^0 = g'V^{0'} + (1 - g')V^{0''}, \quad (1.4)$$

где  $g'$  – массовая доля первого топлива в смеси;  $V^{0'}$ ,  $V^{0''}$  – соответственно объемные расходы воздуха для первого и второго топлив.

Для смеси твердого или жидкого топлива с газообразным:

$$V^0 = V^{0'} + xV^{0''}, \quad (1.5)$$

где  $x$  – количество газа на 1 кг твердого или жидкого топлива.

## 1.2. Состав и объем продуктов сгорания

При сжигании твердого и жидкого топлива образуются следующие объемы продуктов сгорания, м<sup>3</sup>/кг:

– для трехатомных газов:

$$V_{\text{RO}} = 0,01866 (C^{\text{P}} + 0,375S^{\text{P}}); \quad (1.6)$$

– для азота:

$$V_{\text{N}}^0 = 0,79V^0 + 0,008N^{\text{P}}; \quad (1.7)$$

– для паров воды:

$$V_{\text{HO}}^0 = 0,111H^{\text{P}} + 0,0124W^{\text{P}} + 0,0161V^0 + 1,24G_{\text{ф}}, \quad (1.8)$$

где  $G_{\text{ф}}$  – расход пара на распыл 1 кг мазута, кг/кг.

Объем дымовых газов (продуктов сгорания) определяется по формуле:

$$V_{\text{Г}}^0 = V_{\text{RO}} + V_{\text{N}}^0 + V_{\text{HO}}^0. \quad (1.9)$$

При сжигании сланцев объем трехатомных газов за счет карбонатной углекислоты составит:

$$V_{\text{ROк}} = V_{\text{RO}} + 0,509(\text{CO}_2)_{\text{к}}/100, \quad (1.10)$$

где  $(\text{CO}_2)_{\text{к}}$  – двуокись углерода в карбонатах, %.

Тогда полный объем газов при  $\alpha = 1$  составит:

$$V_{\text{Г.к}}^0 = V_{\text{Г}}^0 + 0,509(\text{CO}_2)_{\text{к}}/100, \quad (1.11)$$

где  $V_{\text{Г}}^0$  определяется по (2.9).

При сжигании природного газа объем продуктов сгорания, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>:

$$V_{\text{N}}^0 = 0,79V^0 + 0,01N_2; \quad (1.12)$$

$$V_{\text{RO}} = 0,01(\sum mC_mH_n + \text{CO}_2 + \text{CO} + \text{H}_2\text{S}); \quad (1.13)$$

$$V_{\text{HO}}^0 = 0,01(\Sigma 0,5nC_mH_n + \text{H}_2\text{S} + \text{H}_2 + 0,124d_{\Gamma} + 0,0161V^0), \quad (1.14)$$

где  $d_{\Gamma}$  – влагосодержание газообразного топлива, которое в зависимости от температуры газа принимает значения:

$t, \text{ }^{\circ}\text{C}$	0	10	20;
$d_{\Gamma}, \text{ г/м}^3$	5,0	10,1	19,4.

Действительные объемы воздуха и продуктов сгорания,  $\text{м}^3/\text{кг}$ , при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha$ :

$$V_{\text{B}} = \alpha V^0; \quad (1.15)$$

$$V_{\text{HO}} = V_{\text{HO}}^0 + 0,0161(\alpha - 1)V^0; \quad (1.16)$$

$$V_{\Gamma} = V_{\Gamma}^0 + 1,0161(\alpha - 1)V^0. \quad (1.17)$$

Масса продуктов сгорания,  $\text{кг/кг}$ , при сжигании твердого и жидкого топлива:

$$G_{\Gamma} = 1 - A^{\text{P}}/100 + 1,306\alpha V^0. \quad (1.18)$$

Плотность продуктов сгорания при сжигании газообразного топлива,  $\text{кг/м}^3$ :

$$\rho_{\Gamma.\text{ТЛ}}^{\text{с}} = 0,01[1,96\text{CO}_2 + 1,52\text{H}_2\text{S} + 1,25\text{N}_2 + 1,43\text{O}_2 + 1,25\text{CO} + 0,0899\text{H}_2 + \Sigma (0,536m + 0,045n)\text{C}_m\text{H}_n]; \quad (1.19)$$

$$G_{\Gamma} = \rho_{\Gamma.\text{ТЛ}}^{\text{с}} + d_{\Gamma} \cdot 10^{-3} + 1,306 \alpha V^0. \quad (1.20)$$

Объемные доли трехатомных газов, водяного пара и безразмерная концентрация золы в продуктах сгорания:

$$R_{\text{RO}} = V_{\text{RO}}/V_{\Gamma}; \quad (1.21)$$

$$R_{\text{HO}} = V_{\text{HO}}/V_{\Gamma}; \quad (1.22)$$

$$\mu_{зл} = A^p a_{уН} / (G_T \cdot 100), \quad (1.23)$$

где  $a_{уН}$  – доля золы, уносимой продуктами сгорания. Для твердого шлакоудаления  $a_{уН} = 0,95$ .

Объем продуктов сгорания при рециркуляции газов, м<sup>3</sup>/кг:

$$V_{Г.рц} = V_T + rV_{Г.отб}, \quad (1.24)$$

где  $V_{Г.отб}$  – объем продуктов сгорания в сечении за местом отбора;  $r$  – доля отбираемых газов на рециркуляцию.

Избытки воздуха в газовом тракте при известном значении избытка на выходе из топки  $\alpha_T$  составляют:

– в зоне горелок:

$$\alpha_{гор} = \alpha_T - \Delta\alpha_T;$$

– в газоходе за топкой:

$$\alpha_i = \alpha_T + \sum \Delta\alpha_i,$$

где  $\Delta\alpha_T$ ,  $\Delta\alpha_i$  – присосы воздуха в топке и в поверхностях за топкой.

Относительный избыток горячего воздуха в горелке при сжигании твердого топлива составляет:

$$\beta_{гор} = \alpha_{гор} - \Delta\alpha_{пл},$$

где  $\Delta\alpha_{пл}$  – присосы воздуха в пылеприготовительной установке.

Переход к объему газа при нормальных условиях  $V_H$  производится по формуле:

$$V_H = VpT_H / Tp_H,$$

где  $V$ ,  $p$ ,  $T$  – соответственно объем, давление и температура при заданных (рабочих) условиях;  $T_H$ ,  $p_H$  – температура 273 К и давление 1 кгс/см<sup>2</sup> для нормальных условий.

Приведенные формулы легко записать как операторы для математических программ Scilab или Adequate Calculator. Любая программа для научных или технических расчетов состоит из задания начальных значений некоторых величин и формул для вычисления значений этих или других величин. Применяемая компьютерная математическая система должна обеспечить проведение таких расчетов.

**Пример 1.1. Расчет объема воздуха и продуктов сгорания высокосернистого обводненного мазута при процентном содержании влаги  $w$  и избытке воздуха в топке  $als$  с использованием программы Adequate Calculator:**

`номинальный состав топлива  
 $c0=83$ . `с углерод ;  $h0=10.4$  `h водород ;  $an20=0.35$  `an азот;  
 $x0=0.35$  `x кислород ;  $s0=2.8$  `s сера;  $a0=0.1$  `а зола;  
 $w0=3$ . ` w влага  
 $w=10$ . `Принимаем содержание влаги в %  
 $cmn=(100-w)/(100-w0)$  ` коэффициент пересчета  
 $a=a0*cmn$ ;  $c=c0*cmn$ ;  $h=h0*cmn$ ;  $an2=an20*cmn$ ;  $x=x0*cmn$ ;  $s=s0*cmn$ ;  
 $als=1.05$  `задаем als избыток воздуха в топке  
 ` теоретический объем воздуха, м<sup>3</sup>/кг  
 $vv=0.0889*(c+0.375*s)+0.265*h-0.0333*x$   
 $vd=vv*als$  ` действительный объем воздуха  
 ` объем азота, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>  
 $vn2=0.79*vv+0.008*an2$ ;  
 `объем трехатомных газов, м<sup>3</sup>/кг  
 $vg=0.0187*(c+0.375*s)$ ;  
 `объем водяных паров, м<sup>3</sup>/кг  
 $vh20=0.111*h+0.0124*w$   
 ` теоретический объем продуктов сгорания, м<sup>3</sup>/кг  
 $v0=vn2+vg+vh20$   
 ` действительный объем продуктов сгорания, м<sup>3</sup>/кг  
 $v00=v0+1.0161*(als-1.)*vv$   
 ` объемные доли трехатомных газов и водяных паров  
 $r0=vg/v00$ ;  $rh0=vh20/v00$

**Пример 1.2. Расчет объема воздуха и продуктов сгорания природного газа при избытке воздуха в топке  $als$  с использованием программы Adequate Calculator:**

`состав топлива  
 $ch4=93.62$  `  $ch4$  концентрация метана;  $c2h6=2.08$  `  $c2h6$  концентрация этана  
 $c3h8=1.63$  `  $c3h8$  концентрация пропана;  
 $c4h10=0.68$  `  $c4h10$  концентрация бутана;  
 $c5h12=0.18$  `  $c5h12$  концентрация пентана  
 $c6h14=0.09$  `  $c6h14$  концентрация гексана

$c2h4 = 1.26$  ` c2h4 концентрация этилена  
 $an2 = 0.$  ` an2 концентрация азота  
 $c02 = 0.46$  ` c02 концентрация углекислоты  
 $cc0 = 0.$  ` cc0 концентрация окиси углерода  
 $ch2 = 0.$  ` ch2 концентрация водорода  
 $h2s = 0.$  ` h2s концентрация сероводорода  
 $sx = 0.$  ` sx концентрация кислорода  
 $amn14 = 2.; amn26 = 3.5; amn38 = 5.; amn410 = 6.5; amn512 = 8.;$   
 ` теоретический объем воздуха, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>  
 $vv = 0.0476 * (0.5 * ch2 + 0.5 * cc0 + 1.5 * h2s + amn14 * ch4 + amn26 * c2h6 + amn38 * c3h8 + amn410 * c4h10 + amn512 * c5h12)$   
 $vn2 = 0.79 * vv + 0.01 * an2;$  ` объем азота, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>  
 ` объем трехатомных газов, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>  
 $vg = 0.01 * (c02 + cc0 + h2s + ch4 + 2 * c2h6 + 3 * c3h8 + 4 * c4h10 + 5 * c5h12 + 6 * c6h14);$   
 ` объем водяных паров, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>  
 $vh20 = 0.01 * (h2s + ch2 + 1.61 * vv + 2 * ch4 + 3 * c2h6 + 4 * c3h8 + 5 * c4h10 + 6 * c5h12 + 7 * c6h14)$   
 ` теоретический объем продуктов сгорания, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>  
 $v0 = vn2 + vg + vh20$   
 $als = 1.05$  ` als избыток воздуха в топке  
 ` действительный объем продуктов сгорания, м<sup>3</sup>/кг  
 $v00 = v0 + 1.0 * (als - 1.) * vv$   
 ` объемные доли  
 $r0 = vg / v00; rh0 = vh20 / v00; rr = r0 + rh0$

После обращения к математической системе Adequate Calculator получим результаты вычислений, а именно необходимые объемы воздуха и продуктов сгорания при сжигании мазута и природного газа соответственно.

## 2. РАСЧЕТЫ СОСТАВА И ЭНТАЛЬПИИ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ

Количество теплоты, содержащееся в воздухе или продуктах сгорания, называют теплосодержанием (энтальпией) воздуха или продуктов сгорания. При выполнении расчетов принято энтальпию воздуха и продуктов сгорания относить к 1 кг сжигаемого твердого и жидкого топлива и к 1 м<sup>3</sup> (при нормальных условиях) газообразного топлива.

Расчет энтальпий продуктов сгорания производится при действительных коэффициентах избытка воздуха после каждой поверхности нагрева. При проведении конструктивного расчета температуры после поверхностей нагрева задаются, а при поверочном расчете температуры эти неизвестны.

Определение энтальпий воздуха и продуктов сгорания при ручном счете производится в следующей последовательности.

Вычисляется энтальпия теоретического объема воздуха для всего выбранного диапазона температур для твердого и жидкого топлива (кДж/кг) и газа (кДж/м<sup>3</sup>):

$$I_{\text{в}}^0 = V^0 (c\mathcal{H})_{\text{в}}, \quad (2.1)$$

где  $(c\mathcal{H})_{\text{в}}$  – энтальпия 1 м<sup>3</sup> воздуха, кДж/м<sup>3</sup>, принимается для каждой выбранной температуры по табл. 1;  $V^0$  – теоретический объем воздуха, необходимого для горения, вычисляется по формулам раздела 1.

Определяется энтальпия теоретического объема продуктов сгорания для всего выбранного диапазона температур (кДж/кг или кДж/м<sup>3</sup>):

$$I_{\text{г}}^0 = V_{\text{RO}_2} (c\mathcal{H})_{\text{RO}_2} + V_{\text{N}_2}^0 (c\mathcal{H})_{\text{N}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}}^0 (c\mathcal{H})_{\text{H}_2\text{O}}, \quad (2.2)$$

где  $(c\mathcal{H})_{\text{RO}_2}$ ,  $(c\mathcal{H})_{\text{N}_2}$ ,  $(c\mathcal{H})_{\text{H}_2\text{O}}$  – энтальпии 1 м<sup>3</sup> трехатомных газов, теоретического объема азота, теоретического объема водяных паров, они принимаются для каждой выбранной температуры по табл. 1, кДж/м<sup>3</sup>;  $V_{\text{RO}_2}$ ,  $V_{\text{N}_2}^0$ ,  $V_{\text{H}_2\text{O}}^0$  – объемы трехатомных газов, теоретический объем азота и водяного пара, м<sup>3</sup>/кг или м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

Определяется энтальпия избыточного количества воздуха для всего выбранного диапазона температур (кДж/кг или кДж/м<sup>3</sup>):

$$I_{\text{изб}}^{\text{в}} = (\alpha - 1) I_{\text{в}}^0. \quad (2.3)$$

Таблица 1

**Энтальпия 1 м<sup>3</sup> воздуха, газообразных продуктов сгорания (кДж/м<sup>3</sup>) и 1 кг золы (кДж/кг)**

θ, °С	(с $\mathcal{H}$ ) <sub>RO2</sub>	(с $\mathcal{H}$ ) <sub>N2</sub>	(с $\mathcal{H}$ ) <sub>O2</sub>	(с $\mathcal{H}$ ) <sub>H2O</sub>	(с $\mathcal{H}$ ) <sub>в</sub>	(с $\mathcal{H}$ ) <sub>зл</sub>
100	170	130	132	151	133	81
200	359	261	268	305	267	170
300	561	393	408	464	404	264
400	774	528	553	628	543	361

$\vartheta, ^\circ\text{C}$	$(c\vartheta)_{\text{RO}_2}$	$(c\vartheta)_{\text{N}_2}$	$(c\vartheta)_{\text{O}_2}$	$(c\vartheta)_{\text{H}_2\text{O}}$	$(c\vartheta)_{\text{B}}$	$(c\vartheta)_{\text{ЗЛ}}$
500	999	666	701	797	686	460
600	1226	806	852	970	832	562
700	1466	949	1008	1151	982	664
800	1709	1096	1163	1340	1134	769
900	1957	1247	1323	1529	1285	878
1000	2209	1398	1482	1730	14'40	987
1100	2465	1550	1642	1932	1600	1100
1200	2726	1701	1806	2188	1760	1209
1300	2986	1856	1970	2352	1919	1365
1400	3251	2016	2133	2566	2083	1587
1500	3515	2171	2301	2789	2247	1764
1600	3780	2331	2469	3011	2411	1881
1700	4049	2490	2637	3238	2574	2070
1800	4317	2650	2805	3469	2738	2192
1900	4586	2814	2978	3700	2906	2934
2000	4859	2973	3150	3939	3074	2520
2100	5132	3137	3318	4175	3242	–
2200	5405	3301	3494	4414	3410	–

Определяется энтальпия продуктов сгорания при соответствующем коэффициенте избытка воздуха (кДж/кг или кДж/м<sup>3</sup>):

$$I = I_{\Gamma}^0 + I_{\text{изб}}^{\text{B}} + I_{\text{ЗЛ}}, \quad (2.4)$$

где  $I_{\text{изб}}^{\text{B}}$  – энтальпия 1 кг золы, кДж/кг;

$$I_{\text{ЭЛ}} = (c\vartheta)_{\text{ЗЛ}} \frac{A^p}{100} a_{\text{ун}}. \quad (2.5)$$

Способ нахождения значений удельной энтальпии продуктов сгорания и воздуха, применяемый обычно [1-8] и описанный выше, требует много довольно утомительных ручных вычислений. Кроме того, использование исходной таблицы энтальпий может потребовать дополнительных интерполяций при определении значений энтальпии для температур, не совпадающих с табличными. Тепловой расчет котельных агрегатов можно значительно упростить, построив аналитические аппроксимации для энтальпии продуктов сгорания и воздуха.

Энтальпия продуктов сгорания топлива может быть представлена в виде:

$$H = at^b + (\alpha - 1)ct^d, \quad (2.6)$$

где  $a, b, c, d$  – некоторые константы, зависящие от вида топлива;  $\alpha$  – избыток воздуха,  $t$  – температура, °С. Удельная энтальпия воздуха  $H^0 = ct_0^d$ , где  $t_0$  – температура воздуха, °С. Коэффициенты аппроксимации  $a, b, c, d$  находятся методом наименьших квадратов с использованием зависимости (2.2) и данных табл. 1.

**Пример 2.1. Построение методом наименьших квадратов аппроксимации для энтальпии продуктов сгорания и воздуха в системе Scilab:**

```
tea=[100,200,300,400,500,600,700,800,900,1000,1100,1200,...
1300,1400,1500,1600,1700,1800,1900,2000,2100,2200]
hcr=[170.,359.,361.,774.,999.,1226.,1466.,1709.,1959.,...
2209.,2465.,2726.,2986,3251,3515,3780,4049,4317,4586,4859,5132,5405]
hcn=[130.,261.,393.,528.,666.,806.,949.,1096,1247,1398,...
1550,1701,1856,2016,2171,2331,2490,2650,2814,2973,3137,3301.]
hch=[151,305,464,628,797,970,1151,1340,1529,1730,1932.,...
2138.,2352.,2566.,2789,3011,3233,3469,3700,3939,4145,4414]
hcv=[133.,267.,404.,543.,686.,832.,982.,1134.,1285.,1440.,...
1600.,1760.,1919.,2083.,2247.,2411.,2574.,2738.,2906.,3074.,3242.,3410]
hha=vg*hcr+vn2*hcn+vh20*hch+hcv*(als-1.)*vv
function [a,b]=aaa(x,y,n)
xi=log(x);yi=log(y);xi2=xi.*xi;xy=xi.*yi
sx=sum(xi); sy=sum(yi); sx2=sum(xi2); sxy=sum(xy)
za=(sy*sx2-sxy*sx)/(n*sx2-sx*sx)
a=exp(za);b=(sy-n*za)/sx
endfunction
n=22
[aa,bb]=aaa(tea,hha,n)
hha=hcv*vv
[av,bv]=aaa(tea,hha,n)
hh0=vg*hcr+vn2*hcn+vh20*hch
[a,b]=aaa(tea,hh0,n)
```

Подпрограмма вычисления энтальпии с использованием полученных аппроксимационных зависимостей имеет вид:

```
function h=hhh0(t,a,b,av,bv,als)
h=a*t^b +(als-1)*av*t^bv
endfunction
```

Расчет коэффициентов (2.6) для высокосернистого мазута и уренгойского газа дает следующие результаты (в программе коэффициенты для энтальпии продуктов сгорания  $a$ ,  $b$  обозначены как  $a0$ ,  $b$ , коэффициенты для энтальпии воздуха  $c$ ,  $d$  как  $av$ ,  $bv$ ).

Таблица 2

### Коэффициенты для высокосернистого мазута и уренгойского газа

Топливо	$a$	$b$	$c$	$d$
Мазут высокосернистый	9,666	1,081	9,936	1,0585
Газ уренгойский	10,005	1.0796	9,537	1,0585

Для вычисления адиабатической температуры горения полезно знать аппроксимацию продуктов сгорания топлива при избытке воздуха в топке вида  $h=a0*t^b0$ :

```
hh0=vg*hcr+vn2*hcn+vh20*hch+(als-1)* hcv*vv
[a0,b0]=aaa(tea,hh0,n)
```

### 3. ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС КОТЛА

На основании теплового баланса вычисляются КПД котла и необходимый расход топлива.

Располагаемое тепло на 1 кг твердого, жидкого или на 1 м<sup>3</sup> газообразного топлива  $Q_p^p$  определяется соответственно по формулам:

$$Q_p^p = Q_H^p + Q_{в.вн} + h_{тл} + Q_{ф} - Q_{к}, \text{ кДж/кг}, \quad (3.1)$$

$$Q_p^p = Q_H^c + Q_{в.вн} + h_{тл}, \text{ кДж/м}^3, \quad (3.2)$$

где  $Q_H^p$  и  $Q_H^c$  – низшая теплота сгорания рабочей массы твердого, жидкого и, соответственно, сухой массы газообразного топлив, кДж/кг и кДж/м<sup>3</sup>;

$Q_{в.вн}$  – тепло, внесенное поступающим в котельный агрегат воздухом, при подогреве последнего вне агрегата отборным паром, отработанным теплом и т.п., который, в свою очередь, подсчитывается по формуле:

$$Q_{в.вн} = \beta' [(H_{хв}^0)' - H_{в}^0], \text{ кДж/кг или кДж/м}^3, \quad (3.3)$$

где  $\beta'$  – отношение количества воздуха на входе в котел (в воздухоподогреватель) к теоретически необходимому;  $(H_{хв}^0)'$  и  $H_{в}^0$  – энтальпии теоретически необходимого количества воздуха на входе в котельный агрегат и холодного воздуха, которые определяются по Н-υ таблице, кДж/кг или кДж/м<sup>3</sup>.

При отсутствии специальных указаний температура воздуха поступающего в котел, принимается равной 30 °С.

Физическое тепло топлива  $h_{тл}$  подсчитывается по формуле:

$$h_{тл} = c_{тл} t_{тл}, \text{ кДж/кг или кДж/м}^3, \quad (3.4)$$

где  $c_{тл}$  – теплоемкость рабочего топлива, кДж/(кг °С) или кДж/(м<sup>3</sup> °С);  
 $t_{тл}$  – температура топлива, °С.

Для мазута теплоемкость составляет:

$$C_{тл} = 1,74 + 0,0025 t_{тл}, \text{ кДж/ (кг °С) .} \quad (3.5)$$

Тепло, вносимое в агрегат паровым дутьем («форсуночным» паром),  $Q_{ф}$  определяется по формуле:

$$Q_{ф} = G_{ф} (h_{ф} - 2520), \text{ кДж/кг ,} \quad (3.6)$$

где  $G_{ф}$  и  $h_{ф}$  – расход и энтальпия пара, идущего на распыливание топлива, кг/кг и кДж/кг.

Обычно для котлов низкого давления при сжигании газообразного топлива:

$$Q_{р}^p = Q_{н}^c, \text{ кДж/м}^3.$$

Потеря тепла с уходящими газами определяется:

$$q_2 = \frac{(H_{yx} - \alpha_{yx} H_{хв}^0)(100 - q_4)}{Q_{р}^p}, \%, \quad (3.7)$$

где  $H_{уx}$  – энтальпия уходящих газов при соответствующем избытке воздуха  $\alpha_{уx}$  и температуре  $\upsilon_{уx}$  определяется по  $H$ - $\upsilon$  диаграмме, кДж/кг или кДж/м<sup>3</sup>;  $H_{хв}^0$  – энтальпия теоретически необходимого количества холодного воздуха, кДж/кг или кДж/м<sup>3</sup>,  $q_4$  – потеря от механической неполноты сгорания, %. При сжигании газообразного и жидкого топлив  $q_4 = 0$ . При сжигании жидких и газообразных топлив в котлах низкого давления  $q_3$  принимается равной 0,5 %.

Потеря тепла от наружного охлаждения при нагрузке, отличной от номинальной,  $q_5$  определяется согласно формуле:

$$q_5 = q_5^{\text{НОМ}} \frac{D_{\text{НОМ}}}{D_{\text{ф}}}, \%,$$

где  $q_5^{\text{НОМ}}$  – потеря тепла от наружного охлаждения при номинальной нагрузке,  $D_{\text{НОМ}}$ ,  $D_{\text{ф}}$  – номинальная и фактическая нагрузка котла, кг/с(т/ч).

Температура золы (шлака) при твердом шлакоудалении принимается равной 600 °С.

Коэффициент полезного действия котла (брутто) определяется:

$$\eta_{\text{ка}}^{\text{бр}} = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_{\text{бшш}}), \%. \quad (3.9)$$

Коэффициент сохранения тепла находится по формуле:

$$\varphi = 1 - \frac{q_5}{q_5 + \eta_{\text{ка}}^{\text{бр}}}. \quad (3.10)$$

Тепло, полезно отданное в котле, определяется в общем случае из выражения:

$$Q_{\text{ка}} = D_{\text{пе}}(h_{\text{пе}} - h_{\text{пв}}) + D_{\text{нп}}(h_{\text{нп}} - h_{\text{пв}}) + D_{\text{пр}}(h_{\text{кшп}} - h_{\text{пв}}), \text{ кВт}, \quad (3.11)$$

где  $D_{\text{пе}}$  – количество выработанного перегретого пара, кг/с;  $h_{\text{пе}}$  – энтальпия перегретого пара, кДж/кг, определяемая по  $P_{\text{пе}}$  и  $t_{\text{пе}}$ ;  $h_{\text{пв}}$  – энтальпия питательной воды, кДж/кг, определяемая ее давлением и температурой;  $D_{\text{нп}}$  – количество выработанного насыщенного пара, кг/с,  $h_{\text{нп}}$  – энтальпия насыщенного пара, кДж/кг, определяемая по давлению в барабане котла;  $D_{\text{пр}}$  – расход воды на продувку котла, кг/с, с энтальпией ее определяемой

по давлению в барабане котла  $D_{\text{пр}} = \frac{\Pi}{100} D$ , где  $\Pi$  – процент продувки, %;

$D$  – производительность котла, кг/с.

Расход топлива, подаваемого в топку, определяется по формуле:

$$B = \frac{Q_{\text{ка}}}{Q_p^p \eta_{\text{ка}}} 100, \text{ ( м}^3/\text{с ) , (кг/с),} \quad (3.12)$$

в которой  $\eta_{\text{ка}}$  выражается в процентах.

Для подсчета суммарных объемов продуктов сгорания, воздуха и теплоты, отданной газами в поверхностях нагрева, вводится расчетный расход топлива, вычисляемый с учетом механической неполноты сгорания  $q_4$  по формуле:

$$B_p = B \left( 1 - \frac{q_4}{100} \right). \quad (3.13)$$

При сжигании газообразного и жидкого топлив  $q_4 = 0$ .

**Пример 3.1. Расчет потерь с уходящими газами и КПД пылеугольного котельного агрегата в системе Scilab:**

```
tpr= 128.// tpr температура газов на выходе из котла
thv=30 // температура холодного воздуха
aluh=1.4 //aluh избыток воздуха на выходе из котла
q34=2. //потери от недожога в процентах
hv0=av*thv^bv
hhh=hhh0(tpr,a0,b0,av,bv,aluh)
// потери теплоты с уходящими газами
q2=(hhh-aluh*hv0)*(100-q34)/q // q теплота сгорания топлива
// потери теплоты от наружного охлаждения, %'
q5=sqrt(60./dpe)/log10(dpe) //dpe паропроизводительность, кг /с
// кпд котла, %'
tet=100.-q2-q34-q5
```

**Пример 3.2. Расчет расхода топлива в системе Scilab:**

```
pb=14.4 // давление в барабане
trv=230. // температура питательной воды
dpe=320. // паропроизводительность (т/ч)
```

```

dpe=dpe/3.6 // паропроизводительность, кг/с
prd=0.5 // непрерывная продувка в процентах
tn=ttt(pb)
// нахождение энтальпии кипящей и питательной воды
hn=h12(tn)
hpr=h12(tpv)
// расход продувочной воды, кг/с
dpr=0.01*prd*dpe
// теплота продувки, кВт
tdpr=dpr*(hn-hpr)
// расход топлива, кг/с
b=(dpe*(hpp-hpr)+dpr*(hn-hpr))/q/(tet/100.)
// расход топлива, т/ч
btbt=b*3.6

```

#### 4. РАСЧЕТ ТОПОЧНОЙ КАМЕРЫ

Расчет теплообмена в топках паровых и водогрейных котлов основывается на приложении теории подобия к топочным процессам. На базе этой теории в ЦКТИ имени И.И. Ползунова и ВТИ имени Ф.Э. Дзержинского разработан нормативный метод теплового расчета котельных агрегатов [1].

В этом методе для расчета теплообмена в однокамерных и полуоткрытых топках рекомендуется формула, связывающая безразмерную температуру продуктов сгорания на выходе из топки ( $\theta_m''$ ) с критерием Больцмана ( $Bo$ ), степенью черноты топки  $a_T$  и параметром  $M$ , учитывающим характер распределения температур по высоте топки:

$$\theta_T'' = \frac{T_T''}{T_a} = \frac{Bo^{0,6}}{M \cdot a_T^{0,6} + Bo^{0,6}} \quad (4.1)$$

Безразмерная температура продуктов сгорания на выходе из топки  $\theta_T''$  представляет собой отношение действительной абсолютной температуры на выходе из топки  $T_T''$  к абсолютной теоретической температуре продуктов сгорания  $T_a$ .

Под теоретической температурой продуктов сгорания (адиабатной температурой) понимают максимальную температуру, образующуюся при сжигании топлива с расчетным избытком воздуха, которую могли бы иметь продукты сгорания, если бы в топке отсутствовал теплообмен с экранными поверхностями нагрева.

Критерий Больцмана представляет собой число, показывающее соотношение между конвективным переносом теплоты и излучением абсолютно черного тела при температуре рассматриваемого элементарного объема. Вычисляется по формуле:

$$Bo = \frac{\varphi \cdot B_p V_{c_{cp}} \cdot 10^3}{5,67 \cdot 10^{-8} \psi_{cp} F_{ст} T_a^3}, \quad (4.2)$$

где  $\varphi$  – коэффициент сохранения теплоты;  $B_p$  – расчетный расход топлива, кг/с;  $F_{ст}$  — площадь поверхности стен топки, м<sup>2</sup>;  $\psi_{cp}$  – среднее значение коэффициента тепловой эффективности экранов;  $V_{c_{cp}}$  – средняя суммарная теплоемкость продуктов сгорания 1 кг топлива в интервале температур  $\theta_a - \theta_T''$ , кДж/(кг·К);  $5,67 \cdot 10^{-8}$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $T_a$  – абсолютная теоретическая температура продуктов сгорания, К.

Степень черноты топки  $a_T$  называют отношение излучательной способности действительной топки к излучательной способности абсолютно черного тела. Степень черноты топки зависит от излучательной способности пламени факела (слоя горящего топлива), конструкции тепловоспринимающих поверхностей нагрева и степени их загрязнения.

Пламя факела представляет собой полупрозрачную излучающую, рассеивающую и поглощающую среду. Передача теплоты лучеиспусканием в такой среде связана с процессами испускания, рассеяния и поглощения энергии трехатомными газами и твердыми частицами. В зависимости от концентрации, размеров и оптических констант твердых частиц, содержащихся в факеле, его излучательная способность может меняться весьма значительно. Ослабление интенсивности излучения пламени происходит вследствие поглощения и рассеяния. Если луч проходит сквозь слой поглощающей среды, происходит непрерывное уменьшение его интенсивности в направлении излучения.

Коэффициент пропорциональности  $k$ , определяющий относительное изменение интенсивности луча в поглощающем слое единичной толщины, называют коэффициентом ослабления луча. Он определяет интенсивность ослабления лучей в поглощающей среде и, следовательно, характеризует полную поглощательную способность среды, определяемую как поглощением, так и рассеянием. В топочной камере основными газами, способными поглощать тепловые лучи, являются трехатомные газы,

состоящие из  $\text{CO}_2$  и водяных паров  $\text{H}_2\text{O}$ . Поглощательная способность  $\text{CO}_2$  при постоянном давлении и температуре однозначно определяется произведением его парциального давления  $p_{\text{CO}_2}$  и толщины слоя  $s$ . Поглощательная способность водяного пара при заданной температуре также зависит от произведения парциального давления водяного пара на толщину слоя.

Поглощающие объемы в топочных камерах котельных агрегатов имеют различную конфигурацию, следовательно, длина пути луча может быть различной в зависимости от его направления. В то же время длина всех лучей, падающих с поверхности полусферы на центр основания, одинакова и равна радиусу полусферы. Для облегчения расчетов используют не действительную длину лучей в разных направлениях, а эффективную длину луча, или толщину излучающего слоя. Под эффективной длиной луча, или толщиной излучающего слоя, понимают толщину слоя, равную радиусу полусферы, которая при прочих равных условиях излучает на центр основания такое же количество энергии, какое излучает оболочка иной формы на заданный на ней элемент поверхности. Расчеты показывают, что все встречающиеся в промышленной практике объемы могут быть приближенно заменены соответствующими полусферическими объемами.

При наличии в продуктах сгорания твердых взвешенных частиц их поглощающая способность существенно изменяется. Твердые частицы, находящиеся в пламени, можно разделить на три группы: частицы золы, топлива и углерода. В светящемся пламени частицы углерода представляют собой сажу, а в пылеугольном – кокс.

Коэффициент ослабления лучей – это основная характеристика любой мутной среды, определяющая ее излучающую, рассеивающую и поглощающую способности. Поэтому применительно к топкам котельных агрегатов задача сводится к определению коэффициента ослабления лучей в зависимости от характера пламени.

При расчете несветящегося пламени необходимо определить коэффициент ослабления лучей только трехатомными газами, полу светящегося пламени – дополнительно коэффициенты ослабления лучей частицами золы и кокса, а светящегося – частицами сажи.

Параметр  $M$ , учитывает распределение температуры по высоте топочной камеры и характеризует влияние максимума температуры пламени на эффект суммарного теплообмена. Он зависит от вида топлива, способа его сжигания, типа горелок, их расположения на стенах топки и функционально связан с относительным уровнем расположения горелок по высоте топочной

камеры. Под относительным расположением горелок понимают отношение высоты расположения осей горелок (отсчитываемой от пода топки или от середины холодной воронки) к общей высоте топки.

В ходе расчета определяется коэффициент тепловой эффективности экранов:

$$\psi = x\xi. \quad (4.3)$$

Угловым коэффициентом  $x$  называется отношение количества энергии, посылаемой на облучаемую поверхность, к энергии излучения всей полусферической излучающей поверхности. Угловым коэффициентом показывает, какая часть лучистого полусферического потока, испускаемого одной поверхностью, падает на другую поверхность и зависит от формы и взаимного расположения тел, находящихся в лучистом теплообмене.

Коэффициент  $\psi$  учитывает снижение тепловосприятости экранных поверхностей нагрева вследствие их загрязнения наружными отложениями или закрытия огнеупорной массой. Если стены топки покрыты экранами с разными угловыми коэффициентами или частично покрыты огнеупорной массой (огнеупорным кирпичом), то определяется среднее значение коэффициента тепловой эффективности. При этом для неэкранированных участков топки коэффициент тепловой эффективности  $\psi$  принимается равным нулю.

Далее по формулам нормативной методики [1] определяются эффективная толщина излучающего слоя  $s$  (м), коэффициент ослабления лучей, степень черноты факела.

Определяется параметр  $M$  в зависимости от относительного положения максимума температуры пламени по высоте топки [1]. Максимальное значение  $M$  для камерных топок принимается не более 0,5. Относительное положение максимума температуры для большинства топлив определяется как отношение высоты размещения горелок к общей высоте топки.

В ходе расчета определяется средняя суммарная теплоемкость продуктов сгорания на 1 кг сжигаемого твердого и жидкого топлива или на 1 м<sup>3</sup> газа при нормальных условиях [кДж/(кг·К)] или [кДж(м<sup>3</sup>·К)]:

$$V_{ср} = \frac{Q_T - I_T''}{T_a - T_T''}, \quad (4.4)$$

где  $T_a$  – абсолютная теоретическая (адиабатная) температура горения,  $T_T''$  – абсолютная температура на выходе из топки, К;  $I_T''$  – энтальпия

продуктов сгорания при принятой на выходе из топки температуре;  $Q_T$  – полезное тепловыделение в топке.

Температура продуктов сгорания на выходе из топки ( $^{\circ}\text{C}$ ) выражается формулой:

$$\vartheta_T'' = \frac{T_a}{M \left( \frac{5.67 \psi_{\text{ср}} F_{\text{ср}} a_T T_a^3}{10^{11} \varphi \cdot B_p V_{\text{ср}}} \right)^{0,6} + 1} - 273. \quad (4.5)$$

При конструктивном расчете котельного агрегата задается температура на выходе из топки, тогда соотношение (4.5) используется для нахождения площади поверхности топочной камеры  $F_{\text{ср}}$ .

#### **Пример 4.1. Вычисление адиабатической температуры горения газового топлива методом итераций**

Для газового топлива адиабатическую температуру горения  $t$  с использованием аппроксимации энтальпии продуктов сгорания, построенной для избытка воздуха в топке, можно найти из уравнения:

$$Q_{\text{H}}^{\text{p}} = at^b + (\alpha - 1)ct^d,$$

где  $Q_{\text{H}}^{\text{p}}$  – низшая теплота сгорания топлива,  $\text{кДж/м}^3$ .

Для вычисления адиабатической температуры обычно используется метод итераций. В нашем случае в качестве начального приближения можно использовать приближенное значение адиабатической температуры, вычисленное по формуле:

$$t = (Q_{\text{H}}^{\text{p}} / (\alpha a))^{(1/b)}.$$

Дальнейшее уточнение значения адиабатической температуры проводится по формуле:

$$t = (Q_{\text{H}}^{\text{p}} - (\alpha - 1)ct^d / a)^{(1/b)}.$$

Для сходимости обычно достаточно 2-3 итераций.

**Пример 4.2. Конечное выражение для адиабатической температуры горения в системе Scilab:**

```
// a0, b0 коэффициенты аппроксимации энтальпии газов, вычисленные при
// избытке воздуха в топке
qt=q*(100.-q34)/100.
// tea температура горения
teas=(qt/a0)^(1/b0)
tea=teas+273;
```

**Пример 4.3. Вычисление степени черноты топки:**

```
psi=0.55 // коэффициент тепловой эффективности экранов
fstn=825. // площадь поверхности топки (м2)
vtp=1000. // объем топки (м3)
// объемные доли
r0=vg/v00; rh0=vh20/v00; rr=r0+rh0;
// вычисление степени черноты топки
// эффективная толщина излучающего слоя
s=3.6*vtp/fstn;
// коэффициент ослабления лучей трехатомными газами
cg=((7.8+16*rh0)/3.16/sqrt(0.1*r0*s)-1)*(1-0.37*(te0+273)/1000);
//коэффициент ослабления лучей
csl=cg*r0+0.5+0.06*9.5*a/v00;
//произведение 0.1*csl*s
prrr=0.1*csl*s;
//степени черноты факела
atf=1-exp(-prrr)
//степени черноты топки
at=atf/(atf+(1-atf)*psi)
```

**Пример 4.4. Вычисление площади топочной камеры по заданной температуре газов на выходе из топки с использованием программы Adequate Calculator:**

```
q=18500. ` Низшая теплота сгорания (кДж/кг)
q34=2. ` потери от недожога в процентах
am= 0.4 ` параметр M (0.3-0.5)
te0=1100. ` температура газов на выходе из топки
```

полезное тепловыделение, кДж/кг'

$$qt=q*(100.-q34)/100.$$

` удельное радиационное тепловосприятие топки

$$hdg=aa*te0^bb$$

` tet КПД котла

$$fi=tet/(tet+q5); qtt=fi*(qt-hdg)$$

` температура горения

$$teas=(qt/aa)^(1/bb)$$

$$tea=teas+273$$

` средняя теплоемкость, кДж/(м3К)

$$vcs=(qt-hdg)/(teas-te0)$$

` температура на выходе из топки, К'

$$te0n=te0+273.$$

$$aaaa=(((tea/te0n)-1)/am)^(1.5)$$

` площадь топки, м

$$fst=10^11/5.67*aaaa*fi*b*vcs/psi/at/(tea^3)$$

## 5. ФОРМУЛЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

В ходе теплового расчета котельного агрегата приходится использовать такие величины, как температура и энтальпия кипящей воды при заданном давлении в барабане котла, энтальпия и теплоемкость воды и перегретого пара при различных давлениях и температурах. При «ручном» счете эти величины берутся из бумажных справочников, где они представлены в виде громоздких таблиц. Ниже приводятся приближенные выражения для компьютерного расчета этих величин, оформленные как подпрограммы Scilab или Adequate Calculator.

**Подпрограммы расчета теплофизических величин для системы Scilab:**

```
// Подпрограмма нахождения температуры насыщения по давлению
function tn=ttt(p)
a=log(p/0.098);tn=1000./(2.6884-0.200966*a-2.166*a*a/1000.)-273.15
endfunction
function hn=h12(t)
// Подпрограмма нахождения энтальпии кипящей воды
a=(t+273.15)/1000.; a2=a*a; a3=a2*a; a4=a3*a; a5=a4*a
hn=4.187*(-753.317+6959.41*a-29258*a2+71285.*a3-86752.8*a4+42641.1*a5)
endfunction
```

```

function h=fhpp(tp)
// Подпрограмма нахождения энтальпии перегретого пара
pp=14.4; p=pp/22.064; t=(tp+273.15)/647.14; t2=t*t;
t3=t2*t; t4=t3*t; t5=t4*t;
h1=10258.8-20231.3/t+24702.8/t2-16307./t3+5579.31/t4-777.285/t5
h2=p*(-355.878+817.288/t2-845.841/t3)
p2=p*p; p3=p2*p; p4=p3*p; h3=p2*160.276/t3
h4=p3*(-95607.5/t+443740/t2-767668/t3+587261/t4-167657/t5)
h5=p4*(22542.8/t2-84140.2/t3+104198/t4-42886.7/t5)
h=h1+h2; h=h+h3; h=h+h4;
h=h+h5
endfunction
// Подпрограмма нахождения энтальпии воды
p=14
t=(t+273.15)/647.14
p=p/22.064
t2=t*t; t3=t2*t; t4=t3*t; p2=p*p
h=7809.096*t-13868.72
h1=12725.22/t-6370.893/t2+1595.86/t3-159.9064/t4
h=h+h1
h2=p*9.488789/t+p2*(-148.1135*t+224.3027-111.4602/t+18.15823/t2)
h=h+h2
endfunction

```

**Приближенные выражения для расчета энтальпии и теплоемкости пара в котлах высокого давления (Adequate Calculator):**

h<sub>0</sub>, c<sub>p</sub> - энтальпии и теплоемкости пара соответственно  
 $appp(tt_0)=(a=145.45020;b=0.50297;h_0=a*tt_0^b)$   
 $cppp(tt_0)=(a=145.45020;b=0.50297;c_p=a*b*tt_0^{(b-1)})$

**Приближенные выражения для расчета энтальпии и теплоемкости воды в котлах высокого давления (Adequate Calculator):**

h<sub>0</sub>, c<sub>p</sub> – энтальпии и теплоемкости воды соответственно  
 $appv(tt_0)=(a=4.006;b=1.01835;h_0=a*tt_0^b);$   
 $cppv(tt_0)=(a=4.006;b=1.01835;c_p=a*b*tt_0^{(b-1)});$

## 6. РАСЧЕТ КОНВЕКТИВНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА

Эффективность работы конвективных поверхностей нагрева в значительной мере зависит от интенсивности передачи теплоты продуктами сгорания воде и пару. Продукты сгорания передают теплоту наружной поверхности труб путем конвекции и лучеиспускания. От наружной поверхности труб к внутренней теплота передается через стенку теплопроводностью, а от внутренней поверхности к воде и пару – конвекцией. Таким образом, передача теплоты от продуктов сгорания к воде и пару представляет собой сложный процесс, называемый теплопередачей.

При расчете конвективных поверхностей нагрева используется уравнение теплопередачи и уравнение теплового баланса. Расчет выполняется для 1 кг сжигаемого твердого и жидкого топлива или 1 м<sup>3</sup> газа при нормальных условиях.

Уравнение теплопередачи:

$$Q_T = K \cdot H \cdot \Delta t / B_p. \quad (6.1)$$

Уравнение теплового баланса:

$$Q_6 = \varphi \cdot (I' - I'' + \Delta\alpha \cdot I_{\text{прс}}^0). \quad (6.2)$$

В этих уравнениях  $K$  – коэффициент теплопередачи, отнесенный к расчетной поверхности нагрева, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\Delta t$  – температурный напор, °С;  $B_p$  – расчетный расход топлива, кг/с или м<sup>3</sup>/с;  $H$  – расчетная поверхность нагрева, м<sup>2</sup>;  $\varphi$  – коэффициент сохранения теплоты, учитывающий потери теплоты от наружного охлаждения;  $I'$ ,  $I''$  – энтальпии продуктов сгорания на входе в поверхность нагрева и на выходе из нее, кДж/кг или кДж/м<sup>3</sup>;  $I_{\text{прс}}^0$  – количество теплоты, вносимое присасываемым в газозод воздухом, кДж/кг или кДж/м<sup>3</sup>.

В уравнении (6.1) коэффициент теплопередачи  $K$  является расчетной характеристикой процесса и определяется явлениями конвекции, теплопроводности и теплового излучения. Из уравнения теплопередачи ясно, что количество теплоты, переданное через заданную поверхность нагрева, тем больше, чем больше коэффициент теплопередачи и разность температур продуктов сгорания и нагреваемой жидкости. Поверхности нагрева, расположенные в непосредственной близости от топочной камеры, работают при большей разности температуры продуктов сгорания и температуры воспринимающей теплоту среды. По мере движения продуктов сгорания

по газовому тракту температура их уменьшается и хвостовые поверхности нагрева (водяной экономайзер, воздухоподогреватель) работают при меньшем перепаде температур продуктов сгорания и нагреваемой среды. Поэтому чем дальше расположена конвективная поверхность нагрева от топочной камеры, тем большие размеры должна она иметь и тем больше металла расходуется на ее изготовление.

При выборе последовательности размещения конвективных поверхностей нагрева в котлоагрегате стремятся так расположить эти поверхности так, чтобы разность температуры продуктов сгорания и температуры воспринимающей среды была наибольшей. Например, пароперегреватель располагают сразу после топки или фестона, поскольку температура пара выше температуры воды, а водяной экономайзер – после конвективной поверхности нагрева, потому что температура воды в водяном экономайзере ниже температуры кипения воды в паровом котле.

Уравнение теплового баланса (6.2) показывает, какое количество теплоты отдают продукты сгорания воде или пару через конвективную поверхность нагрева. Количество теплоты  $Q_6$ , отданное продуктами сгорания, приравнивается к теплоте, воспринятой водой или паром.

**Пример 6.1. Приближенное выражение для коэффициента теплообмена при расчете пароперегревателя и экономайзера:**

` t – температура газов, b - расход топлива, v0 – удельный объем газов  
` fg – площадь прохода газов, d- диаметр труб (м)  
` ck эмпирический множитель (приближенно можно положить равным 0.9)  
` Adequate Calculator  
akm(t,b,v0,fg,d)=(alt=6.56+0.02128416\*t^0.8471;akm=alt/d^0.35\*(b\*v0/fg)^0.65)  
ak=akm(t1,b,v0,fg,d)\*ck  
// Scilab  
function ak=akm(t,b,v0,fg,d)  
alt=6.56+0.02128416\*t^0.8471  
ak=alt/d^0.35\*(b\*v0/fg)^0.65  
endfunction

**Пример 6.2. Приближенное выражение для коэффициента теплообмена при расчете трубчатого воздухоподогревателя (Scilab):**

```
function akm=akmtr(t,b,v0,fg,d)
alt=4.047+0.00974*t^0.8353
akm=alt/d^0.2*(b*v0/fg)^0.8
endfunction
```

**Пример 6.3. Вычисление температур сред на выходе из теплообменника (противоток):**

```
// t1,tt1 – температуры сред на входе
//f – площадь теплообмена
// w,ww – произведение расхода на теплоемкость соответствующих сред
// (водяные эквиваленты)
// ak – коэффициент теплообмена
function [t2,tt2]=tpm2(t1,tt1,w,ww,ak,f)
a=w/ww;s=ak*f/w/1000.;aa=exp(-(1-a)*s);z=(1-aa)/(1-a*aa);
t2=t1-(t1-tt1)*z;
tt2=tt1+(t1-tt1)*z*a
endfunction
```

**Пример 6.4. Поверочный расчет элемента пароперегревателя:**

```
//Расчет теплообмена ширмы , противоток
// f площадь поверхности нагрева; fg площадь для прохода газов;
//d диаметр труб; t1 температура газов на входе;
//tt1 температура пара на входе
f=340.; fg=40.; d=0.032 ;
dvpr1=2.66//2 впрыск в т/ч
dvpr1=dvpr1/3.6 //впрыск воды в т/с переводится в кг/с
hpvr=(dpe*145.45*tt1^0.50297+dvpr1*hpv)/(dpe+dvpr1);
tt1=(hpvr/145.45)^(1/0.50297) //температура пара после впрыска
dpe=dpe+dvpr1
als=1.22; ck=0.9;
v0=vn2+vg+vh20; v0=v0+1.0*(als-1.)*vv;
// теплоемкость газов
[h1,cp]=af0(t1,a0,b0,av,bv,als)
// теплоемкость пара
cpp=fcpp(tt1)
w=cp*b
ww=cpp*dpe
ak=akm(t1,b,v0,fg,d)*ck
[t2,tt2]=tpm2(t1,tt1,w,ww,ak,f)
tsr=(t1+t2)/2;
[hsr,cp]=af0(tsr,a0,b0,av,bv,als)
tsrp=(tt1+tt2)/2
```

```

ccp=fcpp(tsrp)
w=cp*b;ww=ccp*dpe;a=w/ww;
ak=akm(tsr,b,v0,fg,d)*ck
[t2,tt2]=tpm2(t1,tt1,w,ww,ak,f)
// t2 – температура газов после теплообменника
// tt2 температура пара после теплообменника

```

### Пример 6.5. Поверочный расчет ступени экономайзера:

```

// Расчет теплообмена 2-й ступени экономайзера
// t1 температура газов на входе; tt1 температура воды на входе;
// als избыток воздуха
f=1300.; fg=20.; d=0.032; t1=t2;
tt1=240.// температура воды после 1 ступени экономайзера
als=1.28; ck=0.9;
v0=vn2+vg+vh20; v0=v0+1.0*(als-1.)*vv;
[h1,cp]=af0(t1,a0,b0,av,bv,als)
[hh1,ccp]=afv(tt1)
w=cp*b;ww=ccp*dpe;a=w/ww;
ak=akm(t1,b,v0,fg,d)*ck
ak0=ak;
[t2,tt2]=tpm2(t1,tt1,w,ww,ak,f)
tsr=(t1+t2)/2;
tsrv=(tt1+tt2)/2
[h1,cp]=af0(tsr,a0,b0,av,bv,als)
[hh2,cpp]=afv(tsrv)
w=cp*b;ww=ccp*dpe;a=w/ww;
ak=akm(tsr,b,v0,fg,d)*ck
[t2,tt2]=tpm2(t1,tt1,w,ww,ak,f)
// he , te – энтальпия и температурв воды после экономайзера
te=tt2
[he,ccp]=afv(te)

```

### Пример 6.6. Поверочный расчет ступени трубчатого воздухоподогревателя:

```

// 2 ступень воздухоподогревателя
f=8000.; fg=40.; d=0.04;
t1=t2
tt1=164.// tt1 температура воздуха на входе

```

```

als=1.3
ck=0.9;
v0=v0+1.0*(als-1.)*vv;dvv=b*vv*als0;
[h1,cp]=af0(t1,a0,b0,av,bv,als)
w=cp*b;ww=b*als0*av*bv*(tt1^(bv-1))
ak=akmtr(t1,b,v0,fg,d)*ck
[t2,tt2]=tpm2(t1,tt1,w,ww,ak,f)
tsr=(t1+t2)/2;
tsrv=(tt1+tt2)/2
[h1,cp]=af0(tsr,a0,b0,av,bv,als)
w=cp*b;ww=b*als0*av*bv*(tsrv^(bv-1))
ak=akmtr(tsr,b,v0,fg,d)*ck
[t2,tt2]=tpm2(t1,tt1,w,ww,ak,f)
// t2,tt2 – температуры газов и воздуха на выходе

```

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод). – 3-е изд., перераб. и доп. – СПб., 1998 г. – 380 с.
2. Липов Ю.М. Компоновка и тепловой расчет парового котла / Ю.М. Липов, Ю.Ф. Самойлов, Т.В. Виленский. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 298 с.
3. Котельные установки и парогенераторы (тепловой расчет парового котла): учебное пособие / Е.А. Бойко, И.С. Деринг, Т.И. Охорзина. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2005. – 96 с.
4. Тепловой расчет котлоагрегатов: учеб. пособие / Ю.И. Акимов, А.В. Васильев, Г.В. Антропова. – Саратов: Саратов. госуд. технич. университет, 2006. – 95 с.
5. Методика теплового расчета паровых котлов: учебное пособие / В.Н. Баранов. – Новосибирск: НГТУ, 2009. – 138 с.
6. Болштынский А.Г., Михайлов А.Г. Тепловой расчёт котельных установок: учеб. пособие / А.Г. Болштынский, А.Г. Михайлов – Омск: ОмГТУ, 2007. – 94 с.
7. Тепловой расчет промышленных парогенераторов / под. ред. В.И. Частихина. – Киев: Высшая школа, 1980. – 182 с.
8. Теплогенерирующие установки: методическое пособие к курсовому проекту / Н.Б. Карницкий, Б.М. Руденков, В.А. Чиж. – Минск.: БНТУ, 2005. – 54 с.
9. Шатиль А.А. Расчетное исследование топочных устройств. – СПб., 2003 г. – 150 с.
10. Михель С.К. Математика for free. – Челябинск, 2012. – 87 с.
11. Тропин И.С. Численные и технические расчеты в среде Scilab (ПО для решения задач численных и технических вычислений): учебное пособие / И.С. Тропин, О.И. Михайлова, А.В. Михайлов. – Москва: – 2008. – 65 с.
12. Алексеев Е.Р., Чеснокова О.В., Е.А. Рудченко Е. А. Scilab: Решение инженерных и математических задач. – М. ALT Linux; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. – 260 с.

**СОДЕРЖАНИЕ**

Введение . . . . .	3
1. Расчеты продуктов сгорания топлива . . . . .	6
2. Расчеты состава и энтальпии продуктов сгорания . . . . .	11
3. Тепловой баланс котла . . . . .	15
4. Расчет топочной камеры . . . . .	19
5. Формулы для расчета теплофизических величин . . . . .	25
6. Расчет конвективных поверхностей нагрева . . . . .	27
Библиографический список . . . . .	32

*Учебное издание*

ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ КОТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ  
С ПОМОЩЬЮ КОМПЬЮТЕРА

Методические указания  
по выполнению расчетных заданий и курсовых работ

Для студентов направлений подготовки  
13.03.03 «Энергетическое машиностроение»  
и 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»

Составитель: **Федосов Андрей Александрович**

Кафедра котельных установок и парогенераторов КГЭУ

Редактор редакционно-издательского отдела *Н.И. Оморова*  
Компьютерная верстка *Т.И. Лунченкова*

Подписано в печать 23.10.15.

Формат 60×84/16. Гарнитура «Times». Вид печати РОМ.  
Усл. печ. л. 1,86. Уч.-изд. л. 2,06. Тираж 500 экз. Заказ № 21/эл.

Редакционно-издательский отдел КГЭУ,  
420066, Казань, Красносельская, 51