

## **Раздел 7. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ КОТЛОВ (4 часа). Разделы РЦД 7.1-7.2**

### **7.1. Характеристики тепловой схемы**

Тепловой схемой котла называют схему, устанавливающую взаимосвязь элементов котла: распределение приращения энтальпий воды, пароводяной смеси, пара и воздуха в элементах котла; размещение элементов котла по ходу движения потока продуктов сгорания.

Тепловая схема котла призвана обеспечить оптимальные конструктивные и эксплуатационные характеристики котла и определяется параметрами пара; типом и мощностью котла; видом топлива и способом его сжигания. Характерными параметрами тепловой схемы являются относительное приращение энтальпии воды при ее нагреве и испарении и пара при его перегреве; температура продуктов сгорания на выходе из топки; температура подогрева воздуха и уходящих продуктов сгорания.

Распределение приращения энтальпии рабочей среды в экономайзере, испарительных поверхностях нагрева и пароперегревателе характеризуется его отношением к общему тепловосприятию:

$$q_{эл} = 100\Delta h_{эл}/(h_{пп} - h_{пв}), \quad (7.1)$$

где  $\Delta h_{эл}$  - приращение энтальпии в данном элементе, кДж/кг;  $h_{пп}$  и  $h_{пв}$  - энтальпии перегретого пара и питательной воды, поступающей в котел, кДж/кг.

Зависимости тепловосприятия  $q$  (%) в элементах котла от давления и перегрева пара в диапазоне давлений  $p = 4,0 \div 14,0$  МПа: на подогрев воды – 18-25 %; на испарение воды – 65-40 %; на перегрев пара – 20-30 %. С повышением параметров пара возрастает тепловосприятие экономайзера и пароперегревателя, одновременно уменьшается тепловосприятие испарительными поверхностями нагрева.

### **7.2. Температура продуктов сгорания на выходе из топки**

Распределение теплоты, передаваемой радиационным и конвективным поверхностям котла, определяется значением температуры продуктов сгорания на выходе из топки. Увеличение этой температуры повышает среднюю температуру в топке и интенсифицирует радиационный теплообмен. При неизменной паропроизводительности котла снижается доля теплоты, передаваемой

радиационным поверхностям нагрева, увеличиваются необходимые конвективные поверхности и соответственно возрастает расход электроэнергии на тягу и дутье. Общая поверхность нагрева уменьшается вследствие интенсификации радиационного теплообмена и некоторого повышения температурного напора в конвективных поверхностях нагрева. Снижение температуры продуктов сгорания на выходе из топki приводит к обратным результатам. В общем случае оптимальная температура продуктов сгорания на выходе из топki  $\nu''_T$  определяется технико-экономическими расчетами по минимуму расчетных затрат на котел.

При сжигании пылеугольного топлива температура продуктов сгорания на выходе из топki не должна превышать температуру, допустимую по условиям шлакования; при сжигании всех видов топлива она должна обеспечивать активный процесс его горения с минимальными потерями от химической и механической неполноты горения. Обычно температура продуктов сгорания перед фестомом или фестонированной поверхностью нагрева принимается ниже температуры начала размягчения золы  $t_1$ , но не более 1100 °С. Практически при работе на пыли антрацита ее принимают равной 1050 °С, а на пыли бурых углей — 950 °С, что несколько ниже оптимальной температуры, определяемой по расчетным затратам. При работе котла на газе и мазуте по технико-экономическим соображениям температура перед конвективными поверхностями нагрева должна быть 1100-1200°С.

### **7.3 Тепловосприятия в испарительной системе, экономайзере и пароперегревателе.**

Приращение энтальпии в экономайзере и конвективных испарительных системах поверхностей нагрева составляет величину, определяемую из выражения:

$$\Delta h_{\text{эк}} + \Delta h_{\text{ип}} = (h_{\text{пп}} - h_{\text{пв}}) - (\Delta h_T + \Delta h_{\text{пв}}), \quad (7.2)$$

где  $h_{\text{пп}}$  и  $h_{\text{пв}}$  - энтальпии перегретого пара и питательной воды, кДж/кг;  $\Delta h_{\text{эк}}$ ,  $\Delta h_{\text{пп}}$ ,  $\Delta h_T$ ,  $\Delta h_{\text{ип}}$  - приращения энтальпии в экономайзере, в конвективных испарительных поверхностях нагрева, в экранах и испарительных ширмах и в пароперегревателе, кДж/кг.

При заданных значениях температуры продуктов сгорания на выходе из топki

необходимое приращение энтальпии в конвективных испарительных поверхностях нагрева и экономайзере зависит только от параметров пара. Например, при среднем давлении пара 3,93 МПа и температуре 450 °С на парообразование расходуется примерно 64 % общего тепловосприятия в котле. В зависимости от вида топлива и способа его сжигания доля теплоты, передаваемой экранами при сухих твердых топливах, газе и мазуте, составляет 56-60%, а при влажных твердых топливах 45-48 %, т. е. существенно меньше, чем необходимо для парообразования. Это относится к котлам среднего давления, работающим на твердом топливе. В этих условиях возникает необходимость в установке дополнительной конвективной испарительной поверхности нагрева или в организации частичного испарения воды в экономайзере. Удельная стоимость конвективной испарительной поверхности нагрева в котлах с естественной циркуляцией выше, чем экономайзера, и поэтому целесообразно частичное испарение воды осуществить в экономайзере. Допустимое паросодержание в воде на выходе ее из экономайзера составляет 15 %. При наличии парообразования в экономайзере его парообразующая часть должна быть выделена отдельно, так как в ней движется поток двухфазной среды и для равномерного ее распределения по параллельно включенным змеевикам, работающим при различных тепловых нагрузках, часто необходима установка шайб. При этом распределение приращения энтальпии рабочей среды по частям экономайзера должно соответствовать условию:

$$h''_{\text{э1}} = h_{\text{нас}} - (125 \div 170), \quad (7.3)$$

где  $h''_{\text{э1}}$ ,  $h_{\text{нас}}$  - энтальпии воды на выходе из первой части экономайзера и насыщения при данном давлении, кДж/кг.

При низких параметрах пара доля теплоты, расходуемой на испарение воды, значительно выше тепловосприятия в экранах и при допустимом паросодержании на выходе из экономайзера, и поэтому возникает необходимость в применении конвективных испарительных поверхностей нагрева, которые обычно и имеются в котлах малой мощности.

Приращение энтальпии пара в пароперегревателе, первичном или промежуточном, кДж/кг, должно быть:

$$\Delta h_{\text{пп}} = h_{\text{пп}} - h_{\text{нп}} + \Delta h_{\text{рег}}, \quad (7.4)$$

где  $h_{\text{пп}}$  и  $h_{\text{нп}}$  - энтальпии перегретого и насыщенного пара, кДж/кг;  $\Delta h_{\text{рег}}$  - снижение энтальпии пара в регуляторе перегрева пара, кДж/кг.

#### 7.4. Примеры тепловой схемы котлов

В качестве примера на рисунке 7.1 показана тепловая схема котла среднего давления с естественной циркуляцией для работы на газе и мазуте.

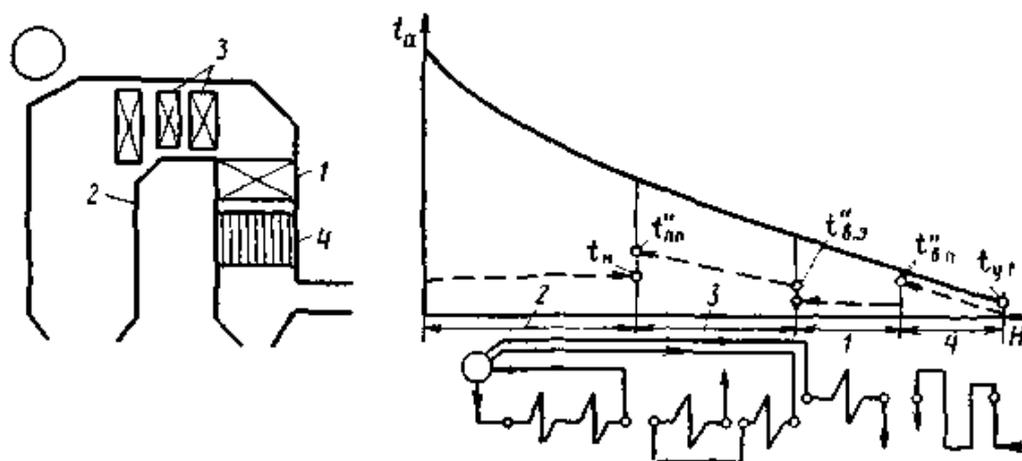


Рисунок 7.1 - Тепловая схема газомазутного котла среднего давления: 1 - экономайзер; 2 – испарительные поверхности нагрева; 3 – пароперегреватель; 4 – воздухоподогреватель

Испарение воды осуществляется в экранах топки, фестоне и частично в кипящем экономайзере. Пароперегреватель двухступенчатый и расположен непосредственно за фестоном в области высоких температур газов, что определяется стремлением уменьшить его поверхность нагрева при значительном тепловосприятии, составляющем около 20 % общего. Регулирование температуры перегретого пара предусмотрено в поверхностном охладителе. За пароперегревателем по ходу газов последовательно располагаются кипящий экономайзер, паросодержание воды на выходе из которого составляет 15 %, и за ним последним по ходу газов — воздухоподогреватель. Одноступенчатая компоновка экономайзера и воздухоподогревателя возможна вследствие принятой невысокой температуры подогрева воздуха (до 250 °С). Для предотвращения коррозии воздухоподогревателя предусмотрено повышение температуры поступающего в него воздуха за счет рециркуляции.

На рисунке 7.2 показана тепловая схема современного котла высокого давления с естественной циркуляцией, предназначенного для работы на пыли твердого топлива.

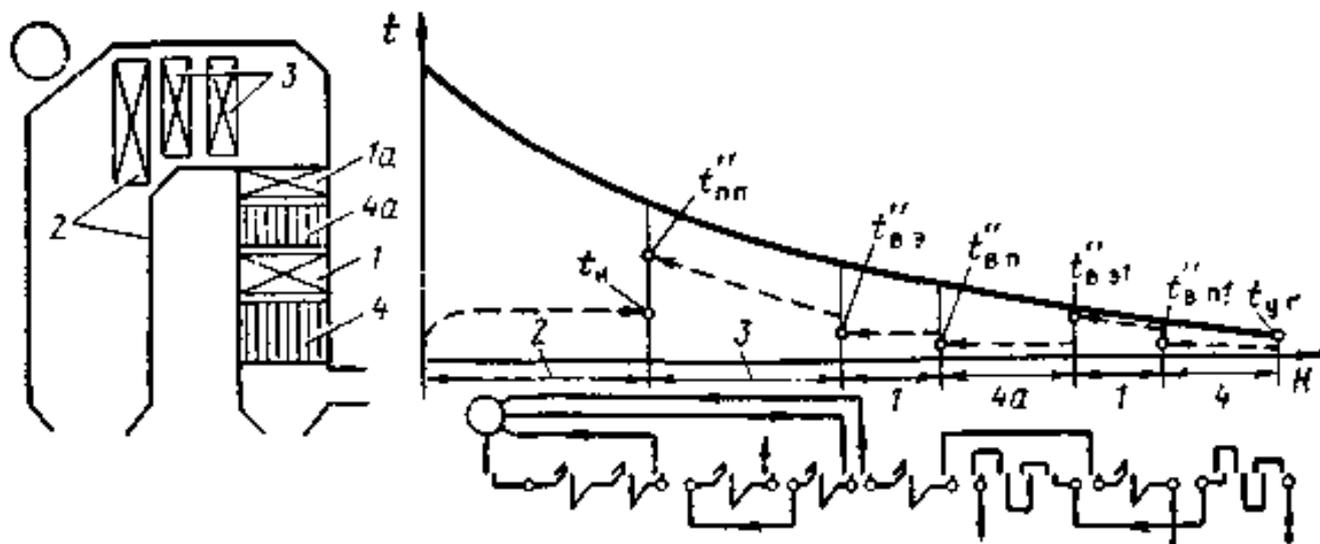


Рисунок 7.2 - Тепловая схема котла высокого давления с естественной циркуляцией на пылеугольном топливе: 1 – экономайзер I ступени; 1а - экономайзер II ступени; 2 и 2а – испарительные поверхности нагрева; 3 – пароперегреватель; 4 – воздухоподогреватель I ступени; 4а - воздухоподогреватель II ступени

Испарительными поверхностями нагрева являются экраны, расположенные в топке, и фестон. Частично испарение воды осуществляется и в экономайзере, паросодержание на выходе из которого не превышает 15 %. Пароперегреватель выполнен радиационно-конвективным. Радиационная часть пароперегревателя, выполненная в виде ширм, размещена в топке; конвективная часть расположена непосредственно за фестонем. Такая организация тепловосприятия пароперегревателя обеспечивает возможность снижения температуры продуктов сгорания на выходе из топки до оптимальной и улучшает условие регулирования температуры перегрева пара.

Регулирование температуры перегрева пара осуществляется впрыском питательной воды в коллекторы ступеней пароперегревателя. За пароперегревателем в опускной шахте расположены экономайзер и воздухоподогреватель, скомпонованные каждый в две ступени. Тепловосприятие завершается в первой по ходу воздуха ступени воздухоподогревателя. Применение

такого расположения экономайзера и воздухоподогревателя определяется необходимостью высокого подогрева воздуха (выше  $300^{\circ}\text{C}$ ). Двухступенчатая компоновка экономайзера и воздухоподогревателя применяется обычно также и в котлах среднего давления, предназначенных для работы на пыли твердого топлива.

На рисунке 7.3 показана тепловая схема конвективного котла среднего давления с многократной принудительной циркуляцией, предназначенного для использования физической теплоты отходящих газов от технологических агрегатов.

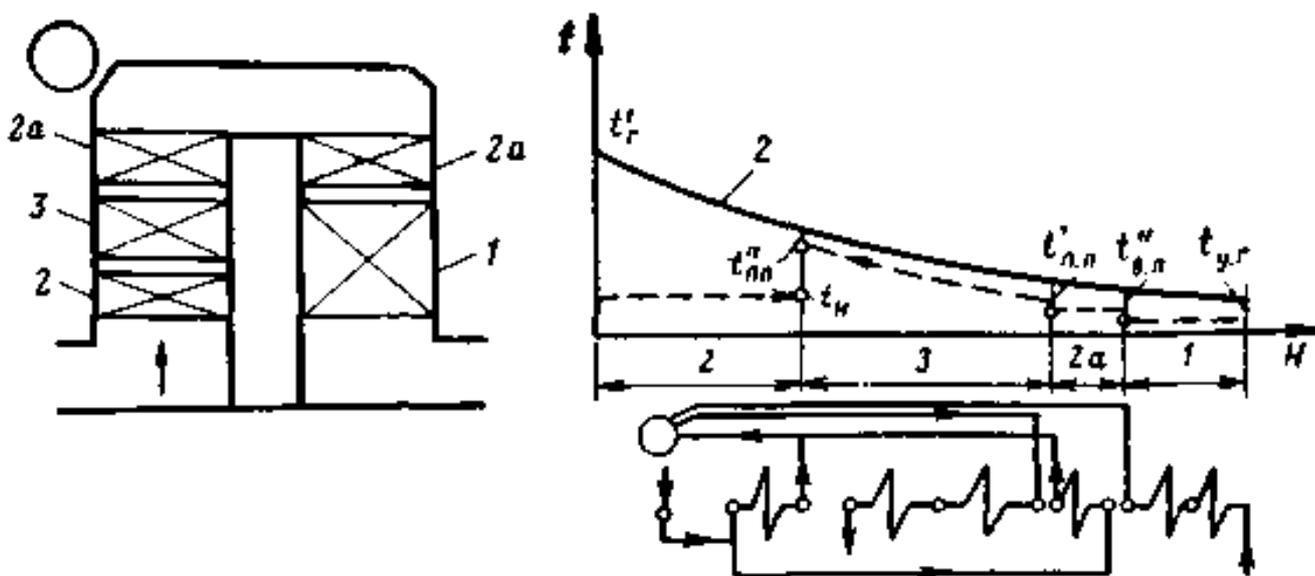


Рисунок 7.3 - Тепловая схема конвективного котла среднего давления с многократно-принудительной циркуляцией на отходящих газах технологических агрегатов: обозначения на рисунке 7.2.

Испарительные поверхности нагрева, выполненные в виде пакетов из змеевиков, включены параллельными контурами в систему принудительной циркуляции, что уменьшает потери давления в циркуляционной системе и снижает расход электроэнергии на циркуляционные насосы. Пароперегреватель размещается между первым и вторым по ходу газов пакетами испарительных поверхностей нагрева, что предохраняет его от воздействия высоких температур газов, которые могут возникать в процессе работы технологического агрегата. Последним по ходу газов располагается экономайзер. Для обеспечения достаточного охлаждения газов температура воды, поступающей в него обычно непосредственно после деаэратора,

принимается около 105 °С.

## **7.5. Указания по тепловому расчету котлов**

### *7.5.1. Порядок и последовательность расчета*

Различают конструктивный и поверочный расчеты котла [1-4]. Целью конструктивного расчета является определение площадей поверхностей нагрева элементов котла при заданных паропроизводительности, параметрах пара и характеристиках топлива. Поверочный расчет имеет целью определение параметров, характеризующих тепловую работу элементов котла при заданном топливе и режиме работы.

При конструктивном расчете по заданным температурам продуктов сгорания и обогреваемой среды определяют тепловосприятие каждого элемента, затем рассчитывают температурный напор и коэффициент теплопередачи, а из уравнения теплообмена - площадь поверхности нагрева.

При поверочном расчете отдельных элементов котла обычно задаются температурой и энтальпией каждой из сред на одном конце поверхности нагрева. Для определения энтальпий обеих сред на втором конце задаются тепловосприятием и уточняют его путем последовательных приближений. При поверочном расчете конвективной поверхности нагрева предварительно оценивают конечную температуру и энтальпию одной из сред и по уравнению теплового баланса определяют по принятой температуре тепловосприятне поверхности нагрева и конечную энтальпию второй среды. Далее рассчитывают коэффициент теплопередачи и температурный напор и по уравнению теплообмена определяют тепловосприятие поверхности нагрева, отнесенное к единице топлива. Если полученное значение тепловосприятне отличается от определенного по уравнению теплового баланса не более чем на 2 %, расчет не уточняется. При большем расхождении принимают новое значение конечной температуры и повторяют расчет. Для второго приближения выбирают значение температуры, отличающееся от принятого на 50 °С. Коэффициент теплопередачи не пересчитывается. Если после второго приближения расхождение окажется больше допустимого, истинную температуру находят графической интерполяцией.

Расчет установки в целом при одноступенчатой компоновке экономайзера и воздухоподогревателя рекомендуется вести в следующей последовательности. Оценивают температуру уходящих газов и подогрева воздуха, определяют тепловые потери, КПД котла и расход топлива. Далее рассчитывают температуру газов на выходе из топки и методом последовательного приближения находят температуры за последующими поверхностями нагрева до экономайзера.

Расчет тепловосприятия экономайзера ведут также методом последовательных приближений. По известным температурам газов и воды на входе в экономайзер определяют температуры газов и воды за экономайзером.

При расчете воздухоподогревателя известны температура газов на входе в него и температура поступающего воздуха. Определяют температуры подогретого воздуха и уходящих газов. Если полученная температура газов отличается от принятой не более чем на  $\pm 10$  °С и температура воздуха не более  $\pm 40$  °С, расчет считается законченным. Далее уточняют потерю теплоты с уходящими газами, КПД котла и расход топлива, а по температуре горячего воздуха и температуре газов на выходе из топки — тепловосприятие лучевоспринимающей поверхности нагрева. Затем определяют невязку теплового баланса, кДж/кг:

$$\Delta Q = Q_p^p \cdot \eta_k - [Q_l + Q_k + Q_{вэ} + Q_{пп} + Q_{вг} + Q_{эк}] \{(1 - q_4)/100\}, \quad (7.5)$$

где  $Q_l$ ,  $Q_k$ ,  $Q_{вэ}$ ,  $Q_{пп}$ ,  $Q_{вг}$ ,  $Q_{эк}$  - количества теплоты, воспринятой лучевоспринимающими поверхностями топки, испарительными пучками, переходными зонами прямоточных котлов, первичным и вторичным перегревателями и экономайзером.

При правильном выполнении расчета невязка не должна превышать 0,5 %. Если температура уходящих газов и температура подогретого воздуха отличаются от принятых более чем на  $\pm 10$  и  $\pm 40$  °С, расчет следует повторить.

При двухступенчатой компоновке экономайзера и воздухоподогревателя порядок расчета такой же, как и при одноступенчатой их компоновке. Изменения расчета сводятся к следующему. После расчета поверхностей нагрева, расположенных до второй ступени экономайзера, нужно задаться значением энтальпии воды на выходе:

$$h''_{\text{ЭК}} \approx (D/D_{\text{ЭК}})(h_{\text{ПП}} - \Delta h_{\text{ПО}}) - (B_p/D_{\text{ЭК}})(Q_{\text{Л}} + Q_{\text{К}} + Q_{\text{ВЭ}} + Q_{\text{ПП}} + Q_{\text{ВГ}}), \quad (7.6)$$

где  $h_{\text{ПП}}$  - энтальпия перегретого пара, кДж/кг;  $D_{\text{ЭК}}$  - расход воды через экономайзер, кг/ч;  $\Delta h_{\text{ПО}}$  - тепловосприятие пароохладителя с впрыском собственного конденсата или поверхностного пароохладителя, кДж/кг.

По найденному значению  $h''_{\text{ЭК}}$  определяют температуру воды на выходе из экономайзера. По этой температуре и температуре газов на входе методом последовательных приближений рассчитывают вторую ступень экономайзера. Температура газов на входе во вторую ступень воздухоподогревателя известна из расчета экономайзера, и эту ступень рассчитывают по значению температуры горячего воздуха, принятого в расчете топки. Первую ступень экономайзера рассчитывают по известной из предыдущих расчетов температуре газов и заданной температуре воды на входе в нее. Путем последовательных приближений определяют температуры газов и воды на выходе из этой ступени экономайзера. Расчет первой ступени воздухоподогревателя ведут по определенной температуре газов на входе в нее и заданной температуре входящего воздуха.

Если температура уходящих газов отличается от принятой не более чем на  $\pm 10^\circ\text{C}$  и невязки между промежуточными значениями температур газов в экономайзере и воздухоподогревателе не превышают  $\pm 10^\circ\text{C}$ , расчет закончен. Если значения температур газов отличаются от принятых более чем на  $\pm 10^\circ\text{C}$ , необходимо уточнить расчет.

Рекомендуется следующий порядок расположения расчетных данных: 1) исходные данные для расчета; 2) избытки воздуха по газходам; 3) объемы и энтальпии газов и воздуха; 4) тепловой баланс котла и расход топлива; 5) расчет газходов по ходу газов от топки; 6) сводная таблица основных данных расчета.

#### 7.5.2. Расчет топки

При конструктивном расчете топки котлов большой мощности объем топки определяется размером поверхностей нагрева, обеспечивающих заданную температуру газов на выходе из нее, выбранную по условиям шлакования и технико-экономическим соображениям. Тепловое напряжение не должно превышать допустимого. Для котлов малой и средней мощности объем топки при

конструктивном расчете находят по допустимой тепловой нагрузке. Далее определяют температуру газов на выходе из топки и сравнивают ее с допустимой или по заданному значению температуры на выходе из топки рассчитывают размеры поверхности ее стенок и коэффициент эффективности экранов.

Двухкамерную топку рассчитывают отдельно по камерам. После определения суммарного тепловосприятия топки его разбивают по участкам. Обычно следует определить тепловосприятие по высоте топки.

### *7.5.3. Расчет пароперегревателя*

Порядок расчета конвективных и ширмовых пароперегревателей одинаков. Суммарное тепловосприятие пароперегревателя при конструктивном расчете определяют по заданной температуре перегрева и принятому тепловосприятию пароохладителя, а также количеству теплоты, переданной вторичному пару, кДж/кг, по формуле 7.7:

$$Q_{\text{пп}} = (D/B_p)(h'' - h') + Q_T, \quad (7.7)$$

где  $Q_T$  - количество теплоты, переданной в теплообменнике первичным паром вторичному на 1 кг топлива, кДж/кг.

При поверочном расчете, задавшись температурой газов на выходе из пароперегревателя, определяют теплоту, отданную газом в пароперегревателе.

При расчете пароперегревателя по частям тепловосприятие рассчитываемой части определяют по заданным или принятым температурам пара на ее концах. Для определения промежуточного давления на границе между частями предварительно его приближенно оценивают, исходя из значений заданных давлений на концах пароперегревателя. При наличии пароохладителей расчет ведут с учетом их включения при номинальной нагрузке.

При конструктивном расчете по уравнению теплопередачи определяют необходимую площадь поверхности нагрева пароперегревателя, при поверочном расчете по этому уравнению рассчитывают тепловосприятие пароперегревателя. Если оно расходится со значением, найденным по уравнению теплового баланса, не более чем на 2 %, расчет считают законченным. Если расхождение больше, расчет надо повторить.

#### 7.5.4. Расчет экономайзера

При конструктивном расчете экономайзера энтальпии газов и воды на входе известны и тепловосприятие, кДж/кг, определяют из уравнения баланса 7.8:

$$Q_{\text{эк}} = Q_p^p \cdot \eta_k [100 / (100 - q_4)] - Q_{\text{л}} + Q_{\text{к}} + Q_{\text{вэ}} + Q_{\text{пп}} + Q_{\text{вг}}. \quad (7.8)$$

При поверочном расчете входные энтальпии газов и воды также обычно известны. Порядок расчета указан ранее.

## Список литературы

1. Шубин Е.П., Левин Б.И. Проектирование теплоподготовительных установок ТЭЦ и котельных. М.: Энергия, 1970. 496 с.
2. Тепловой расчет котельных агрегатов: Нормативный метод / под ред. Н.В. Кузнецова. М.: Энергия, 1973. 295 с.
3. Двойнишников В.А. Конструкция и расчет котлов и котельных установок: учебник. М.: Машиностроение, 1988. 263 с.
4. Расчет паровых котлов в примерах и задачах: учеб. пособие / А.Н. Безгрешнов, Ю.М. Липов, Б.М. Шлейфер; под общ. ред. Ю.М. Липова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 240 с.