

Тепловой расчёт теплогенератора

Организация проектирования

Тепловой расчет парового или водогрейного теплогенератора может быть конструктивным или поверочным. Конструктивный расчет выполняется при разработке новых котлов. Поверочный расчет котельных агрегатов, выпускаемых промышленностью, выполняется при проектировании конкретного топлива и источника теплоснабжения, предназначенных для выработки пара или горячей воды.

Для выполнения проектной работы (проекта) необходимо произвести поверочный расчет котельного агрегата с элементами конструктивного расчета отдельных поверхностей нагрева (пароперегревателя, водяного экономайзера или воздухоподогревателя). Основной целью поверочного расчета является определение основных показателей работы котельного агрегата, а также реконструктивных мероприятий, обеспечивающих высокую надежность и экономичность его эксплуатации при заданных условиях.

Проект состоит из пояснительной записки и чертежей общих видов котла и его элементов.

11.2. Состав топлива, параметры теплоносителя и конструктивные характеристики теплогенератора

Основные расчетные параметры топлива: элементарный состав, теплота сгорания, теоретический объем воздуха и дымовых газов и др. приведены в [5, табл. 2.8 и 2.9]

Устройство и работа паровых и водогрейных теплогенераторов описаны в разд. 7, 8.

Конструктивные характеристики теплогенераторов, необходимые для расчета, приведены в табл. [5]. В паровых котлах серии ДЕ и ДКВР

наружный диаметр экранных и кипяtilьных труб 51 × 2,5 мм, а расположение труб – коридорное.

Параметры теплоносителя (пара и воды) определяют в зависимости от типа агрегата. Для парогенератора, вырабатывающего перегретый или насыщенный пар, необходимы предварительные данные:

- $D_{п.пг}$, $D_{н.п}$ – расход вырабатываемого перегретого, насыщенного пара, кг/с (по заданию или расчету тепловой схемы котельной);
- $i_{н.пг}$, $i_{п.пг}$, $i_{п.вг}$, $i_{пр}$ – энтальпии насыщенного или перегретого пара, питательной и продувочной (котловой) воды, кДж/кг; определяются по таблицам насыщенного или перегретого пара, при соответствующем давлении и температуре пара и питательной воды [5, табл.3.1 и 3.2];
- P_p – процент продувки, %, определяется по расчету тепловой схемы котельной или предварительно принимается от 2 до 10.

В водогрейных котлах серии КВ-ГМ расположение труб в фестоне и конвективном пучке – шахматное. Для водогрейного котла параметры определяют по расчету тепловой схемы котельной или конструктивным характеристикам:

- $Q_{ном}$ – мощность номинальная, кВт;
- G_k – расход воды через котел, кг/с;
- t_k' , t_k'' – температура воды на входе и выходе из агрегата, °С;
- ϑ_{yx} – температура уходящих топочных газов, °С.

Конструктивные характеристики теплогенератора, параметры теплоносителя, состав топлива выписывают из справочной и приведенной литературы и сводят в таблицы.

11.3. Расчет объемов и энтальпий

продуктов сгорания воздуха

Коэффициент избытка воздуха в топке от принимают в зависимости от вида топлива и способа его сжигания. Избыток воздуха, по мере движения продуктов сгорания по газоходам котельного агрегата, увеличивается. Это вызвано тем, что для котлов, работающих под разрежением, давление продуктов сгорания в топке и газоходах меньше барометрического давления окружающего воздуха. Поэтому через обмуровку происходит присос атмосферного воздуха в газовый тракт агрегата. При расчетах температуру этого воздуха принимают 20...30 °С, а значения присосов воздуха – по нормативным данным.

Для выполнения теплового расчета газовый тракт котельного агрегата делят на ряд самостоятельных участков в зависимости от типа котла. Коэффициент избытка воздуха для каждой поверхности нагрева подсчитывают путем прибавления к от соответствующих присосов воздуха $\Delta\alpha$, а в результате такого суммирования имеем – $\Sigma \Delta\alpha$.

Присосы воздуха $\Delta\alpha$ для каждого элемента котла равны:

- 0,05 – для первого конвективного пучка (газохода), фестона (с камерой догорания), пароперегревателя, воздухоподогревателя;
- 0,1 – для второго конвективного пучка (газохода), конвективной шахты, чугунного и стального экономайзера с обшивкой;
- 0,15...0,2 – для чугунного экономайзера без обшивки.

Теоретические объемы воздуха V^0 , трехатомных газов V_{RO_2} , азота $V_{N_2}^0$, водяных паров $V_{H_2O}^0$, m^3/m^3 или m^3/kg , выбирают из [5, табл. 2.8 или 2.9] для соответствующего вида топлива. Средний коэффициент избытка воздуха α_{cp} для каждой поверхности нагрева определяют как среднее арифметическое значений коэффициента избытка воздуха до α' и после α'' газохода. Результаты расчета действительных объемов продуктов сгорания по газоходам теплогенератора сводят в таблицы. Расчеты выполняют на 1 m^3 природного газа или на 1 кг жидкого топлива.

Количество теплоты, содержащейся в воздухе или продуктах сгорания, называют *теплосодержанием* или *энтальпией*. Расчет энтальпий продуктов сгорания производят для каждой поверхности нагрева при действительных коэффициентах избытка воздуха, когда $\alpha > 1$. Причем расчет производят для всего возможного диапазона температур топочных газов и соответствующей поверхности нагрева 100...2000 °С.

Вначале вычисляют энтальпию газов – трехатомных, азота, водяных паров и воздуха, при соответствующей температуре в топке, фестоне и конвективном пучке для водогрейного котла или топке, газоходе и водяном экономайзере для парового котла.

При расчете для каждой поверхности нагрева рекомендуется определять значения энтальпий лишь в пределах, немного превышающих реально возможные температуры. Температуру топочных газов, °С, задают в диапазонах: для топки и камеры догорания – 800...2000, фестона – 800...1100, пароперегревателя – 600...1000, конвективных пучков (газоходов) – 200...900, водяного экономайзера и воздухоподогревателя – 100...300.

Энтальпию трехатомных газов I_{RO_2} , азота $I_{N_2}^0$, водяных паров $I_{H_2O}^0$, избыточного воздуха ΔI_B , вычисляют по формулам:

$$I_{RO_2} = V_{RO_2} \cdot (c\vartheta)_{RO_2};$$

$$I_{N_2}^0 = V_{N_2}^0 \cdot (c\vartheta)_{N_2};$$

$$I_{H_2O}^0 = V_{H_2O}^0 \cdot (c\vartheta)_{H_2O};$$

$$\Delta I_B = (\alpha_i - 1) \cdot V^0 \cdot (c\vartheta)_B,$$

где V^0 , V_{RO_2} , $V_{N_2}^0$, $V_{H_2O}^0$ – теоретические объемы соответственно воздуха, трехатомных газов, азота и водяных паров, м³/м³ или м³/кг; $(c\vartheta)_{RO_2}$, $(c\vartheta)_{N_2}$, $(c\vartheta)_{H_2O}$, $(c\vartheta)_B$ – энтальпии 1 м³ трехатомных газов, азота, водяных паров и воздуха, кДж/м³, кДж/кг.

Общую энтальпию продуктов сгорания I_r (последний столбец) при соответствующих температуре и коэффициенте избытка воздуха вычисляют суммированием числовых значений по горизонтали:

$$I_r = I_{\text{RO}_2} + I_{\text{N}_2}^0 + I_{\text{H}_2\text{O}}^0 + \Delta I_{\text{в}}$$

По расчетным данным, на миллиметровой бумаге, в удобном для прочтения масштабе, строят диаграмму $I - \vartheta$ продуктов сгорания. Построенная диаграмма $I - \vartheta$, для продуктов сгорания данного вида топлива позволяет в последующих расчетах по температуре топочных газов определять их энтальпию или, наоборот, по энтальпии продуктов сгорания – их температуру.

11.4. Тепловой баланс и расход топлива

Расход сжигаемого топлива должен обеспечивать получение необходимого количества полезной теплоты, а также восполнение тепловых потерь, сопровождающих работу котельной установки. Полезно используемая теплота в котельной установке Q_1 идет на подогрев воды, ее испарение, получение и перегрев пара. Соотношение, связывающее приход и расход теплоты в котле, носит название *теплового баланса*.

Тепловой баланс составляется на 1 кг твердого или жидкого топлива либо на 1 м³ газообразного топлива, или в % от введенной теплоты. В паровом или водогрейном теплогенераторе общее количество введенной в топку теплоты называется располагаемой теплотой $-Q_p^p$.

Тепловой баланс теплогенератора сводится в табл. 8.4. В исходных данных и расчетах теплового баланса необходимо учитывать вид топлива, тип теплогенератора, параметры пара и воды и др.

Физическая теплота с топливом $Q_{\text{ф.т}}$ учитывается только при его предварительном подогреве от постороннего источника, обычно при сжигании мазута, когда его температура $t_m \approx 100...120$ °С.

Потери теплоты от наружного охлаждения ограждающих конструкций котла q_5 зависят прямо пропорционально от номинальной

нагрузки парового $D_{\text{ном}}$ (т/ч) или номинальной мощности водогрейного котла $Q_{\text{ном}}$ (МВт) и обратно пропорционально – от расчетной нагрузки парового – D (т/ч) или расчетной мощности водогрейного котла Q (МВт). Потери теплоты от наружного охлаждения ограждающих конструкций, при номинальной нагрузке парового ($q_{5\text{ном}}$) и водогрейного ($q_{5\text{ном}}^{\text{БК}}$) котлов определяют по табл. П5.

Коэффициент полезного действия (КПД) брутто $\eta_{\text{бр}}$ парового и водогрейного котла определяется из уравнения обратного теплового баланса. Расчетный расход топлива B_p при сжигании газа и мазута равен натуральному расходу B_n , так как потери теплоты от механической неполноты сгорания $q_4 = 0$.

Для сравнения тепловой ценности различных видов топлива, учета и планирования используют условное топливо – B_y .

11.5. Расчет топочных камер

При проектировании и эксплуатации теплогенератора выполняют поверочный расчет топочных устройств. При расчете топки по чертежам или конструктивным данным определяются: объем топочной камеры, степень ее экранирования, площадь поверхности стен и площадь лучевоспринимающих (радиационных) поверхностей нагрева, а также конструктивные характеристики труб экранов (диаметр и шаг труб).

Поверочный расчет топок производится в следующей последовательности.

1. Предварительно задаются температурой продуктов сгорания на выходе из топочной камеры: для промышленных паровых котлов эту температуру рекомендуется принимать при сжигании газа – 950...1000 °С, мазута – 1000...1050 °С, а для водогрейных котлов 950...1150 °С или по табл. П2 [5].

2. По построенной ранее диаграмме $I - \vartheta$, для принятой температуры продуктов сгорания на выходе из топочной камеры определяется энтальпия продуктов сгорания на выходе из топки.

3. Вычисляются коэффициенты и параметры топочной камеры:

- коэффициенты загрязнения и тепловой эффективности экранов;
- эффективная толщина излучающего слоя;
- суммарная поглощательная способность трехатомных газов и водяных паров;
- коэффициент ослабления лучей трехатомными газами и сажистыми частицами;
- степень черноты светящейся и несветящейся части факела;
- видимое тепловое напряжение топочного объема;
- эффективная степень черноты факела и степень черноты топки;
- полезное тепловыделение в топке;
- теоретическая (адиабатическая) температура горения, которую могли бы иметь продукты сгорания, если бы в топке отсутствовал теплообмен с экранными поверхностями обмена;
- средняя суммарная теплоемкость продуктов сгорания;
- параметр M , зависящий от относительного положения максимума температуры пламени по высоте топки: для котлов ДКВР, КВ-ГМ, ДЕ, при сжигании газа и мазута, можно принять.

4. Вычисляется действительная температура дымовых топочных газов на выходе из топки.

5. Полученная температура на выходе из топки сравнивается с температурой, принятой ранее. Если расхождение между полученной

действительной температурой на выходе из топки и ранее принятой на выходе из топки не превысит ± 50 °С, то расчет считается окончанным.

В противном случае задаются новым, уточненным значением температуры на выходе из топки, и весь расчет повторяется.

11.6. Расчет конвективных поверхностей нагрева паровых и водогрейных котлов

Конвективные поверхности нагрева паровых и водогрейных котлов играют важную роль в процессе получения пара или горячей воды. В паровых котлах – это кипяtilьные трубы, расположенные в газоходах, трубы пароперегревателя и водяного экономайзера, а в водогрейных котлах – трубы фестона и конвективного пучка (шахты).

Продукты сгорания, проходя по газовому тракту котла, передают теплоту наружной поверхности труб за счет конвекции и лучеиспускания, затем это же количество теплоты проходит через металлическую стенку, после чего теплота от внутренней поверхности труб передается воде и пару. Эффективность работы конвективных поверхностей нагрева зависит от интенсивности теплопередачи – передачи теплоты от продуктов сгорания к воде и пару через разделяющую стенку.

При расчете используются уравнение теплопередачи и уравнение теплового баланса, а расчет выполняется для 1 кг жидкого топлива или 1 м³ газа при нормальных условиях. Для парового котельного агрегата расчет выполняется для каждого (или общего) газохода, а в водогрейном котле – вначале для фестона, а затем для конвективного пучка шахты в следующей последовательности.

1. Определяют конструктивные характеристики: площади поверхности нагрева, живое сечение для прохода газов, шаг труб и рядов, диаметр труб и др.

2. Предварительно, если известно по паспортным характеристикам котла (табл. П2 [5]), принимают значение температуры топочных газов

после рассчитываемой поверхности нагрева. Если таких данных нет, то согласно условиям работы котла, задают произвольно два значения температур топочных газов ϑ_1'' и ϑ_2'' , которые вероятнее всего могут оказаться после рассчитываемой поверхности нагрева, а расчеты вести параллельно. Например, после второго газохода парового котла (ДКВР или ДЕ) можно задать $\vartheta_1'' = 200$ °С и $\vartheta_2'' = 250$ °С.

3. Согласно уравнению теплового баланса, определяют количество теплоты Q_6 , передаваемое от продуктов сгорания к теплоносителю через конвективную поверхность нагрева, а именно: в кипятельном пучке парового котла – $Q_{кр}$, в фестоне – $Q_{ф}$, в конвективном пучке или шахте водогрейного котла – $Q_{ш}$. Затем вычисляют среднюю температуру воды (для водогрейного котла), средний температурный напор Δt и подсчитывают среднюю скорость продуктов сгорания.

4. По номограммам графоаналитическим методом определяют коэффициент теплоотдачи конвекцией и излучением, после чего вычисляют коэффициент теплопередачи и тепловосприятие поверхностью нагрева – Q_T .

5. Если полученные из уравнения теплообмена значения тепловосприятия Q_T отличаются от определенного по уравнению баланса Q_6 ($Q_{кр}$, $Q_{ф}$ или $Q_{ш}$), т.е. при невязке расчета Δ менее 2 %, расчет поверхности нагрева считается законченным, а предварительно заданное значение температуры на выходе из конвективной поверхности нагрева (газохода, фестона, шахты) и является истинной температурой для расчета последующих поверхностей нагрева.

При расхождении значений Q_T и Q_6 (Q_T и $Q_{кр}$, Q_T и $Q_{ф}$, Q_T и $Q_{ш}$), т.е. при невязке расчета Δ более 2 % (что встречается чаще всего), задают новое значение температуры газов за поверхностью нагрева, причем температуру принимают в большую сторону при плюсовой (+) невязке и в меньшую сторону при минусовой (–) невязке, и вновь повторяют расчет.

6. Для ускорения расчета возможно использование графо-аналитического метода. Графическую интерполяцию производят

для определения температуры продуктов сгорания после поверхности нагрева по принятым предварительно двум значениям температур ϑ_1'' и ϑ_2'' и полученным по результатам расчета двум значениям Q_T и Q_6 (Q_T и $Q_{кр}$, Q_T и $Q_{ф}$, Q_T и $Q_{ш}$).

Для этого на миллиметровой бумаге выстраивают четыре точки $Q_T = f(\vartheta_1'', \vartheta_2'')$ и $Q_6 = f(\vartheta_1'', \vartheta_2'')$. Точка пересечения прямых линий Q_T и Q_6 укажет истинную или расчетную температуру топочных дымовых газов за поверхностью нагрева – ϑ_p'' . Причем, если ϑ_p'' отличается от одного из принятых предварительно значений ϑ_1'' и ϑ_2'' менее чем на 50 °С, то для завершения расчета необходимо по истинной ϑ_p'' повторно определить только средний температурный напор Δt и тепловосприятие Q_T , сохранив при этом прежний коэффициент теплопередачи K , после чего уточнить невязку расчета Δ , которая должна быть менее 2 %. При расхождении температур более 50 °С требуется заново, для найденной температуры ϑ_p'' , определить коэффициент теплопередачи K , тепловосприятие поверхностью нагрева Q_T и проверить невязку расчета.

Расчеты конвективных поверхностей нагрева сводят в таблицы для парового котла или для водогрейного котла.

11.7. Энергосбережение в котлах

Для экономии тепловой и электрической энергии в котельных установках могут быть использованы комбинированные пароводогрейные агрегаты и различные схемы циркуляции теплоносителя. В пароводогрейных теплогенераторах получают два теплоносителя пар и воду с разными параметрами (давлением и температурой).

Для повышения коэффициента полезного действия и экономии топлива в теплогенераторах применяются контактные теплообменники, а в водогрейных котлах – различные схемы циркуляции воды (для основного и пикового режима работы).

Энергосбережение в котлах включает следующие мероприятия:

- утилизацию теплоты уходящих топочных дымовых газов;
- комплексное использование теплоты уходящих газов;
- модернизацию паровых котлов (ДКВР, Е-1-9) для работы в водогрейном режиме;
- модернизацию схем горячего водоснабжения путем установки контактно-газового экономайзера;
- использование теплоты пара, вторичного вскипания конденсата;
- применение теплового насоса с использованием низкопотенциальных источников (нагретого воздуха, горячей воды, конденсата);
- использование аккумулированной теплоты при останове котла;
- предварительный подогрев природного газа с повышением его влагосодержания.