ЗАДАНИЕ НА КУРСОВУЮ РАБОТУ И УКАЗАНИЯ ПО ЕЕ ВЫПОЛНЕНИЮ

Задание

1. Выполнить термохимический расчет процесса горения смеси отходящих газов сажевого производства с природным газом в котле-утилизаторе, включая определение теоретической температуры горения.

2. Вычислить составляющие теплового баланса котла-утилизатора и его тепловой коэффициент полезного действия (коэффициент использования теплоты). Построить диаграмму потоков энергии в котле-утилизаторе (диаграмму Сенкея).

3. Оценить фактическую паропроизводительность котла.

4. Выполнитьэксергетический анализ эффективностикотла-утилизатора и построить диаграмму потоков эксергии в котле-утилизаторе (диаграмму Грассмана-Шаргута).

5. Найти исходя из условия рассеивания в атмосфере вредных компонентов продуктов сгорания требуемую высоту дымовой трубы.

6. Оценить экономию топлива за счет утилизации энергии отходящих газов сажевого производства.

Указания к выполнению работы

1. Исходные данные для расчета берутся из приведенных ниже таблиц (табл. 1, 2, 3) в соответствии с заданным преподавателем номером варианта.

2. Выполненную работу (расчеты и необходимые пояснения) оформить в виде пояснительной записки. Записка должна содержать: введение (назначение котла-утилизатора, его краткое описание, цель расчетов); исходные данные; расчетные формулы и результаты расчетов; построенные в масштабе диаграммы Сенкея и Грассмана-Шаргута; выводы об термодинамической эффективности котла утилизатора и возможных путях ее повышения.

#### Таблица 1

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Типоразмер котла ПКК | Параметры котла | | | Данные к расчету котла | | | | |
| D, т/ч | р, Мпа | t пп, °С | Вог м3/с | x | qХ, % | qНО, % | α |
| 0 | 100/2,4-200-5 | 100 | 2,4 | 370 | 17,0 | 0,05 | 1,0 | 0,7 | 1,30 |
| 1 | 75/2,4-150-5 | 75 | 2,4 | 370 | 12,5 | 0,04 | 1,1 | 0,8 | 1,28 |
|  | Типоразмер котла ПКК | Параметры котла | | | Данные к расчету котла | | | | |
| D, т/ч | р, МПа | t П.П, °С | ВО.Г, м3/с | х | qХ, % | qН.О, % | αТ |
| 2 | 75/4,5-150-5 | 75 | 4,5 | 440 | 12,5 | 0,03 | 1,2 | 0,8 | 1,26 |
| 3 | 30/2,4-70-5 | 35 | 2,4 | 370 | 5,5 | 0,035 | 1,3 | 1,1 | 1,24 |

Примечание. В табл.1 использованы следующие обозначения: D, р, tпп – соответственно паропроизводительность, давление и температура вырабатываемого пара, относящиеся к номинальному режиму работы котла; Bог – расход сухих отходящих газов сажевого производства; х – объемная доля природного газообразного топлива в смеси с отходящими газами; qХ, q Н.О – доли располагаемой теплоты, теряемые соответственно от химической неполноты сгорания и наружного охлаждения; α – коэффициент избытка воздуха в топке.

#### Таблица 2

## Характеристики отходящих газов сажевого производства

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Объемный состав сухой массы отходящих газов, % | | | | | | | WР, % | tог, °С |
| CO2 | CO | H2 | H2S | CH4 | O2 | N2 |
| 0 | 4,0 | 16,20 | 12,10 | 0,30 | 0,20 | 0,30 | 66,90 | 35,0 | 167 |
| 1 | 3,9 | 16,25 | 12,08 | 0,32 | 0,19 | 0,31 | 66,95 | 34,5 | 171 |
| 2 | 3,8 | 16,30 | 12,06 | 0,34 | 0,18 | 0,32 | 67,00 | 34,0 | 175 |
| 3 | 3,7 | 16,35 | 12,04 | 0,36 | 0,17 | 0,33 | 67,05 | 33,5 | 179 |
| 4 | 3,6 | 16,40 | 12,02 | 0,38 | 0,16 | 0,34 | 67,10 | 33,0 | 183 |
| 5 | 4,1 | 16,15 | 12,00 | 0,40 | 0,15 | 0,35 | 66,85 | 35,0 | 167 |
| 6 | 4,2 | 16,10 | 12,12 | 0,28 | 0,21 | 0,29 | 66,80 | 35,5 | 163 |
| 7 | 4,3 | 16,05 | 12,14 | 0,26 | 0,22 | 0,28 | 66,75 | 36,0 | 159 |
| 8 | 4,4 | 16,00 | 12,16 | 0,24 | 0,23 | 0,27 | 66,70 | 36,5 | 155 |
| 9 | 4,5 | 15,95 | 12,18 | 0,22 | 0,24 | 0,26 | 66,65 | 37,0 | 151 |

Примечание. В табл.2 WР – объемная доля (в %) влаги в рабочей массе отходящих газов; tог – температура отходящих газов.

# Таблица 3

Теплота сгорания, расход воздуха на горение и объемы продуктов сгорания природных газообразных топлив

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Газопровод | кДж/м3 | ,  м3/м3 | м3/м3 | м3/м3 | , м3/м3 |
| 0 | Кумертау‑Магнитогорск | 36830 | 9,74 | 1,06 | 7,79 | 2,13 |
| 1 | Шебелинка‑Брянск – Москва | 37900 | 9,98 | 1,07 | 7,90 | 2,22 |
| 2 | Саратов‑Москва | 35820 | 9,52 | 1,04 | 7,60 | 2,10 |
| 3 | Кулешовка ‑ Самара  (попутный газ) | 41770 | 10,99 | 1,26 | 8,82 | 2,28 |
| 4 | Бухара‑Урал | 36750 | 9,73 | 1,04 | 7,70 | 2,18 |
| 5 | Средняя Азия‑Центр | 37580 | 9,91 | 1,07 | 7,84 | 2,21 |
| 6 | Оренбург ‑ Совхозное | 38050 | 10,05 | 1,08 | 7,94 | 2,23 |
| 7 | Серпухов ‑ Санкт-Петербург | 37460 | 10,00 | 1,08 | 7,93 | 2,21 |
| 8 | Ставрополь‑Невинномысск | 35660 | 9,47 | 1,00 | 7,49 | 2,14 |
| 9 | Саушино –Лог ‑ Волгоград | 35150 | 9,32 | 0,98 | 7,39 | 2,10 |

Примечание. В табл.3 использованы следующие обозначения: – низшая теплота сгорания сухого природного газа (ПГ); – теоретически необходимый объем воздуха для полного сжигания 1 м3 ПГ; – объем сухих трехатомных газов в продуктах сгорания ПГ; , – теоретические объемы азота и водяного пара в продуктах сгорания ПГ.



1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1.1 Ознакомиться с устройством котлов-утилизаторов

1.2 Получить практические навыки проведения термодинамического анализа эффективности агрегатов энерготехнологических систем и протекающих в них процессов.

2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

2.1 Проведение термодинамического анализа эффективности котла-утилизатора энергетическим и эксергетическим методами.

2.2 Оценка экономии топлива за счет утилизации теплоты отходящих газов сажевого производства.

2.3 Расчет дымовой трубы котла-утилизатора из условия рассеивания в атмосфере вредных компонентов продуктов сгорания.

3. УТИЛИЗАЦИЯ ТЕПЛОТЫ ВТОРИЧНЫХ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ

Проблема экономного расходования топливно-энергетических ресурсов является чрезвычайно важной в современной хозяйственной деятельности.

Значительная экономия топливно-энергетических ресурсов и снижение вредного воздействия производства на окружающую среду могут быть достигнуты при более широком вовлечении в топливно-энергетический баланс вторичных энергоресурсов (ВЭР), под которыми подразумевают энергетический потенциал продукции, побочных и промежуточных продуктов, образующихся в технологических агрегатах (установках, процессах). Вторичные энергоресурсы имеются практически во всех отраслях промышленности, где применяются энерготехнологические процессы, в первую очередь высокотемпературные. Коэффициент полезного теплоиспользования для многих энерготехнологических процессов не превышает 15–35%.

Вторичные энергоресурсы могут быть разделены на две основные группы:

горючие (топливные) ВЭР – горючие газы плавильных печей (доменный, колошниковый шахтных печей и вагранок, конвертерный и т. д.), горючие отходы процессов химической и термохимической переработки углеродистого или углеводородного сырья и др.;

тепловые ВЭР – физическая теплота отходящих газов технологических агрегатов, теплота рабочих тел систем принудительного охлаждения технологических агрегатов, теплота горячей воды и пара, отработавших в технологических и силовых установках и др.

Утилизацию горючих и тепловых ВЭР осуществляют в котлах-утилизаторах (КУ), которые обеспечивают получение за счет использования энергии этих ВЭР дополнительной продукции в виде энергетического или технологического пара, горячей воды, какого-либо другого теплоносителя, что приводит к экономии топлива на предприятии. Котлы–утилизаторы устанавливают за печами и реакторами в химической промышленности, за мартеновскими и нагревательными печами в черной металлургии и т. п. Если используется лишь физическая теплота отходящих газов этих производств, то КУ топочного устройства не имеют и, по существу, представляют собой теплообменники. Если же отходящие газы содержат в своем составе горючие компоненты то, для их сжигания котлы-утилизаторы снабжаются топочным устройством. В случае использования отходящих газов с незначительным содержанием горючих компонентов и малой теплотой сгорания, например, газов сажевого производства, их сжигают в смеси с природным газом или мазутом.

3.1 Котлы-утилизаторы в сажевом производстве

Сажевые заводы относятся к числу предприятий, в которых образуется большое количество отходящих газов, содержащих примерно 20 % горючих компонентов (СО, Н2 и др.) и 80% балласта (СО2, N2 и др.), в том числе около 40% водяных паров. Вследствие сильной забалластированности и малой теплоты сгорания для эффективного их сжигания в котлах-утилизаторах к ним добавляют в небольшом количестве природный газ или мазут, имеющие высокую теплоту сгорания.

Специально для сжигания отходящих газов сажевого производства разработана серия унифицированных котлов типа ПКК (пакетно-конвективный котел). Его продольный разрез показан на рис.1 Котлы типа ПКК однобарабанные, конвективные, с естественной циркуляцией.

Отходящие газы сажевого производства вместе с природным газом или мазутом поступают через горелку 1 в неэкранированный предтопок 2, где и сжигаются. Из предтопка продукты сгорания проходят конвективные испарительные секции 3, пароперегреватель 4, воздухоподогреватель 7, и экономайзер 8. Все элементы котла состоят из системы труб, нагреваемых омывающими их продуктами сгорания. Однако использование теплоты продуктов сгорания в них различно: в трубах испарительных секций происходит кипение воды и образование пара, который поступает затем в барабан 5; в пароперегревателе пар, поступающий из барабана, перегревается до температуры выше температуры насыщения; в воздухоподогревателе подогревается воздух перед подачей в предтопок; в экономайзере подогревается питательная вода, поступающая в котел.

4. ТЕРМОХИМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ

4.1 Состав продуктов сгорания

Для оценки термодинамической эффективности использования ВЭР в котле утилизаторе необходимо знать температуру и энтальпию продуктов сгорания смеси отходящих газов с природным. Указанные параметры определяются на основе термохимического расчета процесса горения. Этот расчет включает определение теоретически необходимого для полного сжигания горючей газовой смеси объема воздуха, действительного объема воздуха, подаваемого в топку котла, объемов продуктов сгорания (ПС), теплоты сгорания газовой смеси, теоретической температуры продуктов сгорания. При этом для газообразных топлив указанные объемы принято находить в расчете на 1 м3 объема сухой части сжигаемого газа.

При горении горючие элементы топлива (CO, H2, H2S, CH4 и другие) взаимодействуют с окислителем – кислородом воздуха, и образуют окислы CO2, SO2, H2O и др. Кроме того, в продукты сгорания входят негорючие газообразные компоненты топлива и азот, содержащийся в воздухе.

Если при полном сгорании 1 м3 горючих газов объем поданного в топку воздуха таков, что прореагирует весь входящий в него кислород, то такой объем (, м3/м3) называется теоретически необходимым. Полученный в этом случае объем продуктов сгорания (, м3/м3) называется также теоретическим. Отметим, что здесь и в дальнейшем объемы воздуха и других газов берутся при нормальных физических условиях (p=101,3 кПа и T=273 К), а размерность м3/м3 означает объем воздуха или компонента продуктов сгорания, приходящийся на 1 м3 объема сухой части сжигаемой газовой смеси.



Теоретический объем продуктов сгорания состоит из объёмов следующих компонентов:

, (4.1)



где



объем сухих трехатомных газов (, так как содержание серы в топливе мало); , ‑ теоретические объемы азота и водяного пара.



В действительности, из-за несовершенства смесеобразования подача в топку теоретического количества воздуха не обеспечивает полного сгорания топлива. По этой причине обычно в топку подают воздуха больше теоретически необходимого:

, (4.2)



где – действительно поданный в топку объем воздуха, – коэффициент избытка воздуха.



Очень часто для удаления продуктов сгорания из котельного агрегата их отсасывают дымососом, в результате чего в газоходах котла создается разряжение. Вследствие этого через неплотности в обмуровке котла в газоходы может подсасываться атмосферный воздух и величина α будет несколько возрастать по длине газового тракта. При работе котла с воздуходувкой давление в газоходах выше атмосферного, поэтому подсосов воздуха нет и значение α сохраняется неизменным.

При α>1 в продуктах сгорания появляется избыточный воздух :



. (4.3)



Следствием избытка воздуха, поступающего в топку, является увеличение в продуктах сгорания объема водяных паров на величину соответствующую содержанию водяного пара в избыточном воздухе. С учетом действительный объем водяных паров в продуктах сгорания



, (4.4)



где – теоретический объем водяных паров в продуктах сгорания при α=1.



4.2 Определение расходов горючих газов и воздуха

4.2.1 Расход горючих газов

В предтопке котла-утилизатора типа ПКК сжигается смесь отходящих газов с природным газом (ОГ с ПГ). Объемная доля природного газа в этой смеси составляет:



, (4.5)



где , – расходы соответственно отходящих и природного газов; здесь и далее индексы “ог”, ”пг” означают соответственно отходящие газы и природный газ. Значение выбирают, исходя из параметров и теплоты сгорания отходящих газов. В настоящей курсовой работе это значение указано в исходных данных. Величина при расчетах также известна, так как она определяется производительностью сажевого производства. Таким образом, исходя из формулы (4.5) можно найти потребный расход природного газа:



. (4.6)



Суммарный расход горючих газов составляет:

. (4.7)



4.2.2 Расход воздуха на горение

Теоретически необходимый объем (м3/м3) воздуха для полного сжигания 1 м3 смеси ОГ с ПГ определяется по формуле



, (4.8)



где и – соответственно теоретические объемы воздуха для сжигания отходящих газов сажевого производства и природного газа.



В свою очередь

, (4.9)



где СО, Н2, Н2S и другие – объемные доли соответствующих компонентов в отходящих газах, %.

Величина также может быть рассчитана по формуле (4.9) или взята из справочника (табл.3).



Действительный объем воздуха в м3/м3 для сгорания 1 м3 смеси ОГ с ПГ вычисляется по формуле (4.2).



4.3 Объем продуктов сгорания

Объем продуктов сгорания 1 м3 смеси ОГ с ПГ при α>1 находится как сумма объемов их компонентов:

. (4.10)



Объем сухих трехатомных газов определяется суммированием объема таких газов, содержащихся в ОГ и получающихся при их сжигании, с одной стороны, и объема трехатомных газов, образующихся при сгорании природного газа:



, (4.11)



где СО2, CO, Н2S, CmHn – объемные доли соответствующих компонентов в отходящих газах, %, – объем сухих трехатомных газов в продуктах сгорания природного газа (см.табл.3).



Теоретический объем азота вычисляется следующим образом:

, (4.12)



где N2(пг) – процентное содержание азота в отходящих газах, – объем азота при в продуктах сгорания природного газа (см.табл.3).



Объем водяного пара, вносимого в топку отходящими газами и получающегося при их сгорании, может быть вычислен следующим образом:

, (4.13)



где – влагосодержание отходящих газов, г/м3. Значение находится по формуле



, (4.14)



где WР – содержание влаги в отходящих газах, %; – плотность водяного пара, кг/м3 (при нормальных условиях = 0,804 кг/м3).



Суммарный объем водяного пара в продуктах сгорания составляет



. (4.15)



Второе слагаемое в правой части равенства (4.15) учитывает образование водяного пара при горении добавки природного газа (см.табл.3), а третье – влагосодержание воздуха, подаваемого в топку (принимается, что влагосодержание воздуха равно 10 г/м3).

Объем избыточного воздуха может быть найден по формуле (4.3) или

. (4.16)



4.4 Теплота сгорания смеси газообразных топлив

Низшая теплота сгорания , кДж/м3, сухой смеси ОГ с ПГ рассчитывается по уравнению:



, (4.17)



где CO, H2, H2S, … – объемное содержание соответствующих горючих компонентов в отходящих газах, %; 12636, 10798, 23400 и т. д. – низшие теплоты сгорания горючих компонентов отходящих газов, кДж/м3; – низшая теплота сгорания сухого природного газа, кДж/м3.



4.5 Энтальпии воздуха, отходящих газов и продуктов сгорания

Котел-утилизатор с термодинамической точки зрения представляет собой открытую термодинамическую систему. Поэтому вычисление составляющих энергетического и эксергетического балансов удобно выполнять, используя величину энтальпии продуктов сгорания. Кроме того, требуется знать энтальпии воздуха при различных его температурах.

4.5.1 Энтальпия продуктов сгорания

Энтальпия продуктов сгорания определяется в расчете на 1м3 сухих горючих газов, поступающих в топку (предтопок) котла-утилизатора. Так как компоненты продуктов сгорания можно считать идеальными газами, то

(4.18)



где t – температура газовой смеси; – энтальпия i-го компонента; – средняя в диапазоне температур 0 – t °С объемная теплоемкость i-го компонента в изобарном процессе; – парциальный объем i-го компонента; N – число компонентов.



Значения при нелинейной зависимости от температуры могут быть найдены из таблиц термодинамических свойств газов. В инженерных расчетах широко пользуются приближенной линейной зависимостью



, (4.19)



обеспечивающей допустимую погрешность в диапазоне t = 0 – 2000 °С. Здесь и – постоянные интерполяционной формулы теплоемкости.



При этом формула энтальпии смеси (4.18) принимает вид:

. (4.20)



Используя линейные зависимости вида (4.19) для отдельных компонентов продуктов сгорания, приведенные в табл. 4, можно на основе выражения (4.20) получить зависимость энтальпии продуктов сгорания от температуры

, (4.21)



где

, .



Формула (4.21) дает возможность вычислять значение энтальпии продуктов сгорания при любой заданной температуре.

4.5.2 Энтальпия воздуха

Если принять зависимость теплоемкости воздуха от температуры линейной, то согласно табл.П.2. средняя в диапазоне температур 0 – t °С объемная теплоемкость воздуха при постоянном давлении определится так:

, (4.22)



Тогда энтальпия теоретически необходимого количества воздуха для полного сжигания 1 м3 смеси ОГ с ПГсоставит:

, (4.23)



где t – температура воздуха, °С.

Энтальпия действительного количества воздуха при сгорании 1 м3 смеси ОГ с ПГ, кДж/м3, определится по формуле

. (4.24)



4.5.3 Энтальпия отходящих газов

Энтальпия отходящих газов определяется по формуле:

, (4.25)



где t – температура ОГ, °С; и –коэффициенты формул для средней объемной изобарной теплоемкости i-го компонента сухой части ОГ; – объемная доля i-го компонента в сухой части ОГ (в %); – число компонентов в сухой части ОГ; – объемная доля влаги в ОГ; - коэффициенты формулы средней объемной изобарной теплоемкости для водяного пара. Формула (4.25) учитывает то, что для расчета тепловых балансов в котле–утилизаторе энтальпия отходящих газов должна быть отнесена к 1 м3 сухой части этих газов.



4.6 Определение теоретической температуры продуктов сгорания

В топках паровых котлов, работающих на природном газе, мазуте, угольной пыли, стенки топки покрыты экранными трубами, которые защищают конструкцию от воздействия высоких температур. В котлах-утилизаторах, в которых сжигается низкокалорийное топливо, температуры пламени относительно низкие и потери теплоты в стенки топки нежелательны. По этой причине, в частности, в топочной камере котлов-утилизаторов типа ПКК экранные трубы отсутствуют. Если не учитывать потери теплоты в стенки топочной камеры и принимать, что все полезное тепловыделение в топке затрачивается только на их нагрев, то температуру продуктов сгорания на выходе из топки можно приближенно считать равной так называемой адиабатной температуре горения . Последняя находится на основе уравнения сохранения энергии:



, (4.26)



где – энтальпия продуктов сгорания на выходе из топки, – доля теплоты, теряемая от химической неполноты сгорания ( %), – теплота, вносимая в топку смесью отходящих газов с природным, – теплота, вносимая в топку воздухом, приходящим из воздухоподогревателя.



Теплота, вносимая смесью ОГ с ПГ

, (4.27)



где и – теплота, вносимая в топку соответственно отходящими газами и природным газом. Величина равняется энтальпии отходящих газов :



(4.28)



Вследствие малых значений и невысокой температуры природного газа, поступающего в котел-утилизатор, вторым слагаемым в правой части уравнения (4.27) можно пренебречь. Тогда с учетом (4.28)



. (4.29)



Теплота , вносимая в топку с воздухом, равна его энтальпии на выходе из воздухоподогревателя и может быть вычислена по формуле (4.24) при условии, что на входе в воздухоподогреватель температура воздуха составляет 60…80 °С, а в воздухоподогревателе она повышается на 200…250 °С.



Определив формуле (4.26), можно найти температуру продуктов сгорания на выходе из топки как



. (4.30)



5. ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС И ТЕПЛОВОЙ КПД КОТЛА-УТИЛИЗАТОРА

5.1 Составляющие теплового баланса

Тепловой баланс котла вытекает из закона сохранения энергии и устанавливает равенство между количеством подведенной и расходуемой теплоты. В общем виде он записывается так:



=. (4.31)



Суммарное количество теплоты, внесенной в котел, называется располагаемой теплотой , которая является приходной частью теплового баланса:



=. (4.32)



Располагаемая теплота включает в себя все виды теплоты, внесенной в котел[[1]](#footnote-1)\*:



, (4.33)



где и – соответственно низшая теплота сгорания и физическая теплота смеси ОГ с ПГ; – теплота, внесенная в котлоагрегат воздухом при подогреве его вне агрегата посторонним источником энергии (не в воздухоподогревателе котла).



Если принять энтальпию воздуха в окружающей среде за начало отсчета, то теплоту внешнего подогрева воздуха можно определить по формуле:



, (4.34)



где и – соответственно энтальпии воздуха на входе в воздухоподогреватель котла после его предварительного подогрева (например, в паровом калорифере) до температуры и холодного воздуха с температурой . Как было сказано выше в разделе 4.6, температуру принимают равной 60…80 °С. Температура холодного воздуха принимается обычно равной 30 °С.



Если записать составляющие расходной части равенства (4.31) применительно к рассматриваемому котлу-утилизатору, то в развернутом виде уравнение теплового баланса котла будет иметь вид:

, (4.35)



где – полезно использованная теплота (израсходованная на выработку технологической или энергетической продукции, например, на нагрев воды или получение пара заданных параметров); , , – потери теплоты соответственно с уходящими газами (продуктами сгорания), химической неполнотой сгорания смеси ОГ с ПГ и от наружного охлаждения (в окружающую среду через ограждения котла).



Уравнение теплового баланса можно записать в виде, где все составляющие выражены в процентах по отношению к располагаемой теплоте, принимаемой за 100 % ( = 100%):



, (4.36)



где и т. д.



5.2 Коэффициент использования теплоты

Энергетическая эффективность котла-утилизатора характеризуется коэффициентом использования теплоты, или коэффициентом полезного действия η, %:

. (4.37)



Среднестатистические данные по тепловым потерям и приводятся в таблице исходных данных к настоящей работе. Потеря теплоты с уходящими из котла газами (продуктами сгорания) , %, определяется по формуле



, (4.38)



где – энтальпия продуктов сгорания при температуре уходящих газов ; – коэффициент избытка воздуха в уходящих газах (в данном случае коэффициент избытка воздуха по газоходам котла не меняется, то есть ); – энтальпия теоретически необходимого количества воздуха при температуре холодного воздуха . Температура уходящих газов для котлов подобного типа принимается равной 180 … 190 °С.



6. ПАРОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ КОТЛА

Одним из основных параметров котельного агрегата является его номинальная паропроизводительность , т. е. наибольшая паропроизводительность, которую котел должен обеспечивать в течение длительной эксплуатации при номинальных величинах параметров пара и питательной воды.



Однако при изменении количества, состава и температуры отходящих из технологической установки газов, изменении параметров вырабатываемого пара, а также конструкции поверхностей нагрева действительная паропроизводительность может отличаться от номинальной, вследствие чего она подлежит определению в поверочном тепловом расчете.

Паропроизводительность котла-утилизатора, в котором нет отбора к потребителям насыщенного пара и в котором отсутствует вторичный пароперегреватель, определяется по формуле:

, (4.39)



где – расход смеси ОГ с ПГ; – располагаемая теплота; η – коэффициент использования теплоты, %; , , – энтальпии соответственно перегретого пара, питательной воды и кипящей (продувочной) воды в барабане парового котла; – коэффициент, учитывающий расход кипящей воды на непрерывную продувку[[2]](#footnote-2)\* котла. Величина этого коэффициента , где – расход продувочной воды, и составляет обычно 0,015 … 0,05. Температура питательной воды составляет 140 … 150 °С.



7. ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОТЛА-УТИЛИЗАТОРА

В последние годы в практике инженерных расчетов для оценки степени термодинамического совершенства энерготехнологических систем, теплотехнических установок и их элементов все шире используется эксергетический анализ. В его основе лежит понятие эксергии, под которой понимают максимальную работу термодинамической системы при обратимом переходе ее в состояние равновесия с окружающей средой. Эксергетический метод термодинамического анализа позволяет оценить:

качество (потенциал) энергии с точки зрения ее работоспособности, в частности, располагаемые резервы утилизации вторичных энергоресурсов (отходящих газов какого-либо производства, горячей воды и пара, отработавших в технологических и силовых установках, и др.);

снижение качества (“деградацию”) энергии из-за необратимого протекания реальных процессов (горения, теплообмена, смешения, трения и т.д.)

В зависимости от вида термодинамической системы и энергии, которая преобразуется в работу, различают несколько видов эксергии. При анализе эффективности котла-утилизатора целесообразно использовать понятия эксергии потока вещества и химической эксергии.

7.1 Виды эксергии, используемые при анализе эффективности котла-утилизатора

7.1.1 Эксергия потока вещества

Эксергия потока вещества характеризует максимальную располагаемую работу, совершаемую потоком в процессе обратимого перехода из состояния, характеризуемого параметрами , , в состояние с параметрами окружающей среды , . Величина удельной (для единицы массового расхода) эксергии потока вещества определяется по формуле



, (7.1)



где , – удельные значения энтальпии и энтропии вещества в состоянии, характеризуемом параметрами , ; , – значения указанных величин в состоянии равновесия с окружающей средой.



Уравнение (7.1) отражает единственно возможный путь обратимого перехода вещества из состояния , к состоянию , , обеспечивающий достижение : сначала обратимый адиабатный процесс до момента, когда температура становится равной , а затем изотермический процесс при . Указанная последовательность процессов позволяет избежать потерь из-за внутренней и внешней необратимости, связанной с теплообменом при конечной разности температур.



В частном случае, когда давление в потоке близко к давлению окружающей среды , а вещество близко по свойствам к идеальному газу, расчет разностей и можно выполнить на основе средних удельных теплоемкостей, выраженных эмпирическими уравнениями типа . При этом расчетные формулы для однородного вещества имеют вид:



, (7.2)



, (7.3)



где – среднелогарифмическая температура в интервале от до :



. (7.4)



К такому именно случаю можно отнести движение воздуха и продуктов сгорания в газоходах котельной установки.

Поскольку, как уже отмечалось ранее, расчеты котельной установки принято вести по отношению к единице количества топлива, отходящих газов или их смеси, соответственно будем иметь:

, (7.5)



, (7.6)



. (7.7)



Следует указать также на возможность приближенного вычисления эксергии потока вещества для указанного частного случая р1≈ р0 по формуле

. (7.8)



Установлено, что погрешность при использовании этой формулы в диапазоне температур Т = 273–2500 К составляет <3%, что допустимо для таких расчетов.

7.1.2 Химическая эксергия

Химическая (нулевая) эксергия – это та максимальная работа, которая может быть получена в результате преобразования какого-либо вещества, т. е. определенного соединения химических элементов, в другие соединения этих элементов, наиболее распространенные в окружающей среде и находящиеся с ней в равновесии. Такое преобразование должно осуществляться в ходе обратимой химической реакции при , с участием дополнительных веществ (окислителя, катализатора).



Приближенно можно считать, что химическая эксэргия представляет собою теплоту реакции, взятую с обратным знаком. В частности, для топлива удельное значение ее можно брать примерно равной высшей теплоте сгорания .



Для газообразного топлива, а также горючих отходящих газов:

, (7.9)



где – низшая теплота сгорания.



7.2 Эксергетический баланс котла-утилизатора

Содержание эксергетического анализа составляют расчеты составляющих эксергетического баланса и эксергетического КПД.

В отличие от баланса энергии, баланс эксергии для любой установки может быть сведен лишь условно, если включить в число его составляющих эксэргию, потерянную в процессах преобразования энергии. Баланс эксергии может быть записан в двух формах, одна из которых имеет вид

, (7.10)



где – суммарная эксергия, поступающая в установку с потоками вещества и энергии; – суммарная эксергия, уходящая из установки; – сумма потерь эксергии в установке.



Суммарная эксергия, поступающая в котел-утилизатор складывается из следующих составляющих:

, (7.11)



где – химическая эксергия смеси отходящих газов с природным; – физическая эксергия потока указанных газов; – эксергия потока воздуха, поступающего в котел (на входе в воздухоподогреватель); – эксергия потока питательной воды, поступающей в котел (на входе в экономайзер).



Величина химической эксергии смеси отходящих газов с природным, поступающей за единицу времени в котел-утилизатор, приближенно вычисляется по формуле:

. (7.12)



Физическая эксергия смеси отходящих газов с природным:

. (7.13)



Поскольку природный газ поступает из окружающей среды, его физическая эксергия равна нулю. Тогда

, (7.14)



где

; – энтальпии отходящих газов, соответственно, при и .



Эксергия воздуха на входе в котел

, (7.15)



где , , – энтальпии воздуха при и .



Эксергия питательной воды, поступающей в котел, находится в случае ее предварительного подогрева как

, (7.16)



где , – энтальпия и энтропия воды при и заданном давлении в котле (находятся по таблицам воды и водяного пара); , – энтальпия и энтропия воды при , .



С достаточной степенью точности и для воды могут быть вычислены по формулам и , где – теплоемкость воды: = 4,19 кДж/(кг⋅К).



Суммарный поток эксергии, уходящий из установки, складывается следующим образом:

, (7.17)



где – эксергия потока перегретого пара; – эксергия продуктов сгорания, покидающих котел (на выходе из экономайзера); – эксергия продуктов неполного окисления (химический недожог) смеси отходящих и природного газов в топке котла; – эксергия несгоревшего (физический недожог) топлива (для газообразных горючих = 0); – эксергия потока теплоты, теряемой через стенки котла в окружающую среду.



Эксергия потока перегретого пара

, (7.18)



где , – энтальпия и энтропия перегретого пара; , – энтальпия и энтропия воды при условиях окружающей среды.



Эксергия потока уходящих из котла продуктов сгорания

, (7.19)



где

.



Эксергия продуктов неполного окисления

. (7.20)



Эксергия потока теплоты в окружающую среду

, (7.21)



где

.



Потери эксергии обусловлены необратимостью процессов горения , теплообмена , трения и др., причем наибольший вклад вносят и , поэтому можно принять:



. (7.22)



Потери эксергии из-за необратимости процесса горения

, (7.23)



или

, (7.24)



где – эксергия продуктов сгорания в топке при адиабатной температуре горения:



. (7.25)



Здесь

.



Потери эксергии из-за конечной разности температур при теплообмене  
между продуктами сгорания, с одной стороны, и водой, паром, воздухом, с другой

. (7.26)



7.3 ЭксергетическийКПДкотла-утилизатора

Эксергетический КПД характеризует долю полезно использованной эксергии



, (7.27)



где , – соответственно затраченная и использованная эксергии;



– транзитная эксергия, то есть эксергия, которая проходит от входа в установку до выхода из нее, не участвуя в процессах преобразования энергии. Для котла-утилизатора в данном случае к транзитной эксергии относятся эксергии потоков питательной воды и воздуха , а также физическая эксергия потока отходящих газов сажевого производства.



В случае, когда отсутствует “вторичная” утилизация, т. е. не используются потенциалы работоспособности продуктов сгорания, уходящих из котла, , теплоты наружного охлаждения и теплоты сгорания продуктов неполного окисления , последние могут рассматриваться как потери эксергии. Тогда формула (7.27) преобразуется к виду



. (7.28)



8. РАСЧЕТ ДЫМОВОЙ ТРУБЫ

Продукты сгорания удаляются из котла в атмосферу через дымовую трубу. Необходимая высота дымовой трубы при естественной тяге должна обеспечивать решение двух задач – достижение определенной скорости движения продуктов сгорания по газоходам котла, от которой зависит эффективность теплообмена в элементах котла, и вынос продуктов сгорания в более высокие слои атмосферы.

В современных промышленных котельных установках с помощью трубы решается, как правило лишь вторая задача, поскольку для получения требуемых скоростей потоков в газовых и воздушных трактах могут использоваться дутьевые вентиляторы и дымососы. Выбор последних осуществляется на основе результатов аэродинамического расчета котельной установки, который в данной работе не рассматривается.

При эвакуации продуктов сгорания из высотных дымовых труб их концентрация может быть снижена до нормативных значений за счет турбулентного перемешивания с большими объемами окружающего воздуха.

Особую опасность представляют вредные (токсичные) примеси. Для газообразного топлива при полном сгорании основными токсичными составляющими являются оксиды серы SО2, SО3 и оксиды азота NО, NО2. Около 99% оксидов серы составляет SО2 и в расчетах выбросов условно принимается, что вся сера переходит в SО2.

Оксиды азота образуются в зоне высоких температур (в ядре факела пламени) в предтопке в результате окисления азота, входящего в состав как смеси горючих газов, так и подаваемого воздуха. На выходе из дымовой трубы NО составляет до 95% от суммы NО + NО2. Однако в процессе распространения дымового факела в атмосфере происходит доокисление NО в NО2 кислородом воздуха. Поэтому массовый выброс оксидов азота из котлов рассчитывается по NО2.

Высота дымовой трубы должна обеспечивать такое рассеивание токсичных веществ в атмосфере, при котором их концентрация у поверхности земли будет меньше предельной допускаемой санитарными нормами. Разовая предельно допускаемая концентрация (ПДК) в атмосферном воздухе населенных мест не должна превышать по SО2 – 0,5 мг/м3, по NО2 – 0,085 мг/м3.

Минимально допустимая высота трубы, при которой выполняется указанное выше требование, рассчитывается по формуле (без учета фоновой загазованности от других источников):

Нmin ≥ , (8.1)



где – коэффициент, учитывающий характер атмосферных течений ( для Нижнего Поволжья принимают = 200); – безразмерный коэффициент, учитывающий скорость осаждения загрязняющих веществ в атмосфере (для газообразных веществ =1); , – безразмерные коэффициенты, учитывающие условия выхода дымовых газов из устья трубы; , – массовые выбросы вредных веществ, г/с; – максимальная разовая предельно допускаемая концентрация диоксида серы, мг/м3; – объем всех выбрасываемых продуктов сгорания, м3/с: ; – разность между температурой выбрасываемых из трубы продуктов сгорания и температурой атмосферного воздуха.



Массовый выброс окислов азота в г/с (в пересчете на NО2) рассчитывается по приближенной формуле

, (7.2)



где – низшая теплота сгорания смеси горючих газов, КДж/м3; – суммарный расход указанной смеси, м3/с; β – поправочный коэффициент, учитывающий вид топлива и особенности сжигания (в данном случае принимается β=1); – выход NО2 на 1МДж теплоты, выделяющейся при сгорании, г/МДж. Значения при сжигании газообразного топлива определяются по формулам:



для котлов паропроизводительностью = 20 … 265 кг/с



, (7.3)



для котлов паропроизводительностью = 8 … 20 кг/с



, (7.4)



При сжигании газового топлива SО2 образуется в ходе реакции окисления Н2S. В данном случае последний компонент присутствует только в составе отходящих газов, поэтому объем в расчете на 1м3 смеси отходящих газов с природным составляет



, (7.5)



Объемный выброс диоксида серы в единицу времени , м3/с:



. (7.6)



Массовый выброс диоксида серы , г/с:



, (7.7)



где – атмосферное давление; – универсальная газовая постоянная;   
 – молекулярная масса SO2.



8.1 Расчет экономии топлива

Как уже отмечалось ранее, использование вторичных энергоресурсов, имеющихся практически во всех отраслях промышленности, где применяются теплотехнологические процессы, позволяет обеспечить значительную экономию топлива и энергии.

Экономия топлива за счет использования отходящих газов сажевого производства в котле-утилизаторе для выработки пара определяется по формуле

, (8.1)



где – расход природного газа в смеси с отходящими газами; – количество природного газа, которое потребовалось бы без использования отходящих газов для выработки такого же количества пара тех же параметров, что и в котле-утилизаторе.



Величина приближенно вычисляется по формуле



, (8.2)



Где

.



Теплота, вносимая подогретым воздухом в топку (в расчете на 1м3 природного газа),

, (8.3)



где – объем воздуха необходимый для сжигания 1м3 природного газа при α=1.



На практике часто экономию топлива выражают в тоннах так называемого условного топлива, теплота сгорания которого составляет 29300 кДж/кг:

. (8.4)



###### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Назначение котла-утилизатора.

2. Устройство котла-утилизатора типа ПКК, назначение его отдельных элементов.

3. Методика расчета процесса сгорания в котле-утилизаторе.

4. Как рассчитываются энтальпии воздуха и продуктов сгорания?

5. Тепловой баланс котла-утилизатора.

6. Коэффициент использования теплоты и его вычисление.

7. Что включает в себя располагаемая теплота?.

8. Методика расчета действительной паропроизводительности котла.

9. Адиабатная температура горения и ее вычисление.

10. Понятие эксергии.

11. Каковы цели эксергетического анализа котла-утилизатора?

12. Виды эксергии и расчетные формулы.

13. Эксергетический баланс котла-утилизатора.

14. Эксергетический КПД.

15. Формула для приближенного вычисления эксергии потока продуктов сгорания.

16. Формулы для вычисления эксергий потоков перегретого пара и питательной воды.

17. Виды потерь эксергии в котле.

18. Методика расчета дымовой трубы.

19. Методика расчета экономии топлива.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица П 1

Интерполяционные формулы для средних объемных теплоемкостей в изобарном процессе при атмосферном давлении 0,1013 МПа (линейная зависимость)

|  |  |
| --- | --- |
| ГАЗ | = аi + bi t, кДж / (м3⋅К) |
| ВОЗДУХ | = 1,287 + 1,201⋅10 -4t |
| H2 | = 1,28 + 5,23⋅10-5t |
| N2 | = 1,306 + 1,107⋅10-4t |
| О2 | = 1,313 + 1,577⋅10-4t |
| СО | = 1,291 + 1,21⋅10-4t |
| СО2 | = 1,7132 + 4,723⋅10-4t |
| Н2О | = 1,473 + 2,498⋅10 –4t |
| СН4 | = 1,5491 + 1,181⋅10-3t |
| Н2S | = 1,5072 + 3,266⋅10-4t |

Здесь t в °С.

###### Таблица П 2

Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| р, МПа | 0,1 | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 3,5 | 4,0 | 4,5 |
| tН, °С | 99,63 | 151,85 | 179,88 | 198,28 | 212,37 | 223,94 | 233,84 | 242,54 | 250,33 | 257,41 |
| h′,кДж/кг | 417,5 | 640,1 | 762,6 | 844,7 | 908,6 | 962,0 | 1008,4 | 1049,8 | 1087,5 | 1122,2 |
| h′′,кДж/кг | 2,6757 | 2748,5 | 2777,0 | 2790,4 | 2797,4 | 2800,8 | 2801,9 | 2801,3 | 2799,4 | 2796,5 |

#### Таблица П3

Термодинамические свойства воды и перегретого пара

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| t, °C | р = 2,0 МПа | | | р = 2,5 МПа | | | р = 4,5 МПа | | |
| ν, м3/кг | h, кДж/кг | s, кДж/(кг⋅К) | ν, м3/кг | h, кДж/кг | s, кДж/(кг⋅К) | ν, м3/кг | h, кДж/кг | s, кДж/(кг⋅К) |
| 0 | 0,00010 | 2,0 | 0,0000 | 0,00010 | 2,5 | 0,0000 | 0,00010 | 4,5 | 0,0002 |
| 50 | 0,00101 | 211,0 | 0,7026 | 0,00101 | 211,4 | 0,7023 | 0,00101 | 213,1 | 0,7014 |
| 100 | 0,00104 | 420,5 | 1,3054 | 0,00104 | 420,9 | 1,3050 | 0,00104 | 422,4 | 1,3034 |
| 150 | 0,00109 | 633,1 | 1,8399 | 0,00109 | 633,4 | 1,8394 | 0,00109 | 634,6 | 1,8372 |
| 200 | 0,00115 | 852,6 | 2,3300 | 0,00115 | 852,8 | 2,3292 | 0,00115 | 853,6 | 2,3260 |
| 250 | 0,1115 | 2902,5 | 6,5460 | 0,08701 | 2879,9 | 6,4087 | 0,00125 | 1085,8 | 2,7923 |
| 300 | 0,1255 | 3024,0 | 6,7679 | 0,09892 | 3009,4 | 6,6454 | 0,05136 | 2943,9 | 6,2848 |
| 350 | 0,1386 | 3137,2 | 6,9574 | 0,1098 | 3126,6 | 6,8415 | 0,05840 | 3081,3 | 6,5149 |
| 400 | 0,1512 | 3248,1 | 7,1285 | 0,1201 | 3239,9 | 7,0165 | 0,06473 | 3205,8 | 6,7071 |
| 450 | 0,1635 | 3357,7 | 7,2855 | 0,1301 | 3351,0 | 7,1758 | 0,07070 | 3323,8 | 6,8763 |

Примечание. Числовые значения выше разграничительной линии относятся к воде, ниже – к перегретому пару.

1. \* Теплота подогрева воздуха в воздухоподогревателе в выражении (4.33) не учитывается, так как это же количество теплоты отдается продуктами сгорания воздуху в воздухоподогревателе в пределах котельного агрегата, т. е. осуществляется регенерация (возврат) теплоты. [↑](#footnote-ref-1)
2. \* Продувка – это вывод из котла небольшого количества воды с большой концентрацией растворимых накипеобразующих солей. [↑](#footnote-ref-2)