**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ «ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ»**

Цель работ: наблюдение и определение тепловых характеристик парогенератора на физической модели.

Используемое оборудование:

 1. Стационарное оборудование: тепловая модель парогенератора с электросчетчиком, приборами для измерения давления и температуры пара, регулирующей арматурой и конденсатором.

 2. Приборы, получаемые студентами при выполнении работы: мультиметр, секундомер и мерная емкость для измерения объема конденсата.

Общие сведения

Котельные установки состоят из котла и вспомогательного оборудования, связанных единой технологической схемой. К вспомогательному оборудованию относятся устройства топливоподачи, питательные насосы, вентиляторы, дымососы, золоуловители, паропроводы, водопроводы и др. По назначению котлы можно разбить на несколько групп:

- энергетические (или парогенераторы) - предназначены для выработки пара в составе паротурбинных установок, обладающие высокой единичной паропроизводительностью, повышенными параметрами пара, высокой надежностью и экономичностью;

- промышленные паровые котлы - вырабатывают пар для технологических нужд промышленности;

 - отопительные котлы - производят пар и горячую моду для отопления промышленных, жилых и общественных зданий;

- водогрейные котлы - предназначены для получения горячей воды с давлением выше атмосферного;

 - котлы утилизаторы н энерготехнологические агрегаты - используют физическое и химическое тепло вторичных энергетических ресурсов металлургического, химического и других производств.

По давлению котлы подразделяют на: котлы низкого давления (до 1 МПа), среднего (1-10 МПа), высокого (10-18 МПа), сверхвысокого (18-20 МПа) , сверхкритического (более 22,5 МПа) и ульстрасверхкритического (суперсверхкритического) (более 30 МПа).

 По способу циркуляции воды выделяют котлы: с естественной и многократной принудительной циркуляцией, а также прямоточные.

Котельный агрегат с П-образной компоновкой (рис. 1) состоит из подъемного 2 и опускного 8 газоходов. Подъемный газоход представляет собой топку для сжигания топлива, на стенках которой установлены испарительные поверхности нагрева 3 в виде плоских трубчатых панелей, называемых экранами. В опускном газоходе расположены водяной экономайзер 9 и воздухоподогреватель 10 для подогрева воздуха, идущего на горение топлива в топке. В соединительном газоходе расположены фестон 6, представляющий собой разреженный пучок труб, являющийся продолжением заднего экрана, и пароперегреватель 7, обеспечивающий требуемую потребителем температуру пара.

Испарительные поверхности 3 сообщаются с барабаном котла 4 и вместе с опускными трубами 5, соединяющими барабан с нижними коллекторами экранов, составляют циркуляционные контуры. Пароводяная смесь в барабане разделяется на насыщенный пар и воду, пар направляется в пароперегреватель, а вода снова в циркуляционные контуры. Циркуляция воды и пароводяной смеси в контурах происходит за счет разности плотностей воды в опускных трубах и пароводяной смеси в подъемных трубах - экранах (естественная циркуляция).



Топливо вместе с горячим воздухом через горелки 1 подается в топочную камеру 2, где сжигается в виде факела. Продукты сгорания из топочной камеры направляются в пароперегреватель, экономайзер и воздухоподогреватель и через газоочистку удаляются в атмосферу.

Существуют различные конструктивные оформления котельных агрегатов, схемы которых отличаются от рассмотренной. Так, сжигание топлива может осуществляться в слое, циркуляция воды и пароводяной смеси в испарительной системе котла может быть принудительной с помощью специальных насосов, а водяной экономайзер и воздухоподогреватель могут располагаться в несколько ступеней и т.д.

 Выделяют основные параметры работы котла:

1. Номинальная производительность котла D кг/с, является наибольшей паропроизводительностью, которую должен обеспечить котел при длительной эксплуатации, при сжигании основного топлива, при соблюдении номинальных параметров пара и питательной воды.
2. Номинальное давление Р, МПа, и температура пара$ t\_{пп}$, °С, - абсолютное давление и температура пара, принятые при проектировании котла, которые должны обеспечиваться непосредственно за паросборной камерой пароперегревателя при номинальной паропроизводительности котла.

Обозначение паровых котлов с естественной циркуляцией имеет букву Е, прямоточных - букву П, с принудительной циркуляцией - Пр. Если котел имеет промежуточный перегрев, то в обозначениях добавляется буква П. За буквами следуют цифры, первая из которых обозначает паропроизводительность котла, т/ч, а вторая - давление, атм. Если дополнительные обозначения отсутствуют, то принимается, что топка открытая, камерная и с твердым шлакоудалением . Для других условий к упомянутым обозначениям добавляются индексы: Ж - топка с жидким шлакоудалением; В - вихревая топка; Ц - циклонная топка; Р - решетка (слоевая топка); Г- газ; М - мазут; Н - котел под наддувом.

Тепловой баланс котельного агрегата обычно составляют на 1 кг твердого и жидкого топлива или на 1 м газообразного топлива. Приходная часть теплового баланса представляет собой располагаемое тепло $Q\_{p}^{p}$, МДж/кг или МДж·м3, равное низшей теплоте сгорания топлива $Q\_{н}^{p}$, при отсутствие других статей приходного баланса:

$ Q\_{прих}=Q\_{н}^{р}$ (1)

Расходная часть теплового баланса содержит полезное тепло выработанного пара $Q\_{пол} $и различные потери $Q\_{потерь}$:

$ Q\_{расх}=Q\_{пол}+Q\_{потерь}$ (2)

Теплота, полезно затраченная на выработку пара [1], определяется по уравнению:

 $Q\_{пол}=\frac{D}{B}(i\_{п.п.}-i\_{п.в.})$, (3)

где D -выход пара, кг/с;

В - расход топлива, кг/с или м3/с;

 $i\_{п.п.} и i\_{п.в.}$ - энтальпии перегретого пара и питательной воды, кДж/кг.

Остальные слагаемые в уравнении (2) представляют собой тепловые потери, отнесенные к единице сжигаемого топлива, МДж/кг или МДж/м3.

Таким образом, уравнение теплового баланса котла может быть записано в следующем виде:

$ Q\_{н}^{р}=\frac{D}{B}\left(i\_{п.п.}-i\_{п.в.}\right)+Q\_{потерь}$ (4)

Отношение количества теплоты, затраченного на выработку пара D·($i\_{п.п.}-i\_{п.в.}$) (в МВт), к теплоте, выделенной в топке $B·Q\_{p}^{p} $(в МВт), представляет собой КПД котельного агрегата, %:

 $η\_{ka}=\frac{D(i\_{п.п.}-i\_{п.в.})}{BQ\_{н}^{р}}·100=\frac{Q\_{пол}}{Q\_{н}^{p}}·100$ (5)

 Часовой расход топлива определяют по формуле:

 $B=\frac{D(i\_{п.п.}-i\_{п.в.})}{Q\_{н}^{р}η\_{ka}}$ (6)

Расчет КПД котельной установки по непосредственному измерению часовых выработок пара и расходу топлива называется определением по методу прямого баланса [1-2].

При определении КПД котла по методу прямого теплового баланса необходимо оценивать погрешность измерения. Поскольку количество насыщенного пара, отбираемого из котла, составляет небольшую долю общей паропроизводительности (до 3 %), а теплота на подогрев продувочной воды обычно не превышает 0,5-1 % от полезно израсходованной теплоты, то уравнение прямого баланса может рассматриваться в следующем виде:

$ η\_{ка}=\frac{D\_{пп}(i\_{п.п.}-i\_{п.в.})+D\_{втп}(i"\_{п.п.}-i\_{п.в.}^{,})}{ВQ\_{р}^{р}}·100$ (7)

Вероятная абсолютная погрешность % (абс.) определения КПД котла по прямому балансу пропорциональна КПД котла и может быть рассчитана по формуле

$ σ\_{η\_{ка}}=\left(\frac{φ\_{η\_{ка}}}{100}\right)·η\_{ка}$ , (8)

а относительная погрешность $φ\_{η\_{ка}}$, %, определяется из уравнения:

 $φ\_{η\_{ка}}=\sqrt{φ^{2}р\_{п.п.}+φ^{2}}i\_{п.п.}-i\_{g.d.}+φ^{2}i\_{втн}"-i\_{втр}"+φ^{2}Р\_{втп}+φ^{2}δ+φ^{2}Q\_{р}^{р}$ (9)

В уравнении (9) максимальную долю в общую погрешность вносят погрешности определения расхода топлива и питательной воды. Вероятная относительная погрешность прямого баланса по данным [1] составляет $φ\_{η\_{ка}}$ = 3,3 - 5,0 % для котлов на твердом топливе и 1,5-3,0 % - для котлов на жидком и газовом топливе. Сопоставление погрешностей обратного и прямого баланса показывает, что для котлов на газовом или жидком топливе, имеющих КПД брутто до 80 %, и на твердом топливе - до 75 %, долее точное определение обеспечивает прямой баланс, а при более высоких КПД - обратный баланс [3, 4].

**Описание лабораторной установки**

Экспериментальная установка (рис. 2) состоит из электрического парогенератора 1, конденсатора 16 и системы контрольно-измерительных приборов. Из водопровода через вентиль 5 вода заливается в парогенератор, где с помощью электронагревателя 17 она превращается в пар. Далее через вентиль 4 пар поступает в барабан парогенератора 8. Парогенератор снабжен предохранительным клапаном 3, который отрегулирован на давление 0,22-0,24 МПа. Для слива конденсата из барабана котла в воронку имеется специальный сливной кран 9.

Из барабана котла влажный насыщенный пар выходит через дроссельный вентиль 10. Вентиль 11 служит для поддержания в системе некоторого избыточного давления. Сдросселированный пар проходит через конденсатор поверхностного охлаждения 16 и образовавшийся конденсат собирается в мерном цилиндре 18.



В установке используются контрольно-измерительные приборы, служащие для определения температуры (мультиметр) и давления пара на различных участках, а также мощности трубчатого электронагревателя (электросчетчик). Для измерения времени накопления конденсата в мерном цилиндре 18 служит секундомер.

**Лабораторная работа № 1**

**ИССЛЕДОВАНИЕ КПД КОТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ МЕТОДОМ ПРЯМОГО ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА**

Цель работы: экспериментальное изучение КПД котла методом прямого теплового баланса.

 План выполнения работы

1 . Перед выполнением работы необходимо внимательно ознакомиться с оборудованием установки. Закрыть все краны и вентили. Залить парогенератор водой до определенного уровня. Конденсатор подсоединить к проточной воде. Подставить под конденсатор емкость для сбора конденсата.

 2. Открыть вентиль 4 и включить электронагреватель 17.

З. При достижении заданной величины давления пара в парогенераторе постепенно начать открывать вентили 10 и 11 так, чтобы прекратились пульсации давления на выходе из барабана парогенератора и за дроссельным клапаном.

4. Открыть дроссельный вентиль 10 так, чтобы давление после него стало 0,05 МПа. После достижения установившегося режима можно приступить к измерениям.

5. Поставить под конденсатор 16 мерную колбу 18 и одновременно засечь время. Записать показания счетчика расхода электроэнергии.

6. Измерять давление и температуру на выходе из барабана и перед дроссельным вентилем через каждые 60 с. Через 3 мин после начала измерений определить массу конденсата в мерной колбе.

7. Записать показания счетчика расхода электроэнергии.

8. Повторить измерения 3 раза. По заданию преподавателя установить на контактном манометре новое значение давления и повторить замер.

9. Записать показания водоуказательной колонки парогенератора в начале и в конце каждой серии замеров.

1 0. Поддерживать на одном и том же уровне (0,05 МПа) давление в системе после дроссельного вентиля 10.

11. Составить прямой тепловой баланс и найти тепловые потери парогенератора и КПД для исследуемых режимов.

12. Настроить зависимость паропроизводительности D парогенератора от удельной электрической мощности $N\_{э}/M\_{ж}$, и КПД парогенератора от паропроизводительности, где$N\_{э}$— электрическая мощность парогенератора, кВт; $M\_{ж}$- средняя масса жидкости в парогенераторе во время каждой серии экспериментов, определяемая по водоуказательной колбе, кг.

14. Определить потери теплоты парогенератором расчетным путем, сопоставив с величиной потерь, найденных из теплового баланса, определить величину невязки.

Расчетная часть

1. Полезные затраты тепла

$ Q\_{п}=G\_{п}·i\_{п}$ (10)

где $G\_{п}$=$G\_{k}$ – расход пара, кг/с;

$i\_{п}$ — энтальпия пара при давлении Р перед редукционным клапаном, кДж/кг;

$G\_{k}$- расход конденсата, кг/с.

2. Полные затраты тепла, кВт,

$ Q\_{э}=\frac{Q\_{э}^{,}-Q\_{э}^{,,}}{τ}$ (11)

$Q\_{э}^{,}, Q\_{э}^{,,}$ — расход электроэнергии по показаниям счетчика, кВт·ч;

τ — время эксперимента, ч.

 3. Количество теплоты, теряемое парогенератором в окружающую среду, для промышленных котельных установок определяется по номограммам в зависимости от производительности котла. Для лабораторного парогенератора:

 $Q\_{потерь}=α·Δt·F$ (12)

где α - коэффициент теплоотдачи для условий свободной конвекции, кВт/м2·°С; $Δt$ =$t\_{c}+t\_{в}$ ,$ t\_{c}$ —средняя температура стенки парогенератора, °С; $t\_{в}$ —температура воздуха вдали от парогенератора, °С; F —поверхность теплообмена F =$F\_{п}+F\_{б}$;$ F\_{п}$—поверхность парогенератора, м2; $F\_{б}$ —поверхность барабана, м2.

Для нахождения α используется критериальное уравнение:

 Nu=c·(Gr·Pr)n (13)

где Gr = g·β$·Δt·d^{3}/ν^{2}$—критерий Грасгофа;

Рг = v/а — критерий Прандтля.

Значения кинематической вязкости v, м2/с, температурного коэффициента объемного расширения β, К-1, коэффициента температуропроводности а, м2/с, и коэффициента теплопроводности воздуха λ, Вт/м·°С, принимаются при средней температуре $t=0,5·(t\_{c}+t\_{в})$ по формулам:

v = 5,1·10-5·t2+0,115·t + 13.2)·10-6;

β = 1,37·10-8·t2 – 1,45·10-5·t+0,0047;

a = (7,71·10-6·t2 + 0,015·t +1,76)·10-5;

λ = -2,58·10-8·t2 + 7,86·10-5·t + 0,023.

В диапазоне значений произведения 103 < Сr·Рr < 109 коэффициент С в уравнении (13) аппроксимируется уравнением:

 С = 1,54·10-4· Рr3 - 0,017 Рr2 + 0,181 Рr + 0,971, (14)

где степень n = 0,25.

Коэффициент теплоотдачи для условий свободной конвекции определяется по уравнению:

 $α=Nu·λ/d\_{ср}$ , (15)

где $d\_{ср}$ — средний диаметр парогенератора и барабана, м2.

Определить потери теплоты для двух условий: при температурах $t\_{в}$= 10 °С и $t\_{с}$= 50 °С, а также при $ t\_{в}$ = 25°С и$ t\_{с}$ = 80 °С.

 4. Определить удельную электрическую нагрузку парогенератора, кВт/кг:

 $N\_{уд}=N\_{э}/M\_{в}$ (16)

где $N\_{э}$— электрическая мощность парогенератора, кВт; $M\_{в}$ — масса нагреваемой воды, кг.

Порядок оформления отчета

Отчет по работе должен содержать следующее: 1) название и цель работы; 2) краткий конспект теоретического введения; 3) описание схемы установки; 4) порядок выполнения работы; 5) результаты измерений и расчетов (см. приложение); 6) выводы по работе (объяснить полученные зависимости).

**Лабораторная работа №2**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КПД КОТЛА И РАСХОДА TOПЛИВА**

Цель работы: изучение методики ускоренного расчета парового котла на основе экспериментальных данных.

 План выполнения работы

 Электрическая мощность котла принимается из лабораторной работы №2 в диапазоне $N\_{эл}$ = 6-9 кВт. Паропроизводительность по насыщенному пару для электрокотла с КПД $η\_{эл}$ равна: $D\_{н}=N\_{эл}·η\_{эл}/(i\_{п}-i\_{пв})$, где $i\_{п} и i\_{пв}$- - энтальпии сухого насыщенного пара и питательной воды, кДж/кг, на кривой насыщения при давлении Р = 0,2 МПа и температуре 120 °С.

**Необходимо определить расчетный расход топлива** $В\_{р}$ **для эквивалентного по паропроизводительности топливного котла.**

Исходные данные для расчета: вид сжигаемого топлива - каменный уголь Кузнецкого месторождения (марки 2СС); низшая теплота сгорания- $Q\_{н}^{р}$= 24,6 МДж/кг; основные компоненты рабочей массы, %: $С^{р}=$64,1; $Н^{р}$ = 3,3; $А^{р}$ = 18,2; $W^{р}$ = 9,0; температура топлива $t\_{t}$ = 200 °С; подогрев воздуха $t\_{под.в}$ = 350 °С; температура холодного воздуха $t\_{хв}$ = 20 °С; температура уходящих газов $t\_{ух}$ = 130 °С; коэффициент избытка воздуха в уходящих газах $α\_{ух}$ = 1,4; объемы компонентов продуктов сгорания, м3/кг: трехатомных газов $V\_{RO2}$ = 1,2, азота $V\_{N2}$ = 5,16; доли золы в шлаке и уносе, определяемые взвешиванием и из золового баланса ($а\_{шл}$ + $а\_{ун}$ = 1), где $а\_{шл}$ = 0,2 и $а\_{ун}$ = 0,8; теплоемкость шлака при его температуре $t\_{шл}$ = 1380 °С; $C\_{шл}$ = 2,42·10-4·$t\_{шл}$ + 0,79 [кДж/(кг·К)]; содержания горючих соответственно в шлаке и уносе, определяемые взвешиванием и дожиганием лабораторных проб: $Г\_{шл}$ = 30 % и $Г\_{ун}$ = 50 %; объемное содержание продуктов неполного сгорания в уходящих газах, %: СО = 0,5, $Н\_{2}$ = 0,3, $СН\_{4}$ = 0,1. Расчет проводится по методике ускоренного теплового расчета котла [4]:

1. Теоретически необходимый расход воздуха, м3/кг:

$V\_{в}^{°}$ = 0,263·$Q\_{н}^{р}$ + 0,007·$W^{p}$ = 0,0889·$C^{p}$ + 0,265·$H^{p}=Q\_{н}^{р}$/3,7; в МДж/кг.

1. Коэффициент, учитывающий различие низшей и располагаемой теплоты сгорания топлива:

$k\_{q}$ = 1 + (0,055·$t\_{T}$ + 0,35·Δ$t\_{подв.в.}$)· 10-3.

1. $ $Располагаемая теплота, MДж/кг:

$Q\_{р}^{р}$ =$k\_{q}·$ $Q\_{н}^{р}$

1. Энтальпия теоретического объема воздуха, кДж/кг:

$(VC)\_{в}^{°}=V\_{в}^{°}·100·$[1,32 + 0,122·($t\_{ух}·10^{-3}-0,1$)].

1. Потери теплоты с уходящими газами, %:

$q\_{2}$ = $(VC)\_{в}^{°}t\_{ух}$ {$а\_{ун}$ [ 1 - ($t\_{хв}/t\_{ух}$)]($ α\_{ух}-1)$ } /$Q\_{р}^{р}$,

где $Q\_{р}^{р}$ в кДж/кг.

1. Потери теплоты (недожог) от механической неполноты сгорания, %:

$q\_{4}$ = {[$а\_{шл}$ $Г\_{шл}$ /(100 -$ Г\_{шл}$)] + [$а\_{ун}$ · $Г\_{ун}$ /(100- $Г\_{ун}$)]}·32,7· $А^{р}·$100/$Q\_{р}^{р}$,

где $Q\_{р}^{р}$ в кДж/кг.

1. Объем сухих газов (м3/кг):

$V\_{сг}$ = $V\_{RO2}+V\_{N2}^{°}$ +($α\_{ух}-1) V\_{в}^{°}$.

1. Потери теплоты (недожог) от химической неполноты сгорания топлива, %:

$q\_{3}$ = (126,4·СO + 108$·Н\_{2}$ + 358,2$·СН\_{4}$)$ ·V\_{сг}·$ (100 - $q\_{4}$)·100/$Q\_{р}^{р}$,

где $Q\_{р}^{р}$ в Дж/кг.

9. Потери теплоты в окружающую среду, %, в зависимости от номинальной нагрузки $D\_{H}$,кг/с:

$$q\_{5H}=3,6·10^{-11}·D\_{H}^{6}-1,47·10^{-8}·D\_{H}^{5}+2,28·10^{-6}·D\_{H}^{4}^{ }-1,72·10^{\left(-4\right)}·D\_{H}^{3}+0,68·10^{\left(-2\right)}·D\_{H}^{2}-0,143·D\_{H}+2,0$$

1. Потери теплоты в окружающую среду при неноминальной нагрузке D:

$$q\_{5}=q\_{5H}·D\_{H}/D$$

1. Потери теплоты с физической теплотой шлака:

$q\_{6}=a\_{шл}·A^{p}·C\_{шл}·t\_{шл}/Q\_{p}^{p}$,

где $Q\_{p}^{p}$ в кДж/кг.

1. КПД котла брутто, %:

$η\_{к}^{бр}$ = 100 - ($q\_{2}+q\_{3}+q\_{4}+q\_{5}+q\_{6})$

1. Коэффициент сохранения теплоты:

$$φ=\{1-\left[\frac{q\_{5}}{η\_{к}^{бр}+q\_{5}}\right]\}$$

1. Расход топлива, подаваемого в топку В, кг/с:

В = $\frac{Q\_{k}·100}{Q\_{p·}^{p} η\_{к}^{бр}}$ $=2,56·D\_{H}·\left(\frac{10}{P\_{п}}\right)^{0,175}/(Q\_{p}^{p}·η\_{к}^{бр})$

1. Расчетный расход топлива$-B\_{р}$, кг/с:

$B\_{р}$ = В·[1 - ($q\_{4}$/100)].

Порядок оформления отчета

 Отчет по работе должен содержать следующее:

1) название и цель работы; 2) краткий конспект теоретического введения; 3) описание схемы установки; 4) порядок выполнения работы; 5) результаты измерений и расчетов (см. приложение); 6) выводы по работе (объяснить полученные зависимости).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как составляется тепловой баланс и находится КПД парового котла?

2. Как определяются тепловые потери котла?

3. Что такое КПД брутто и КПД нетто котла?

4. Объяснить методологию прямого и обратного теплового баланса.

Приложение

Таблица 1. Результаты экспериментального исследования парогенератора

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Номер серии замеров | Время опыта τ, мин | Среднее давление в парогенераторе Р, МПа | Давление пара перед дроссельным вентилем $Р\_{п}$, МПа | Температура пара tп, °С | Энтальпия пара iп, кДж/кг | Расход конденсата Gк, кг/с | Расход электроэнергии Qэ’ Qэ”, кВт·чкВт$·$ч |
| 1 |  |  |  |  |  |  |  |
| 2 |  |  |  |  |  |  |  |

Таблица 2. Тепловые характеристики парогенератора

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Номер серии | Расход пара Gп, кг/с | Полезные затраты тепла Qп, кВт | Полные затраты тепла Qпол, кВт | Потери теплоты (эксперимент) $Q\_{пот}^{э}$, кВт | Невязка теплового балансаδ,% | КПД парогенератораη, % |
| 1 |  |  |  |  |  |  |
| 2 |  |  |  |  |  |  |

Список литературы

* + - 1. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод) / под ред. Н.В. Кузнецова. ЯМ.: Энергия, 1973. 296 с.
			2. Ковалев А.П. Парогенераторы. М.: Энергоатомиздат, 1985. 396 с.
			3. Парилов В.А., Ушагов С.Г. Испытания и наладка паровых котлов. М.: Энергоатомиздат, 1986, 320 с.
			4. Липов Ю.М. Ускоренный тепловой расчет парового котла. М.: Изд-во МЭИ, 1982. 60 с.