МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МАГНИТОГОРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Г.И. НОСОВА»

ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ И АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ

Кафедра теплотехнических и энергетических систем

ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ

КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА НА МОДЕЛИ

Методические указания к лабораторным работам по дисциплине  
«Котельные установки и парогенераторы» для студентов  
направления 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»

Магнитогорск

2021

Составитель С.В. Матвеев

Исследование аэродинамики котельного агрегата на модели: методиче­ские указания к лабораторным работам по дисциплине «Котельные уста­новки и парогенераторы» для студентов направления 13.03.01 «Промышленная теплоэнергетика». Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск, гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2019. 11 с.

Рецензент

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ «ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА НА МОДЕЛИ»**

**Цель работ**: наблюдение, фиксация и моделирование аэродинамиче­ских процессов на физической модели парогенератора.

**Используемое оборудование:**

Стационарное оборудование: аэродинамическая модель парогене­ратора с вентилятором.

Приборы, получаемые студентами при выполнении работ: микро­манометр для измерения давлений и микрометр для измерения размеров модели.

**Общие сведения**

Одним из важнейших разделов проектирования и эксплуатации современных котельных агрегатов является аэродинамика газовоздушного тракта [1]. Анализ законов и характера движения дымовых газов позволяет создать наиболее совершенную конструкцию и эксплуатировать парогенератор с наибольшей эффективностью.

Основными целями исследования и расчета аэродинамики котельно­го агрегата является: 1) определение производительности тяговой и дуть­евых систем и выбор необходимых тягодутьевых машин на основе расче­та перепада полных давлений в газовом и воздушных трактах; 2) оптими­зация элементов и участков газовоздушного тракта, обеспечивающая минимальные расчетные затраты, а также определение расчетных данных для конструирования газовоздухопроводов.

Оптимизация элементов и участков газовоздушного тракта котла неразрывно связана с нахождением оптимальной скорости газов. Оптимальной скоростью газов является такая, при которой получаются наименьшие расходы на сооружение и эксплуатацию данной поверхно­сти нагрева. С повышением скорости газов увеличивается коэффициент теплопередачи, поэтому уменьшается необходимый размер поверхности нагрева. Это приводит к снижению гидравлического сопротивления при движении рабочей среды внутри труб, что дает выигрыш в мощности питательных насосов. С другой стороны, растут расходы энергии на пре­одоление сопротивлений газового тракта.

В Центральном котлотурбинном институте разработана методика расчета [1] экономических скоростей газов соэк, м/с, которые для паровых котлов с уравновешенной тягой и с шахматным расположением труб в пучках, составляют: в экономайзере - 11-15; в пароперегревателе 10-14; в рекуперативном воздухоподогревателе (при оптимальном соотношении скоростей воздуха и газа = 0,4-0,55) - 9-13 и в регенеративном воздухоподогревателе (при = 0,86-0,92) - 9-11. Для коридорных пучков труб значения ©,к на 40 % выше, чем в шахматных пучках.

Конвективный теплообмен в котельных агрегатах описывается системой дифференциальных уравнений, аналитическое решение которой осложнено серьезными трудностями, что приводит к предпочтительному использованию экспериментальных методов исследования. С целью со­кращения объема исследований необходимо иметь возможность перено­сить результаты, полученные с помощью какой-либо конкретной уста­новки, на аналогичный процесс. Это решается на основе теории подобия. С помощью этой теории размерные физические величины можно объ­единить в безразмерные комплексы, причем число этих комплексов будет меньше числа величин, в них входящих. Теория подобия устанавливает также условия, при которых результаты лабораторных исследований можно распространить на другие явления, подобные изучаемому.

Общие условия подобия физических процессов формулируются в виде трех правил:

процессы в модели и натурном образце должны быть качественно одинаковыми, они должны иметь одинаковую физическую природу и описываться одинаковыми по форме записи дифференциальными уравнениями;

условия однозначности подобных процессов должны быть одина­ковыми во всем, кроме числовых значений размерных постоянных, вхо­дящих в эти условия;

одноименные определяющие безразмерные переменные должны иметь одинаковое числовое значение.

Дифференциальное уравнение, описывающее движение газов в ко­тельных агрегатах в безразмерной критериальной форме, выраженное через критерий Эйлера Ей, обычно приводится к общему виду, опреде­ляющему первое условие подобия:

Еu =f (X, Y, Z, Re, Pr, Gr). (1)

При условии, что число Прандтля Рг для газов практически не зави­сит от температуры и давления, то для данного газа оно является величи­ной постоянной, определяемой атомностью газа. В современных котло­агрегатах доля естественной конвекции, по сравнению с вынужденной конвекцией, пренебрежимо мала, поэтому из уравнения (1) можно ис­ключить критерий Грасгофа Gr.

Таким образом, при исследовании движения газа в модели парогене­ратора с геометрическими размерами X, Y и Z экспериментальные пара­метры можно в первом приближении обрабатывать в виде критерия Эй­лера как функции Рейнольдса Re по формуле

*Еu*= *CR* (2)

где Сиn- коэффициенты, определяемые экспериментально.

Условия однозначности модели для стационарных процессов со­стоят: а) из геометрических условий, характеризующих форму и разме­ры газоходов котла, в которых протекают процессы; б) из физических условий, характеризующих физические свойства рассматриваемой сре­ды; в) из граничных условий, характеризующих особенности протека­ния процесса на границах движения газов.

Для осуществления геометрического подобия все размеры L моде­ли (мод) и натурного образца (обр), влияющие на протекание рассмат­риваемого процесса, должны быть связаны между собой соотношением

(3)

т.е. модель строится как точная копия образца, уменьшенная в Сф раз. При этом следует учитывать, что изменение геометрических размеров не должно привести к качественному изменению процесса в модели. Так, например, при достижении соотношения > 0,00 l, где hcp - длина свободного пробега молекул газа, dэ - эквивалентный (характерный) диаметр канала (газохода), течение газа по своим свойствам отклоняется от течения сплошной среды. Такие изменения происходят в частности при переходе с дозвукового течения газа на сверхзвуковое.

Условие подобия граничных условий чаще всего ограничивается тре­бованием подобия условий входа газа в образец и модель, чего можно достичь путем устройства входного участка модели геометрически по­добным входному участку образца.

Третье условие подобия требует, чтобы одноименные определяющие критерии подобных процессов имели одинаковые значения. При вынуж­денном движении картина течения в первую очередь зависит от числа Рейнольдса Re = /v, где - скорость газа, м/с; - кинематическая вязкость газа, м2/с. Поэтому при моделировании должно быть соблюдено равенство чисел Re образца и модели:

*или =*

Следствием выполнения всех рассмотренных условий будет равен­ство для модели и натурного образца определяющего критерия Эйлера, включающего в себя перепад давления Р, Па, т.е.

или = (5)

где - плотность газа, кг/

Следовательно, определив численно значение критерия Эйлера на модели парогенератора можно найти перепад давления в газовом тракте моделируемого котельного агрегата

Для определения искомых критериев Eu и Re необходимо иметь сле­дующие исходные данные:

физические свойства газов (при давлении 0,1 МПа) в зависимости от температуры, t, °С, кинематическую вязкость воздуха на модели , м2/с, и дымовых газов среднего состава [2] на натурном образце и соответ­ственно плотности и , кг/м3:

=(5,1·+0.115t+13.2)·; =(4,8·+0.11t+11.9)· (6)

= 1,6·−2,4·t+1,29; =3·−3,5·t+1,45

конструктивные характеристики поверхностей нагрева, необходи­мые для определения эквивалентных диаметров dэ;

параметры газового потока - перепад статического давления и скорость на каждом исследуемом участке газового тракта, определяемые на модели экспериментально.

Скорость газа является переменной величиной по длине газового трак­та, различные значения имеют также определяющие размеры. Поэтому критерий Re принимает различные значения в отдельных элементах паро­генератора. В этом случае целесообразно применять метод локального мо­делирования и рассчитывать подобие на отдельных участках газового тракта (в топке, пароперегревателе, экономайзере и воздухоподогревателе).

**Описание лабораторной установки**

Исследование аэродинамики проводится на модели парового котла ТП-150 ТКЗ [3, 4], выполненной в масштабе 1:23 (см. рисунок). Средние температуры, °С, и скорости, м/с, газа на натурном образце: в паропере­гревателе - 900 и 11,2; в экономайзере - 700 и 10,7; в воздухоподогрева­теле - 390 и 12,6. Общее сопротивление газового тракта - 1,9 кПа. Дымо­сос имеет производительность 188500 м3/ч и создает полный напор 3,04 кПа при мощности электродвигателя 250 кВт.

Диаметры труб, мм, и их количество, шт., в элементах натурного кот­ла: в пароперегревателе - 38 и 7000; в экономайзерах - 38 и 2640 (каж­дый); в трубчатом воздухоподогревателе - 51 и 3060.

Модель пароперегревателя 3\* выполнена из проволоки диаметром d = 0,002 м с числом труб в ряду z = 20, при размерах газохода в свету (а·в), м, и длине труб , м, соответственно: на входе −0,18-0,31 и 0,17; на выходе -0,125-0,31 и 0,115.

Пакет 4\* моделирует первую (по ходу движения дымовых газов) сту­пень водяного экономайзера с коридорным расположением труб в газо­ходе с размерами в свету (а·в) = 0,095-0,31 м, с диаметром d = 0,002 м, длиной = 0,095 м и числом труб в ряду z = 64.

Регенеративный воздухоподогреватель 5\* моделируется пластиной с числом отверстий n = 300 диаметром = 0,005 м, установленной в га­зоходе с размерами в свету (а·в) = 0,095-0,31 м.

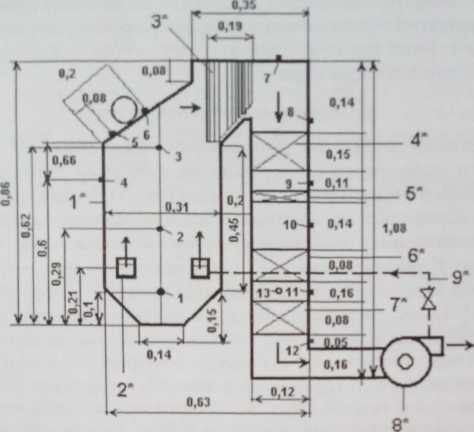


Схема модели парогенератора П-образной компоновки:

1\* -топочная камера; 2\*-горелочныс амбразуры с заслонками;

3\*— пароперегреватель; 4\* -первая ступень экономайзера;

5\* - регенеративный воздухоподогреватель; 6\* - вторая ступень экономайзера;

7\* - трубчатый воздухоподогреватель; 8\* - вентилятор; 9\* - линия рециркуляции

Вторая ступень водяного экономайзера 6\* моделируется пакетом с коридорным расположением трубок диаметром d = 0,005 м, длиной = 0,095 м и количеством в ряду z = 20, установленных в газоходе с разме­рами в свету (а·в) = 0,095-0,31.

Трубчатый воздухоподогреватель 7\* имитируется пакетом с шахматным расположением трубок диаметром d = 0,0045 м, длиной = 0,095 м и количеством в ряду z = 15, установленных в газоходе с размерами в свету (а·в) = 0,095-0,31 м.

Расход воздуха через модель регулируется заслонками на горелочных амбразурах 2\*, имитирующих горелки парогенератора. Перепад статиче­ских давлений на исследуемом участке газового тракта определяется по разности давлений, измеренных до и после контрольного участка с по­мощью микроманометра, присоединяемого одной трубкой к соответ­ствующим патрубкам на наборном щитке, соединенных с отверстиями в стенках модели в точках 1-12. Объемный расход воздуха через модель, необходимый для расчета скорости воздуха на исследуемых участках газового тракта, определяется по динамическому давлению, измеряемому с помощью трубки Прандтля, вводимой в отверстие 13 в хвостовой части

модели и присоединяемой к микроманометру двумя трубками. Для по­вышения точности определения динамического давления измерение производят при строго вертикальном расположении напорной трубки в трех точках по глубине газохода, с последующим нахождением среднего значения динамического давления.

**Порядок выполнения работ**

Перед выполнением лабораторных работ необходимо ознакомиться с описанием экспериментальной установки, методикой измерений и заготовить таблицу записей опытных данных (табл. 1). Включение установки в работу осуществляется преподавателем или лаборантом. Перед вклю­чением производится определенная установка заслонок на горелочных амбразурах 2\* топочной камеры Г. После включения вентилятора модели с помощью микроманометра производятся замеры статических давлений в точках 1-12 (см. рисунок) на наборном щитке установки, а затем измеряется динамическое давление в газоходе с помощью напорной трубки вводимой через отверстие 13. Все замеры повторить для шести вариантов положения заслонок на горелочных амбразурах, характеризующихся раз­личным расходом воздуха через горелки (режимы задаются преподавателем). Результаты измерений сводятся в табл. 1. Работа модели при раз­личных режимах имитирует работу парогенератора при различных схемах включения горелок.

Таблица 1

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Режим | Давление в точках, Па | | | | | | | | | | | | | Рд, |  |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | Па | /с |
| 1 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| …. |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 6 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

**Лабораторная работа № 1**

**ИССЛЕДОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ  
ГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВ**

**Цель работы:** определение полного давления воздуха, необходимо­го для преодоления сопротивления горелочных устройств.

**План выполнения работы**

1. Расход воздуха Vc, м3/с, через модель определяется из уравнения неразрывности при шести режимах по данным измерения динамического давления:

= (7)

где - площадь поперечного сечения газохода в месте расположения трубки Прандтля (0,03 м2); *—*плотность воздуха при температуре окружающей среды, кг/м3 (= 1,6·−2,4·t+1,29).

- показания микроманометра, Па (умноженные на синус угла наклона микроманометра и пересчитанные из условия 1 мм вод. ст. = 9,81 Па).

При принятом в модели факельном сжигании газообразного топлива в камерной топке полное давление принимается равным затрате давления на преодоление сопротивлений, возникающих при прохождении воздуха через амбразуры горелок, включая потерю динамического дав­ления на входе воздуха в топку.

2. Сопротивление горелки Ргор, Па, по воздуху определяется по формуле [1]:

=)2/2 = ϛ (8)

где ϛ - коэффициент сопротивления горелки (для прямоточной газовой горелки принимается равным 1,5) [1];

Vrop -секундный объем воздуха, поступающего через горелки, м3/с;

Frop - выходное сечение горелки (площадь сечения одной горелочной амбразуры на модели 0,002 м2);

n—число открытых горелок, шт.

3. Построить зависимости сопротивления горелок от секундного объема воздуха Vrop = Vc при соответствующем открытии горелочных амбразур для двух значений температуры воздуха 20 и 200°С (плотности воздуха в уравнениях (7), (8) принимаются по формулам (6)).

**Лабораторная работа № 2**

**ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ ТОПКИ КОТЛА**

**Цель работы**: определение скорости истечения воздуха из горелок, распределения давлений по высоте и сечению топочной камеры и изуче­ние аэродинамики камерной топки при различной компоновке горелок.

**План выполнения работы**

По формуле (8) определить скорость воздуха на выходе из горелок (, м2/с, и построить зависимость ее изменения от числа открытых горелочных амбразур.

По измеренным пьезометрическим давлениям в точках 1, 2 и 3 (см. рисунок) построить зависимость распределения давления по высоте то­почной камеры для шести изучаемых режимов. Начало координат совме­стить с параметрами точки 1.

По измеренным пьезометрическим давлениям в точках 4, 5 и 6 (см. рисунок) построить зависимость распределения давления в верхнем углу топочной камеры для шести изучаемых режимов. Начало координат сов­местить с параметрами точки.

Изобразить и охарактеризовать типичные варианты аэродинамики камерных топок, снятые на воздушных моделях, при различных массах подаваемого воздуха через горелки [3, с. 110-111].

**Лабораторная работа № 3**

**ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ КОНВЕКТИВНЫХ  
ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА КОТЛА**

**Цель работы**: определение условий моделирования конвективных поверхностей котельного агрегата.

**План выполнения работы**

Рассчитать скорость воздуха . м/с, в каждой поверхности нагрева при всех режимах по найденным расходам воздуха (7) через модель:

= (9)

где F - расчетное живое сечение газохода.

Расчет живых сечений F, м2, для прохода газов в различных поверх­ностях нагрева производится по следующим формулам [1]:

− для конвективных поперечно омываемых гладкотрубных пучков (пароперегреватель, экономайзер, трубчатый воздухоподогреватель)

F = а·в−zmp d; (10)

для пароперегревателя определяется усредненное сечение потока Fcp при плавном изменении газохода от F' до F" (по уравнению (10))

для регенеративного воздухоподогревателя (пластины с отверстиями)

n (12)

Результаты расчетов занести в табл. 2. Построить график зависимо­сти Р = () для каждой поверхности нагрева.

2. Вычислить значения критериев Рейнольдса и Эйлера в каждой по­верхности нагрева при всех шести режимах. Результаты расчета занести в табл. 2. В логарифмических координатах построить график зависимости lg Eu = (lg Re). Полученные зависимости описываются уравнением (5).

Таблица 2

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Режим | Пароперегре­  ватель | | | | Первая  ступень  экономайзера | | | | Регенератив­ный воздухо­подогреватель | | | | Вторая ступень экономайзера | | | | Трубчатый  воздухоподо­  греватель | | | |
|  | а | 6 | в | г | а | б | в | г | а | б | в | г | а | б | в | г | а | б | в | г |
| 1 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| …. |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 6 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

Примечание а - », б - ; в - Re; г - Еu.

3. Рассчитать постоянные C и n и записать уравнение (5) для каждой поверхности нагрева с численными значениями коэффициентов. Посто­янная п определяется угловым коэффициентом наклона прямой к оси абсцисс:

/(lg) (13)

Постоянная С находится из соотношения для любой точки прямой:

С = /Re”. (14)

Полученные уравнения с численными значениями коэффициентов справедливы как для исследованной модели, так и для образца в интерва­ле найденных чисел Re.

**Лабораторная работа №** 4

**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЦИРКУЛЯЦИИ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ**

**Цель работы**: изучение аэродинамических закономерностей рецир­куляции дымовых газов.

**План выполнения работы**

При исследовании рециркуляции часть воздуха после вентилятора по рециркуляционной линии (см. рисунок) направляется в одну из горелочных амбразур при открытых остальных амбразурах. При рециркуля­ции газов радиационная теплопередача в топке снижается, а температура газов, поступающих в газоходы, и их энтальпия повышаются, кроме того, скорость газов возрастает. В результате теплообмен в конвективных по­верхностях увеличивается.

Определить динамическое давление в точке 13 и расход воздуха через модель при рециркуляции по формуле (7), количество рециркулируемого воздуха (Vc) и коэффициент рециркуляции, %:

= ()100/

Измерить пьезометрические давления в точках 1—12, найти , , Re и Eu для отдельных элементов в газоходе и сравнить их с аналогичным режимом без циркуляции.

**Лабораторная работа № 5  
ВЫБОР ДЫМОСОСОВ И ВЕНТИЛЯТОРОВ**

**Цель работы:** экспериментальное изучение алгоритма выбора тягодутьевых машин

**План выполнения работы**

Сопротивления поверхностей нагрева из пучков труб при поперечном или продольном обтекании газами составляют большую часть общего аэродинамического сопротивления котла. Следовательно, для определе­ния мощности тягодутьевых систем необходимо определить полный пе­репад давления на участке газового тракта, содержащем указанные по­верхности нагрева.

1 Расчетное давление тягодутьевой машины определяется по формуле

(16)

где = + + + + + - полный перепад давления, получается суммированием сопротивления горелок по­терь давления на пароперегревателе на первой и второй ступенях экономайзера , на регенеративном и трубчатом воздухоподо­гревателях , ,Па;

- коэффициент запаса по давлению (принимаемый 1,2).

2. Расчетная производительность дымососа определяется из выражения:

(17)

где V - расход газа, м3/с;

- коэффициент запаса по производительности (принимаемый 1,1);

z - количество машин на парогенератор.

3. Установленная мощность электродвигателя тягодутьевой машины определяется по формуле

N = (18)

где - коэффициент запаса мощности электродвигателя (задается 1,1);

- КПД тягодутьевой машины (в оптимальном режиме для дутьевых вентиляторов = 0,88, а для дымососов = 0,7).

Рассчитать необходимую мощность привода тягодутьевой машины для одного из режимов и сравнить с мощностью электродвигателя на ла­бораторном стенде.

Вычислить необходимую мощность привода для обеспечения опти­мальной скорости газа в одной из поверхностей нагрева по указанию преподавателя. Величину определить как сумму , найденную по графику = (), при необходимости экстраполировать зависимость.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

Закономерности моделирования аэродинамических процессов.

Условия подобия модели котельной установки.

Алгоритм выбора тягодутьевых устройств.

Как определяется сопротивление горелочных устройств?

Назначение рециркуляции дымовых газов.

Методология экспериментального определения сопротивлений газового тракта котла.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аэродинамический расчет котельных установок (нормативный метод) / под ред. С.И. Мочана. Л.: Энергия, 1977. 255 с.
2. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод) / под ред. Н.В. Кузнецова. М.: Энергия, 1973.296с.
3. Ковалев А.П., Лелеев Н.С., Виленский Т.В. Парогенераторы. М.: Энергоатом из дат, 1985. 396 с.
4. Резников М.И., Липов Ю.М. Паровые котлы тепловых электро­станций. М.: Энергоиздат, 1981. 240