

Федеральное агентство по образованию
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГОУ ВПО “АмГУ”

УТВЕРЖДАЮ
Зав.кафедрой энергетики
_____ Н.В. Савина
“ _____ ” _____ 2007 г.

КОТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И ПАРОГЕНЕРАТОРЫ
УЧЕБНО – МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ПО ДИСЦИПЛИНЕ
Для специальности 140101 – “Тепловые электрические станции”

Составитель: ассистент Литвиненко О.Е

Благовещенск 2007 г.

Печатается по решению
Редакционно-издательского совета
энергетического факультета
Амурского Государственного
университета

Литвиненко О.Е

Учебно-методический комплекс по дисциплине “Котельные установки и парогенераторы” для студентов специальности 140101 “Тепловые электрические станции”. – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2007. -69 с.

Учебно-методические рекомендации предназначены для оказания помощи студентам специальности 140101 “Тепловые электрические станции” в изучении дисциплины “Котельные установки и парогенераторы: приобретение знаний о физико - химических процессах сжигания и горения органических топлив, о процессах, протекающих в газозооушном и пароводяном трактах парового котла, о процессах теплообмена в топке и поверхностях нагрева.

Рецензент:

© Амурский государственный университет, 2007

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ, ЕЕ МЕСТО В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ

Государственный образовательный стандарт подготовки инженера по специальности 140101 "Тепловые электрические станции" включает изучение дисциплины " Котельные установки и парогенераторы " в разделе дисциплин специализации ДС.01.

1.1. Цель преподавания дисциплины

Целью изучения дисциплины является приобретение знаний о физико-химических процессах сжигания и горения органических топлив, о процессах, протекающих в газозооушном и пароводяном трактах парового котла, о процессах теплообмена в топке и поверхностях нагрева. В тесной связи с этими процессами рассматриваются схемы и конструктивные решения паровых котлов и их элементов, а также условия получения пара заданных параметров при надлежащих технико-экономических показателях.

1.2. Задачи изучения дисциплины

Задачей изучения дисциплины является обеспечение знаний студентов в области конструкции котельных установок и парогенераторов.

В результате изучения дисциплины студенты должны знать: технологию производства пара на ТЭС и АЭС, конструкции, характеристики и принцип работы паровых котлов, а также всех вспомогательных механизмов; режимы работы и эксплуатации котельной установки и парогенератора; основы организации и управления процессами, обеспечивающие безаварийную работу котельной установки и парогенератора на заданной производительности по пару требуемых параметров, с минимальным расходом топлива и эл. энергии.

Уметь выполнять: поверочный и аэродинамический расчет парогенератора.

1.3. Перечень дисциплин, освоение которых необходимо при изучении данной дисциплины

математика: диф. уравнения

Химия: химическая термодинамика и кинетика: энергетика химических процессов, химическое и фазовое равновесие, скорость реакции и методы ее регулирования.

Теоретические основы теплотехники. Термодинамика: Основные законы и термодинамические процессы идеальных и реальных газов; I, II законы термодинамики; таблицы, i - и p - диаграммы водяного пара; истечение и процесс дросселирования газов и паров; циклы паротурбинных установок.

Теоретические основы теплотехники. Тепломассообмен: основные положения теплопроводности; конвективного теплообмена; теплообмен излучением; конструкция и принцип действия теплообменных аппаратов.

Гидравлика: физические свойства жидкости, сопротивление при течении жидкости в трубах, режимы движения жидкости.

2. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

2.1. Федеральный компонент

Технологическая схема парового котла; роль парового котла и парогенератора в схемах тепловых и атомных электрических станций; характеристики органического топлива; подготовка топлива к сжиганию; основные технологические схемы и конструкция элементов системы топливаподготовки и топливоподачи; механизм горения органического топлива; продукты сгорания; технологические схемы золоудаления и конструкция их элементов; очистка уходящих газов от выбросов вредных

веществ и конструкция элементов системы очистки; тепловой баланс котельного агрегата; принцип конструирования топочных камер котла; процессы с газовой стороны поверхностей нагрева; основные профили паровых котлов; тепловые характеристики и принципиальные схемы парогенераторов атомных электрических станций; внутрикотловая гидродинамика; температурный режим поверхностей нагрева; теплогидравлическая развертка и гидродинамика рабочей среды в поверхностях нагрева; водный режим котельного агрегата; условия работы поверхностей нагрева; принципы конструирования котельного агрегата; тепловой, аэродинамический, гидравлический и прочностной расчет котельного агрегата; нестационарные процессы в парогенераторах и котлах; основные положения эксплуатации котельных агрегатов; пуск и останов котла; обеспечение надежности эксплуатации; парогенераторы утилизационного типа для парогазовых установок; особенности конструкции и расчета; строительные конструкции и вспомогательное оборудование котла; перспективы развития котельных агрегатов и парогенераторов.

2.2. Наименование тем, их содержание, объем в часах лекционных Занятий

Тема 1. Технологическая структура ТЭС (ТЭЦ И КЭС).

Принципиальные схемы ТЭС и АЭС. Место и назначение котельных установок и парогенераторов в схемах электростанций. (2 часа).

Тема 2. Конструкции паровых котлов (4 часа)

Классификация паровых котлов. Основные схемы образования пара в паровых котлах (естественная, принудительная и комбинированная циркуляция, прямоточная схема). Работа котла под разряжением и под наддувом (газовоздушный тракт). Основные характеристики паровых котлов.

Паровые котлы мощных энергетических блоков ТЭС, влияние типа, мощности и режима работы электростанции на конструкцию паровых котлов. Особенности современных паровых котлов. Перспективы развития.

Тема 3. Энергетическое топливо. Основы теории горения (8 часов).

Виды топлива и его состав. Теплота сгорания топлива и приведенные характеристики. Технические характеристики твердых топлив, мазута и природных газов.

Способы сжигания твердого топлива. Системы пылеприготовления. Характеристики угольной пыли. Оптимальная степень размола. Оборудование систем пылеприготовления. Подготовка к сжиганию мазута и природного газа.

Основы кинетики химических реакций. Механизм горения топлива. Кинетическая и диффузная области горения. Воспламенение топливно-воздушной смеси. Фронт горения. Интенсивность выгорания топлива.

Состав продуктов сгорания. Коэффициент избытка воздуха на работающем котле. Токсичные вещества в дымовых газах и меры защиты внешней среды.

Тема 4. Топочные камеры (пылеугольных) паровых котлов (4 часа).

Основные характеристики пылеугольных камерных топок.

Конструкция топочных газомазутных камер. Мазутные форсунки. Организация сжигания природного газа. Комбинированные газомазутные горелки.

Тема 5. Теплообмен в поверхностях нагрева парового котла. (4 часа)

Тепловые характеристики настенных экранов. Излучательная способность факела. Расчет теплообмена излучением в топочной камере. Лучистый теплообмен в газоходах котла. Конвективный теплообмен в газоходах котла. Выбор скоростей газов и рабочей среды в конвективных поверхностях нагрева.

Тема 6. Технологические схемы золоудаления. Очистка уходящих газов от выбросов вредных веществ и конструкция элементов системы очистки. (4 часа)

Тема 7. Характеристики, параметры и уравнения движения рабочей среды. (2 часа)

Основные уравнения гидродинамики и теплообмена водопарового тракта. Характеристики движения пароводяной смеси. Гидравлические сопротивления. Теплофизические свойства рабочей среды в тракте энергетического блока.

Тема 8. Тепловой баланс парового котла

Тепловой баланс парового котла. Определение коэффициента полезного действия. Характеристики тепловых потерь.

Тема 9. Горелочные устройства и их размещение. (2 часа)

Тема 10. Парогенераторы атомных электрических станций (2 часа).

Классификация парогенераторов АЭС и их особенности. Парогенераторы с водным теплоносителем. Парогенераторы с жидкометаллическим и газовым теплоносителями. Реактор как генератор пара.

Тема 11. Гидродинамика парогенерирующих и пароперегревательных поверхностей нагрева. (8 часа)

Классификация разомкнутых гидравлических систем. Гидродинамическая устойчивость потока в горизонтальных парообразующих трубах. Гидродинамическая устойчивость потока в вертикальных парообразующих трубах. Тепловая развертка. Влияние коллекторов на распределение рабочей среды по трубам. Пульсация потока.

Закономерность естественной циркуляции. Методика расчета контуров циркуляции (простой и сложный контуры циркуляции). Полная гидравлическая характеристика парообразующих труб и ее значение для оценки надежности циркуляции. Гидродинамика опускных труб и ее влияние на надежность циркуляции. Гидравлическое сопротивление опускных труб. Попадание пара в опускные трубы. Образование паровых воронок. Захват пара из водяного объема барабана.

Закономерности барботажного процесса. Динамический слой в паропромысловых устройствах. Влияние неравномерности тепловыделения и примесей на динамический двухфазный слой.

Тема 12. Водный режим парогенератора (4 часа)

Загрязнения питательной воды и их влияние на работу оборудования. Растворимость примесей в водном теплоносителе и закономерности образования отложений. Продукты коррозии конструкционных материалов. Переход примесей из воды в насыщенный пар.

Методы вывода примесей из цикла котлов с естественной циркуляцией, непрерывная и периодическая продувка. Водный режим прямоточных паровых котлов (гидразинно-аммиачный, нейтральный, комплексонный водный режим). Безнакипной водный режим барабанных котлов. Методы получения чистого пара (сепарация капельной влаги из пара, промывка пара, ступенчатое испарение). Нормирование качества питательной воды.

Тема 13. Процессы на внешней стороне поверхностей нагрева. (2 часа)

Механизм образования отложений. Абразивный износ конвективных поверхностей нагрева. Коррозия поверхностей нагрева (высокотемпературная и низкотемпературная коррозия). Поведение металла при высоких температурах. Металл паровых котлов. Расчет прочности. Контроль за металлом в эксплуатации.

Тема 14. Условия работы поверхностей нагрева котла.

Теплопроводность парообразующих поверхностей и их компоновка. Методы повышения надежности топочных экранов и их конструкции (методы повышения надежности циркуляции, увеличение кратности циркуляции, секционирование экранов, методы повышения надежности топочных экранов прямоточных котлов). Особенности газоплотных экранов и методы повышения их надежности. Футерованные экраны.

Методы регулирования температуры перегретого пара. Классификация пароперегревателей. Радиационные и ширмовые пароперегреватели. Условия работы пароперегревателей и методы повышения надежности. Компоновка пароперегревателей. Методы регулирования температуры перегретого пара.

Компоновка низкотемпературных поверхностей нагрева. Экономайзеры. Воздухоподогреватели. Методы повышения коррозионной стойкости воздухоподогревателей.

Тема 15. Компоновка и расчет парового котла. (4 часа)

Компоновка парового котла. Каркас парового котла. Обмуровочные ограждения. Тепловая изоляция. Тепловая схема котла. Тепловой, аэродинамический расчет котла (задачи и методы). Конструктивный и поверочный расчеты парового котла.

Тема 16. Эксплуатация паровых котлов. (4 часа)

Эксплуатационные режимы и показатели. Стационарные режимы эксплуатации котлов. Нестационарные режимы работы в диапазоне допустимых нагрузок. Пусковые схемы блоков. Режимы останова и сброса нагрузки котла. Режимы растопки котла и пуска блока.

Тема 17. Разновидности парогенераторов (2 часа).

Котлы – утилизаторы. Схемы, режимы работы.

2.3. Практические занятия.

Задача 2.5. Определить состав продуктов сгорания в уходящих газах ($V_{RO_2}, V_{N_2}^0, V_{H_2O}^0, V_{CO_2}^0, V_{CO}^0$) при сжигании донецкого угля марки Д (приложение, табл. П1, топливо №1) при 1) $a = 1$ и избытке воздуха в уходящих газах $a_{yx} = 1,35$.

Задача 2.6. Как изменится состав продуктов сгорания в уходящих газах (данные см. задачу 2.5) при изменении W^p с 13 до 18 и 23%?

Задача 2.7. Как изменится соотношение объемов воздуха через горелку и продуктов сгорания за пароперегревателем для условий задачи 2.4. при работе котла под наддувом?

Задача 2.8. Определить теоретические объёмы воздуха и продуктов сгорания при разомкнутой схеме сушки Назаровского бурого угля (приложение, табл. П1, топливо №15). Принять влажность пыли 15,0%.

Задача 2.9. Определить необходимое сечение канала горячего воздуха при температуре $300^\circ C$, избыточном давлении в газоходе 3000 Па для котла, сжигающий нерюнгринский уголь (приложение, табл. П1, топливо №16) в

количестве 23,8 кг/с. При решении задачи принять скорость воздуха 15 м/с, количество газоходов 2, форма- круглая (1й вариант) и прямоугольная с соотношением сторон 2:1 (2й вариант); принять отношение объёма воздуха к теоретически необходимому $\beta=1,16$ и барометрическое давление 750 мм рт.ст. (99990 Па).

Задача 2.10. Определить объём воздуха для горения и объём продуктов сгорания в топке при сжигании эстонских сланцев (приложение, табл.П1, топливо №17). Избыток воздуха в топке принять $\alpha=1,3$; сжигание- камерное.

Задача 2.11. Как изменится объём и объёмные доли трёхатомных газов и водяных паров, если при сжигании челябинского бурого угля (приложение, табл.П1, топливо №12) избыток воздуха увеличить с 1,2 до 1,3?

Задача 2.12. Определить энтальпию теоретически необходимого объёма воздуха при сжигании 1 кг АШ (приложение, табл.П1, топливо №5) и 1 кг Назаровского бурого угля (приложение, табл.П1, топливо №15) при температуре 350°С и сопоставить их одновременно с соотношением теплот сгорания этих топлив.

Задача 2.13. Как изменится энтальпия продуктов сгорания уходящих газов при сжигании ангреновского угля (приложение, табл.П1, топливо №13), если его влажность увеличить с 34,5 до 45%, температуру уходящих газов принять 160°С, $\alpha_{yx}=1,4$.

Задача 2.14. Как изменится энтальпия продуктов сгорания на выходе из топки при сжигании назаровского бурого угля (приложение, табл.П1, топливо №15), если замкнутую схему сушки заменить на разомкнутую с влажностью $W^{nl}=13\%$? Принять $\vartheta_T=1100^\circ\text{C}$, $\alpha_T=1,20$.

Задача 2.15. Насколько изменит удельную энтальпию и температуру газов в поворотной камере котла присос холодного воздуха в количестве $\alpha_{прс}=0,1$ при $t_{х.в}=20^\circ\text{C}$? Принять избыток воздуха в газовом потоке до

поворотной камеры $\alpha'_{п.к} = 1,13$, температуру газов 850°C , топливо-экибастузский уголь (приложение, табл.П1, топливо №9).

Задача 3.1. Определить располагаемую теплоту донецкого угля марки Г (отсевы)

(приложение, табл.П1, топливо №2) при температуре холодного воздуха 30°C , температуре предварительного подогрева воздуха 50°C . Отношение количества воздуха на входе в котёл к теоретически необходимому $\beta' = 1,35$, сушка топлива- замкнутая, физической теплотой топлива пренебречь.

Задача 3.2. Насколько меняется Q_p^p бурого угля Челябинского месторождения (приложение, табл.П1, топливо №12) при изменении температуры предварительного подогрева воздуха с 40 до 80°C ? При решении задачи принять $\beta' = 1,22$.

Задача 3.3. Определить тепловосприятие котла $Q_{пол}$ при наличии отбора пара на собственные нужды. Расход пара на собственные нужды принять из промежуточного пароперегревателя в количестве 40 кг/с с параметрами $t_{не} = 450^{\circ}\text{C}$, $p = 2,55\text{ МПа}$. Принять параметры и расходы свежего пара по примеру 3.1, при этом расход пара на входе в промежуточный перегреватель увеличить с $163,9$ до $203,9\text{ кг/с}$.

Задача 3.4. Определить располагаемую теплоту фрезерного торфа (приложение, табл.П1, топливо №18), а также энтальпию уходящих газов при изменении влажности W^p с 50 до 40% . Принять: температурного воздуха 30°C , предварительного подогрева воздуха на входе в воздухоподогреватель 50°C ; отношение расхода воздуха на входе в воздухоподогреватель к теоретически необходимому $\beta' = 1,25$; избыток воздуха за котлом $\alpha_{yx} = 1,40$; температуру уходящих газов $\vartheta_{yx} = 150^{\circ}\text{C}$; температуру топлива принять 20°C .

Задача 3.5. Насколько изменятся потери с уходящими газами для бурого угля Назаровского месторождения (приложение, табл.П1, топливо №15) при изменении ϑ_{yx} со 160 до 140°C (за счёт очистки поверхностей

газового тракта)? Принять избыток воздуха в уходящих газах 1,26, температуру воздуха на входе в паровой котёл 50°C , относительный избыток воздуха на входе в паровой котёл $\beta' = 1,22$, потери теплоты с механическим недожогом $q_4 = 0,5\%$.

Задача 3.6. Определить расход топлива для газоплотного котла производительностью 736,11 кг/с на следующие параметры пара:

Температура перегретого пара
 $545/545^{\circ}\text{C}$ Температура питательной воды
 270°C Давление свежего пара
 на выходе $25,02\text{ МПа}$ Давление
 питательной воды $30,41\text{ МПа}$
 Расход пара через промежуточный перегреватель
 $605,56\text{ кг/с}$ Температура пара на входе в промежуточный перегреватель
 295°C Давление пара после промежуточного перегревателя
 $3,92\text{ МПа}$ Давление пара на входе в промежуточный
 перегреватель $4,17\text{ МПа}$ Топливо – природный газ
 (приложение, табл.П2, топливо №7)

При проведении расчётов:

Температура воздуха перед паровым котлом
 30°C Предварительный подогрев воздуха
 Отсутствует Избыток воздуха на
 выходе из парового котла $1,30$ Температура
 уходящих газов 120°C
 Впрыск в промежуточный пароперегреватель
 Отсутствует

Задача 3.7. Определить потери q_2 для топлив с различной влажностью при одинаковой температуре уходящих газов $\vartheta_{\text{yx}} = 140^{\circ}\text{C}$ и

$\alpha_{yx} = 1,45$; $t_{x,n} = 30^\circ C$; $t'_n = 30^\circ C$; $t_{TL} = 0^\circ C$. Принять следующие топлива по табл.

П1: АШ(№3), кузнецкий СС (№6), назаровский уголь (№15) и

соответственно q_4 , равное 4; 1; 0,5%, $\alpha_{yn} = 0,95$.

Задача 3.8. Определить потери q_2 при сжигании в паровом котле экибастузского угля (приложение, табл. П1, № 9) при $\vartheta_{yx} = 140^\circ C$ и избытке воздуха на выходе из парового котла соответственно 1,20; 1,30; 1,40; 1,50.

Принять $t_{x,e} = 30^\circ C$, $t'_e = 30^\circ C$, $q_4 = 2\%$, $t_{TL} = 0^\circ C$. Сопоставить изменение объёмов газов (см. гл.2) и потерь q_2 .

Задача 4.1. Определить геометрические характеристики топочной камеры котла Е-500-13,8 ГМ с $t_{n,e} = 545^\circ C$, имеющего такой же профиль топочной камеры, как в примере 4.1, и отличающийся только шириной топки, составляющей по осям труб 13520 мм. Количество горелок 8, лазов 4.

Задача 4.2. Определить лучевоспринимающую поверхность экрана стены топки, имеющей ширину 13 и высоту 21 м. Экран выполнен из гладких труб диаметром 42 мм с шагом 46 мм; в нижней части экрана имеется четыре амбразуры горелок диаметром устья 1,2 м и два лаза диаметром 0,45 м, в верхней части экрана – восемь сопл для рециркуляции газов размером каждое 0,2*0,45 м. В нижней части экран ошипован на высоту 2 м по всей ширине.

Задача 4.3. Определить коэффициент излучения факела ε_ϕ при сжигании Березовского бурого угля (приложение, табл. П1, топливо №14). Избыток воздуха за топкой принять $\alpha_T = 1,2$, температуру продуктов сгорания за ней $1050^\circ C$, эффективную толщину излучающего слоя топки 5 м, мельницы – молотковые, $\alpha_{yn} = 0,75$.

Задача 4.4. Определить коэффициент излучения топочной камеры ε_T , при сжигании нерюнгринского угля (приложение, табл. П1, топливо №16). Принять избыток воздуха за топкой $\alpha_T = 1,2$, температуру газов за топкой $\vartheta_T = 1200^\circ C$, эффективную толщину излучающего слоя топки $s=7,0$ м,

мельницы – среднеходные, средний коэффициент эффективности экранов $\psi_{\text{ср}} = 0,41$, $\alpha_{\text{yn}} = 0,95$, топка – с уравновешенной тягой, т.е. $p_T = 0,1$ МПа.

Задача 4.20. Как изменится тепловосприятие радиационного перегревателя в примере 4.19, если его конструкцию выполнить из двояных U-образных труб $\varnothing 42$ мм, с шагом 45 мм, радиусом внутренней петли 105 мм, в ленте принять 20 труб. Принять расположение одной петли в зоне II, второй в зоне III по всему периметру топки; тепловые потоки в зонах принять по примеру 4.19; $q_{\text{л2}} = 235,7$ и $q_{\text{л3}} = 157,6$ кВт/м².

Задача 4.21. Для условий примера 4.21 определить тепловосприятие топочных ширм при сжигании природного газа (приложение, табл. П2. топливо №8).

Задача 5.1. Для котла Е-16-9,8-560-ГМ (БКЗ-160-100 ГМ) при сжигании мазута определить выход оксидов азота при замене вихревых на прямоточные горелки с тангенциальным направлением горелочных струй в сечении топки. Принять избытки воздуха в топке и присосы, температуру горячего воздуха по условиям примера 5.3 и расчётные данные топки котла из примера 5.4. Расчёт произвести без учёта рециркуляции газов в топку, скорость воздуха на выходе из горелок 45 м/с.

Задача 5.2. Для котла Пп-1000-25-545-ГМ (ТГМП-314 А) в соответствии с условиями примера 5.3 определить выход NO_2 при сжигании природного газа с $Q_{\text{н}}^{\text{с}} = 36,3 \text{ МДж} / \text{м}^3$ и вводе газов рециркуляции в горячий воздух в количестве 5%. Тепловую эффективность стен зоны горения принять по мазуту. Избыток воздуха на выходе из топки принять $\alpha_T = 1,05$. Температура газов на выходе из топки $\vartheta_T' = 1230^\circ \text{C}$, остальные данные по котлу принимаются без изменений.

Задача 5.3. Для котла Пп-1000-25-545 К (ТПП-312 А) (пример 5.1) определить концентрацию оксидов азота при сжигании донецкого ГСШ, но с твёрдым шлакоудалением. Принять те же исходные данные, кроме $\psi_{\text{т.Г}} = 0,45$ и $\vartheta_T'' = 1150^\circ \text{C}$.

Задача 6.1. Определить геометрические характеристики

$(E_r, f_1, F_1, \sigma_1, \sigma_2, s)$ ступени промежуточного пароперегревателя, выполненного из вертикальных змеевиков с коридорным расположением труб наружным диаметром 60 мм и толщиной стенки 5 мм (рис.6.3). Ширина газохода $a=16320$ мм, количество трубных секций 116 шт., число параллельных труб в одной секции 3, поперечный шаг $s_1 = 138$ мм. При расчёте обогреваемой длины труб участки изгибов считать соответственно для первого, второго и третьего змеевиков: 150, 225 и 300 мм.

Задача 6.2. Определить скорость продуктов сгорания и вторично-перегреваемого пара во входной ступени пароперегревателя из труб $\varnothing 50$ мм с толщиной стенки 4 мм и коридорным горизонтальным расположением труб в опускном газоходе. При проведении расчётов принять: размеры газохода $a=16,32$ м и $h=6,36$ м. Количество трубных секций 176 шт. длиной каждая 6,2 м, число параллельных труб в одной секции – четыре. Расход топлива $B_p = 19,28$ кг/с, объём продуктов сгорания на 1 кг сгоревшего топлива $V_r = 13,25$ м³/кг, температура продуктов сгорания на входе в ступень 697°С и на выходе 450°С, давление пара соответственно 4,17 и 4,07 МПа.

Задача 6.3. Как изменится скорость продуктов сгорания и пара в промежуточном перегревателе при изменении средней температуры продуктов сгорания с 596 до 650°С и вторично-перегреваемого пара с 380°С до 420°С (при $p=4,12$ МПа), а также давления в нём с 4,12 МПа до 2,65 МПа (при $t=380$ °С). При проведении расчётов принять: расход топлива 19,28 кг/с, объём продуктов сгорания на 1кг сгоревшего топлива 13, 25 м³/кг, живое сечение газоходов для прохода продуктов сгорания 49,2 м³, расход пара 216,11 кг/с и сечение для прохода пара 0,975 м³.

Задача 6.4. Сравнить скорости воды в экономайзерах с коридорным расположением труб параллельно фронту и перпендикулярно фронту. Принять следующие исходные данные: диаметр труб 32мм, толщину стенки труб 4 мм, поперечный шаг 85 мм, продольный шаг 47мм, размеры газохода по глубине $b=3,5$ м, по ширине $a=12,5$ м, количество параллельных труб в

одной трубной секции – три, расход воды через экономайзер $D=138,89$ кг/с, средняя температура воды $t=268^{\circ}\text{C}$, среднее давление $p=16,2$ МПа.

При расположении труб параллельно фронту принять количество секций поверхности по ширине газохода – две, свободное расстояние между осями труб и стенкой во всех случаях принять 100 мм.

Задача 6.5. Насколько изменится скорость продуктов сгорания. Если увеличить размер газохода по глубине с 3,5 до 4,0 м при сохранении относительного поперечного шага труб. Остальные данные, необходимые для определения живого сечения, принять по задаче 6.4. при расположении змеевиков параллельно фронту. Принять длину змеевиков 6,1 м, температуру продуктов сгорания 700°C , расход топлива 17,25 кг/с, объём газов на 1 кг топлива $V_r = 10\text{ м}^3 / \text{кг}$.

Задача 6.6. Определить необходимое сечение конвективной шахты при проектировании котла для сжигания Березовского бурого угля (приложение, табл. П1, топливо №14) и сопоставить его с необходимым сечением газохода при сжигании сушонки этого угля. При проведении расчётов принять: расход сырого угля $B_p = 35,05\text{ кг} / \text{с}$, объём продуктов сгорания на 1 кг топлива $V_r = 5,89\text{ м}^3 / \text{кг}$; для сушонки Березовского угля принять соответственно $B_p = 25,5\text{ кг} / \text{с}$, $V_r = 7,434\text{ м}^3 / \text{кг}$; температура продуктов сгорания на входе в конвективную шахту 800°C . Геометрические характеристики поверхности нагрева: трубы $\varnothing 36$ мм с поперечным шагом 140 мм, ширина газохода 18,0 м, длина труб 8,85 м (две секции по ширине). Допустимую скорость газов по условиям износа принять для сырого угля 8,8, для сушонки 8,65 м/с.

Задача 6.7. Как изменится коэффициент теплоотдачи конвекцией α_k при увеличении количества труб по ходу газов с 4 до 15 шт. Принять: $w_r = 10\text{ м} / \text{с}$; $d=2$ мм; $s_1 = 120\text{ мм}$; $s_2 = 50\text{ мм}$; $\vartheta = 900^{\circ}\text{C}$; парциальное давление водяных паров $r_{H_2O} = 0,100$; расположение труб – коридорное.

Задача 6.8. Определить как меняется коэффициент теплоотдачи α_k для пучков труб с шахматным расположением при изменении поперечного шага s_1 со 120 до 138 мм и при изменении продольного шага с 50 до 70 мм. Принять $z_2 = 10$ (остальные данные по задаче 6.7.).

Задача 6.9. Как повлияет на коэффициент теплоотдачи α_k при коридорном расположении труб в пучке замена сжигания в котле природного газа на мазут? При решении задачи принять $w_r = 25 \text{ м/с}$, $\sigma_1 = 3,3$, $\sigma_2 = 1,5$, $d = 45$ мм, $z_2 = 10$, $\vartheta = 800^\circ \text{C}$. Природный газ – топливо №6 (табл.П2 приложения); $\alpha_r = 1,05$; мазут – топливо №19 (табл.П1 приложения), избыток в газоходе $\alpha_r = 1,03$.

Задача 6.10. Сопоставить значения коэффициента теплоотдачи конвекцией α_k для труб коридорного пучка при атмосферном давлении и увеличении давления в газоходе до $p = 0,5$ МПа и сохранении постоянной линейной скорости продуктов сгорания.

Задача 6.11. Определить коэффициент теплоотдачи конвекцией α_k при наружных диаметрах труб $d_1 = 38 \text{ мм}$ и $d_2 = 32 \text{ мм}$. При решении задачи принять: $\vartheta = 900^\circ \text{C}$, $r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,100$, $w_r = 10 \text{ м/с}$, $\sigma_1 = 3,0$, $\sigma_2 = 1,5$, $z_2 = 10$, пучки с коридорным и шахматным расположением труб.

Задача 6.12. Поверхность нагрева конвективного пароперегревателя с коридорным расположением труб имеет фестонированную часть. Определить средний коэффициент теплоотдачи конвекцией α_k , если известно, что поверхность нагрева 898 м^2 , сечение для прохода газов в фестонированной части $F_{r,\phi} = 83,3 \text{ м}^2$, шаги труб этой части $s_1 = 276$ мм и $s_2 = 55$ мм, в нефестонированной части $F_r = 71,4 \text{ м}^2$, $s_1 = 138$ мм, $s_2 = 55$ мм.

Трубы имеют диаметр 36 мм, z_2 в фестонированной части равно 12, в нефестонированной части 6. Принять: в обеих частях среднюю температуру газов $\vartheta = 1100^\circ \text{C}$, $V_r = 8,85 \text{ м}^3 / \text{кг}$, $B_p = 22,0 \text{ кг/с}$, $r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,08$.

Задача 6.13. Как изменится коэффициент теплоотдачи излучением α_{λ} при увеличении температуры продуктов сгорания каменного угля с 600 до 800 °C? Принять: коэффициент излучения объёма $\varepsilon = 0,15$, температуру загрязнённой стенки $t_s = 450^\circ\text{C}$.

Задача 6.14. Определить коэффициент теплоотдачи излучением α_{λ} при увеличении продольного шага s_2 от 48 до 64 мм. При решении задачи принять: $d=32$ мм; $s_1=138$ мм; $\vartheta = 900^\circ\text{C}$; $t_s = 400^\circ\text{C}$; $r_{H_2O} = 0,08$; $r_{II} = 0,226$; топливо – каменный уголь; безразмерная концентрация золы в продуктах сгорания $\mu_{\text{зл}} = 0,019$; тип мельницы – среднеходные, давление в топке $p=0,1$ МПа.

Задача 6.15. Как изменится коэффициент теплоотдачи излучением α_{λ} при изменении безразмерной концентрации золы в газовом потоке от 0,010 до 0,020 кг/кг? (Остальные условия – по задаче 6.14.).

Задача 6.16. Сравнить коэффициенты теплоотдачи α_2 в экономайзере и в экранах котла докритического давления ($p=14,715$ МПа) при одинаковой массовой скорости рабочей среды 1000 кг/($\text{м}^2 \cdot \text{с}$) и температурах соответственно 250 °C и $t_{\text{нас}}$. Принять внутренний диаметр труб 20 мм. Зависит ли α_2 в экранах, в трубах которых протекает кипящая вода, от массовой скорости?

Задача 6.17. Как изменится коэффициент теплоотдачи α_2 при повышении температуры среды с 200 до 300 °C при $p=14,715$ МПа, p_w 900 кг/($\text{м}^2 \cdot \text{с}$) и $d_{\text{вн}}=24$ мм? Проанализировать изменение теплофизических свойств рабочей среды при повышении температуры и выявить влияние температуры среды на коэффициент теплоотдачи α_2 .

Задача 6.18. Как изменится значение α_2 при повышении скорости пара с 10 до 30 м/с и одинаковых других параметрах? Установить дополнительное влияние на изменение α_2 перехода на другой внутренний диаметр труб – с 34 до 20 мм.

Задача 6.19. Определить коэффициент теплопередачи в конвективном пароперегревателе, расположенном в горизонтальном газоходе при сжигании мазута без очистки поверхности. Для выполнения расчётов принять: скорость 15 м/с; коэффициенты $\alpha_k = 80 \cdot 10^{-3} \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, $\alpha_n = 25 \cdot 10^{-3} \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, $\alpha_2 = 6 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Задача 6.20. Определить коэффициент теплопередачи в поверхности нагрева переходной зоны с шахматным расположением труб при сжигании канскоачинских бурых углей. При решении задачи принять: скорость продуктов сгорания 12 м/с; наружный диаметр труб 42 мм; продольный шаг $s_2 = 75$ мм; коэффициент теплоотдачи с газовой стороны конвекцией $\alpha_k = 90 \cdot 10^{-3} \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; то же излучением $\alpha_n = 30 \cdot 10^{-3} \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; термическим сопротивлением со стороны рабочей среды $1/\alpha_2$ пренебречь.

Задача 6.21. Определить, какая погрешность будет иметь место при определении коэффициента теплопередачи в шахматном пучке, но без учёта внутреннего термического сопротивления $1/\alpha_2$ вместо более точной формулы по табл. 6.2? При решении задачи принять: $\alpha_2 = 9,00 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; остальные данные из задачи 6.20.

Задача 6.22. В соответствии с опытными данными примем коэффициент загрязнения пароперегревателя $\varepsilon_z = 1,72 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{кВт}$ вместо рекомендованного $\varepsilon_z = 4,3 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{кВт}$. Насколько изменится коэффициент теплопередачи в данном пароперегревателе при сохранении постоянными значений α_k и α_2 ?

При решении задачи принять: $\alpha_k = 90 \cdot 10^{-3} \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $\varepsilon = 0,15$; $\alpha_2 = 5 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $t = 450^\circ \text{С}$; $\vartheta = 850^\circ \text{С}$; воспринятый тепловой поток $q_g = 45 \text{ кВт}/\text{м}^2$.

Задача 6.23. Определить коэффициент загрязнения для конвективного пароперегревателя с шахматным расположением труб при скорости продуктов сгорания 8 и 16 м/с. Принять: $d = 32$ мм; $s_2 = 48$ мм;

! $\varepsilon = 2,6 \text{ м}^2 \cdot \text{К} / \text{кВт}$, сжигаемое топливо – каменный уголь. Как изменится коэффициент загрязнения при переходе на сжигание торфа?

Задача 6.24. Как влияет на коэффициент загрязнения трубного пучка с шахматным расположением труб изменение продольного шага s_2 ? Принять в исходном варианте: $w_r = 7 \text{ м/с}$; диаметр труб 36 мм; продольные шаги труб $s_2 = 55$ и 75 мм; топливо – торф; ! $\varepsilon = 2,6 \text{ м}^2 \cdot \text{К} / \text{кВт}$.

Задача 6.25. Сопоставить коэффициенты загрязнения при сжигании каменных углей при диаметрах труб 32, 42 и 60 мм при одинаковых условиях $s_2/d = 1,4$; ! $\varepsilon = 0$; $w_r = 11 \text{ м/с}$.

Задача 6.26. Как изменится коэффициент тепловой эффективности и коэффициент теплопередачи экономайзера с коридорным расположением труб при переходе на сжигание подмосковного бурого угля вместо тощего каменного угля? Принять в расчёте: $\alpha_k = 100 \cdot 10^{-3} \text{ кВт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $\alpha_n = 15 \cdot 10^{-3} \text{ кВт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Задача 6.31. Найти температуру продуктов сгорания за экономайзером с шахматным расположением труб. При решении принять: $\vartheta' = 357^\circ \text{С}$; $H' = 6972 \text{ кДж/кг}$; ! $\alpha_{np} \neq 0,02$; $H_{к.в}^0 = 257,5 \text{ кДж/кг}$; $\varphi = 0,9972$; $B_p = 22,278 \text{ кг/с}$; $r_{H_2O} = 0,072$; $r_H = 0,219$; $\mu_{ст} = 0,0146 \text{ кг/кг}$; $V_r = 8,48 \text{ м}^3 / \text{кг}$; сжигаемое топливо – нерюнгринский уголь СС; тип мельниц – молотковая; очистка труб экономайзера – дробью; рабочая среда $t' = 250^\circ \text{С}$; $h' = 1086,5 \text{ кДж/кг}$; $D = 186,11 \text{ кг/с}$; движение среды – противоточное. Конструктивные характеристики: $f_b = 0,188 \text{ м}^2$; $F_r = 73,3 \text{ м}^2$; $F = 6972 \text{ м}^2$; трубы $\varnothing 28 \text{ мм}$ с толщиной стенки 4 мм; шаги труб $s_1 = 85 \text{ мм}$; $s_2 = 44 \text{ мм}$; $s = 0,128 \text{ м}$; отношение $l_0 / l_H = 1,0$.

Принять $\varepsilon_s = 4,47 \text{ м}^2 \cdot \text{К} / \text{кВт}$ и энтальпия газов при температурах $\vartheta = 400, 300$ и 200°С соответственно $H = 5078,6; 3755,6$ и $2407,2 \text{ кДж/кг}$.

Задача 6.32. Как изменится температура продуктов сгорания за экономайзером, если коэффициент загрязнения ε_s увеличится с 4,47 до 6,19

$\text{м}^2 \cdot \text{К} / \text{кВт}$? При решении задачи принять необходимые данные из задачи 6.3, коэффициент теплоотдачи от газов к стенке α_1 принять постоянным и $k = 77,8 \cdot 10^{-3} \text{ кВт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Задача 6.33. Определить необходимую расчётную поверхность нагрева первой ступени промежуточного пароперегревателя, расположенной в опускном газоходе и очищаемой дробью. При выполнении расчётов принять: по газовой среде: $\vartheta' = 697^\circ \text{C}$; $\vartheta'' = 496^\circ \text{C}$; $H' = 13746 \text{ кДж/кг}$; $H'' = 9533 \text{ кДж/кг}$; $Q_{\text{доп}} = 327 \text{ кДж/кг}$; $\alpha_{\text{пр}} \neq 0$; $\phi = 0,9936$; $B_p = 19,278 \text{ кг/с}$; $V_r = 13,25 \text{ м}^3 / \text{кг}$; $r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,1168$; $r_{\text{II}} = 0,2566$; сжигаемое топливо – мазут, избыток воздуха за топкой $\alpha_t < 1,03$; по рабочей среде: $D = 216,11 \text{ кг/с}$; $t' = 310^\circ \text{C}$; $h' = 2982,3 \text{ кДж/кг}$; $p' = 4,12 \text{ МПа}$; $p'' = 4,07 \text{ МПа}$; предварительные конструктивные данные: $F_{\text{II}} = 0,975 \text{ м}^2$; $F_r = 49,2 \text{ м}^2$; трубы $\varnothing 50 \text{ мм}$ с толщиной стенки 4 мм, расположение труб – коридорное с шагами $s_1 = 92$ и $s_2 = 80 \text{ мм}$; $z > 10$; $s = 0,195$; $l_0 / l_{\text{II}} = 2,284$.

Задача 6.34. Как изменится необходимая поверхность нагрева, если приращение энтальпии пара в выходной ступени промежуточного пароперегревателя увеличится с $h = 157,3 \text{ кДж/кг}$ (задача 6.33) до $h = 200 \text{ кДж/кг}$? Энтальпии продуктов сгорания принять при температурах $\vartheta = 900, 800$ и 700°C соответственно $H_r = 7268,3; 6380,7; 5505,6 \text{ кДж/кг}$. Коэффициент теплопередачи принять по задаче 6.33 $k = 68,9 \cdot 10^{-3} \text{ кВт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$, данные по топливу и воде также принять по задаче 6.33.

Задача 7.1. Насколько изменится предельная температура горячего воздуха при вводе 3% рециркуляции продуктов сгорания перед воздухоподогревателем? Исходные данные принять по примеру 7.1.

Задача 7.2. Задана температура продуктов сгорания на входе в одноступенчатый воздухоподогреватель $\vartheta'_{\text{вп}} = 350^\circ \text{C}$. Определить балансовую температуру уходящих газов для вариантов выполнения воздухоподогревателя трубчатый и регенеративным при сжигании Назаровского бурого угля (приложение, табл. П1, топливо №15). Принять:

! $t_m = 45^\circ\text{C}$; $t'_B = 35^\circ\text{C}$; $\alpha' = 1,20$; $\beta'' = 1,23$; $\varphi = 0,9972$, присосы в ТВП 0,03; в РВП 0,20.

Задача 7.3. Как изменится действительное предельное тепловосприятие РВП при появлении в газовом тракте котла присосов воздуха в количестве $\sum \alpha = 0,06$? Принять: $\vartheta_{yx} = 150^\circ\text{C}$; $t'_B = 50^\circ\text{C}$; $t_m = 40^\circ\text{C}$; $\varphi = 0,9972$; $\alpha_{T1} = 1,03$ и $\alpha_{T2} = 1,09$ (при наличии присосов), присосы в РВП $\alpha_{РВП} = 0,20$; $\beta'' = 1,03$; принять $t_{Г.В}$ в исходном варианте 300°C .

Задача 7.4. Возможно ли в одноступенчатом ТВП обеспечить подогрев воздуха до $t_{Г.В} = 280^\circ\text{C}$ при сжигании кузнецкого угля СС (приложение, табл.П1, топливо №6) при t_m не менее 35°C ? При расчётах принять: $t_\sigma = 115^\circ\text{C}$; $t'_B = 30^\circ\text{C}$; $\alpha_{yx} = 1,23$; $\alpha' = 1,20$; $\beta'' = 1,14$; $\varphi = 0,9972$.

Задача 7.5. Насколько изменится температура горячего воздуха в РВП, установленном в “расщеплённом газоходе”, если долю продуктов сгорания через РВП уменьшить с 0,911 до 0,80? Остальные данные принять по примеру 7.2.

Задача 7.6. Определить, как изменятся поправочные коэффициенты к температурному напору ψ при одновременном повышении входной (и соответственно выходной) температуры продуктов сгорания в ТВП на 20°C , оставив температуры воздуха неизменными. При решении задачи принять за исходные: $\vartheta' = 410^\circ\text{C}$; $\vartheta_{yx} = 150^\circ\text{C}$; $t_{Г.В} = 380^\circ\text{C}$; $t'_B = 50^\circ\text{C}$. Задачу решить для двух вариантов выполнения воздухоподогревателя: при четырёхкратном и двукратном перекрёстном токе.

Задача 7.7. Как изменится коэффициент теплопередачи от продуктов сгорания к стенке труб при переходе на трубы $\varnothing 51$ мм с толщиной стенки $\delta = 1,6$ мм? Исходные данные принять по примеру 7.8. При расчётах учесть изменение сечения для прохода газов с учётом того, что трубы диаметром 40 мм имели шаги $s_1 = 73$ и $s_2 = 51$ мм. Коэффициентом теплоотдачи излучением пренебречь.

Задача 7.8. Найти коэффициент теплоотдачи от стенки РВП к воздуху в холодной части воздухоподогревателя. Принять следующие исходные данные: $t' = 70^{\circ}\text{C}$; $t'' = 111^{\circ}\text{C}$; $\vartheta' = 180^{\circ}\text{C}$; $\vartheta'' = 138^{\circ}\text{C}$; $V_B^0 = 10,08 \text{ м}^3 / \text{кг}$; $\beta_{РВП}'' = 1,03$; присос в РВП ! $\alpha = 0,20$; $F_B = 51,9 \text{ м}^2$; $d_{ЭКВ} = 11,3 \text{ мм}$; тип набивки – горячий; $l / d_{ЭКВ} > 50$; $B_p = 20,083 \text{ кг/с}$.

Задача 7.9. Найти коэффициент теплопередачи в вертикальном трубчатом воздухоподогревателе (Выходная ступень) с двумя ходами среды при наличии в ступени одной промежуточной доски. При проведении расчётов принять: скорость продуктов сгорания $w_r = 10,9 \text{ м/с}$; скорость воздуха 8 м/с ; трубы наружным диаметром 40 мм с толщиной стенки $1,6 \text{ мм}$; шахматное расположение труб с шагами $s_1 = 60$ и $s_2 = 42 \text{ мм}$; $z_2 > 10$; топливо – каменный уголь; $r_{H_2O} = 0,072$; $r_H = 0,219$; $\mu_{за} = 0,0146 \text{ кг/кг}$; мельницы – молотковые; $\vartheta' = 493^{\circ}\text{C}$; $\vartheta'' = 357^{\circ}\text{C}$; $t_B' = 221^{\circ}\text{C}$; $t_B'' = 391^{\circ}\text{C}$. Как изменится коэффициент теплопередачи, если выполнить ступень в виде двух отдельных кубов – без промежуточной доски?

Задача 7.10. Найти по данным примера 7.11. необходимую температуру предварительного подогрева воздуха на входе в РВП t_B' исходя из условия, что для предотвращения забивания липкими отложениями набивки t_{CT} должна быть не ниже чем $t_{CT} = t_{CT} - 35^{\circ}\text{C}$. Удовлетворит ли принятая высота ‘холодной’ части РВП условиям бескоррозионной работы ‘горячей’ части РВП при новой температуре t_B' ?

Задача 7.11. Определить необходимую высоту ‘холодной’ части РВП из условия работы бескоррозионной работы ‘горячей’ части. Принять: температуру уходящих газов $\vartheta_{yx} = 120^{\circ}\text{C}$; $t_B' = 60^{\circ}\text{C}$; остальные данные по примеру 7.9.

Задача 7.12. Найти температуру продуктов сгорания на выходе из ‘горячей’ части РВП из условия её бескоррозионной работы при сжигании антрацитового штыба (приложение, табл.П1, топливо №5). При решении принять: $\vartheta_{yx} = 120^{\circ}\text{C}$; $t_B' = 50^{\circ}\text{C}$; $\alpha' = 1,20$; ! $\alpha_{ВП} = 0,16$; $\beta'' = 1,1$;

$\alpha_{\Gamma}^{\Gamma, \text{ч}} = 62,8 \cdot 10^{-3} \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $\alpha_{\text{В}}^{\Gamma, \text{ч}} = 49,5 \cdot 10^{-3} \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,0454$ при $\alpha_{\text{yx}} = 1,36$;
 $p = 0,1 \text{ МПа}$; $\varphi = 0,9972$; $x_{\Gamma} = x_{\text{В}} = 0,458$.

Задача 7.13. Как изменится необходимая высота ‘холодной’ части РВП, если зольность антрацитового штыба на рабочую массу повысится с 30,2 по задаче 7.12 до 40%? Принять: $\alpha_{\Gamma}^{\text{х.ч}} = 43,5 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;
 $\alpha_{\text{В}}^{\text{х.ч}} = 34,3 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $\varphi = 0,98$; $x_{\Gamma} = x_{\text{В}} = 0,458$; $B_p = 44,9 \text{ кг/с}$; поверхность нагрева на 1 м высоты ‘холодной’ части 10000 м^2 ; количество аппаратов $n_{\text{en}} = 2$.

Задача 7.14. Найти необходимую температуру продуктов сгорания на входе в сменяемую часть трубчатого воздухоподогревателя (ТВП) при сжигании донецкого тощего угля (приложение, табл.П1, топливо №4). При решении принять: $\alpha' = 1,20$; $\alpha_{\text{ВП}} = 0,015$; $\beta'' = 1,20$; $r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,066$; $\alpha_{\text{yn}} = 0,85$;
 $\vartheta_{\text{yx}} = 150^{\circ}\text{C}$; $t'_B = 66^{\circ}\text{C}$; $\alpha_{\Gamma} = 40,7 \cdot 10^{-3} \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $\alpha_{\text{В}} = 77,7 \cdot 10^{-3} \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $\varphi = 0,996$.

Задача 7.15. Определить необходимую поверхность нагрева трубчатого воздухоподогревателя для котла к блоку 300 МВт при условии охлаждения продуктов сгорания с $\vartheta' = 375^{\circ}\text{C}$ до $\vartheta_{\text{yx}} = 150^{\circ}\text{C}$. При выполнении расчётов принять: $t'_B = 50^{\circ}\text{C}$, трубы диаметром 40 мм с толщиной стенки 1,6 мм и шахматным расположением труб с шагами $s_1 = 60$ и $s_2 = 41$ мм; схему включения – четырёхкратный перекрест с двумя промежуточными досками $z_2 > 10$, скорость воздуха $w_{\text{В}} = 8,7 \text{ м/с}$, газов $w_{\Gamma} = 11,1 \text{ м/с}$; $\alpha' = 1,20$; $\alpha'' = 1,23$;
 $\beta'' = 1,16$; $\varphi = 0,9972$. Расход топлива $B_p = 17,444 \text{ кг/с}$; $r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,091$; теоретические энтальпии продуктов сгорания и воздуха равны: при 200°C $H_{\Gamma}^0 = 1729,1 \text{ кДж/кг}$, $H_{\text{В}}^0 = 1477,9 \text{ кДж/кг}$; при 400°C $H_{\Gamma}^0 = 3564,0 \text{ кДж/кг}$, $H_{\text{В}}^0 = 3006,1 \text{ кДж/кг}$.

Задача 7.16. Как изменится необходимая поверхность нагрева трубчатого воздухоподогревателя при переходе на шаги $s_1 = 52$ и $s_2 = 40$ мм при сохранении скоростей газов и воздуха по задаче 7.15?

Задача 7.17. Найти зависимость температуры воздуха от расхода воздуха ω через воздухоподогреватель, включенный параллельно по продуктам сгорания и воздуху. При проведении расчёта принять: доли расхода воздуха (от количества воздуха, поступающего в топку, $\beta''=1,20$)- $\omega=0,20$, $0,25$ и $0,30$; долю расхода газов $x=0,2$ во всех вариантах. Значения избытков воздуха в газовом тракте $\alpha'=1,2$ и $\alpha''=1,205$. Конструктивные данные ТВП и характеристики топлива принять по примеру 7.15. Коэффициент α_k принять постоянным (по варианту с $\omega=0,2$). Энтальпия газов при $\alpha=1,205$ составляет: при 100°C $H_{\Gamma}=1004$ кДж/кг, при 200°C $H_{\Gamma}=2032$ кДж/кг.

Задача 7.18. Как изменится температура уходящих газов при использовании каскадной схемы с пропуском через первый ход 80% воздуха, а остальные 20% - через байпасный воздухопровод со смешением перед вторым ходом. Принять исходные данные по примеру 7.13 с использованием коэффициента теплопередачи, температуру поступающего в ТВП воздуха принять 30°C .

Задача 8.1. Рассчитать геометрические характеристики ступени радиационно-конвективного пароперегревателя Т-образного профиля котла для блока 800 МВт, расположенного в переходном газоходе. Радиационно-конвективный пароперегреватель имеет два хода пара: сначала пар проходит секции в средней части газохода (половина ширины), а затем крайние секции. Общее количество секций по ширине одного газохода 40 шт., каждая секция состоит из 18 труб диаметром 42 мм с толщиной стенки 7 мм, расположенных с продольным шагом $s_2=45$ мм. Ширина газохода 30,44 м. Основные размеры секции в одной части газохода приведены на рис. 8.4.

Задача 8.2. Какова будет поверхность нагрева, сечения для прохода пара, эффективная толщина излучающего слоя в радиационно-конвективном пароперегревателе котла паропроизводительностью $D=186,11$ кг/с при

использовании труб различных диаметров: $\varnothing 32$ мм с толщиной стенки 5 мм; $\varnothing 36$ мм с толщиной стенки 6 мм и $\varnothing 38$ мм с толщиной стенки 6 мм?

Принять, что при ширине газохода 18000 мм расстояние между секциями 720 мм, зазоры между трубами 3 мм. Поверхность нагрева считать упрощенно – без учёта поверхности дистанционирующих труб; радиусгиба внутренней трубы во всех вариантах принять 135 мм. Количество труб в секции 7000 мм.

Задача 8.3. какие необходимо применить трубы, чтобы уменьшить поверхность нагрева радиационно-конвективного пароперегревателя примерно в 1,5-1,6 раза? Сколько и каких размеров будут секции ширм? В исходном варианте 56 секций глубиной 3800 мм из труб $\varnothing 32$ мм с толщиной стенки 6 мм, радиусгиба внутренней трубы 135 мм. Ширина газохода 31,0 м. Указание: при решении задачи рассмотреть диаметры труб 36, 38, 42 мм с зазором между трубами 3 мм, толщину стенок принять кратной 0,5 мм, выполнить условие равнопрочности – постоянство отношения толщины стенки δ к наружному диаметру $\delta/d = \text{const}$.

Задача 8.4. При различных глубинах секций радиационно-конвективного пароперегревателя с выбрать шаг между секциями s_1 , при котором угловой коэффициент с входного на выходное $\varphi_{\text{ш}}$ будет равен 0,10. Принять глубину секций 2,0 и 3,0 м.

Задача 8.5. Как изменится количество лучистой теплоты из топки, воспринятой радиационно-конвективным пароперегревателем при увеличении высоты ширм с 7,0 до 9,0 м? При решении задачи принять: поперечный шаг между секциями $s_1 = 600$ мм; глубину секций 2,8 м; поверхность входного окна пароперегревателя 174,0 м² (высота 9,0 м); поверхности выходного окна 88,8 м² (высота 7,0 м) и 114,2 мм² (высота 9,0 м); топливо – мазут; $B_p = 19,278$ кг/с; $r_{H_2O} = 0,119$; $r_{II} = 0,257$; интенсивность теплового потока $q_{\text{л.ш}} = 19,5 \text{ кВт} / \text{м}^2$; среднюю температуру газов в пароперегревателе 1160°С; коэффициент взаимного теплообмена (топка - ширма) $\beta = 0,76$.

Задача 8.6. Как изменится количество лучистой теплоты из топки в единицу времени, если вместо мазута будет сжигаться твёрдое топливо? Произвести сопоставление при одинаковых геометрических размерах радиационно-конвективного пароперегревателя: высота секций 9000 мм; глубина 2800 мм; шаг между ними 600 мм; поверхность входного окна 225,3 м²; выходного окна 114,2 м²; данные по мазуту принять по задаче 8.5; твёрдое топливо $B_p = 63,7$ кг/с; $r_{H_2O} = 0,168$; $r_{II} = 0,305$; $\mu_{зл} = 0,017$; мельницы – среднеходные; $q_{л.ш} = 19,5 \text{ кВт/м}^2$. Температуры газов в обоих случаях принять на выходе из топки 1150°С, за пароперегревателем 1050°С.

Задача 8.7. Определить балансовое тепловосприятие радиационно-конвективного пароперегревателя, лучистую теплоту, которую он получает из топки и приращение энтальпии пара в нём. При выполнении расчётов принять: топливо – мазут; $\vartheta' = 1272^\circ\text{C}$; $\vartheta'' = 1101^\circ\text{C}$; $H' = 24350$ кДж/кг; $H'' = 20758$ кДж/кг; $Q_{доп} = 420$ кДж/кг; $t' = 365^\circ\text{C}$; $p' = 14,72$ МПа; $p'' = 14,32$ МПа; $h' = 2814,4$ кДж/кг; $B_p = 14,44$ кг/с; $\varphi = 0,997$; $D_{ш} = 175,75$ кг/с; $q_{л.ш} = 57,9 \text{ кВт/м}^2$; $F_{л.вх} = 171 \text{ м}^2$; эффективную толщину излучающего слоя $s = 0,872$ м; давление в газоходе $p = 0,1$ МПа; $r_{H_2O} = 0,187$; $r_{II} = 0,281$; $\varphi_{ш} = 0,174$.

Задача 8.8. Сопоставить в радиационно-конвективном пароперегревателе количественно коэффициенты теплоотдачи от газов к стенке конвекцией α_k и излучением α_l при скоростях продуктов сгорания 3,5 и 8,0 м/с. При выполнении расчётов принять: трубы диаметром $\varnothing 36$ мм с шагами $s_1 = 710$, $s_2 = 39$ мм; $z_2 > 10$; $F_{ш} = 860 \text{ м}^2$; $s_{эф} = 0,840$ м; $\vartheta_{cp} = 1000^\circ\text{C}$; $t_{cp} = 400^\circ\text{C}$; $\alpha_2 = 5 \text{ кВт/(м}^2 \cdot \text{К)}$; $B_p = 22,278$ кг/с; $\varphi = 0,997$; $r_{H_2O} = 0,072$; $r_{R_2O} = 0,148$; $\mu_{зл} = 0,0146$ кг/кг; мельницы – среднеходные; $Q_o = 800$ кДж/кг; $Q_{л.ш} = 300$ кДж/кг; топливо – каменный уголь, умеренно шлакующий с очисткой поверхности.

Задача 8.9. Как изменится коэффициент теплопередачи в радиационно-конвективном пароперегревателе при переходе со сжигания мазута на природный газ? При выполнении расчётов принять:

$\alpha_k = 38,0 \cdot 10^{-3} \text{ кДж} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $\alpha_n = 65,4 \cdot 10^{-3} \text{ кДж} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $\alpha_2 = 5,5 \text{ кДж} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

$Q_{\text{л}} / Q_{\text{б}} = 0,117$ при сжигании природного газа. Скорость продуктов сгорания 7,0 м/с, трубы $\varnothing 32$ мм с шагом $s_2 = 35$ мм, $\xi = 0,85$.

Задача 8.10. Как изменится необходимая поверхность радиационно-конвективного пароперегревателя котла по примеру 8.8 при сжигании природного газа и обеспечении охлаждения газов в том же интервале температур газов? При выполнении задачи учесть возможность увеличения продольного шага труб в секциях: принять $s_2 = 40$ мм с сохранением количества секций. Для продуктов сгорания принять: $r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,193$; $r_{\text{II}} = 0,283$; $p = 0,1$ МПа; $q_{\text{л.ш}} = 80 \text{ кВт} / \text{м}^2$; $B_p = 10,338 \text{ м}^3 / \text{с}$; $Q_{\text{доп}} = 283 \text{ кДж} / \text{м}^3$; $\varphi = 0,966$; $V_{\text{г}} = 10,99 \text{ м}^3 / \text{м}^3$. Энтальпию продуктов сгорания принять при $\vartheta = 1300^\circ \text{C}$ $H_{\text{г}} = 22521 \text{ кДж} / \text{м}^3$; при $\vartheta = 1200^\circ \text{C}$ $H_{\text{г}} = 18707 \text{ кДж} / \text{м}^3$; $\alpha_{\text{т}} = 1,1$, характеристики пара на входе $t' = 380^\circ \text{C}$; $h' = 2868,8 \text{ кДж} / \text{кг}$.

2.4. Лабораторные работы (методические указания)

Лабораторная работа №1. Определение содержания влаги в твердом топливе

Влага в топливе.

Основные теоретические положения. Влага и зола составляют внешний балласт топлива, уменьшающий содержание горючей массы топлива. Влага топлива снижает температурный режим в топке и увеличивает потери тепла с уходящими газами. Повышение влажности на 1% вызывает большее уменьшение низшей теплоты сгорания топлива, чем аналогичное изменение зольности топлива, так как часть тепла топлива тратится на испарение влаги.

При изменении влажности топлива от $W_{1,r}$ до $W_{2,r}$ теплота сгорания рабочей массы топлива $Q_{i,r}$; может быть определена по формуле, кДж/кг

$$Q_{i2,r} = (Q_{i1,r} + 24,42 W_{1,r}^r) \frac{100 - W_{2,r}^r}{100 - W_{1,r}^r} - 24,42 W_{2,r}^r$$

где 24,42 - теплота парообразования при температуре измерения 25°C из расчета на 1 % выделившейся воды, кДж/кг. Изменение Q_i^r приведет к изменению теоретической температуры горения t_a °C :

$$t_a = \frac{Q_T}{[(VC)_{с.г} (VC)_{H_2O}]_{t_a}},$$

Где Q_T - полное тепловыделение в топочной камере, которое можно условно принять для твердого топлива равным $Q_T \approx Q_i^r$; $(VC)_{с.г}$, $(VC)_{H_2O}$ - соответственно средние суммарное теплоемкости 1 кг сухих газов и водяных паров, кДж/(кг °C).

Теоретической (адиабатической) температурой сгорания топлива ϑ_a °C (T_a , К) называется такая температура, которая имела бы место в топке в условиях полного отсутствия теплообмена между продуктами сгорания и поверхностями нагрева, т.е., если бы процесс протекал адиабатически.

Ее определяют по полному тепловыделению в топке Q_T при коэффициенте избытка воздуха на выходе из топки α''_T

Энтальпия газов в зоне максимального тепловыделения определяется, кДж/кг

$$I_r^0 = \sum v_i c_i \vartheta_a$$

Энтальпия газов на выходе из топки I_T'' изменится в большей степени, чем I_r^0 , вследствие увеличения потери теплоты в топке на испарение влаги топлива. Следовательно, изменяются радиационная и конвективная составляющие теплообмена. При увеличении влажности топлива радиационная составляющая $Q_{\text{л}}$, возрастет,

$$Q_{\text{л}} = \phi(Q_T - I_T'')$$

а конвективная составляющая теплообмена Q_K уменьшится вследствие снижения температуры газов по газовому тракту

$$Q_K = \alpha H \Delta t,$$

где Δt - разность температур окружающей среды и наружной стенки топки, °C;

α - коэффициент теплоотдачи от стенки к окружающей среде, Вт/м² С. Для принятого типа топочного устройства температура факела в топке может быть определена по формуле, К или °C

$$T_\phi = 0.925 \sqrt{T_a * T_T''},$$

$$t_\phi = T_\phi - 273,$$

где T_T'' - температура газов на выходе из топки, К.

Содержание влаги в топливе необходимо учитывать при выборе методов подготовки топлива к сжиганию, систем транспортировки и хранения топлива. Содержание влаги в ископаемом твердом топливе в основном определяется его химической природой и степенью углефикации. В меньшей мере оно зависит от условий залегания, добычи, транспорта и хранения топлива. Влажность топлива в залежах снижается с увеличением степени углефикации. Например, свежееизвлеченный торф содержит 85-90 % влаги; бурые угли - от 50-60% до 30-40% ; каменные угли – от 8 до 25% в зависимости от марки, а в антраците влага составляет 4 – 8%.

В зависимости от формы связи с топливом различают влагу :

- $W^{АДС}$ - адсорбционную ;
- $W^{КАП}$ - капиллярно-конденсированную;
- $W^{КОЛ}$ - коллоидную;

$W^{МЕХ}$ - механически удерживаемую;

- $W^{КРИСТ}$ - кристаллогидратную.

Влага адсорбционная, $W^{АДС}$, содержится в субмикроскопических порах топлива, адсорбируясь на поверхности и образуя прочно связанные с топливом тончайшие пленки толщиной не более нескольких диаметров молекулы. Она зависит от пористости угля, а также от температуры и влажности среды, в которой находится топливо. Адсорбционная способность топлива определяет так называемые гигроскопические его свойства.

Влага капиллярная, $W^{КАП}$, удерживается капиллярами топлива. Ее количество тем больше, чем выше пористость топлива. При длительном хранении на воздухе вся она улетучивается (при относительной влажности воздуха ниже 100 %).

Влага коллоидная, $W^{КОЛ}$, является химически связанной и входит непосредственно в структуру коллоидов, она тем выше, чем меньше степень углефикации.

Влага механически удерживаемая, $W^{Мех}$, влага, которая остается на внешней поверхности топлива после его контакта с водой, она тем выше, чем выше степень измельчения топлива и его зольность.

Влага кристаллогидратная, $W^{КРИСТ}$, влага, связана только с минеральной частью топлива и входит в состав соединений ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$; $CaSO_4 \cdot 2H_2O$) и др.

Первые четыре вида влаги ($W^{Мех}$, $W^{КОЛ}$, $W^{КАП}$, $W^{АДС}$) практически полностью удаляются при прокаливании топлива при температуре 102 -105 °С + 25° С.

Кристаллогидратная влага может быть полностью удалена только при температурах 400-700 С, но ее количество весьма мало, в связи с чем при проведении анализов ее, как правило, не учитывают. Наличие кристаллогидратной влаги следует учитывать лишь при определении влажности сланцев и углей, обладающих высокой зольностью $A^{пр} > 2(\% - \text{кг})/\text{мДж}$.

При проведении технических анализов топлива столь тонкой градации разновидностей влаги не проводят. В этом случае наиболее широко применяется следующая классификация видов влаги в твердом топливе:

$$W_t = W_{ex} + W_h,$$

где W_t , - влага общая, т.е. общее содержание внешней влаги в топливе и влаги воздушно-сухого топлива;

W_{ex} - влага внешняя, т.е. часть общей влаги топлива, которая удаляется при высушивании до воздушно-сухого состояния;

W_h - влага воздушно-сухого топлива, т.е. часть общей влаги топлива, которая остается в нем после высушивания до воздушно-сухого состояния, кроме того в зависимости от анализируемой пробы вводятся следующие обозначения.

W^a - влага аналитической пробы, т.е. содержание влаги в пробе с крупностью зерен менее 0,2 мм;

$W^{III} = W_h$ - внутренняя, или условно гигроскопическая влага (оставшаяся часть влаги, прочно удерживаемая твердым топливом).

Описание лабораторной установки. Установка состоит из электрического сушильного шкафа 1 (рис.1) с терморегулятором, тигля 2 с навеской топлива и с крышкой 3, термоэлектрического преобразователя 4 и автоматического потенциометра 5 для контроля температуры внутри сушильного шкафа, эксикатора 6 с химическим реактивом, поглощающим влагу, и аналитических весов с разновесами (на рисунке не показаны).

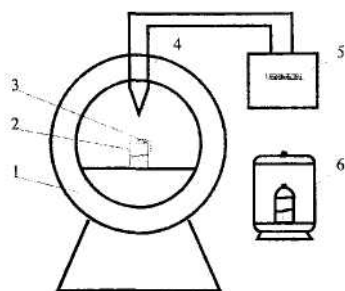


Рис. 1. Установка сушильного шкафа

Методика определения влаги в твердом топливе.

Существует ряд стандартных методов определения содержания влаги в топливе. В данной работе определение аналитической влаги в топливе осуществляется косвенным методом сушки в соответствии с ГОСТ 27314 - 91 (ИСО 589-81).

Сущность метода заключается в высушивании навески аналитической пробы топлива (максимальный размер зерен не более 2 мм) в сушильном шкафу при температуре 105-110°C и вычислении массовой доли потери влаги.

Анализ проводят параллельно в двух навесках и выполняют следующим образом:

1. Взвешивают тару - тигли с крышками или стеклянные бюксы с притертыми крышками.

2. Пробу в открытой таре перемешивают и помещают в тигли навески топлива по 1+0,1 г.

3. Тигли с полуприкрытыми крышками помещают в предварительно нагретый до 105-110 ° С сушильный шкаф (рис.3.) и сушат при этой температуре 30 мин для каменных углей, антрацитов и горючих сланцев; 60 мин для бурых углей и лигнитов. Время высушивания считают с того момента, когда температура в шкафу, понизившаяся при установке тиглей, снова достигнет 105-110 ° С.

4. После высушивания тигли с навесками топлива закрывают крышками, вынимают из шкафа, охлаждают сначала на воздухе 2-3 мин на металлической подставке, затем в эксикаторе до комнатной температуры, после чего взвешивают.

Проводят контрольные сушки в течение 30 мин каждая до тех пор, пока расхождение между двумя взвешиваниями будет не более 0,001 г. За результат принимают самую низкую массу.

Результаты испытаний заносят в таблицу наблюдений (табл.3.1).

Таблица 1.

Наименование	Обозначение	Результат
Масса пустого тигля с крышкой, г	m1	
Масса тигля с крышкой и навеской	m2	
Масса навески пробы топлива, г	m=m2-m1	
Масса тигля с топливом после	m3	
Масса топлива после высушивания, г	m4=m3-m1	
Потеря массы при сушке навески, г	$\Delta m = m - m4$	

В данной работе определение аналитической влаги в топливе выполняется основным методом.

Обработка результатов. Массовую долю внешней влаги (W_{ex}), влаги воздушно-сухого топлива (W_h) и аналитической пробы (W^a) в процентах вычисляют по формуле, %

$$W = \frac{\Delta m}{m} * 100,$$

где Δm - потеря массы при сушке навески, г;

m - масса навески пробы топлива, г.

Результаты вычисляют с точностью до 0,1%.

Допускаемые расхождения результатов двух параллельных определений в одной лаборатории не должны превышать значений, указанных в табл. 3.2.

Таблица 2.

Виды влаги	Допускаемые расхождения при массовой доле влаги в топливе %	
	до 10	св.10
Влага воздушно-сухого топлива (W_h)	0,3%	3%
Влага аналитической пробы (W^a)	0,2%	2%

Общая влага как сумма внешней и влаги воздушно-сухого топлива (W_t) определяется по формуле

$$W_t = W_{ex} + W_h * \frac{100 - W_{ex}}{100},$$

Где W_{ex} - массовая доля внешней влаги в топливе, %;

W_h - массовая доля влаги в воздушно-сухом топливе, %

Для целей классификации пересчет массовой доли общей влаги бурых углей в рабочем состоянии на беззольное состояние (W^{daf}) проводят по формуле

$$W^{daf} = \frac{100 - W_t^r}{100 - A^r},$$

где A^r - зольность в рабочем состоянии, %;

W_t^r - массовая доля общей влаги в рабочем состоянии, %.

Результат записывают с точностью до 0,1%.

По полученным результатам уточняется влажность сжигаемого топлива и сравнивается с расчетными характеристиками топлива, приведенными в Приложении 1; делается вывод о марке анализируемого топлива, определяется отличие натурального топлива, сжигаемого на ТЭЦ, от характеристик проектного топлива; анализируются возможные изменения в работе котельной установки при переводе на непроектное топливо.

Влияние влажности топлива на работу котельной установки.

Как правило, при переводе котлов на сжигание непроектных топлив с ухудшенными теплотехническими характеристиками, в частности, с повышенной влажностью, высоким содержанием летучих, приходится предусматривать реконструкцию систем подготовки топлива. Конкретно, например, систему пыле-приготовления с шаровыми барабанными мельницами (ШБМ) с промбункером и сушкой топлива горячим воздухом переводят на системы пылеприготовления с молотковыми мельницами (ММ) с прямым вдуванием и сушкой топлива либо смесью горячего воздуха и дымовых газов, либо вообще сушкой топлива инертными топочными газами. Это повышает взрывобезопасность пылесистемы, снижает энергозатраты на пуск и останов по сравнению с системами пылеприготовления с ШБМ, тем более что при работе на влажных топливах снижается производительность

ШБМ в результате замазывания внутренней брони влажным топливом; упрощается система пылегазовоздухопроводов, снижается инерционность системы и т.д.

Лабораторная работа №2. Определение зольности топлива

Минеральные примеси и образование золы при сжигании топлива. В практике проектирования и эксплуатации парогенераторов и оборудования тепловых электростанций, работающих на твердом топливе, необходимы данные о количественном содержании минеральных примесей золы, их составе и свойствах. Именно эти характеристики определяют наиболее важные решения по организации топочного процесса, тепловую и конструктивную схемы котлоагрегата, выбор оборудования систем шлакоудаления и золоулавливания.

Минеральные примеси являются внешним балластом топлива, уменьшающим содержание горючей массы; они содержатся во всех видах топлива. Большая их часть не связана с органической массой топлива. По происхождению все минеральные примеси можно разделить на: первичные, вторичные и третичные, накопившиеся в пластах топлива в процессе его образования.

Первичные, так называемые внутренние примеси попадают в топливо в процессе его образования. Вторичные и третичные - внешние, попадают в топливо при его добыче, хранении и транспортировке.

Внутренние примеси сравнительно равномерно распределены по массе топлива, и для данного месторождения состав их более или менее одинаков. Количество и состав внешних минеральных примесей зависит от способа добычи топлива, его транспорта и хранения.

Содержание минеральных примесей в топливах колеблется в широких пределах: для каменных и бурых углей - от 5 до 45 % ; в горючих сланцах - от 50% до 80% ; в торфе - от 2 до 30 %; в древесном и других топливах растительного происхождения от 0,5 до 3,5 %.

В жидком топливе (мазуте) минеральные примеси содержатся в количествах, не превышающих десятых долей процента (Приложение 1).

По составу минеральные примеси представляют собой сложные многокомпонентные соединения разнообразных веществ. В основном преобладают силикаты алюминия ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 - 2\text{H}_2\text{O}$), железа, кальция, магния, натрия, калия главным образом, в виде глинистых веществ. В больших количествах встречаются сульфиды железа, кальция, магния, сульфаты кальция и железа, закись железа, карбонаты кальция, магния ($\text{CaCO}_3; \text{MgCO}_3$), сульфаты кальция и железа ($\text{FeSO}_4, \text{CaSO}_4 - 2\text{H}_2\text{O}$), хлориды, соединения щелочных металлов, а также соединения редких и рассеянных элементов.

Состав минеральных примесей твердых топлив растительного происхождения характеризуется повышенным содержанием (до 15-20%) соединения щелочных и щелочно-земельных металлов.

При сжигании топлива его минеральная часть, подвергаясь ряду превращений, образует золу, количество которой зависит не только от содержания и состава исходных минеральных примесей, но и от условий и способа сжигания топлива.

В лабораторных условиях, при прокаливании топлива в муфельной печи, минеральные примеси претерпевают различные химические превращения.

Так, при температуре около 100°C гидратизированные силикаты, гидраты окиси железа и гипс начинают терять кристаллогидратную влагу, однако полное ее испарение происходит только при температуре $700-800^\circ\text{C}$.

При температуре около 500°C начинают разлагаться карбонаты и сульфиды $\text{FeCO}_3 \rightarrow \text{FeO} + \text{CO}_2$; $4\text{FeS}_2 + 11\text{O}_2 = 2\text{Fe}_2\text{O}_3 + 8\text{SO}_2$.

Сернистый ангидрид, образующийся при окислении сульфидов и сгорании органической серы, при температуре $900-1000^\circ\text{C}$ взаимодействует с окисью кальция, освободившейся при разложении карбонатов, и с кислородом с образованием сульфатов $2\text{CaO} + 2\text{SO}_2 + \text{O}_2 = 2\text{CaSO}_4$.

Щелочи и хлориды начинают улетучиваться при температуре 500°C и заметно испаряются при температуре 800°C .

Все основные превращения минеральных примесей заканчиваются при температуре около 800 °С, в связи с чем эта температура принята в качестве стандартной при определении зольности.

Масса и состав образующейся золы никогда не бывают равными массе и составу исходных минеральных примесей. В ходе озоления топлива иногда происходит сплавление золы, препятствующее полному выгоранию органического вещества, а также унос озоляемого материала образующимися газами. Отсюда следует, зола, зольность топлива — понятия в известной мере условные; количество её, как и состав, в сильной степени зависит от конечной температуры прокаливания.

Кроме того, неверно говорить о «содержании золы в топливе», так как зола в топливе не содержится, а получается при его сжигании.

Золой принято называть смесь негорючих веществ, остающихся после полного сгорания всех горючих компонентов топлива и после завершения всех превращений, которые происходят в минеральной массе топлива при свободном доступе воздуха при заданной температуре. Такие условия имеют место при озолении топлива в лабораторных условиях, при этом образующаяся зола называется лабораторной.

При сжигании натуральных топлив зола, прошедшая стадию расплавления в топочной камере образует шлак. Следовательно, **шлак представляет собой твердый раствор минералов и его химический состав отличается от состава золы.**

Сжигание топлива в промышленных топочных устройствах производится в условиях, существенно отличных от лабораторных, т.е. при малых избытках воздуха и более высокой температуре. Это сказывается на характере и полноте протекания реакций в минеральной массе топлива.

Относительно небольшое время пребывания топлива в топке может не обеспечить протекания некоторых реакций до конца. Все это приводит к тому, что очаговые остатки (шлак, провал, унос) отличаются по своему

составу и массе от лабораторной золы, а также от минеральной массы топлива.

Большая зольность снижает теплоту сгорания топлива. Так, при изменении

зольности топлива от A_1^r до A_2^r теплота сгорания рабочей массы составит, кДж/кг:

$$Q_{i2}^r = (Q_{i1}^r + 24.42W^r) \frac{100 - A_2^r}{100 - A_1^r} - 24.42W^r$$

Снижение теплоты сгорания приводит к увеличению расхода топлива и затрат на его перевозку.

При сжигании топлива с повышенным содержанием золы снижаются ϑ_a - теоретическая температура горения в топке и энтальпия газов - I_r^0 часть теплоты сгорания расходуется на нагрев дополнительного количества шлаков, удаляемых из топки (т.е. не участвующих в теплообмене), вследствие этого уменьшаются температура факела (T_f) в топке, энтальпия газов на выходе из топки I_T'' , и температуры газов по газовому тракту котла. Объем дымовых газов уменьшается, поэтому уменьшается коэффициент теплоотдачи конвекцией α , конвективная составляющая теплообмена, Q_k , паропроизводительность, D и КПД котла, η_k .

Увеличение зольности топлива наблюдается при переводе котлов ТЭС на сжигание проектных топлив с ухудшенными теплотехническими характеристиками (при выработке месторождений, при применении наиболее современных механизмов добычи топлива) или при переводе котлов на сжигание непроектных топлив.

Важное практическое значение имеют плавкостные характеристики золы. **Плавкость** определяется в лабораторных условиях при постепенном нагреве в электрической печи специально приготовленных из исследуемой золы трехгранных пирамидок. В процессе нагрева отмечают следующие характерные значения температуры: t_1 - начала деформации; t_2 - начала

размягчения и t_3 - начала жид-коплавкого состояния. Зола разделяется на тугоплавкую ($t_3 > 1425\text{ }^{\circ}\text{C}$), средне-плавкую ($1200\text{ }^{\circ}\text{C} < t_3 < 1425\text{ }^{\circ}\text{C}$) и легкоплавкую ($t_3 < 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$).

В топочной камере может быть организовано сжигание топлив с твердым или жидким шлакоудалением в зависимости от плавкостных характеристик минеральных составляющих золы.

Твердое шлакоудаление организуется при сжигании топлив с тугоплавкой или среднеплавкой золой с небольшим содержанием приведенной зольности

($A < 1\text{ (\% кг/МДж)}$) и высоким выходом летучих ($V > 25\text{ \%}$). Для сравнительной оценки количества золы используется приведенная зольность топлива в процентах, отнесенная к 1 МДж теплоты сгорания топлива, ($\text{\% кг/МДж}$)

$$A^{пр} = \frac{A^r}{Q_i^r},$$

где A^r - рабочая зольность топлива, поступающего в топку, $\text{\%}$;

Q_i^r - низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг.

Жидкое шлакоудаление целесообразно для топлив с легкоплавкой золой и топлив с большим выходом летучих.

При сжигании топлив с твердым шлакоудалением значительная часть сухой золы уносится дымовыми газами, что приводит к загрязнению окружающей среды, эрозионному износу, заносу и загрязнению поверхностей нагрева, удорожанию золоулавливающих устройств, и т.д.

Описание лабораторной установки и методика определения зольности топлива.

Лабораторная установка (рис. 2.) состоит из муфельной электропечи 2 с автотрансформатором 1, термоэлектрического преобразователя 4, магнитоэлектрического милливольтметра 5, отградуированного в градусах

Цельсия, фарфорового тигля 3 с навеской топлива, эксикатора 6 и аналитических весов с разновесами (на рисунке не показаны).

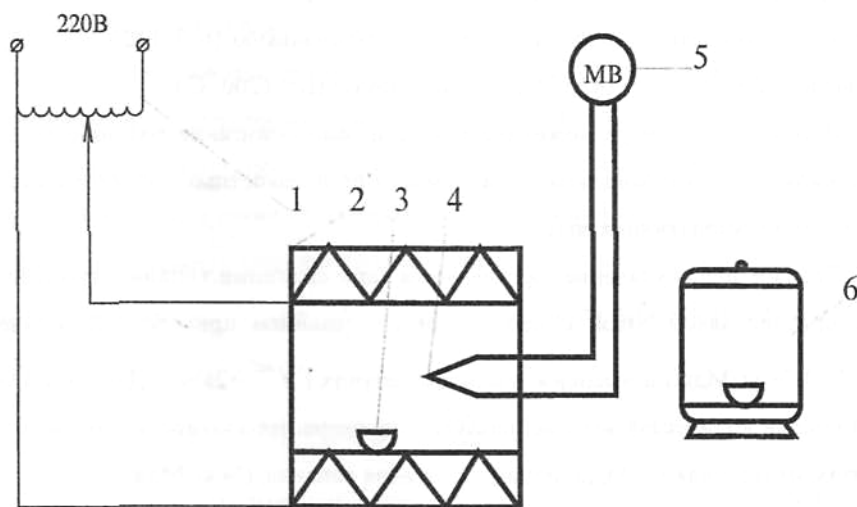


Рис. 2 Установка для определения зольности топлива

Порядок выполнения работы. Определение зольности бурых и каменных углей, антрацитов и горючих сланцев проводится согласно ГОСТ 11022 - 95 по методу медленного или ускоренного озоления.

Метод медленного озоления.

1. В предварительно взвешенные лодочки помещают навески топлива в количестве $1 \pm 0,1$ г. Навески в лодочках размещают равномерным слоем, не допуская насыпания топлива на кран тары.

2. Лодочки с навесками помещают в муфельную печь, разогретую до температуры не выше 300°C . Закрыв дверцу, медленно, в течение 1-1,5 ч нагревают муфель до температуры $(815 \pm 15)^\circ\text{C}$.

3. При температуре $815 \pm 15^\circ\text{C}$ образовавшийся зольный остаток прокаливают 1-2 ч в закрытом муфеле, после чего лодочки с зольным остатком вынимают из муфеля.

4. Лодочки с зольным остатком охлаждают сначала на воздухе в течение 5 мин, затем в эксикаторе до комнатной температуры и взвешивают.

5. Производят контрольное прокаливание лодочек с зольным остатком через 30 мин до тех пор, пока разность масс в двух последних взвешиваниях

будет менее 0,001 г; испытание закончено и для расчета принимают последнюю массу.

Метод ускоренного озоления.

1. Нагревают муфель до температуры $(815 \pm 15)^\circ \text{C}$.

2. В предварительно взвешенные лодочки помещают навески топлива в количестве $1 \pm 0,1$ г. Навески в лодочках размещают равномерным слоем, не допуская насыпания топлива на края тары.

3. Лодочки с навесками ставят па край пода муфеля. В таком положении при открытой дверце муфеля лодочки выдерживают 3 минуты. Затем лодочки медленно продвигают в центр муфеля, после чего закрывают дверцу.

4. Прокаливание навески ведут при температуре не ниже 800°C . Продолжительность прокаливания для каменных углей и антрацитов устанавливают - 25-35 мин; для бурых углей и горючих сланцев - 20 -25 мин.

5. По окончании прокаливания лодочки с зольным остатком вынимают из муфеля охлаждают сначала на воздухе в течение 5 мин, затем в эксикаторе до комнатной температуры и взвешивают.

6. Контрольных прокаливаний не проводят.

В лабораторных условиях предлагается выполнить работу методом ускоренного озоления.

Результаты испытаний заносят в таблицу наблюдений

Таблица 3

Наименование	Обозначени	Результат
Масса пустой лодочки, г	m_1	
Масса лодочки с топливом до	m_2	
Масса топлива до прокаливания, г	$m = m_2 - m_1$	
Масса лодочки и зольного остатка	m_3	
после прокаливания, г		
Масса зольного остатка, г	$m_4 = m_3 - m_1$	

Лабораторная №3. Определение выхода летучих веществ и спекаемости топлива

Летучие вещества и нелетучий остаток твердого топлива.

Выход летучих является одной из важнейших характеристик твердого топлива, от него зависят условия воспламенения и характер горения топлива. Выход летучих веществ оказывает непосредственное влияние на организацию топочного процесса, выбор объема топочной камеры, эффективность сжигания топлива.

При нагревании без доступа воздуха органическая и минеральная части всех видов твердого топлива претерпевает сложные термические превращения (деструкцию), причем степень и глубина этих превращений зависят от состава и свойств данного вида топлива. Этот процесс сопровождается образованием парообразных и газообразных продуктов деструкции - летучих веществ.

Таким образом, летучими веществами твердого топлива называют смесь газообразных и парообразных продуктов, образующихся при нагревании его без доступа воздуха.

Газообразная часть летучих веществ состоит в основном из углеводородных газов предельного и непредельного ряда, водорода, окиси и двуокиси углерода (C_mH_n , H_2 , CO , CO_2 и др.).

Парообразная часть летучих веществ состоит из маслянистых и смолистых продуктов, конденсирующихся при комнатной температуре, а также из влаги как содержащейся в топливе, так и образующейся при его деструкции. Следует подчеркнуть, что летучие вещества не содержатся в топливе, а образуются при его нагревании. Поэтому при их определении **говорят о выходе летучих веществ, а не об их содержании в топливе.** Летучие сгорают примерно в пять раз быстрее коксового остатка.

Выход летучих веществ зависит от степени углефикации топлива, снижаясь по мере его обуглероживания. У торфа выход летучих в расчете на

горючую массу достигает 70 %, у бурых углей - 50-40 % ; у каменных снижается до 45-10

Оставшийся после выхода летучих твердый коксовый остаток состоит из углерода и минеральной части топлива. В зависимости от вида топлива коксовый остаток может быть спекшимся, слабоспекшимся и порошкообразным. Характер коксового остатка играет решающую роль при определении наиболее рационального пути использования топлива.

Все топлива подразделяются на **топлива, используемые в технологических целях** (химическая, коксохимическая, металлургическая промышленность и т.д.) и **энергетические топлива**, используемые для получения тепловой и электрической энергии. Каменные угли с большим содержанием битума дают спекшийся крупнопористый остаток. Эти угли используются в металлургических печах; в котлах и отопительных установках такие угли не сжигаются. Энергетические топлива имеют порошкообразный коксовый остаток. Обязательным условием устойчивого воспламенения топлива является быстрый разогрев до высокой температуры поступающей в топку смеси топлива с воздухом.

Полнота сгорания топлива обуславливается температурным режимом в топке, наличием необходимого количества воздуха, интенсивностью перемешивания летучих соединений с воздухом, скоростью подвода **воздуха** к твердым горючим частицам топлива, временем пребывания горючих соединений в топке и т.д. Все это свидетельствует об очень большой сложности топочных процессов.

Описание лабораторной установки. Лабораторная установка (рис.3) состоит из муфельной печи 2 с автотрансформатором 1, термоэлектрического преобразователя 5, магнитоэлектрического милливольтметра 6, отградуированного в градусах Цельсия, фарфорового тигля 3 с навеской топлива, эксикатора 7 и аналитических весов с разновесами (на рисунке не показаны).

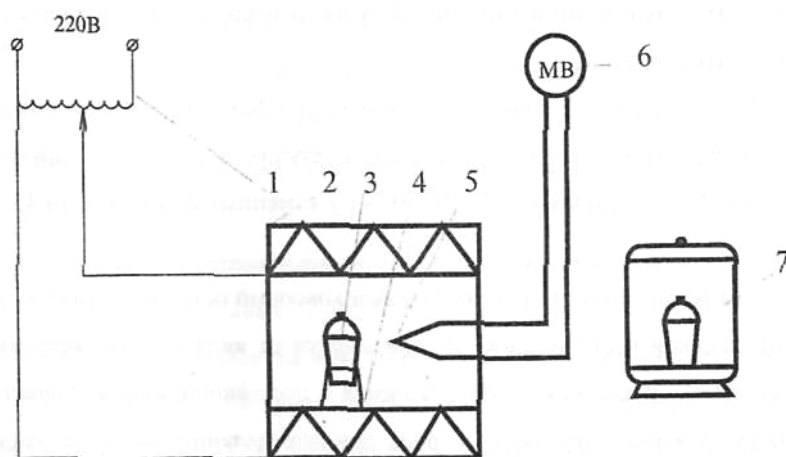


Рисунок 3. Установка для определения выхода летучих

Определение выхода летучих веществ в каминных углях, антрацитах и горючих сланцах

Выход летучих веществ определяют как разность потери массы и влаги при нагревании топлива в стандартных условиях без доступа воздуха. Метод является эмпирическим и для получения воспроизводимых результатов необходимо тщательно контролировать скорость нагревания, конечную температуру и общую продолжительность определения. Определение влаги и выхода летучих веществ проводят одновременно, чтобы можно было ввести соответствующую поправку.

Минеральные вещества пробы угля могут также терять массу при проведении испытания. Потеря массы зависит от природы и количества присутствующих минералов. При высоком содержании карбонатов в каменных углях и антрацитах и, если определение выхода летучих веществ проведено с целью классификации угля в результате определения необходимо ввести поправку на потерю диоксида углерода карбонатов.

Сущность метода для каменных углей и антрацита заключается нагреванием навески топлива при температуре 900°C без доступа воздуха в течение 7 мин. Выход летучих веществ в процессе нагрева определяют по разности общей потери массы пробы и потери за счет испарения влаги.

Сущность метода для бурых углей заключается в нагревании навески без доступа воздуха при температуре $(850 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ в течение 7 мин и определении выхода летучих веществ по разности общей потери массы навески и потери за счет испарения влаги.

Порядок выполнения работы. Определение летучих веществ проводится согласно ГОСТ 6382 - 91 (ИСО 562-81) на установке рис. 3.

1. В предварительно взвешенные тигли с крышками помещают навеску топлива $1 + 0,01$ г аналитической пробы топлива. Навески бурых углей перед испытанием брикетируют с помощью лабораторного пресса.

2. Тигли, закрытые крышками, помещают в зону устойчивой температуры муфеля (рис. 5.1.), предварительно нагретого до температуры $(900 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ для каменных углей, антрацитов и горючих сланцев. Для бурых углей муфель нагревают до температуры $(850 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ и выдерживают в нем точно 7 минут.

3. По истечении 7 мин. тигли вынимают, охлаждают на воздухе, не снимая крышки в течение 5 мин., затем охлаждают в эксикаторе до комнатной температуры, после чего взвешивают. Результаты испытаний заносят в таблицу наблюдений (табл.4).

4. По окончании взвешивания тигли открывают, осматривают и квалифицируют образовавшийся нелетучий остаток (табл. 5).

Таблица 4.

Наименование	Обозначение	Результат
Масса пустого тигля с крышкой, г	m1	
Масса тигля с крышкой и пробой	m2	
Масса пробы топлива до нагревания, г	$m = m_2 - m_1$	
Масса тигля с крышкой и остатком	m3	
Масса пробы топлива после	$m_4 = m_3 - m_1$	

Обработка результатов опыта. Выход летучих веществ на сухую беззольную массу определяют по формуле, % :

$$V^a = \frac{100(m2 - m3)}{m2 - m1} - W^a,$$

где $m1$ - масса пустого тигля с крышкой, г;

$m2$ - масса тигля с крышкой и пробой до нагревания, г;

$m3$ - масса тигля с крышкой и остатком после нагревания;

W^a - массовая доля влаги в аналитической пробе, %

Выход летучих веществ на горючую массу вычисляют по формуле, %

$$V^{daf} = \frac{V^a * 100}{100 - (W^a + A^a)},$$

где A^a - зольность аналитической пробы, %).

Выход нелетучего остатка из аналитической пробы топлива $(NV)^a$ вычисляют по формуле, %

$$(NV)^a = \frac{m3 - m1}{m2 - m1} * 100,$$

Нелетучий (коксовый) остаток, полученный в тигле после определения выхода летучих веществ (кроме кокса), характеризуют зависимости от его внешнего вида (порошкообразный, слипшийся и т.д.)

Таблица 6. Классификация нелетучего остатка

Вид коксового остатка	Признаки
Порошкообразный	Мелкий порошок на дне тигля.
Слипшийся	При легком нажиме пальцем рассыпается
Спекшийся, не сплавленный	Для раскалывания на отдельные кусочки
Сплавленный, не вспученный	Плоская лепешка с серебристым металличе-
Сплавленный, вспученный	Остаток с серебристым металлическим
Сплавленный, сильно вспученный	То же, но высотой более 15 мм.

Результаты (предпочтительно среднее арифметическое результатов двух определений) выражают с точностью до 0,1 % допустимые расхождения

полученных или рассчитанных результатов на одну и ту же массовую долю влаги указаны в табл. 7.

Сходимость - расхождения результатов параллельных определений, выполненных в разное время в одной лаборатории на одной и той же аппаратуре для двух представительных порций, отобранных из одной и той же пробы, не должны превышать значений указанных в таблице 7.

Таблица 7.

Вид пробы	Допустимые расхождения полученных или рассчитанных результатов на одну и ту же массовую долю влаги	
	в одной лаборатории	в разных лабораториях
Каменный уголь, антрацит и сланцы с выходом летучих веществ менее 10%	0,3 %	0,5 %
Каменный уголь, антрацит и сланцы с выходом летучих веществ более 10%	3,0 %	4,0 %

Воспроизводимость (для каменного угля) - расхождения средних результатов параллельных определений, выполненных в двух разных лабораториях на представительных порциях одной и той же аналитической пробы, взятых после окончательной стадии подготовки пробы, не должны превышать значений, указанных в таблице 7.

Максимально допустимые расхождения между результатами, полученными при одном и том же содержании влаги (для бурых углей) приводятся в таблице 8.

Таблица 8.

Проба	Максимально допустимые расхождения между результатами, полученными (рассчитанными) при одном и том же содержании влаги	
	в одной лаборатории	в разных
Бурые угли с выходом летучих веществ с выходом свыше 45 %	1,0%	1,5%

Лабораторная №4. Определение теплоты сгорания твердого топлива

Теплота сгорания как основная теплотехническая характеристика топлива.

Теплота сгорания - одна из основных тепловых характеристик органического топлива. **Теплотой сгорания называют количество теплоты, выделяющейся при полном сгорании единицы массы (кг) в случае сжигания твердого или жидкого топлива и единицы объема (м^3) в случае сжигания газообразного топлива.** Различают высшую и низшую теплоту сгорания топлива.

Высшей теплотой сгорания топлива называется количество теплоты, выделяющееся при полном сгорании единицы массы или объема горючего вещества с учетом теплоты, выделившейся при конденсации водяных паров, которые содержатся в продуктах сгорания топлива.

Низшей теплотой сгорания топлива называется количество теплоты, выделяющееся при полном сгорании единицы массы или объема горючего вещества без учета теплоты, выделившейся при конденсации водяных паров.

Все тепловые расчеты в России, в отличие от США, Англии и других стран, проводятся на низшую теплоту сгорания, которая не учитывает скрытую теплоту парообразования водяных паров, содержащихся в продуктах сгорания топлива.

Для рабочей массы топлива разность между высшей Q_s и низшей теплотой сгорания Q_i^r определяется, в кДж/кг

$$Q_i^r = 2380 \left(\frac{9H^r}{100} + \frac{W^r}{100} \right),$$

где 2380 - приближенное значение величины скрытой теплоты парообразования, кДж/кг;

9 - коэффициент из стехиометрического уравнения горения водорода, который показывает, что при сгорании одной весовой части водорода образуется девять весовых частей воды.

Определение теплоты сгорания по данным элементарного или технического состава топлива.

Расчет теплоты сгорания топлива может быть проведен:

- **аналитически**, из эмпирической формулы Д.И. Менделеева для твердого и жидкого топлива, кДж/кг

$$Q_s^r = 339 * C^r + 1256 * H^r - 109(O^r - S_a^r)$$

где C^r , H^r , O^r , S^r - процентное содержание углерода, водорода, кислорода, летучей серы и влаги в рабочей массе топлива,

339, 1256, 109.25 - эмпирические коэффициенты.

Так как элементарный состав твердого или жидкого топлива не дает точного представления о характере образующих топливо химических соединений и форме связи атомов в них, расчет теплоты сгорания по элементарному или техническому составу не дает такого точного результата, который может быть получен экспериментальным путем. Для газовых топлив точно известного технического состава теплота сгорания может быть подсчитана достаточно точно.

- **экспериментально**, путем сжигания навески топлива в калориметрической бомбе. Этот способ дает наиболее достоверные результаты.

Определение теплоты сгорания твердого топлива методом сжигания в калориметрической бомбе.

Калориметрическое определение теплоты сгорания топлива производится по ГОСТ - 147-95 (ИСО 1928-76).

Метод основан на полном сжигании навески испытуемого топлива в калориметрической бомбе, наполненной кислородом под давлением 2,5-2,9 МПа и поглощении выделившегося тепла водой в калориметре.

Описание лабораторной установки. Общий вид калориметрической установки представлен на рис. 4.

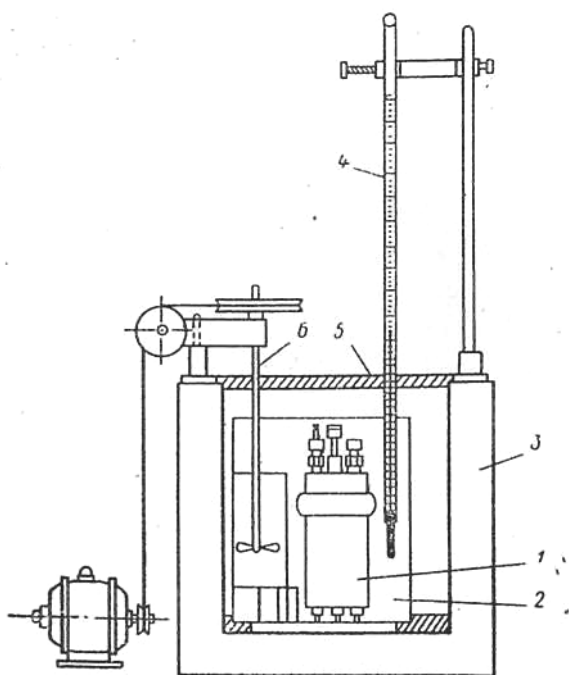


Рисунок 4. Калориметрическая бомба

1 - Калориметрическая бомба;

2 – калориметрический сосуд;

3 – кожух;

4 – термометр;

5 – крыша;

6 - мешалка с приводом.

Основными элементами установки (рис.4) являются; калориметрическая бомба 4, калориметрический сосуд 5, теплоизоляционная оболочка (кожух) 1 с крышкой, мешалкой 3 с электроприводом 2 и термометр.

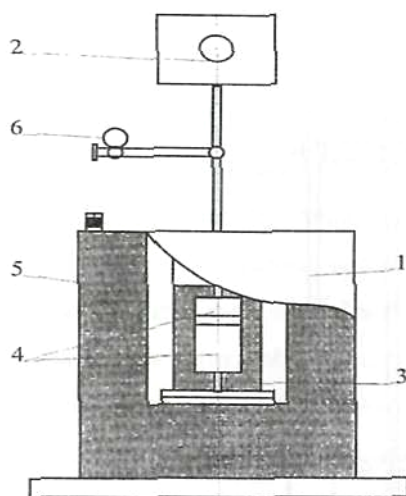


Рис. 5 Установка бомбы

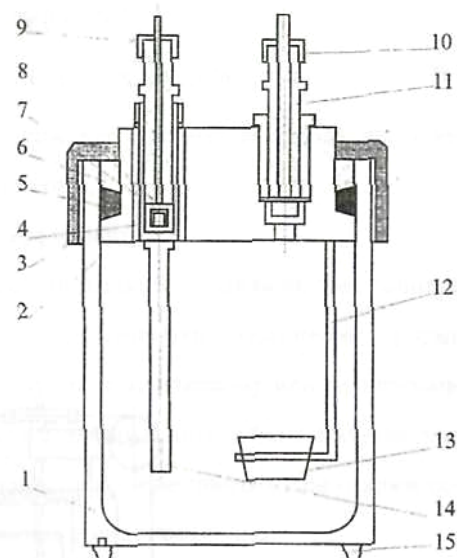


Рис. 6 Самоуплотняющаяся бомба

Самоуплотняющаяся калориметрическая бомба (рис.6) состоит из цилиндрического сосуда 1 емкостью около 300 см^3 , крышки 2, накидной гайки 3, металлического кольца 6 и резинового кольца 5. Крышка на стакан навинчивается от руки накидной гайкой, а при подаче в бомбу кислорода избыточное давление приподнимает ее несколько вверх и сжимает резиновое кольцо, чем и достигает хорошее уплотнение бомбы. Входной штуцер закрывается самоуплотняющимся клапаном 7, прижимаемым давлением к бомбе и эластичной кольцевой прокладке 8. Пружина 4 предварительно уплотняет клапан до повышения давления в бомбе. Снизу клапан заканчивается газопроводной трубкой 14, электроизолированной от бомбы и служащей также электродом. Второй электрод 12 ввинчивается в крышку, он заканчивается кольцом для чашечки 13, в которую помещается сжигаемое вещество. Входной штуцер изготовлен в виде игольчатого вентиля. Входной и выходной 11 штуцера снабжены колпачками 9 и 10 с эластичными прокладками и имеют штифты для подведения тока. Стакан установлен на ножках 15.

Калориметрический сосуд изготовлен из металлического листа с прочным дном, тщательно отполирован (рис. 5).

Рабочая емкость сосуда без бомбы $2000-3000 \text{ см}^3$. Сосуд изолирован от дна кожуха теплоизолирующей подставкой из стекла или пластмассы, касающейся сосуда лишь в нескольких точках.

Оболочка-кожух представляет собой хорошо отполированный массивный двустенный металлический сосуд с двойным дном. Пространство между стенками кожуха заполнено водой или воздухом. Назначение кожуха - защита калориметрического сосуда от действия воздушных потоков и возможных колебаний температуры окружающей среды. На кожухе укреплены две стойки с перекладиной, на ней смонтировано передаточное устройство для мешалки и зажим для укрепления термометра. Сверху кожух закрывается теплоизолирующей крышкой, имеющей вырезы для стержня мешалки, термометра и токопроводящих проводов.

Мешалка предназначена для перемешивания воды и калориметрическом сосуде. При работе мешалки не должно образовываться брызг - верхняя пластина не должна выходить из воды и ударяться об ее поверхность. При работе мешалка не должна касаться стенок сосуда, бомбы и термометра.

Термометр служит для измерения температуры воды в сосуде. Применяется термометр переменного заполнения диапазоном измерения 5°C и ценой деления $0,01^{\circ}\text{C}$. С помощью лупы 6 можно отсчитать температуру с точностью до $0,001^{\circ}\text{C}$. Термометр переменного заполнения измеряет только изменение температуры в делениях шкалы.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с устройством калориметра, бомбы, пресса и лабораторной установки в целом.
2. Подготовить к опыту калориметрическую бомбу, сосуд и оболочку.
3. Изготовить навеску испытуемого топлива при помощи пресса, впрессовывая в массу угля запальную проволоку.
4. Взвесить полученный брикет топлива с запальной проволокой на

аналитических весах. Масса брикета должна быть равна $(0,800 - 1,500) + 0,001$ г.

5. Заполнить бомбу кислородом (заполнение проводится лаборантом).

6. Провести эксперимент по определению удельной теплоты сгорания твердого топлива в калориметрической бомбе:

7. По окончании опыта открыть крышку калориметра, достать и вытереть термометр. Отключить от клемм токоведущие провода и извлечь бомбу из калориметра.

8. Осторожно приоткрыть выпускной вентиль, медленно снизить давление в бомбе до атмосферного, далее отвинтить гайку и вынуть крышку бомбы.

9. Собрать остатки запальной проволоки и взвесить их с погрешностью не более $0,0002$ г.

Подготовка калориметрической бомбы, сосуда и оболочки

1. Определяют массу запальной проволоки и хлопчатобумажной нити, применяемых для сжигания топлива. Для этого взвешивают 10-15 отрезков одинаковой длины в зависимости от устройства внутренней арматуры бомбы и системы запала и вычисляют среднюю массу одного отрезка.

2. Запальную проволоку прикрепляют к внутренней арматуре бомбы, плотно присоединяя один конец ее к кислородоподводящей трубке, другой к токоведущему штифту и вытягивают среднюю часть отрезка проволоки, не свертывая ее в петлю. Тигель с навеской топлива помещают в кольцо токоведущего штифта. Вытянутая средняя часть укрепленного отрезка проволоки должна плотно прилегать к брикету топлива, находящемуся в тигле, а при испытании топлива в виде порошка проволока должна быть несколько углублена в порошок. Среднюю часть запальной проволоки при приготовлении брикета из навески топлива можно впрессовать в брикет. При применении хлопчатобумажной нити ее привязывают к проволоке, натянутой между электродами, и погружают в топливо. Проволока (или нить) не должна касаться тигля.

3. При использовании для испытаний бомбы с клапанами в верхней части

в корпус бомбы наливают 1 см дистиллированной воды, вкладыш опускают в корпус бомбы и навинчивают на него гайку.

4. Устанавливают бомбу в подставку и присоединяют к приспособлению для наполнения бомбы кислородом. Подачу кислорода в бомбу регулируют игольчатым клапаном. Бомбу медленно наполняют кислородом до давления 2,5-2,9 МПа, не вытесняя из нее воздух, а при сжигании топлива с низкой теплотой сгорания - до 3,4 МПа. При достижении требуемого давления закрывают впускной клапан бомбы и вентиль баллона и отсоединяют кислородоподводящую трубку от бомбы. На клапаны бомбы навинчивают резьбовые колпачки с прокладками.

5. Опускают бомбу в сосуд с дистиллированной водой и выдерживают 2 мин для проверки отсутствия утечки кислорода из бомбы. При отсутствии выделяющихся пузырьков кислорода - протирают клапаны, к токовводам бомбы калориметра присоединяют проводники, вторые концы которых присоединяют к соответствующим контактам крышки сосуда.

6. Устанавливают бомбу в сосуд и проверяют, чтобы не было препятствий вращению мешалки сосуда. Заполняют сосуд дистиллированной водой так, чтобы верхние части бомбы были полностью погружены в воду. Взвешивают сосуд с водой и бомбой с погрешностью не более 1,0 г. Допускается взвешивать сосуд с водой без бомбы. Масса сосуда с водой должна быть постоянной при всех определениях с данной бомбой и значения ее должно быть записано в исходные данные для расчета (см. пример расчета).

Проведение испытания

1. Изотермический режим

Измерение температуры разбиваются на три периода:

начальный - учет теплообмена калориметрической системы с окружающей средой в условиях начальной температуры опыта;

главный — сгорание навески, передача выделившегося тепла калориметрической системе и выравнивание температуры всех ее частей;

конечный - учет теплообмена калориметра с окружающей средой в условиях конечной температуры опыта.

Начальный период. Необходимо измерить температуру помещения вблизи калориметра. После перемешивания воды не менее 10 мин для выравнивания температуры всех частей калориметра и наступления ее равномерного изменения за 5 мин до ожидаемого момента достижения температуры воды в сосуде $(25 \pm 0,2)$ °С, после этого начинают считывать показания температуры в течение 5 мин с интервалом 60 или 30 с. Последнее значение температуры начального периода является исходной температурой главного периода.

Главный период. При достижении температуры $(25 \pm 0,2)$ °С в сосуде калориметра в момент соответствующего полуминутного отсчета нажимают кнопку в цепи зажигания для запала навески. Первый отсчет температуры в главном периоде проводят непосредственно через 30 с после последнего отсчета в начальном периоде. Продолжают считывать показания температуры через каждые 30 с. Главный период считают законченным с наступлением равномерного изменения температуры. При затруднениях с определением конца главного периода полуминутные промежутки, которые вызывают сомнение в равномерности изменения температуры, относят к главному периоду, увеличивая его продолжительность на 1—2 полуминутных промежутка.

Конечный период. Последний отсчет главного периода считают начальным отсчетом конечного периода, в котором снимают 10 показаний с интервалом 30 с.

Показание термометра снимают по третьему звуковому сигналу через 30 с с погрешностью не более $0,002$ °С. Перед каждым отсчетом температуры в течение 3 - 5 с слегка постукивают по термометру вибратором или палочкой, на которую надета резиновая трубка. Данные записывают в таблицу 9. Примеры записи испытаний приведены в таблице 10.

При считывании по шкале ртутного термометра переменного наполнения в начальном, главном (с четвертого отсчета) и конечным периодах погрешность не должна превышать 0,2 наименьшего деления шкалы термометра. В главном периоде до четвертого отсчета погрешность считывания не должна превышать двух наименьших делений шкалы.

По окончании испытания выключают переключатели и сетевой выключатель, приподнимают (или вынимают) термометр, снимают крышку калориметра, отключают провода от зажимов бомбы, вынимают бомбу из сосуда. Снимают колпачки с клапанов бомбы, открывают выходной клапан, выпускают газ и разбирают бомбу. Собирают остатки запальной проволоки и взвешивают их с погрешностью не более 0,0002 г.

Обработка результатов опыта

1. Вычисление энергетического эквивалента Q

Энергетический эквивалент калориметра - количество теплоты, необходимое для подъема температуры калориметра на 1 С. Энергетический эквивалент определяют по инструкции МИ 2096 сжиганием 1 - 1,2 г эталонной бензойной кислоты в тех же условиях, в которых в дальнейшем на данном калориметре будет производиться определение теплоты сгорания топлива.

При сжигании бензойной кислоты образуется азотная кислота, растворяющаяся в воде, налитой в бомбу. При этом выделяется теплота, которую следует учитывать при расчете. Количество образовавшейся азотной кислоты определяют следующим образом: смыв бомбы переливают в химический стакан, покрывают его часовым стеклом и кипятят 5 мин, затем прибавляют две капли фенолфталеина и титруют 0,1 н. раствором едкого натра до появления не исчезающего розового окрашивания. 1 мл израсходованного на титрование раствора едкого натра соответствует 5,9 Дж.

Энергетический эквивалент системы C_i в адиабатическом режиме вычисляют по формуле, кДж/°С

$$C_i = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3}{\Delta t}$$

Где Q_1 - количество теплоты, выделившейся при сгорании бензойной кислоты, кДж;

Q_2 - количество теплоты, выделившейся при сгорании запальной проволоки, кДж;

Q_3 - количество теплоты, выделившейся при образовании и растворении в воде азотной кислоты, кДж;

Δt - исправленный прирост температуры в сосуде, °С

2.5. Самостоятельная работа студентов

Самостоятельная работа предусматривает выполнение студентами курсового проекта, подготовку к лекционным и практическим работам.

2.6. Курсовой проект на тему: «Поверочный расчет котлоагрегата» выполняется в 9 семестре.

Задание к курсовому проекту

К курсовому проекту студентов специальности 140101

1. Тема курсового проекта: Поверочный расчет парового котла

2. Исходные данные к курсовому проекту:

2.1. Сжигаемое топливо:

Харанорское месторождение. Б. 1 Р. (бурый уголь);

$P_{н.п} = 140$ атм.

Паропроизводительность: номинальная 420 тонн; расчётная 400 тонн.

$t_{н.п} = 560$ °С, $W = 41$ %, $A = 9$ %.

2.2 Средний (табличный) состав:

$W_T^r = 40,5$ % $C_T^r = 36,4$ % $O_T^r = 11,4$ %

$A_T^r = 8,6$ % $H_T^r = 2,3$ %

$S_{(O+R)}^r = 0,3$ % $N_T^r = 0,5$ %

2.3. Низшая теплота сгорания для рабочего состояния топлива:

$Q_{HT}^r = 2980$ ккал/кг или $Q_{HT}^r = 12476,664$ кДж/кг;

2.4. Выход летучих для сухого беззольного состояния (горючая масса):

$$V^r=44,0 \text{ \%};$$

2.5. Температурные характеристики золы.

2.5.1. Температура начала деформации:

$$t_A=1160 \text{ }^\circ\text{C};$$

2.5.2. Температура начала размягчения:

$$t_B=1250 \text{ }^\circ\text{C};$$

2.5.3. Температура начала жидкоплавкого состояния:

$$t_C=1250 \text{ }^\circ\text{C};$$

2.6. Температура нормального жидкого шлакоудаления:

$$t_{н.ж} - \text{Нет};$$

2.7. Влажность гидроскопическая:

$$W^{гг}=12,5 \text{ \%};$$

2.8. Приведённая влажность и зольность:

$$W^n = \frac{W_T^n}{4,19} = \frac{13,60}{4,19} = 3,246 \text{ \%}; \quad (1)$$

$$A^n = \frac{2,88}{4,19} = 0,687 \frac{\text{\%кг}}{\text{кгДж}}; \quad (2)$$

2.9 Значение влажности и зольности топлива по заданию:

$$W^r=41 \text{ \%}, A^r=9 \text{ \%},$$

2.10. Коэффициент пересчёта состава топлива на массу с заданной влажностью и зольностью:

$$K = \frac{100 - (A^r + W^r)}{100 - (A^r + W^r)} = \frac{100 - (9 + 41)}{100 - (8,6 + 40,5)} = 0,982;$$

2.11. Расчётный состав рабочей массы топлива:

$$S_{O+R}^r = k * S_{O+R}^r = 0,982 * 0,3 = 0,295 = 0,3 \text{ \%}; \quad (4)$$

$$C^r = k * C_T^r = 0,982 * 36,4 = 35,7 \text{ \%} \quad (5)$$

$$N^r = k * N_T^r = 0,982 * 0,5 = 0,49 = 0,5 \text{ \%} \quad (6)$$

$$O^r = 0,982 * 11,4 = 11,2 \text{ \%} \quad (7)$$

$$H^r = 0,982 * 2,3 = 2,3 \text{ \%} \quad (8)$$

Правильность пересчёта:

$$A^r + W^r + S_{O+R}^r + C^r + N^r + H^r + O^r = 100 \text{ \%}$$

$$9 + 41 + 0,3 + 35,7 + 0,5 + 11,2 + 2,3 = 100 \text{ \%}$$

2.12. Расчётное значение низшей теплоты сгорания для рабочего состояния топлива при заданных влажности и зольности:

$$Q_i^r = [Q_i^r + 25 * W_T^r] * \frac{100 - (A^r + W^r)}{100 - (A^r + W^r)} - 25 * W^r \quad (9)$$

$$Q_i^r = [12476 + 25 * 40,5] * \frac{100 - (9 + 41)}{100 - (8,6 + 40,5)} - 25 * 41 = 12225,652;$$

2.7. Перечень промежуточных форм контроля знаний.

К промежуточным формам контроля знаний относятся блиц-опрос на лекциях и проверочные работы. Ниже представлен вариант проверочных работ по изучаемым темам.

Задания для текущей проверки знаний

По теме № 1

1. Напишите расчетную формулу для определения удельной комбинированной выработки электрической энергии на паротурбинной ТЭЦ и объясните значения входящих в нее величин.

"Определение состава угля"

Задание для проведения самостоятельных работ

Вариант № 1

Сушка Березовского угля с составом рабочей массы:

$W^p = 33\%$; $A^p = 4,7\%$; $S^p = 0,2\%$; $C^p = 44,3\%$; $H^p = 3,0\%$; $N^p = 0,4\%$; $O^p = 14,4\%$

Производится при разомкнутой схеме. Определить состав рабочей массы подсушенного до $W^p = 10,0\%$ топлива.

Вариант № 2

Состав сухой массы подмосковного угля следующий:

$C^c = 38,24\%$; $H^c = 3,09\%$; $A^c = 42,06\%$; $S^c = 3,97\%$; $N^c = 0,59\%$; $O^c = 12,06\%$.

Известно, что влажность топлива составляет 32 %. Определить элементный состав рабочей массы.

Вариант № 3

Содержание углерода и водорода в рабочей массе донецкого угля марки Г соответственно 62,1% и 4% при зольности 11,3% и влажности 13% . Определить содержание этих компонентов в рабочей массе при увеличении рабочей влажности на 5%.

Вариант № 4

Горючая масса воркутинского угля составляет $S^r = 1,36\%$; $C^r = 83,97\%$; $H^r = 5,44\%$; $N^r = 2,57\%$; $O^r = 6,65\%$. Определить элементный состав рабочей массы при $W^p = 5,5\%$; и $A^p = 28,4\%$.

Вариант № 5

Известен состав рабочей массы донецкого угля марки Д:

$W^p = 13\%$; $A^p = 24,4\%$; $S^p = 3,1\%$; $C^p = 47,0\%$; $H^p = 3,4\%$; $N^p = 1,40\%$; $O^p = 8,0\%$.

Определить состав сухой массы данного угля.

Вариант № 6

Определить состав горючей массы нерюнгринского угля, элементный состав рабочей известен состав рабочей массы:

$W^p = 9,5\%$; $A^p = 12,7\%$; $S^p = 0,2\%$; $C^p = 66,1\%$; $H^p = 3,3\%$; $N^p = 0,7\%$; $O^p = 7,5\%$.

Вариант № 7

Содержание углерода в рабочей массе экибастузского угля составляет $C^p = 43,4\%$;

при $W^p = 7\%$ и $A^p = 38,1\%$. Определить содержание углерода в сухой массе при увеличении рабочей зольности топлива до $A^p = 45,0\%$.

Вариант № 8

Элементный состав рабочей массы карагандинского угля следующий:

$W^p = 10\%$; $A^p = 38,7\%$; $S^p = 0,8\%$; $C^p = 41,8\%$; $H^p = 2,7\%$; $N^p = 0,6\%$; $O^p = 5,4\%$.

Определить состав сухой массы.

Вариант № 9

При лабораторных испытаниях был получен элементный состав кузнецкого угля марки СС на горючую массу:

$S^r = 0,5\%$; $C^r = 84,0\%$; $H^r = 4,5\%$; $N^r = 2,0\%$; $O^r = 9\%$.

Влажность и зольность на рабочую массу равны $W^p = 12,0\%$ и $A^p = 11,4\%$. Определить элементный состав на рабочую массу топлива.

Вариант № 10

Состав рабочей массы челябинского угля следующий:

$W^p = 17\%$; $A^p = 32,4\%$; $S^p = 0,9\%$; $C^p = 35,9\%$; $H^p = 2,6\%$; $N^p = 1,0\%$; $O^p = 10,2\%$.

Определить рабочую массу угля при увеличении влажности на 4% и уменьшении зольности до 30%.

Контрольная работа N 2

"Определение теплоты сгорания. Определение объемов продуктов сгорания"

Вариант 1

1. Определить теплоту сгорания смеси топлив.

В топке котла сжигается 30 м/ч твердого топлива следующего элементного состава:

$W^p = 34,5\%$; $A^p = 14,4\%$; $S^p = 1,3\%$; $C^p = 39,1\%$; $H^p = 1,9\%$; $N^p = 0,2\%$; $O^p = 8,6\%$ и $12 \cdot 10^3$ м³/ч газа с $Q^p_n = 40 \cdot 10^3$ кДж/кг.

2. Определить на сколько изменится действительный объем продуктов сгорания при W^p $W^p_2 = 28\%$ ($\alpha = 1,12$) (по условию задачи 1).

Вариант 2

1. Определить теплоту сгорания смеси твердого топлива и мазута с $Q^p_n = 38800$ кДж/кг при тепловой доле твердого топлива в смеси $g' = 0,3$.

Элементный состав твердого топлива:

$W^p = 10\%$; $A^p = 19,8\%$; $S^p = 0,2\%$; $C^p = 60\%$; $H^p = 3,1\%$; $N^p = 0,6\%$; $O^p = 6,3\%$.

2. На сколько изменится действительный объем продуктов сгорания ($\alpha = 1,15$) при увеличении влажности на 12% (по условию задачи 1).

Вариант 3

1. При проверке элементарного состава угля было определено, что зольность увеличилась на 10% по сравнению с исходным составом. На сколько изменилась низшая теплота сгорания топлива, если его исходный состав:

$W^p = 12\%$; $A^p = 23,8\%$; $S^p = 0,5\%$; $C^p = 51,4\%$; $H^p = 3,8\%$; $N^p = 1,9\%$; $O^p = 6,6\%$.

2. На сколько изменится теоретический объем продуктов сгорания при изменении зольности (по условию задачи 1).

Вариант 4

1. Определить высшую теплоту сгорания газообразного топлива следующего элементного состава:

$CH_4 = 89,7\%$; $C_2H_6 = 5,2\%$; $C_3H_8 = 1,7\%$; $C_4H_{10} = 0,5\%$; $C_5H_{12} = 0,1\%$; $N_2 = 2,7\%$;

$CO_2 = 0,1\%$; $Q_{CH_4} = 35818$ кДж/м³; $Q_{C_2H_6} = 35818$ кДж/м³; $Q_{C_3H_8} = 63248$ кДж/м³;

$$Q_{C_3H_8} = 91251 \text{ кДж/м}^3; Q_{C_4H_{10}} = 118646 \text{ кДж/м}^3; Q_{C_5H_{12}} = 146077 \text{ кДж/м}^3;$$

$$Q_{N_2} = 1216 \text{ кДж/м}^3; Q_{CO_2} = 2314 \text{ кДж/м}^3;$$

2. Определить изменение объемного и массового расхода воздуха при $W^p_1 = 32\%$;

$$W^p_2 = 15\%; A^p = 28,6\%; S^p = 2,7; C^p = 26,0; H^p = 2,1\%; N^p = 0,4\%; O^p = 8,2\%.$$

Вариант 5

1. Насколько изменится низшая теплота сгорания горючей массы угля при изменении влажности на 10% (увеличении). Элементарный состав угля:

$$W^p_1 = 14\%; A^c = 24,6\%; S^c = 5\%; C^c = 56,9; H^c = 3,6\%; N^c = 0,9\%; O^c = 9\%.$$

2. Определить изменение действительного объема продуктов сгорания ($\alpha = 1,19$) при изменении зольности $A^p_2 = 34\%$.

$$W^p = 32\%; C^p = 26,0; H^p = 2,1\%; A^p = 28,6\%; S^p = 2,7\%; N^p = 0,6\%; O^p = 8,2\%.$$

Вариант 6

1. Определить низшую теплоту сгорания сухой массы кузнецкого угля следующего элементного состава:

$$W^p = 30\%; C^c = 54,2; H^c = 6\%; A^c = 22\%; S^c = 6,0\%; N^c = 2,8\%; O^c = 9\%.$$

2. Определить объем продуктов сгорания с учетом коэффициента избытка воздуха, равным 1,15. Элементный состав:

$$W^p = 30\%; C^c = 54,2; H^c = 6\%; A^c = 22\%; S^c = 6,0\%; N^c = 2,8\%; O^c = 9\%.$$

Вариант 7

1. При открытом способе добычи экибастуского угля, произошло увеличение его зольности с 37% до 45% и влажности с 7 до 13%. На сколько изменится низшая теплота сгорания угля, если его исходный состав:

$W^p = 7\%$; $C^p = 44,8$; $H^p = 3,0 \%$; $A^p = 37\%$; $S^p = 0,7 \%$; $N^p = 3,5 \%$; $O^p = 4 \%$.

2. На сколько изменится теоретический объем продуктов сгорания при одновременном изменении зольности и влажности. Элементный состав:

$W^p = 7\%$; $C^p = 44,8$; $H^p = 3,0 \%$; $A^p = 37\%$; $S^p = 0,7 \%$; $N^p = 3,5 \%$; $O^p = 4 \%$.

Вариант 8

1. Определить низшую теплоту сгорания горючей массы донецкого угля следующего элементного состава:

$W^p = 14\%$; $C^c = 54,9\%$; $H^c = 12 \%$; $A^c = 24,6 \%$; $S^c = 5,6 \%$; $N^c = 0,9 \%$; $O^c = 12\%$.

2. Определить действительный объем продуктов сгорания при $\alpha = 1,05$.

Вариант 9

1. Насколько увеличивается высшая теплота сгорания рабочей массы Назаровского угля при переходе от замкнутой схемы сушки к разомкнутой с окончательной влажностью

$W = 8\%$.

$W^p = 39\%$; $C^p = 37,6\%$; $H^p = 2,6 \%$; $A^p = 7,3 \%$; $S^p = 0,4 \%$; $N^p = 0,4 \%$; $O^p = 12,7 \%$.

2. Определить массовый и объемный расход воздуха при $\alpha = 1,2$.

$W^p = 12\%$; $C^p = 51,4\%$; $H^p = 3,8 \%$; $A^p = 18,2 \%$; $S^p = 0,5 \%$; $N^p = 0,6 \%$; $O^p = 5,4\%$.

2.8. Вопросы к экзамену

1. Место и назначение котельных установок и парогенераторов.

2. Конструктивная схема современного парового котла.
3. Характеристика процессов, происходящих в котле.
4. Важнейшие характеристики топлив, их воздействие на условия сжигания топлива и работу поверхностей котла.
5. Тепловой баланс парового котла определение КПД, характеристики тепловых потерь.
6. Особенности расчета радиационного теплообмена в топочных камерах.
7. Температурный режим топочной камеры. Основные тепловые характеристики топки тепловые напряжения топочного объема и сечения топки, их связь с выгоранием топлива и распределением температур газов в сечении.
8. Организация твердого и жидкого шлакоудаления, обоснование конструктивных размеров топок. Тепловые характеристики и выбор размеров топок для газа и мазута.
9. Основные конструкции топочных камер (факельные, вихревые, с кипящим слоем).
10. Особенности теплообмена в конвективных поверхностях нагрева. Основные уравнения, температурный капор, коэффициент теплопередачи.
11. Коррозия поверхностей нагрева. Износ и занос летучей золой поверхностей нагрева.
12. Радиационные поверхности барабанных и прямоточных котлов.
13. Принципы конструктивного выполнения пароперегревательных, экономайзерных и воздухоподогревательных поверхностей.
14. Тепловая схема котла.
15. Основные профили паровых котлов, принципы выбора профиля зависимости от тепловой мощности котла и сжигаемого топлива.
16. Параметры течения однофазного и двухфазного потоков, гомогенная и гетерогенная модели.
- 17 Режимы течения и структура двухфазного потока. Силы, воздействующие на движение паровых пузырей в потоке.
18. Изменение температуры рабочей среды и металла трубы в различных зонах теплообмена при докритическом давлении.
19. Изменение теплофизических характеристик среды в зоне максимальной теплоемкости при СКД.
20. Режимы и область ухудшенного теплообмена. Обеспечение надежного температурного режима, поверхностей нагрева паровых котлов.
21. Характеристики металлов для поверхностей нагрева, выбор необходимого по качеству металла для разных элементов парового котла.
22. Тепловая и гидравлическая разверка в трубной секции, расчетные показатели разеерок. Теплогидравлическая разверка и разверочные характеристики поверхностей нагрева.
23. Гидродинамика рабочей среды в системах с принудительным движением.

22. Гидравлическая характеристика горизонтальных и вертикальных труб.
23. Анализ условий неустойчивости характеристики и меры повышения надежности. Пульсация потока.
24. Гидродинамика контура естественной циркуляции.
25. Движущий и полезный напоры циркуляции, методы расчета контуров циркуляции.
26. Анализ надежности циркуляции, расчетные показатели надежности. Ограничения надежности работы контура циркуляции в переходных режимах работы котла.
27. Влияние гидродинамики на конструктивное выполнение поверхностей нагрева в барабанных и прямоточных паровых котлах.
28. Материальный баланс примеси водного теплоносителя в пароводяном тракте блока и задачи воднохимического режима.
29. Поведение примеси в паровом котле: растворимость веществ в воде и паре, переход примеси в пар, унос с влагой, отложение примеси в барабанном котле и прямоточном котле ДКД и СКД.
30. Нормирование качества водного теплоносителя.
31. Методы получения чистого пара в барабанных котлах; сепарация, продувка, ступенчатое испарение, промывка пара.
32. Воднохимические режимы блоков с барабанными и прямоточными котлами.
33. Допустимые пределы рабочих нагрузок котла по условиям горения и надежности охлаждения металла экранов топки.
34. Изменение экономичности котла (КПД) с нагрузкой, характер изменения температур газов по тракту.
35. Зависимость тепловосприятия рабочей среды от нагрузки для радиационных и конвективных поверхностей котла.
36. Комбинированные поверхности пароперегревателей, доли конвективного и радиационного теплообмена.
37. Принципы регулирования температуры пара.
38. Впрыскивающие пароохладители и места их установки.
39. Пуск парового котла в работу.
40. Принципиальная пусковая схема барабанного и прямоточного котлов.

3. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

3.1. Литература

Основная литература

1. Резников М.И., Липов Ю.М. Паровые котлы тепловых электростанций. М.: Энергоатомиздат. 1981.
2. Бугай Н.В. Работоспособность и долговечность металла энергетического оборудования. - М.: Энергоатомиздат, 1994г. -272 с.

3. Липов Ю.М., Самойлов Ю.Ф., Виленский Т.В. Компановка и тепловой расчет парового котла. М.: Энергоатомиздат. 1988.

4. Лабораторный практикум. Испытания оборудования котельного отделения ред. Ю.М.Липова.- М.: Издательство МЭИ. 1987.