

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра химической технологии вяжущих материалов

ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ТЕХНОЛОГИИ СИЛИКАТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Программа, методические указания
и контрольные задания для студентов
специальности 1-48 01 01**

**«Химическая технология неорганических веществ,
материалов и изделий» заочной формы обучения**

Минск 2011

УДК 661.68(075.8)

ББК 35.41я7

Т34

Рассмотрены и рекомендованы к изданию редакционно-издательским советом университета

Составитель

кандидат технических наук, доцент *С. В. Плышевский*

Рецензент

кандидат технических наук, доцент *В. Н. Фарафонов*

По тематическому плану изданий учебно-методической литературы университета на 2011 год. Поз. 125.

Для студентов специальности 1-48 01 01 «Химическая технология неорганических веществ, материалов и изделий» заочной формы обучения.

© УО «Белорусский государственный
технологический университет», 2011

ПРЕДИСЛОВИЕ

Цель дисциплины «Тепловые процессы в технологии силикатных материалов» – изучение во взаимосвязи комплекса теплотехнологических процессов, осуществляемых в тепловых установках и в подвергаемых тепловой обработке материалах и изделиях производства силикатных материалов.

В процессе изучения студенты должны: сформировать специальные теплотехнические знания; освоить основы управления теплотехнологическими процессами при работе тепловых установок; приобрести знание энергетической политики и структуры топливного баланса в республике, проблем экономии топлива и использования вторичных энергоресурсов (ВЭР) на предприятиях производства силикатных материалов; получить представление о видах топлива, физико-химических основах горения, способах его сжигания, типах и конструкциях применяемых топок и топочных устройств, проблемах защиты окружающей среды при сжигании топлива, способах электронагрева и областях его использования в технологии силикатных материалов, режимах теплообмена в тепловых установках и агрегатах, аэродинамике газовых потоков при взаимодействии с материалами и изделиями, тепловых процессах, протекающих в материалах и изделиях на стадиях тепловой обработки, энерготехнологии и энерготехнологическом комбинировании в технологии силикатных материалов, а также об экологических аспектах теплотехнологий силикатных материалов.

По окончании освоения данной дисциплины студенты должны уметь: проводить расчеты процесса горения топлива, топок, топливосжигающих устройств, электрических нагревательных элементов и электродов; выполнять расчеты процессов теплообмена в тепловых установках; осуществлять аэродинамические расчеты и подбор устройств для создания газовых и воздушных потоков; проводить термодинамический (эксергетический) анализ тепловых процессов и в дальнейшем тепловых установок с целью создания оптимальных теплотехнических режимов их работы и экономии топлива; пользоваться термодинамическими и теплотехническими справочными данными.

В соответствии с учебным планом студентам необходимо в 10-м семестре выполнить и защитить контрольную работу и сдать экзамен по программе курса.

1. ПРОГРАММА КУРСА

1.1. Введение. Этапы развития теории тепловых процессов

Содержание, цель и задачи дисциплины, место в системе подготовки инженеров-химиков-технологов. Связь ее с другими инженерными дисциплинами специальности.

Энергетическая политика и структура топливного баланса в республике.

Проблема экономии топлива, снижение норм его расхода, использование вторичных энергоресурсов в промышленности строительных материалов. Защита окружающей среды.

Этапы исторического развития теории тепловых процессов. Вклад отечественных и зарубежных ученых в развитие теории тепловых процессов.

Совершенствование тепловых процессов производства строительных материалов и изделий в свете выполнения Государственных программ инновационного развития Республики Беларусь, регионов, малых и средних городских поселений.

1.2. Источники и процессы получения теплоты. Виды и характеристика топлива

Источники получения теплоты. Органическое топливо: твердое, жидкое, газообразное (газовое).

Основные технические характеристики твердого топлива: состав, влажность, зольность, плавкость золы, выход летучих, теплота сгорания (теплотворная способность). Пересчеты сухой и горючей масс твердого топлива на рабочую массу, сухого газа – на влажный.

Определение высшей и низшей теплот сгорания топлива. Приведенные характеристики твердого и жидкого топлива. Понятие условного топлива. Тепловой эквивалент различных видов топлива. Классификация топлив и теплотехнические характеристики торфа, бурого и каменного углей, горючих сланцев, жидкого и газового топлива.

Марки каменных углей и мазута. Природное и искусственное газовое топливо.

Альтернативные виды топлива. Выбор топлива для осуществления теплотехнологических процессов в тепловых установках.

1.3. Физико-химические основы горения топлива и расчет процесса горения

Гомогенное и гетерогенное горение, скорость горения. Факторы, влияющие на скорость горения. Уравнение Аррениуса. Температурный коэффициент скорости горения. Горение газового топлива. Температура воспламенения, диффузионная и кинетическая стадии горения. Фронт пламени, ламинарное, турбулентное горение. Структура ламинарного диффузионного факела.

Горение твердого топлива. Стадии горения. Тепловая подготовка топлива. Горение летучих и кокса. Температурные области кинетического и диффузионного горения. Скорость выгорания углерода. Горение жидкого топлива. Стадии горения. Нижний и верхний пределы вспышки жидкого топлива. Интенсификация процесса горения.

Структура факела жидкого топлива, его зоны. Разновидность факелов и условия их создания. Основы расчета процесса горения топлива. Реакции горения компонентов топлива. Расчет количества кислорода и расхода на горение: теоретически необходимого, действительного, атмосферного.

Коэффициент избытка воздуха и его расчет. Расчет объема образующихся продуктов горения и их состава. Влагосодержание продуктов горения. Определение общего объема дымовых газов в тепловых установках.

Материальный баланс процесса горения. Расчет приходных и расходных статей, невязка баланса. Расчет температур горения топлива: калориметрической, теоретической и действительной. Методы расчета: по Ht - и ht -диаграммам, тепловому балансу. Диссоциация продуктов горения.

Расчет теплоты диссоциации продуктов горения и объема продуктов горения. Особенности расчета теоретической температуры горения твердого топлива. Связь действительной температуры горения топлива и температуры технологического процесса в тепловой установке.

Температурный напор и пирометрический коэффициент. Определение необходимости подогрева воздуха для горения топлива при осуществлении технологического процесса. Расчет минимальной температуры подогрева воздуха.

Особенности расчета процесса горения смеси различных видов топлива: газовых, жидких, твердых, твердого и жидкого, пылегазовой смеси, газового и жидкого.

1.4. Сжигание топлива в теплогенераторах и тепловых установках

Способы сжигания топлива для осуществления теплотехнологических процессов в тепловых установках. Топочные устройства, их классификация и требования к ним. Охрана окружающей среды. Слоевые топki, классификация, их обслуживание. Структура горящего слоя топлива, зоны горения. Камерные топki, классификация. Газо- и ма-зутосжигающие устройства.

Классификация горелок. Примеры конструкций горелок, применяемых в тепловых установках производства силикатных материалов, их техническая характеристика. Регулировка факела горелок, проскок, отрыв, срыв пламени.

Классификация форсунок, их схемы, показатели работы. Расположение горелки форсунок в камерных топках. Сжигание пылевидного топлива. Преимущество камерных топок для пылевидного топлива по сравнению со слоевыми. Пылеприготовление. Вихревые и циклонные топki. Особенности их устройства.

Шлакоудаление: холодное, жидкое. Топki с кипящим слоем. Системы подачи различных видов топлива к топливосжигающим устройствам и печам. Техника безопасности при их эксплуатации. Концентрационные границы взрываемости газо- и пылевоздушных смесей.

Показатели работы топок: тепловая мощность, КПД, объемная тепловая нагрузка, тепловая нагрузка зеркала горения. Основы расчета слоевых и камерных топок, горелок, форсунок.

1.5. Электронагрев и его применение в тепловых установках технологии силикатных материалов

Получение теплоты за счет электрического тока. Прямой, косвенный нагрев, создание электрической дуги и вихревых токов. Нагревательные элементы, электроды. Материалы электродов, нагревателей. Требования к ним. Материалы нагревателей для керамических печей: нихром, кантал, хромель, хромалой, карборунд, силит и др.

Конструктивные особенности нагревательных элементов и электродов, их устройство и установка в печах. Схемы расположения электродов в стекловаренных печах, параметры тока.

Расчет нагревательных элементов косвенного нагрева. Основы электротехнического расчета электрических печей для варки стекла.

1.6. Теплообмен в тепловых установках

Особенности теплообмена в тепловых установках. Теплоносители в печах и сушилках: факел, кладка, продукты горения топлива. Влияние их на теплообмен. Внутренний и внешний теплообмен в рабочем пространстве печей. Режимы внутреннего и внешнего теплообмена. Нагрев кладки и материала. Критерий Био и оценка с помощью его процесса нагрева твердых тел. Конвективный, радиационный, слоевой режимы теплообмена. Равномерно распределенный, направленный прямой и косвенный теплообмен режима внешнего теплообмена. Теплообмен в пламенном пространстве печей. Механизм теплообмена. Тепловые потоки, воспринимаемые материалом в печи.

Основы расчета теплообмена в пламенном пространстве. Количество теплоты, воспринимаемое кладкой. Количество теплоты, передаваемой излучением газами и кладкой материалу. Видимый коэффициент излучения. Влияние теплоотдачи от газов к кладке и потерь теплоты в окружающую среду на видимый коэффициент излучения. Расчет температуры кладки, газов и материала в печи. Влияние различных теплотехнических факторов на теплообмен в печи.

Основы моделирования и оптимизации теплообмена. Необходимые условия подобия процессов теплообмена в образце и модели. Основные критерии теплового подобия.

1.7. Аэродинамика газовых потоков в тепловых установках технологии силикатных материалов

Роль движения газовых потоков в процессах теплообмена. Параметры, характеризующие движение потоков. Виды напоров газов: геометрический, статический, динамический. Связь между напорами. Сопротивления движению газа: местное, от трения и преодоления геометрического напора.

Аэродинамика движения газового потока при взаимодействии с материалом, изделиями. Расчеты сопротивлений движению газов: плотного слоя материала, садки изделий, частиц материала в потоке. Расчет скорости истечения газов через отверстия, насадки, сопла. Виды движения газов в тепловых установках: естественное, принудительное. Циркуляция и рециркуляция газов. Способы создания рециркуляции газовых потоков.

Оборудование для перемещения газов: дымовые трубы, вентиляторы, эжекторы. Расчет дымовой трубы и подбор вентиляторов. Мо-

делирование движения газов. Основные критерии установившегося движения потока газов. Условия подобия в аэродинамике газов. Количественная связь между критериями подобия аэродинамики газов и теплообмена.

Критериальные уравнения для определения коэффициента теплоотдачи в тепловых установках. Оптимизация процессов теплообмена. Особенности расчета теплообмена при взаимодействии газовых потоков с материалом, изделиями, расплавом.

1.8. Тепловые процессы в материалах и изделиях, подвергаемых тепловой обработке

Виды и стадии тепловой обработки материалов и изделий силикатной технологии: нагрев, сушка, пропаривание, запаривание, обжиг, спекание, расплавление, варка.

Общая характеристика химических и физико-химических процессов, протекающих при тепловой обработке материалов и изделий силикатной технологии. Термохимические процессы. Определение теплоты и температурных интервалов тепловых процессов. Процесс сушки как нестационарный перенос теплоты и влаги. Значение сушки. Формы и виды связи влаги в материале.

Виды влажности материала. Взаимный пересчет показателей влажности. Явление переноса влаги в материалах и изделиях: внутренняя и внешняя диффузия, влагопроводность, паропроводность, термовлагопроводность. Закон переноса влаги (массопроводность). Скорость сушки. Совместный график сушки.

Понятие режима сушки. Оптимальный режим сушки. Усадка и усадочные напряжения в керамических изделиях в процессе сушки. Основы расчета оптимальных режимов сушки. Способы сушки силикатных материалов и изделий.

1.9. Основы энерготехнологии силикатных материалов

Понятие энерготехнологии. Использование первичных (ТЭР) и вторичных (ВЭР) энергоресурсов в технологии силикатных материалов. Разработка и создание энерготехнологических систем (ЭТС).

Термодинамический анализ тепловых процессов в ЭТС, его цель и решаемые задачи. Применение эксергетического метода термодинамического анализа. Понятие эксергии. Виды и свойства эксергии и энер-

гии. Расчеты эксергий: вещества в замкнутом объеме; термомеханической; химической; теплового потока; излучения.

Эксергетические диаграммы состояния: hs -диаграмма паров, Ts -диаграмма воздуха и eh -диаграмма паров. Эксергетические балансы и эксергетический КПД ЭТС и ее отдельных элементов. Виды эксергетических потерь. Эксергетическая производительность и мощность. Связь между энергетическими и эксергетическими характеристиками тепловой установки. Особенности потерь эксергии в ЭТС. Понятие о термомономическом анализе. Составление схемы эксергетических потоков тепловой установки (ЭТС) и построение диаграммы Грассмана – Шаргута. Эксергетический анализ процесса горения топлива.

Вторичные энергоресурсы в технологии силикатных материалов. Энерготехнологическое комбинирование в технологии силикатных материалов. Экологические аспекты теплотехнологий силикатных материалов.

2. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Тепловые процессы в силикатной промышленности, развитие теории тепловых процессов.
2. Виды сжигаемых топлив и их характеристика.
3. Пересчет масс топлива, определение теплотворной способности топлива и топливного эквивалента.
4. Определение расхода воздуха на горение топлива.
5. Определение продуктов горения топлива, их состава и влагосодержания.
6. Структура и составление материального баланса процесса горения.
7. Температуры горения топлива и методы расчета калориметрической температуры.
8. Теоретическая и действительная температуры горения топлива, методы их расчета.
9. Влияние коэффициента избытка воздуха и подогрева воздуха на процесс горения. Основы расчета минимальной температуры подогрева воздуха.
10. Методика расчета процесса горения смеси топлив.
11. Элементы теории горения топлива.
12. Горение газового топлива.
13. Горение твердого топлива.
14. Горение жидкого топлива.
15. Способы сжигания топлива.
16. Топочные устройства, их классификация.
17. Сжигание твердого топлива в слоевых топках, типы слоевых топок. Структура горящего слоя топлива.
18. Сжигание твердого топлива в камерных топках, пылеприготовление, шлакоудаление.
19. Сжигание твердого топлива в вихревых топках и топках КС, их преимущества и недостатки.
20. Показатели работы топок и требования к ним.
21. Сжигание газообразного топлива, горелки и их классификация.
22. Сжигание жидкого топлива, форсунки и их классификация.
23. Основы расчета слоевых и камерных топок.
24. Основы расчета горелок.
25. Основы расчета форсунок.
26. Получение теплоты за счет электрического тока. Нагревательные элементы, электроды.

27. Конструктивные особенности нагревательных элементов и электродов и их расположение в тепловых установках.
28. Основы электротехнических расчетов при осуществлении прямого нагрева.
29. Основы расчета нагревательных элементов косвенного нагрева.
30. Режимы теплообмена в тепловых установках.
31. Механизм теплообмена в пламенном пространстве печей.
32. Основы расчета теплообмена в пламенном пространстве печей.
33. Факторы, влияющие на теплообмен в печах.
34. Роль движения газовых потоков в процессах теплообмена. Виды напоров.
35. Основы моделирования движения газов.
36. Сопротивления движению газовых потоков.
37. Аэродинамика газового потока при взаимодействии с кусковым материалом, изделиями.
38. Аэродинамика движения газовых потоков при взаимодействии с дисперсным материалом.
39. Истечение газов через отверстия, насадки, сопла. Виды движения газов в тепловых установках, виды рециркуляции.
40. Оборудование для перемещения газов. Основы расчета дымовой трубы.
41. Подбор вентиляторов для перемещения газовых потоков.
42. Основы моделирования и оптимизация процессов теплообмена.
43. Теплообмен в тепловых установках с гравитационным слоем материала.
44. Теплообмен в тепловых установках с пересыпающимся слоем материала.
45. Теплообмен в тепловых установках с псевдооживленным и фонтанирующим слоем материала.
46. Теплообмен в тепловых установках с материалом, находящимся во взвешенном состоянии и при пневмотранспортировании.
47. Теплообмен в тепловых установках с рабочим пространством, заполненным изделиями.
48. Теплообмен в полупрозрачной среде.
49. Теплообмен при конденсации пара.
50. Виды тепловой обработки и общая характеристика процессов, протекающих в силикатных материалах и изделиях при тепловой обработке.
51. Процесс сушки, назначение и виды влаги в материале, виды влажности.

52. Перемещение влаги внутри тела. Скорость сушки, режим сушки.
53. Процесс усадки при сушке и возникающие напряжения.
54. Способы сушки в технологии силикатных материалов, основы расчета параметров сушильного агента.
55. Основы расчета скорости и длительности сушки.
56. Понятие энерготехнологии, методы термодинамического анализа энерготехнологических схем (ЭТС) производства.
57. Виды эксергии, свойства эксергии и энергии.
58. Основы расчета эксергии.
59. Эксергетический баланс ЭТС и ее элементов, эксергетический КПД.
60. Виды эксергетических потерь, внутренние связи и особенности потерь эксергии в ЭТС.
61. Эксергетическая производительность и мощность. Связь между эксергетическими и энергетическими характеристиками ЭТС (тепловой установки).
62. Эксергетический анализ ЭТС и диаграмма Грассмана – Шаргута.
63. Понятие о термоэкономическом анализе.
64. Эксергетический анализ и КПД процесса горения.
65. Вторичные энергоресурсы и энерготехнологическое комбинирование в технологии силикатных материалов.
66. Энерготехнологическое и утилизационное комбинирование с применением газотурбинной установки (ГТУ) и газопоршневого агрегата (ГПА).
67. Энерготехнологическое и утилизационное комбинирование для регенерации низкопотенциальных ВЭР.
68. Экологические аспекты энерготехнологий силикатных материалов.

3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

Контрольная работа по курсу «Тепловые процессы в технологии силикатных материалов» содержит шесть задач, охватывающих все разделы курса. Задачи являются расчетными и взаимосвязанными. Результаты расчета предыдущих задач служат исходными данными для решения последующих, поэтому необходимо быть внимательными при их выполнении – неправильный результат расчета может переходить из задачи в задачу. Перед решением каждой задачи следует ознакомиться с методиками по их расчету. В случаях возникновения затруднений при их выполнении нужно обратиться к дополнительным источникам, приведенным в списке литературы, или получить консультацию на кафедре, ведущей обучение по данному курсу.

Справочные данные, необходимые для расчетов, приведены в приложении к учебному пособию [1].

Для первых трех задач выбор исходных данных студентами осуществляется по порядковому номеру своей фамилии в журнале группы; остальные три рассчитываются с использованием полученных результатов решения предыдущих.

Первая задача посвящена расчету процесса горения топлива. В ней требуется определить по заданному составу топлива и условиям его сжигания расход воздуха на горение, количество и состав продуктов горения, калориметрическую, теоретическую, действительную температуры горения, составить материальный баланс процесса горения, чтобы удостовериться в правильности проведенных расчетов.

Вторая задача направлена на приобретение студентами навыков расчета топливосжигающих устройств: топки, горелки, форсунки. Вид топливосжигающего устройства обусловлен видом топлива, расчет горения которого произведен в первой задаче. Из результатов решения первой задачи потребуются также данные, относящиеся к теплоте сгорания рабочего топлива, расходу воздуха на его горение.

В третьей задаче следует провести аэродинамический расчет тепловой установки, для этого понадобятся данные по составу продуктов горения, полученные в первой задаче.

Четвертая задача потребует знаний методики расчета геометрического напора дымовой трубы и подбора вентилятора (дымососа) для создания движения газов. Учитывая, что дымовая труба и дымосос функционируют совместно, нужно установить характеристики дымососа для создания потока газов при заданной высоте дымовой трубы.

В пятой задаче предлагается провести расчет сложного теплообмена, имеющего место в тепловых установках и включающего излучение (радиацию) от нагретых дымовых газов и конвекцию. Поскольку на теплообмен оказывает влияние большое количество факторов, зависящих от вида подвергаемого тепловой обработке материала и конструкций тепловой установки, которые будут изучаться в дальнейшем, то в этой задаче необходимо только продемонстрировать умение проводить расчеты плотности лучистого и конвекционного тепловых потоков, пользоваться критериальными уравнениями на примере одной тепловой установки.

Шестая задача знакомит студентов с элементами эксергетического термодинамического анализа энерготехнологических схем, к которым относятся тепловые установки в технологии силикатных материалов. Решение ее позволяет приобрести навыки применения данного анализа для оценки потерь теплоты при проведении тепловых процессов. В задаче анализируется процесс сжигания топлива, расчеты горения которого выполнены в первой задаче.

Методики решения задач контрольного задания приводятся ниже.

3.1. Расчет горения топлива

1. *Определение характеристик топлива.* Проводится перерасчет заданного состава горючей массы твердого и жидкого топлива на рабочий состав с использованием коэффициентов, приведенных в [1, табл. 1.2].

На примере перерасчета содержания углерода, приведенным в [1, табл. 1.2], коэффициентами пользуются следующим образом:

$$[C]^c = [C]^r \frac{100 - A^c}{100}; \quad (3.1)$$

$$[C]^p = [C]^r \frac{100 - (A^p + W^p)}{100}; \quad (3.2)$$

$$[C]^r = [C]^c \frac{100}{100 - A^c}; \quad (3.3)$$

$$[C]^p = [C]^c \frac{100 - W^p}{100}; \quad (3.4)$$

$$[C]^r = [C]^p \frac{100}{100 - (A^p + W^p)}; \quad (3.5)$$

$$[C]^c = [C]^p \frac{100}{100 - W^p}, \quad (3.6)$$

где $[C]^c$, $[C]^f$, $[C]^p$ – содержание углерода соответственно в сухой, горючей и рабочей массах топлива, мас. %, A^p – содержание золы в топливе, мас. %; W^p – содержание влаги в топливе, мас. %.

Перерасчет состава газообразного топлива с сухого на влажный производится по следующим формулам:

$$[H_2O] = \frac{100w}{804 + w}; \quad (3.7)$$

$$[CH_4^{вл}] = [CH_4^c] \frac{100 - [H_2O]}{100}, \quad (3.8)$$

где $[H_2O]$ – содержание влаги в газе, об. %; w – влагосодержание газа, г/м³, при нормальных условиях (н. у.) сухого газа [1, прил., табл. 1]; $[CH_4^{вл}]$ – содержание метана во влажном газе, об. %; $[CH_4^c]$ – содержание метана в сухом газе, об. %. Низшая теплота сгорания, кДж/кг, твердого и жидкого топлива определяется по формуле Д. И. Менделеева:

$$Q_H^p = 340[C]^p + 1035[H]^p + 109([S]_{ор+к}^p - [O]^p) - 25W^p, \quad (3.9)$$

где 340, 1035, 109 – экспериментальные коэффициенты, приближенно равные теплоте сгорания соответствующих элементов, деленные на 100; $[C]^p$, $[H]^p$, $[S]_{ор+к}^p$, $[O]^p$, W^p – содержание элементов в топливе, мас. %. Низшая теплота сгорания, кДж/м³ при н. у., газообразного топлива определяется как сумма энтальпий окисления его горючих составляющих по универсальной формуле:

$$Q_H^c = 108[H_2] + 127[CO] + 234[H_2S] + 358[CH_4] + 590[C_2H_4] + 638[C_2H_6] + 913[C_3H_8] + 1187[C_4H_{10}] + 1461[C_5H_{12}]. \quad (3.10)$$

Высшая теплота сгорания, кДж/кг (кДж/м³ при н. у.), топлива рассчитывается по формуле

$$Q_B^p = Q_H^p + 2500w', \quad (3.11)$$

где 2500 – теплота парообразования воды при н. у., кДж/кг; w' – содержание водяных паров в продуктах горения топлива, кг/кг (кг/м³ при н. у.).

Величина w' для газообразного топлива находится по реакциям окисления его горючих составляющих, а для твердого топлива – из равенства, кг/кг,

$$w' = \frac{9[H]^p + W^p}{100}, \quad (3.12)$$

где 9 – стехиометрический массовый коэффициент реакции окисления водорода; $[H]^p$, W^p – соответственно содержание водорода и физической влаги в топливе, мас. %.

Для определения теплоты сгорания влажного газообразного топлива $Q_H^{вл}$ проводится либо перерасчет его на влажный состав с последующим использованием формулы (3.10), либо по зависимости, кДж/м³ при н. у.,

$$Q_H^{вл} = Q_H^c \frac{100 - [H_2O]}{100}, \quad (3.13)$$

где $[H_2O]$ – содержание водяных паров в топливе, об. %.

Перевод количества натурального топлива на условное топливо проводится с помощью теплового эквивалента (переводного коэффициента), величина которого равна отношению

$$\Theta_T = \frac{Q^p}{Q_{усл}}, \quad (3.14)$$

где $Q_{усл}$ – теплота сгорания условного топлива, принятая равной 29 300 кДж/кг.

2. *Расход воздуха на горение топлива.* Теоретический расход сухого воздуха, м³/кг, для горения твердого и жидкого топлива определяется по формуле

$$L_0 = 0,0889[C]^p + 0,265[H]^p + 0,0333([S]_{ор+к}^p - [O]^p); \quad (3.15)$$

газообразного – по формуле, м³/м³,

$$L_0 = 0,0476 \left\{ \begin{array}{l} 0,5[CO] + 0,5[H_2] + 1,5[H_2S] + \\ + \sum \left(m + \frac{n}{4} \right) [C_m H_n] - [O_2] \end{array} \right\}; \quad (3.16)$$

теоретический расход атмосферного воздуха для всех видов топлива, м³/м³ (м³/кг),

$$L'_0 = (1 + 0,0016d)L_0; \quad (3.17)$$

действительный расход сухого воздуха для всех видов топлива, м³/кг (м³/м³),

$$L_d = L_\alpha = \alpha L_0; \quad (3.18)$$

действительный расход атмосферного воздуха для всех видов топлива, $\text{м}^3/\text{кг}$ ($\text{м}^3/\text{м}^3$),

$$L'_\alpha = \alpha L'_0 = (1 + 0,0016d)L_0, \quad (3.19)$$

где $[C]^p$, $[H]^p$, $[S^p_{\text{ор+к}}]$, $[O]^p$ – содержание элементов в рабочем составе твердого и жидкого топлива, мас. %; $[CO]$, $[H_2]$, $[H_2S]$, $[C_mH_n]$, $[O_2]$ – содержание составляющих газов в газообразном топливе, об. %; d – влагосодержание атмосферного воздуха, $\text{г}/\text{м}^3$ сухого воздуха [1, рис. 1.1]; α – коэффициент избытка воздуха.

3. *Количество образующихся продуктов горения.* При горении твердого и жидкого топлива объемы их определяются по формулам, $\text{м}^3/\text{кг}$:

$$V(\text{CO}_2) = 0,01866[C]^p; \quad (3.20)$$

$$V(\text{SO}_2) = 0,007[S]^p_{\text{ор+к}} \quad (3.21)$$

$$V(\text{RO}_2) = 0,01866[C]^p + 0,007[S]^p_{\text{ор+к}}; \quad (3.22)$$

$$V(\text{H}_2\text{O}) = 0,1112[H]^p + 0,0124(W^p + 100w_{(\text{п})}) + 0,0016dL'_\alpha; \quad (3.23)$$

$$V(\text{N}_2) = 0,79L'_\alpha + 0,008[N]^p; \quad (3.24)$$

$$V(\text{O}_2) = 0,21(\alpha - 1)L_0, \quad (3.25)$$

где величины $[C]^p$, $[S]^p_{\text{ор+к}}$, $[H]^p$, W^p , $[N]^p$ подставляются в массовых процентах; величина $100w_{(\text{п})}$ подставляется лишь в случае, когда для распыления жидкого топлива используется пар, $\text{кг}/\text{кг}$ топлива.

Некоторую особенность расчета объема CO_2 , образующегося при горении, имеют горючие сланцы. При их сгорании в продукты горения попадает CO_2 из карбонатной части топлива в результате ее диссоциации. При расчете $V(\text{CO}_2)$ вводится поправка, $\text{м}^3/\text{кг}$,

$$V(\text{CO}_2) = 0,01866[C]^p + \frac{\beta[\text{CO}_2]}{\rho(\text{CO}_2)100}, \quad (3.26)$$

где $[\text{CO}_2]$ – содержание диоксида углерода в горючих сланцах (в карбонатной части), мас. %; β – степень разложения карбонатов (принимается равной 1 при сжигании сланцев в пылевидном состоянии или 0,7 – при сжигании в кусковом виде); $\rho(\text{CO}_2)$ – плотность CO_2 , $\text{кг}/\text{м}^3$ при н. у.

Объем продуктов горения газообразного топлива определяют по формулам, $\text{м}^3/\text{м}^3$:

$$V(\text{CO}_2) = 0,01([\text{CO}_2] + [\text{CO}] + \sum m[C_mH_n]); \quad (3.27)$$

$$V(\text{SO}_2) = 0,01[\text{H}_2\text{S}]; \quad (3.28)$$

$$V(\text{RO}_2) = 0,01([\text{CO}_2] + [\text{CO}] + [\text{H}_2\text{S}] + \sum m[\text{C}_m\text{H}_n]); \quad (3.29)$$

$$V(\text{H}_2\text{O}) = 0,01([\text{H}_2] + (\text{H}_2\text{S}) + \sum \frac{n}{2}[\text{C}_m\text{H}_n] + [\text{H}_2\text{O}] + 0,16dL_\alpha); \quad (3.30)$$

$$V(\text{N}_2) = 0,79L_\alpha + 0,01[\text{N}_2]; \quad (3.31)$$

$$V(\text{O}_2) = 0,21(\alpha - 1)L_0. \quad (3.32)$$

При проведении расчета вместо химических формул газов подставляют их величины из состава топлива (об. %).

Общий объем продуктов горения V_0 при $\alpha = 1$ или V_α при $\alpha > 1$ определяют как сумму составляющих продуктов горения ($\sum V_i$).

Объем продуктов горения при разных значениях α можно найти как, $\text{м}^3/\text{кг}$ ($\text{м}^3/\text{м}^3$),

$$V_\alpha = L_\alpha + \Delta V, \quad (3.33)$$

где $\Delta V = V_0 - L_0 = V_\alpha - L_\alpha$, т. е. ΔV представляет величину, не зависящую от α .

4. *Состав продуктов горения.* Его определяют по найденным значениям V_i и $\sum V_i = V_\alpha$, например, об. %,

$$[\text{CO}_2] = \frac{V(\text{CO}_2)}{V_\alpha} \cdot 100; \quad (3.34)$$

$$[\text{H}_2\text{O}] = \frac{V(\text{H}_2\text{O})}{V_\alpha} \cdot 100. \quad (3.35)$$

5. *Материальный баланс процесса горения.* Составляется для проверки правильности предыдущих расчетов на 100 м^3 газообразного топлива или на 100 кг твердого либо жидкого топлива по зависимости $G_{\text{т}} + G_{\text{в}} = G_{\text{п.г}} + G_{\text{зол}}$ (табл. 3.1).

В табл. 3.1 в формулах для расчета массовых количеств компонентов газообразного топлива, участвующих в горении, подставляются их величины (% об.), а плотности газов – при н. у. Плотности газов определяют из выражения, $\text{кг}/\text{м}^3$,

$$\rho_i = \frac{\mu_i}{22,4}, \quad (3.36)$$

где μ_i – молярная масса компонента газообразного топлива, $\text{кг}/\text{кмоль}$; $22,4$ – объем киломоля газа при н. у., $\text{м}^3/\text{кмоль}$.

Таблица 3.1

Материальный баланс процесса горения газообразного топлива

Приход	кг	Расход	кг
1. Природный газ В том числе:	$100\Sigma r_i \rho_i$	Продукты горения В том числе:	$100\Sigma V_i \rho_i$
CH ₄	$[\text{CH}_4]\rho(\text{CH}_4)$	CO ₂	$100V(\text{CO}_2)\rho(\text{CO}_2)$
C ₃ H ₆	$[\text{C}_3\text{H}_6]\rho(\text{C}_3\text{H}_6)$	H ₂ O	$100V(\text{H}_2\text{O})\rho(\text{H}_2\text{O})$
C ₃ H ₈	$[\text{C}_3\text{H}_8]\rho(\text{C}_3\text{H}_8)$	N ₂	$100V(\text{N}_2)\rho(\text{N}_2)$
C ₄ H ₁₀	$[\text{C}_4\text{H}_{10}]\rho(\text{C}_4\text{H}_{10})$	O ₂	$100V(\text{O}_2)\rho(\text{O}_2)$
C ₅ H ₁₂	$[\text{C}_5\text{H}_{12}]\rho(\text{C}_5\text{H}_{12})$		
CO ₂	$[\text{CO}_2]\rho(\text{CO}_2)$		
N ₂	$[\text{N}_2]\rho(\text{N}_2)$		
H ₂ O	$[\text{H}_2\text{O}]\rho(\text{H}_2\text{O})$		
2. Воздух В том числе:	$100L_{\alpha}\rho_{\text{вл. возд}}$		
O ₂	$21L_{\alpha}\rho(\text{O}_2)$		
N ₂	$79L_{\alpha}\rho(\text{N}_2)$		
H ₂ O	$0,16dL_{\alpha}\rho(\text{H}_2\text{O})$		
<i>Итого</i>	G_1	<i>Итого</i>	G_2

После составления материального баланса процесса горения топлива рассчитывается невязка баланса по формуле, %,

$$\text{невязка} = \frac{G_1 - G_2}{G_1} \cdot 100, \quad (3.37)$$

которая допускается не более 0,5%.

Аналогично проводится расчет приходных и расходных статей материального баланса для твердого и жидкого топлива (табл. 3.2).

Таблица 3.2

Материальный баланс процесса горения твердого (жидкого) топлива

Приход	кг	Расход	кг
1. Твердое (жидкое) топливо	100	1. Зола (шлак)	A^c
2. Воздух В том числе:	100	2. Продукты горения В том числе:	$100\Sigma V_i \rho$
O ₂	$21L_{\alpha}\rho(\text{O}_2)$	CO ₂	$100V(\text{CO}_2)\rho(\text{CO}_2)$
N ₂	$79L_{\alpha}\rho(\text{N}_2)$	SO ₂	$100V(\text{SO}_2)\rho(\text{SO}_2)$
H ₂ O	$0,16L_{\alpha}\rho(\text{H}_2\text{O})$	H ₂ O	$100V(\text{H}_2\text{O})\rho(\text{H}_2\text{O})$
		N ₂	$100V(\text{N}_2)\rho(\text{N}_2)$
		O ₂	$100V(\text{O}_2)\rho(\text{O}_2)$
<i>Итого</i>	G_1	<i>Итого</i>	G_2

6. *Температуры горения топлива.* Калориметрическая и теоретическая определяются с использованием ht -диаграммы [1, табл. 1.4] или уравнения теплового баланса. Для твердого и жидкого топлива уравнения имеют вид

$$Q_H^p + c_T t_T + L_\alpha c'_{pm, в} t_B = V_\alpha c'_{pm, п.г} t_{кал}; \quad (3.38)$$

$$Q_H^p + c_T t_T + L_\alpha c'_{pm, в} t_B = V_\alpha c'_{pm, п.г} t_{теор} + H_{дис}; \quad (3.39)$$

для газообразного

$$Q_H + c'_{pm, г} t_T + L_\alpha c'_{pm, в} t_B = V_\alpha c'_{pm, п.г} t_{кал}; \quad (3.40)$$

$$Q_H + c'_{pm, г} t_T + L_\alpha c'_{pm, в} t_B = V_\alpha c'_{pm, п.г} t_{теор} + H_{дис}, \quad (3.41)$$

где c_T – удельная теплоемкость рабочей массы твердого и жидкого топлива, кДж/(кг · К), которая определяется по формуле

$$c_T = \frac{100 - W^p}{100} c_T^c + \frac{W^p}{100} c_{вод}, \quad (3.42)$$

где c_T^c , $c_{вод}$ – удельная теплоемкость соответственно сухой массы топлива [1, прил., табл. 8] и воды, кДж/(кг · К); $c'_{pm, п.г}$ – средняя объемная изобарная теплоемкость продуктов горения, которая определяется по формуле, кДж/(м³ · К),

$$c'_{pm, п.г} = \sum r_i c'_{pm, i}, \quad (3.43)$$

где r_i – объемная доля каждой газовой составляющей продуктов горения; $c'_{pm, i}$ – средняя объемная изобарная теплоемкость индивидуальных газов, входящих в продукты горения, кДж/(м³ · К) [1, прил., табл. 6].

Калориметрическую и теоретическую температуру, °С, находят, решая указанные уравнения относительно $t_{кал}$ и $t_{теор}$. Поскольку левая часть уравнений представляет собой $H_{общ}$, то

$$t_{кал} = \frac{H_{общ}}{V_\alpha c'_{pm, п.г}}; \quad (3.44)$$

$$t_{теор} = \frac{H'_{общ}}{V_\alpha c'_{pm, п.г}}, \quad (3.45)$$

где $H'_{общ} = H_{общ} - H_{дис}$.

Если для горения используют топливо и воздух при температуре окружающей среды, то физическая теплота (энтальпия) топлива и энтальпия воздуха ввиду небольших их значений могут не учитываться. В расчетах можно использовать только Q_H^p или Q_H .

Поскольку в вышеуказанных формулах неизвестными являются две величины – искомая температура и теплоемкость продуктов горения, которая также зависит от температуры, то поступают следующим образом.

Предварительно принимают ориентировочную температуру горения в пределах 1600–1900°C. Большее значение температуры выбирают для топлива с более высокой теплотворной способностью.

Для принятой температуры находят с помощью таблицы теплоемкостей [1, прил., табл. 6] $c'_{pm, п.г}$ и подставляют ее в формулы.

Определяют $t_{\text{кал}}^{\text{ориен}}$ и $t_{\text{теор}}^{\text{ориен}}$, которые являются приближенными, затем выбирают два значения температур t_1 и t_2 , удовлетворяющие следующим условиям: $t_2 - t_1 = 100^\circ\text{C}$, $t_1 < t_{\text{кал}}^{\text{ориен}} < t_2$. Разность $t_2 - t_1$ можно принять и другую, например 50, 200°C, что не принципиально.

С использованием принятых температур t_1 и t_2 рассчитывают энтальпии H_{t_1} и H_{t_2} продуктов горения, кДж/кг (кДж/м³),

$$H_{t_1} = V_{\alpha} c_{pm, п.г}^{t_1} t_1; \quad (3.46)$$

$$H_{t_2} = V_{\alpha} c_{pm, п.г}^{t_2} t_2, \quad (3.47)$$

где $c_{pm, п.г}^{t_1}$, $c_{pm, п.г}^{t_2}$ – средняя объемная изобарная теплоемкость продуктов горения, кДж/(м³ · К), рассчитанная соответственно при температуре t_1 и t_2 .

После этого составляется пропорция

$$(H_{t_2} - H_{t_1}) - 100^\circ\text{C}; \quad (3.48)$$

$$(H_{\text{общ}} - H_{t_1}) - \Delta t^\circ\text{C}, \quad (3.49)$$

которая решается относительно $\Delta t^\circ\text{C}$:

$$\Delta t = \frac{(H_{\text{общ}} - H_{t_1})100}{(H_{t_2} - H_{t_1})}. \quad (3.50)$$

Фактическая калориметрическая температура горения будет равна $t_{\text{кал}} = t_1 + \Delta t$.

Аналогично поступают при расчете теоретической температуры горения. Как было показано выше, если калориметрическая температура будет меньше 1600°C , то $t_{\text{теор}} = t_{\text{кал}}$, если $t_{\text{кал}}$ будет больше 1600°C , следует рассчитывать $H_{\text{дис}}$. Так как при температурах до 2200°C диссоциирует небольшая часть CO_2 и H_2O , а продукты диссоциации в общем объеме продуктов горения составляют еще меньшую часть, то для упрощения расчета теоретической температуры горения принимают энтальпию продуктов горения постоянной.

Для расчета $H_{\text{дис}}$ определяют энтальпии реакций, кДж/кг, (кДж/м³), диссоциации CO_2 и H_2O :



Тогда

$$H'_{\text{общ}} = H_{\text{общ}} - H_{\text{дис}}; \quad (3.51)$$

$$H_{\text{дис}} = \Delta H(\text{CO}_2)_{\text{дис}} + \Delta H(\text{H}_2\text{O})_{\text{дис}}; \quad (3.52)$$

$$\Delta H(\text{CO}_2)_{\text{дис}} = aV(\text{CO}_2)\Delta h(\text{CO}); \quad (3.53)$$

$$\Delta H(\text{H}_2\text{O})_{\text{дис}} = bV(\text{H}_2\text{O})\Delta h(\text{H}_2), \quad (3.54)$$

где a и b – коэффициенты степени диссоциации соответственно CO_2 и H_2O [1, рис. 1.3]; $V(\text{CO}_2)$, $V(\text{H}_2\text{O})$ – объемы CO_2 и H_2O соответственно в продуктах горения до диссоциации, м³/кг (м³/м³); $\Delta h(\text{CO})$, $\Delta h(\text{H}_2)$ – энтальпии реакций образования соответственно CO и H_2 , кДж/м³ [1, табл. 1.14].

Действительную температуру горения $t_{\text{д}}$ определяют с учетом потерь теплоты за счет теплообмена с окружающей средой.

Для определения $t_{\text{д}}$ находят энтальпию $H''_{\text{общ}}$, кДж/кг (кДж/м³),

$$H''_{\text{общ}} = \eta_n H'_{\text{общ}}, \quad (3.55)$$

где η_n – пирометрический коэффициент процесса горения, учитывающий потери теплоты [1, табл. 1.15]; $H'_{\text{общ}}$ – энтальпия продуктов горения при теоретической температуре горения, кДж/кг (кДж/м³).

По энтальпии $H''_{\text{общ}}$ рассчитывают $t_{\text{д}}$ $^{\circ}\text{C}$:

$$t_{\text{д}} = \frac{H''_{\text{общ}}}{V_{\alpha} c'_{\text{рт,п.г}}}. \quad (3.56)$$

Расчет t_d производится по такой же методике, как и расчет калориметрической температуры.

При использовании ht -диаграммы [1, рис. 1.4] t_d находят по величине $\eta_{\text{п}} H'_{\text{общ}} / V_{\alpha}$ (пунктирная линия) или $\eta_{\text{п}} H_{\text{общ}} / V_{\alpha}$ (сплошная линия). При известных значениях $t_{\text{кал}}$ и $t_{\text{теор}}$ t_d можно вычислить как

$$t_d = \eta_{\text{п}} t_{\text{теор}}. \quad (3.57)$$

7. *Расчет процесса горения бинарного топлива.* Методика расчета процесса горения бинарного топлива будет зависеть от исходных данных.

Если требуется получить топливо с заданной теплотой сгорания, то по ней определяют вначале в смеси доли этих топлив из равенств для смеси твердых, жидких, твердого и жидкого топлива

$$Q_{\text{н, см}}^{\text{п}} = a Q_{\text{н,1}}^{\text{п}} + (1-a) Q_{\text{н,2}}^{\text{п}}; \quad (3.58)$$

для смеси газообразных топлив

$$Q_{\text{н, см}} = a Q_{\text{н,1}} + (1-a) Q_{\text{н,2}}, \quad (3.59)$$

где a – массовая или объемная доля первого топлива; $(1-a)$ – массовая или объемная доля второго топлива.

Зная доли топлив и заданное количество одного из них, определяют количество второго топлива по зависимостям

$$a = \frac{B_1}{B_1 + B_2}, \quad a = \frac{V_1}{V_1 + V_2}, \quad (3.60)$$

где B_1 и B_2 – масса соответственно первого и второго топлива в бинарной смеси топлив, кг; V_1 и V_2 – объемы соответственно первого и второго топлива в бинарной смеси газообразных топлив, м³.

Расчет параметров (характеристик) процесса горения: расхода воздуха L_{α} , объемов образующихся продуктов горения $V_{i, \alpha}$; V_{α} , состава продуктов горения, температур горения $t_{\text{кал}}$, $t_{\text{теор}}$, t_d производится двумя способами.

Первый заключается в определении среднего состава бинарного топлива по формулам для смесей твердых, жидких, жидкого и твердого топлив:

$$[C]_{\text{см}}^{\text{п}} = a[C]_1^{\text{п}} + (1-a)[C]_2^{\text{п}}; \quad [H]_{\text{см}}^{\text{п}} = a[H]_1^{\text{п}} + (1-a)[H]_2^{\text{п}} \text{ и т. д.}; \quad (3.61)$$

для смеси газообразных топлив:

$$[CH_4]^{\text{см}} = a[CH_4]^1 + (1-a)[CH_4]^2; \quad (3.62)$$

$$[\text{CO}]^{\text{см}} = a[\text{CO}]^1 + (1-a)[\text{CO}]^2, \quad (3.63)$$

где $[\text{C}]_1^{\text{п}}$, $[\text{C}]_2^{\text{п}}$, $[\text{H}]_1^{\text{п}}$, $[\text{H}]_2^{\text{п}}$ и т. д. – содержание соответствующих элементов в первом и втором твердом или жидком топливе, мас. %; $[\text{CH}_4]^1$, $[\text{CH}_4]^2$, $[\text{CO}]^1$, $[\text{CO}]^2$ – содержание соответствующих газов в первом и втором газообразном топливе, об. %.

По найденным средним составам топлива производятся дальнейшие расчеты процесса горения по вышеприведенной методике для одинарного топлива.

Второй способ состоит в том, что отдельно ведутся расчеты горения первого и второго топлива, а затем определяются параметры процесса горения смешанного топлива по формуле

$$\Pi_{\text{см}} = a\Pi_1 + (1-a)\Pi_2, \quad (3.64)$$

где Π_1 , Π_2 , $\Pi_{\text{см}}$ – параметры процесса горения $L_\alpha, V_{i,\alpha}, V_\alpha$ и т. д. первого, второго топлив и их смеси.

Для расчета бинарных смесей газообразного и жидкого или газообразного и твердого топлив следует знать расход жидкого или твердого топлива g , кг/м³. Для определения характеристик полученного смешанного топлива и процесса горения используют следующие формулы:

$$Q_{\text{н, см}} = Q_{\text{н, Г}} + gQ_{\text{н, жт, (тт)}}^{\text{п}}; \quad (3.65)$$

$$\Pi_{\text{см}} = \Pi_{\text{Г}} + g\Pi_{\text{ж}}, \quad (3.66)$$

где $Q_{\text{н, см}}$, $Q_{\text{н, Г}}$, $Q_{\text{н, жт, (тт)}}^{\text{п}}$ – теплоты сгорания топлив соответственно смешанного (кДж/м³), газообразного (кДж/м³) и жидкого или твердого (кДж/кг); $\Pi_{\text{см}}$, $\Pi_{\text{Г}}$, $\Pi_{\text{ж}}$ – один из параметров процесса горения $L_\alpha, V_{i,\alpha}, V_\alpha, t_{\text{кал}}$ и т. д. соответственно смешанного газообразного, жидкого или твердого топлив в соответствующих единицах измерения.

Для нахождения параметров процесса горения предварительно необходимо рассчитать отдельно процессы горения газообразного и жидкого или твердого топлив.

Если будут заданы другие характеристики бинарного топлива, то расчет процесса горения необходимо проводить с использованием комбинаций различных формул, рекомендованных выше для расчета характеристик топлива и его процесса горения.

Расчет процесса горения бинарного топлива по заданной температуре горения $t_{\text{кал}}$ заключается в определении массовых или объ-

емных долей в смеси двух топлив. Для этого на основе уравнения теплового баланса процесса горения составляется следующая зависимость:

$$h_{\text{общ}}^{\text{см}} = \frac{aH_{\text{общ}1} + (1-a)H_{\text{общ}2}}{aV_{\alpha,1} + (1-a)V_{\alpha,2}}. \quad (3.67)$$

Для определения энтальпии продуктов горения $h_{\text{общ}}^{\text{см}}$, кДж/м³, бинарного топлива, в данном случае смеси жидких, твердых, жидкого и твердого, газообразных топлив, следует произвести расчеты их процессов горения.

После подстановки всех значений в вышеприведенную формулу и нахождения $h_{\text{общ}}^{\text{см}}$ по ht -диаграмме [1, рис. 1.4] определяют $t_{\text{кал}}$ (пунктирная линия на диаграмме) и $t_{\text{теор}}$ (сплошная линия на диаграмме).

Аналогично находят температуры горения и для бинарных смесей гетерогенных топлив по формуле

$$h_{\text{общ}}^{\text{см}} = \frac{H_{\text{общ}}^{\Gamma} + gH_{\text{общ}}^{\text{жт}(\Gamma\Gamma)}}{V_{\alpha}^{\Gamma} + gV_{\alpha}^{\text{жт}(\Gamma\Gamma)}}. \quad (3.68)$$

3.2. Расчет топливосжигающих устройств

1. *Расчет топок (теплогенераторов).* Для слоевых топок рассчитывают требуемую площадь колосниковой решетки R_p , м²,

$$R_p = \frac{Q_T}{q_R}, \quad (3.69)$$

где Q_T – теплопроизводительность топки, кДж/ч, кВт; q_R – тепловое напряжение (тепловая нагрузка) зеркала горения, кДж/(м²·ч), кВт.

Длину и ширину топки принимают конструктивно исходя из условий удобства обслуживания (длина не более 2 м, ширина одной топки не более 1 м).

Определяют объем топочного пространства V_T , м³,

$$V_T = \frac{Q_T}{q_v}. \quad (3.70)$$

Находят высоту топочного пространства h_T , м,

$$h_T = \frac{V_T}{R_p}. \quad (3.71)$$

Вычисляют полную высоту топочного пространства (от поверхности колосниковой решетки до замка свода) H_T , м,

$$H_T = h_T + h_c, \quad (3.72)$$

где h_c – суммарная высота слоя топлива и шлаковой подушки, которая принимается для бурого угля 0,5–0,6; для каменного – 0,3–0,4; для антрацита – 0,15–0,20 м.

Обычно средняя высота слоевых топок небольшой мощности составляет 1,5–3 м. Она выбирается тем большей, чем выше давление дутья под слой топлива и чем мельче топливо.

Если коэффициент избытка воздуха α не лимитируется требуемой температурой в тепловой установке, то его принимают в пределах: для бурого угля 1,30–1,55; для каменного 1,35–1,40; для антрацита 1,30–1,35.

Бурые и каменные угли сжигают с подогревом дутьевого воздуха до 150–200°C. Антрацит сжигают без подогрева воздуха. Давление воздушного дутья должно быть 800–1000 Па.

Исходной величиной для расчета *камерных* топок, как и при расчете топок слоевого сжигания, является теплопроизводительность Q_T .

При расчете коэффициента полезного действия (η_T) топки по формуле $\eta_T = 100 - q_x - q_m - q_{окр. ср}$, %, q_x принимают для угольной пыли и мазута 1,5–2; для газа – 0,5%. Потерями теплоты от механической неполноты горения (q_m) в расчетах можно пренебречь из-за их ничтожно малой величины, а потери в окружающую среду ($q_{окр}$) принимают в неизменных пределах: 2–5%. Округленно η_T можно принять для камерных топок 0,90–0,92. Затем по справочным данным [1, прил., табл. 12] выбирают q_v .

Величину q_v принимают для пылеугольных топок $(0,5-0,7) \cdot 10^6$; для мазута – $0,9 \cdot 10^6$; для природного газа – $1,1 \cdot 10^6$ кДж/(м³ · ч).

Рассчитывают требуемый объем топки по формуле (3.71).

Далее исходя из конкретных условий сжигания топлива выбирают типоразмер горелки (форсунки) и по ее характеристике [1, прил., табл. 14] учитывают длину факела L_f и угол раскрытия 2α . Длину топки L_T принимают на 0,2–0,3 м больше длины факела, чтобы он не касался задней стенки топки во избежание быстрого разрушения футеровки. Требуемую площадь поперечного сечения топки S_T , м², определяют из соотношения

$$S_T = \frac{V_T}{L_T}. \quad (3.73)$$

По величине S_T рассчитывают линейные размеры, диаметр для цилиндрической топки, ширину и высоту для прямоугольной (квадратной) топки. Полученные размеры топки должны сочетаться с параметрами факела во внутреннем контуре топки. При правильно выбранных размерах факел не должен касаться боковых стенок топки.

2. *Расчет газовых горелок.* Сводится к определению сечений газопроводов или каналов, сопловых отверстий и других сечений, обеспечивающих при заданных давлениях газа и воздуха необходимую производительность горелки. Исходными данными для расчета горелок является тепловая мощность топки, печи Q_T .

По конструктивным соображениям определяется требуемое число горелок и рассчитывается их номинальная тепловая мощность.

Для дутьевой горелки затем рассчитывается расход газа V_G , принимаются значения давлений газа и воздуха или скорости их истечения, а также количество первичного воздуха V'_B .

Площадь сечения f_G и диаметр газового сопла d_c для однопроводной дутьевой горелки определяются по формулам, m^2 ,

$$f_G = \frac{V_G}{3600w_G}; \quad (3.74)$$

$$d_c = \sqrt{1,27f_G}, \quad (3.75)$$

где w_G – принятая скорость истечения газа для выбранного типа горелки, м/с.

При заданном давлении газа скорость его истечения из сопла находят по формуле, м/с,

$$w_G = \varphi_G \sqrt{\frac{2p}{\gamma_G}}, \quad (3.76)$$

где φ_G – коэффициент скорости, равный 0,82–0,98; p – давление газа, Па; γ_G – плотность газа, kg/m^3 .

Площадь сечения газопровода и его диаметр определяются по скорости газа в газопроводе и газовом коллекторе (10–12 м/с для газа низкого давления и 25–30 м/с для газа среднего давления) с использованием формул (3.74), (3.75). Для двухпроводных (двухканальных) дутьевых горелок определяются: сечение кольцевой щели для воздуха в горелках типа «труба в трубе»; сечение носика горелки для горелок с частичным или полным смещением.

Сечение кольцевой щели, m^2 , для воздуха определяется по формуле, аналогичной (3.74):

$$f_{к. щ} = \frac{V'_г}{3600w_в}, \quad (3.77)$$

где $w_в$ – принятая или рассчитанная по формуле (3.76) скорость воздуха при заданном давлении, м/с.

Полное сечение горелки типа «труба в трубе» определяют по формуле, м,

$$d_{пол} = \sqrt{1,27(f_c + f_{к. щ})}. \quad (3.78)$$

Сечение $f_{см}$ носика дутьевой горелки при неполном или полном смешении газа и воздуха $d_{см}$ определяют по формуле, m^2 ,

$$f_{см} = \frac{(V_г + V'_в)T_{см}}{3600T_0w_{см}}, \quad (3.79)$$

где $T_{см}$ – температура горючей смеси, К; T_0 – температура 273 К; $w_{см}$ – скорость горючей смеси, выходящей из горелки при нормальных условиях, исключая проскок или отрыв пламени (принимается в пределах 15–30 м/с).

Диаметр носика горелки $d_{см}$, м, определяют по формуле, аналогичной (3.75):

$$d_{см} = \sqrt{1,27f}. \quad (3.80)$$

При учете толщины трубы общий диаметр, m^2 , горелки типа «труба в трубе» рассчитывают по формуле

$$d_{общ} = d_{пол} + 2(\delta_1 + \delta_2), \quad (3.81)$$

где δ_1 и δ_2 – толщина соответственно газовой и воздушной трубы, м.

Для дутьевых горелок частичного и полного смешения

$$d_{общ} = d_{см} + 2\delta, \quad (3.82)$$

где δ – толщина трубы, из которой выполнен носик горелки, м.

При расчете однопроводных *инжекционных* горелок определяют размеры сопловых отверстий, скорость истечения газа, а также размеры инжекционного устройства, диффузора и других элементов горелок (рисунок).

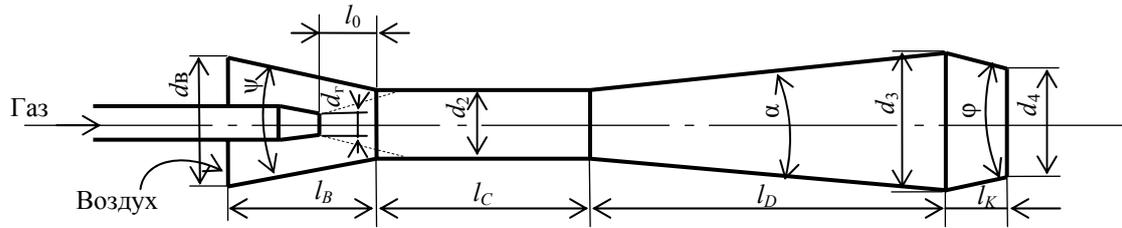


Схема однопроводной инжекционной горелки

Исходными данными для расчета являются располагаемое давление газа p_2 и производительность горелки по газу.

При избыточном давлении газа до 10^4 Па скорость его истечения определяется по формуле (3.76).

При давлении газа более 10^4 Па процесс истечения становится адиабатным и скорость истечения газа, м/с, рассчитывается по формуле

$$w_{\Gamma} = \varphi_{\Gamma} \sqrt{2 \frac{k}{k-1} RT_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}, \quad (3.83)$$

где k – показатель адиабаты, равный для метана 1,31; R – газовая постоянная, равная для метана 520 Дж/(кг · К); T_1 – температура газа, К; p_1 и p_2 – абсолютное давление соответственно газа до истечения и среды после горелки, Па.

Формула (3.83) используется при условии $p_2/p_1 > \beta_{кр}$:

$$\beta_{кр} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}, \quad (3.84)$$

где $\beta_{кр}$ – показатель отношения $p_{кр}/p_1$, равный для метана 0,538.

После определения w_{Γ} рассчитывается сечение газового сопла f_{Γ} по формуле (3.74) и сечение горла инжекционного смесителя $f_{см}$, м²,

$$f_{см} = f_{\Gamma} f, \quad (3.85)$$

где f – отношение $f_{см}/f_{\Gamma}$, устанавливаемое с учетом массовой m и объемной z кратности инжекции по формуле

$$f = \left(1 + \frac{\zeta}{2} \right) (1+m)(1+z), \quad (3.86)$$

где ζ – коэффициент аэродинамического сопротивления горла инжекционного смесителя, равный 0,04–0,05; $m = G_B / G_{\Gamma}$; $z = V_B / V_{\Gamma}$; G_B , V_B – со-

ответственно массовый и объемный расход воздуха кг/с и м³/с; G_{Γ} , V_{Γ} – соответственно массовый и объемный расход газа, кг/с и м³/с.

При давлении газа больше 10^4 Па, но меньше критической G_{Γ} , кг/с, определяется по формуле

$$G_{\Gamma} = \varphi_{\Gamma} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right] \frac{p_1}{v_1}}, \quad (3.87)$$

где v_1 – удельный объем газа перед соплом, м³/кг.

Диаметр горла смесителя d_b рассчитывают по формуле, аналогичной (3.75), в которой скорость воздуха w_b принимают равной 3–5 м/с.

Центральный угол входного патрубка (горла) смесителя ψ принимают равным 30–40°С.

Тогда l_b , м, будет равным

$$l_b = \frac{d_b - d_2}{2 \operatorname{tg} \frac{\psi}{2}}, \quad (3.88)$$

где d_2 – диаметр цилиндрической части смесителя, равный $\sqrt{1,27 f_{\text{см}}}$, м².

Остальные геометрические размеры смесителя, м, определяются по следующим эмпирическим зависимостям:

$$l_c = (3 - 5)d_2; \quad d_{\Gamma} = \sqrt{1,27 f_{\Gamma}}; \quad d_3 = (1,25 - 1,4)d_4; \quad d_4 = (1 - 1,25)d_2;$$

$$l_D = \frac{d_3 - d_2}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}; \quad l_0 = (1,5 - 2,0)d_2; \quad l_k = d_4.$$

Угол α принимается равным 6–10%.

3. Расчет *пылеугольных горелок*. Заключается в определении размеров выходного отверстия, сечения трубопроводов и сопротивлений на пути пылевоздушной смеси и воздуха.

Исходными данными для расчета являются расход топлива B , расход первичного воздуха V'_b (для одноканальной горелки) и расход вторичного воздуха V''_b (для двухканальной горелки).

Определяют расход пылевоздушной смеси $V'_{\text{см}}$ с учетом температуры нагретого воздуха по формуле, м³/с,

$$V_{\text{см}}^t = \frac{B}{3600} \left(V'_B \frac{T_B}{T_0} + \frac{1}{\rho_T} \right), \quad (3.89)$$

где B – расход пылевидного топлива, кг/ч; V'_B – расход первичного воздуха при нормальных условиях, м³/кг; T_B – температура нагрева воздуха, К; $T_0 = 273$ К; ρ_T – плотность пылевидного топлива, кг/м³ (для угольной пыли 1000–1100 кг/м³).

Рассчитывается сечение сопла горелки для пылевидного топлива f_c , м²,

$$f_c = \frac{V_{\text{см}}^t}{\varepsilon w_{\text{см}}}, \quad (3.90)$$

где ε – коэффициент заполнения сопла (при длинных соплах $\varepsilon = 1$); $w_{\text{см}}$ – скорость пылевоздушной смеси (от 15–30 до 60–80 м/с во вращающихся печах).

Требуемое давление пылевоздушной смеси p_1 , Па (Н/м²), перед соплом равно

$$p_1 = (1 + \varepsilon_{\text{п}}) \frac{w_{\text{см}}^{\Gamma} \gamma_{\text{см}}^t}{2} + p_2, \quad (3.91)$$

где $\varepsilon_{\text{п}}$ – коэффициент потерь давления на выходе (0,1–0,2); p_2 – противодавление среды, в которую подается смесь, Н/м²; $\gamma_{\text{см}}^t$ – плотность пылевоздушной смеси при t °С, кг/м³, определяемая по выражению

$$\gamma_{\text{см}}^t = \frac{(\gamma_{\text{в}}^0 + c_{\text{п}}) \frac{T_0}{T_{\text{в}}}}{1 + \frac{c_{\text{п}} T_0}{\rho_{\text{п}} T_{\text{в}}}}, \quad (3.92)$$

где $\gamma_{\text{в}}^0$ – плотность воздуха при нормальных условиях, равная 1,293 кг/м³; $c_{\text{п}}$ – количество пыли в 1 м³ воздуха при 0°С в кг; $T_0 = 273$ К; $T_{\text{в}}$ – температура воздуха, К; $\rho_{\text{п}}$ – плотность пылевидного топлива, кг/м³.

В двухпроводных горелках для сжигания пылевидного топлива, например типа «труба в трубе», производят расчет кольцевой щели, полный и общий диаметр горелки, диаметр воздухопровода, пылевоздухопровода по аналогии с дутьевыми газовыми горелками (формулы (3.74)–(3.78)).

Скорость воздуха в воздухопроводе принимают 15 м/с, пылевоздушной смеси – 20–25, вторичного воздуха – 20–30 м/с.

4. *Расчет форсунок.* Сводится к определению сечений для прохода мазута и распылителя при заданной производительности форсунки. Имеются некоторые особенности расчета пневматических форсунок низкого и высокого давления, механических форсунок.

Для форсунок скорость истечения мазута w , м/с, и сечение сопла f_c , м², определяются по формулам

$$w = \varphi 10^3 \sqrt{\frac{2(p_1 - p_0)}{\rho_{\text{ж}}}}; \quad (3.93)$$

$$f_c = \frac{B}{\mu 10^3 \sqrt{2(p_1 - p_0)\rho_{\text{ж}}}}, \quad (3.94)$$

где φ , μ – коэффициенты скорости и расхода, равные соответственно 0,6–1,0 и 0,6–0,8 в зависимости от формы сопла (кольцевое сечение, цилиндрическое, суживающееся, сопло Лавалья); $(p_1 - p_0)$ – перепад давления жидкого топлива на сопле, МПа; $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкого топлива (для мазута 960–1015 кг/м³); B – расход мазута, кг/с.

Скорость истечения мазута из сопел пневматических форсунок обычно не превышает 4–5 м/с.

Диаметр сопла определяется по формуле (3.75). Диаметр мазутопровода рассчитывают по формулам, аналогичным (3.74), (3.75), по рекомендуемой скорости мазута в нем 0,5–2 м/с. Однако диаметр его не должен быть менее 0,01, а для длинных участков – менее 0,013 м.

Скорость истечения и расход распылителя определяются по формулам истечения в зависимости от располагаемого давления. При давлении распылителя (воздуха) менее 10⁴ Па скорость $w_{\text{в}}$ на выходе из сопла определяют по формуле (3.75), а расход $V_{\text{в}}$, м³/с, по формуле

$$V_{\text{в}} = f \mu \sqrt{\frac{2(p_{\text{в}} - p_0)}{\rho_{\text{в}}}}, \quad (3.95)$$

где f – площадь сечения отверстия, м²; μ – коэффициент расхода (0,6–0,8); $(p_{\text{в}} - p_0)$ – перепад давления воздуха (перед форсункой и после), Па; $\rho_{\text{в}}$ – плотность воздуха, кг/м³.

Скорость истечения пара $w_{\text{п}}$ в паровых форсунках при давлении пара менее 10⁴ Па может быть определена по формуле, м/с,

$$w_{\text{п}} = 91,5 \sqrt{h_{\text{нач}} - h_{\text{кон}}}, \quad (3.96)$$

где $h_{\text{нач}}$ и $h_{\text{кон}}$ – начальная и конечная энтальпия пара, Дж/кг (определяется по ph -диаграмме водяного пара).

При давлении распылителя больше 10^4 Па и скорости меньше критической ($p_2 / p_1 > \beta_{\text{кр}}$) скорость распылителя находят по формуле адиабатного истечения (3.83) с использованием данных, приведенных в [1, прил., табл. 15].

В пневматических и паровых форсунках высокого давления распылитель имеет давление выше критического, вследствие чего в суживающихся, цилиндрических соплах и в узком сечении сопла Лавалья распылитель имеет критическую скорость, которую находят по формуле, м/с,

$$w_{\text{кр}} = \varphi \sqrt{2 \frac{k}{k+1} p_1 v_1}, \quad (3.97)$$

где k – показатель адиабаты для распылителя; p_1 – абсолютное давление распылителя перед соплом, Па; v_1 – удельный объем распылителя, м³/кг.

Скорость распылителя, м/с, на выходе из распыляющего сопла Лавалья находят по формуле адиабатного истечения, аналогичной (3.83):

$$w = \varphi \sqrt{2 \frac{k}{k-1} p_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}. \quad (3.98)$$

Сечения трубопроводов для подачи к пневматическим форсункам топлива и распылителя могут определяться из следующих экономически целесообразных значений скорости, м/с: для мазута 0,5–2,0; для насыщенного водяного пара 20–40; для холодного вентиляторного воздуха 10–15; для компрессорного воздуха 15–20.

Расчет параметров механических форсунок производится по формулам (3.75), (3.93), (3.94). Скорость истечения мазута для них рекомендуется в пределах 40–60 м/с.

3.3. Расчет устройств для перемещения газов

1. *Определение напоров газов.* Проводится с использованием следующих формул:

– для геометрического напора, Н/м² (Па),

$$h_{\Gamma} = Hg(\gamma_{\text{в}} - \gamma_{\Gamma}); \quad (3.99)$$

$$h_{\Gamma} = Hg \left(\gamma_0^{\text{в}} \frac{T_0}{T_{\text{в}}} - \gamma_0^{\Gamma} \frac{T_0}{T_{\Gamma}} \right), \quad (3.100)$$

где H – расстояние от центра тяжести сечения рабочего пространства печи до нулевого уровня, м; g – ускорение силы тяжести, м/с²; $\gamma_{\text{в}}, \gamma_{\Gamma}$ – плотности соответственно воздуха и газа, кг/м³; $T_0 = 273$ К, $T_{\text{в}}, T_{\Gamma}$ – абсолютная температура соответственно воздуха и газов, К; $\gamma_0^{\text{в}}, \gamma_0^{\Gamma}$ – плотности соответственно окружающего воздуха и газа при нормальных условиях ($T_0 = 273$ К, $p = 101,3$ кН/м²), кг/м³;

– для динамического напора, Н/м²,

$$h_{\text{д}} = \frac{w_t^2}{2} \gamma_t^{\Gamma} = \frac{w_0^2}{2} \gamma_0^{\Gamma} \frac{T_{\Gamma}}{T_0}, \quad (3.101)$$

где w_t, w_0 – скорость газа соответственно действительная при температуре t °С и условная при 0°С, м/с; $\gamma_t^{\Gamma}, \gamma_0^{\Gamma}$ – плотности газов соответственно при температуре t °С и при 0°С, кг/м³;

– для статического напора, Н/м²,

$$h_{\text{ст}} = p_{\text{об}} - B, \quad (3.102)$$

где $p_{\text{об}}$ – давление газов в технологическом объеме, Н/м²; B – атмосферное давление, Н/м².

2. *Соппротивления движению газов (потери давления)*. Определяют как сумму *местных* сопротивлений $h_{\text{м}}$, сопротивлений *от трения* $h_{\text{тр}}$ и сопротивлений, связанных с преодолением *геометрического* напора h_{Γ} , Н/м²,

$$h_{\text{пот}} = \sum h_{\text{м}} + \sum h_{\text{тр}} \pm \sum h_{\Gamma}. \quad (3.103)$$

Местное сопротивление $h_{\text{м}}$, Н/м², характеризуется коэффициентом сопротивления при скоростном напоре

$$h_{\text{м}} = \xi_{\text{м}} \frac{w_t^2}{2} \gamma_t, \quad (3.104)$$

где $\xi_{\text{м}}$ – коэффициент местного сопротивления, определяемый по справочным данным [1, прил., рис. 5].

В случае запыленного газового потока коэффициент местного сопротивления корректируется:

$$\xi'_m = \xi_m(1 + 0,8C), \quad (3.105)$$

где C – концентрация пыли в газовом потоке, кг/кг газа.

К видам местных сопротивлений относятся: внезапное расширение или сужение канала ($\xi_m = 0,01-0,81$); плавное расширение или сужение ($\xi_m = 0,1-1,7$); резкий поворот на 90° ($\xi_m = 0,2-2,2$); разделение или слияние потоков газа ($\xi_m = 1,0-1,5$); ниша (углубление) в канале ($\xi_m = 0,1-1,0$); Z-образное колено ($\xi_m = 0,6-4,2$); задвижка в прямоугольном канале ($\xi_m = 0,09-193$); дроссельная заслонка ($\xi = 0,5-750$); острая диафрагма ($\xi_m = 0,3-246$); выход потока из трубы в атмосферу ($\xi_m = 1,06-3,67$) и др.

Величина ξ , характеризующая местное сопротивление, зависит от соотношения скорости потоков газа перед сопротивлением и после него, формы каналов, угла поворотов, соотношения диаметров, степени перекрытия сечения канала задвижками, режима движения потоков газов в трубе перед выходом в атмосферу.

При выборе коэффициента ξ_m необходимо правильно учитывать скорость, по которой рассчитывается скоростной напор. При изменении сечения каналов ξ_m относится к скоростному напору, рассчитанному по скорости потока газа в узком месте. При расширении канала потери напора рассчитываются по скорости до изменения сечения. В остальных случаях скоростной напор определяется по скорости, с которой газовый поток подходит к данному местному сопротивлению.

Потеря напора на трение $h_{тр}$ выражается формулой

$$h_{тр} = \xi_{тр} \frac{w_{t_{cp}}^2}{2} \gamma_{t_{cp}}, \quad (3.106)$$

где $\xi_{тр}$ – коэффициент сопротивления трения, определяемый по формуле

$$\xi_{тр} = \lambda \frac{l}{d_3}. \quad (3.107)$$

Для запыленных газов $\xi_{тр}$ находят по формуле

$$\xi_{тр} = \lambda(1 + 0,8C) \frac{l}{d_3}, \quad (3.108)$$

где $w_{t_{cp}}$ – скорость потока газов в канале при средней температуре t_{cp} , м/с; $\gamma_{t_{cp}}$ – плотность газов при средней температуре, кг/м³; λ – коэф-

коэффициент трения газов о стенки канала, зависящий от критерия Re и шероховатости стенок; l – длина канала, м; d_3 – эквивалентный диаметр канала, м;

В зависимости от режима движения газов λ определяют по следующим формулам:

– для ламинарного движения

$$\lambda = \frac{64}{Re}; \quad (3.109)$$

– для турбулентного движения по гладким металлическим трубам при $Re \leq 100\,000$

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}; \quad (3.110)$$

– для турбулентного движения по шероховатым (корродированным) металлическим трубам

$$\lambda = \frac{0,129}{Re^{0,12}}; \quad (3.111)$$

– для турбулентного движения по кирпичным каналам

$$\lambda = \frac{0,175}{Re^{0,12}}. \quad (3.112)$$

При высокоразвитой турбулентности потока, когда ламинарный слой у поверхности канала исчезает, λ определяется только шероховатостью канала независимо от числа Re :

$$\lambda = 0,193 \sqrt{\frac{k}{d_3}}, \quad (3.113)$$

где k – средняя высота выступов шероховатой стенки, м; d_3 – эквивалентный (приведенный) диаметр канала, м.

Величина k может быть принята следующей: для стальных новых труб $(1-2) \cdot 10^{-4}$ м; для чугунных новых труб $(3-5) \cdot 10^{-4}$ м; для загрязненных металлических труб $(8-10) \cdot 10^{-4}$ м; для кирпичных каналов $(1-6) \cdot 10^{-3}$ м.

Величина d_3 для каналов с круглым сечением равна его диаметру d , с прямоугольным сечением – равна его приведенному (гидравлическому) диаметру, м,

$$d_3 = \frac{4S}{P}, \quad (3.114)$$

где S – площадь поперечного сечения канала, м^2 ; P – периметр сечения канала, м .

При подстановке значений S и P в формулу (3.114) получают

$$d_3 = \frac{2ab}{a+b}, \quad (3.115)$$

где a и b – стороны сечения прямоугольного канала, м .

При расчетах сопротивлений на пути движения теплоносителя при турбулентном потоке можно приближенно принять следующие значения коэффициента трения λ : для металлических труб чистых – 0,025; с малой коррозией – 0,035; с сильной коррозией – 0,045; для кирпичных каналов – 0,05.

Общая формула для определения сопротивлений трения $h_{\text{тр}}$, Н/м^2 ,

$$h_{\text{тр}} = \lambda \frac{lw_{\text{тср}}^2}{2d_3} \gamma_{\text{тср}}. \quad (3.116)$$

В случае учета процессов теплообмена при движении газов в каналах расчет потери давления, Н/м^2 , определяют по формуле

$$h_{\text{тр}} = \lambda \frac{lw_{\text{тср}}^2}{2d_3} \gamma_{\text{тср}} \left(\frac{2}{\sqrt{\frac{T_{\text{ст}}}{T_{\text{г}}} + 1}} \right)^2, \quad (3.117)$$

где $T_{\text{ст}}$ и $T_{\text{г}}$ – абсолютные температуры соответственно стенки канала и движущихся газов, К .

Сопротивление *геометрического* напора $h_{\text{г}}$, Н/м^2 , обусловлено наличием подъемов и спусков на пути движения газов. Величина сопротивления на подъеме газов берется со знаком минус, на спуске – со знаком плюс.

Для одного спуска или подъема газов

$$\pm h_{\text{г}} = (h_{\text{ст},2} - h_{\text{ст},1}) + g\Delta H(\gamma_{t,\text{окр}} - \gamma_{t,\text{г}}), \quad (3.118)$$

где $h_{\text{ст},1}$ и $h_{\text{ст},2}$ – статические давления газов в начале и в конце спуска или подъема, Н/м^2 ; g – 9,81 м/с^2 ; ΔH – разность уровней начала и кон-

ца спуска или подъема на пути газов относительно нулевого (базового) уровня, м; $\gamma_{t, \text{окр}}$ и $\gamma_{t, \text{г}}$ – действительная плотность окружающего воздуха и газов в канале, кг/м³.

Для нескольких подъемов и спусков сопротивление геометрического напора, Н/м², определяют по формуле

$$\pm h_{\text{г}} = (h_n - h_1) + g \sum_{i=1}^n \Delta H_i (\gamma_{t, \text{окр}} - \gamma_{t, \text{г}, i}), \quad (3.119)$$

где h_n – статический напор в конце последнего спуска или подъема, Н/м²; ΔH_i – разность уровней начала и конца каждого спуска или подъема, м; $(\gamma_{t, \text{окр}} - \gamma_{t, \text{г}, i})$ – разность плотностей окружающего воздуха и газов в каждом спуске или подъеме канала, кг/м³.

3. *Расчет дымовой трубы.* Дымовая труба служит для создания естественной тяги за счет геометрического напора. Геометрический напор $h_{\text{г}}$, Н/м², трубы должен быть достаточным для преодоления всех сопротивлений в установке. Он рассчитывается по уравнению

$$h_{\text{г}} = h_{\text{р}} + h_{\text{тр}} + h_{\text{м}}, \quad (3.120)$$

где $h_{\text{р}}$ – потеря давления на преодоление всех сопротивлений на пути движения газов в тепловой установке, Н/м²; $h_{\text{тр}}$ – сопротивление от трения газов в самой трубе, Н/м²; $h_{\text{м}}$ – местное сопротивление трубы, Н/м².

Высота дымовой трубы H , м определяется решением уравнения (3.120) с подстановкой в него формул расчета напоров и сопротивлений движению газов (3.99), (3.104), (3.116), Н/м²,

$$h_{\text{р}} = Hg(\gamma_{t, \text{в}} - \gamma_{t, \text{г}}) - \lambda \frac{Hw_{t, \text{ср}}^2}{2D_{\text{ср}}} \gamma_{t, \text{ср}} - \xi_{\text{м}} \frac{w_{t, \text{уст}}^2}{2} \gamma_{t, \text{уст}}, \quad (3.121)$$

где $\gamma_{t, \text{в}}$, $\gamma_{t, \text{г}}$, $\gamma_{t, \text{ср}}$, $\gamma_{t, \text{уст}}$ – плотности соответственно воздуха при температуре окружающей среды, отходящих газов у основания трубы, газов при средней температуре в трубе, газов в устье трубы, кг/м³; $D_{\text{ср}}$ – средний диаметр трубы, м; $w_{t, \text{ср}}$, $w_{t, \text{уст}}$ – скорости газов соответственно в трубе при средней температуре газов и в устье трубы, м/с; λ – коэффициент трения газов о стенки трубы, определяемый по одной из формул (3.109)–(3.112); $\xi_{\text{м}}$ – коэффициент местного сопротивления (выход газов из трубы [3, прил. 45]).

Потери давления газов $h_{\text{р}}$, найденные расчетом сопротивлений на пути их движения, обычно увеличиваются на 20–40% для создания трубой запаса напора. Соотношение диаметров основания и устья

кирпичных труб принимается равным $D_{\text{осн}} / D_{\text{уст}} = 1,5$. Условная скорость газов w_0 в устье трубы принимается равной 2–6 м/с.

Диаметр основания кирпичной трубы принимается не менее 0,8 м.

Температура газов, °С, в устье трубы принимается с учетом падения температуры газов по высоте трубы:

$$t_{\text{уст}} = t_{\text{осн}} - \Delta t H, \quad (3.122)$$

где Δt – потеря температуры газов на один погонный метр трубы, принимаемая для кирпичных труб 1,0–1,5 град/м; для металлических нефутерованных труб 2,0–3,0 град/м [1, прил., табл. 18].

Для расчета температуры дымовых газов в устье трубы $t_{\text{уст}}$ необходимо определить приближенную высоту трубы H' , м, из формулы геометрического напора (3.99):

$$H' = \frac{h_p}{9,8(\gamma_{t,в} - \gamma_{t,г})}. \quad (3.123)$$

При расчете дымовой трубы, предназначенной для нескольких печей, ее высоту определяют по наибольшему значению h_p одной из печей.

При этом размеры сечений дымовой трубы и газоподводящих каналов к трубе рассчитывают по суммарному объему дымовых газов от нескольких печей.

Общая высота дымовой трубы по санитарным нормам принимается более 30 м при расходе условного топлива до 5 т/ч и более 100 м при расходе топлива 100–200 т/ч. Разрежение, создаваемое дымовой трубой, обычно не превышает 500–600 Па.

В связи с мероприятиями, проводимыми по интенсификации работы теплообменных, пылеочистительных и других устройств, вызывающих понижение температуры отходящих газов, а следовательно, и естественной тяги, дымовая труба утратила свою основную роль и предназначается, прежде всего, для рассеивания продуктов горения и содержащихся в них вредных выбросов.

Дымовые трубы для печей в этой связи выполняются высотой не более 80–100 м.

Движение газов в современных тепловых установках обеспечивают созданием искусственной тяги с помощью вентиляторов. Скорость газов в устье трубы при этом принимается равной 8–15 м/с.

4. *Подбор вентиляторов (дымососов).* Подбор центробежных вентиляторов и дымососов для создания принудительного движения газов проводится по паспортным данным, приведенным в справочни-

ках или каталогах по вентиляторам [1, прил., табл. 19], либо по номограммам, в которых устанавливается связь между основными параметрами работы вентиляторов [1, прил., рис. 6, 7].

Исходными данными для подбора вентилятора являются объем газов, образующихся в тепловой установке V_t , и суммарная потеря напора на преодоление газами всех сопротивлений h_t . При этом потерянный напор, Н/м^2 , берется с запасом 30–40% и пересчитывается по формуле

$$h' = (1,3 - 1,4) h_t \frac{\gamma_t}{1,2}, \quad (3.124)$$

где h_t – действительный напор газов до входа в вентилятор, Н/м^2 ; γ_t – плотность газов, кг/м^3 ; 1,2 – плотность воздуха при 20°C , кг/м^3 .

Пересчет необходимо производить в связи с тем, что номограммы для подбора вентиляторов составляются для воздуха при температуре 20°C , а отработанные газы тепловых установок имеют более высокую температуру. Порядок подбора вентиляторов по номограммам [1, прил., рис. 6, 7] следующий.

По определенному для тепловой установки расходу газов V_t в нижней части номограммы выбирается номер вентилятора. Для этого от значения подачи V_t на оси ординат проводится горизонтальная линия, которая будет пересекать лучи, соответствующие номерам вентиляторов. Сплошные лучи соответствуют значениям V_t на левой ординате, пунктирные – значениям V_t на правой. Из точек пересечения горизонтальной линии с лучами номеров вентиляторов выбирается та, которая ближе к середине номограммы. Ей будет соответствовать наибольшее значение КПД – η . Величина η определяется в верхней части номограммы на пересечении вертикальной линии, проведенной от точки на выбранном луче (№ вентилятора) до горизонтальной линии, соответствующей полному напору $h_{\text{полн}}$.

Полный напор вентилятора равен, Н/м^2 ,

$$h_{\text{полн}} = h' + h_{\text{дин}}, \quad (3.125)$$

где $h_{\text{дин}}$ – динамический напор вентилятора, определяемый в верхней части номограммы по точке на пересечении вертикальной линии с кривой динамического напора. Выбирают тот номер вентилятора, у которого η будет не менее $0,9 \eta^{\text{max}}$. Одновременно с величиной η в верхней части номограммы определяется условное число вентилятора A по линиям, соответствующим числам A . Частоту вращения вентилятора, об/мин, рассчитывают по зависимости

$$n = \frac{A}{N_{\text{в}}}, \quad (3.126)$$

где n – частота вращения вентилятора, об/мин; $N_{\text{в}}$ – номер вентилятора, дм.

Мощность на валу электродвигателя $N_{\text{дв}}$, кВт, вентилятора рассчитывается по формуле

$$N_{\text{дв}} = \frac{V_t h_t}{3,6 \cdot 10^6 \eta_{\text{в}} \eta_{\text{п}}}, \quad (3.127)$$

где V_t – производительность вентилятора при данной температуре, м³/ч; h_t – давление, создаваемое вентилятором при данной температуре, Н/м²; $\eta_{\text{в}}$ – КПД вентилятора; $\eta_{\text{п}}$ – КПД передачи, принимаемый при соединении вала вентилятора и двигателя с помощью эластичной муфты 0,98, с помощью клиноременной передачи – 0,95.

Установочная мощность электродвигателя, кВт, принимается равной

$$N_{\text{уст}} = k N_{\text{дв}}, \quad (3.128)$$

где k – коэффициент запаса, принимаемый в зависимости от мощности на валу $N_{\text{дв}}$ (при $N_{\text{дв}}$ до 0,5 кВт $k = 1,5$; при $N_{\text{дв}} = (0,5-1,0)$ кВт $k = 1,3$; при $N_{\text{дв}} = (1,0-2,0)$ кВт $k = 1,2$; при $N_{\text{дв}} = (2,0-5,0)$ кВт $k = 1,15$; при $N_{\text{дв}}$ выше 5 кВт $k = 1,1$).

3.4. Расчет процессов теплообмена

1. *Расчет сложного теплообмена.* Рассчитывается тепловой поток, воспринимаемый стенкой от газов излучением, по формуле, Вт/м²,

$$q_{\text{л}} = C_0 \varepsilon_{\text{пр}} \left[\left(\frac{T_{\text{г}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{ст}}}{100} \right)^4 \right], \quad (3.129)$$

где C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, равный 5,7 Вт/(м² · К⁴); $\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведенная степень черноты продуктов горения (газов) и стенки; $T_{\text{г}}$, $T_{\text{ст}}$ – абсолютная температура соответственно газов и стенки, К.

Приведенная степень черноты продуктов горения (газов) и стенки $\varepsilon_{\text{пр}}$ рассчитывается по формуле

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{ст}}} + \frac{1}{\varepsilon_{\text{г}}} - 1}, \quad (3.130)$$

где $\varepsilon_{\text{ст}}$, $\varepsilon_{\text{г}}$ – степень черноты соответственно стенки и излучающих газов CO_2 и H_2O . Последняя зависит от парциального давления, эффективной толщины газового слоя и температуры.

Степень черноты газов равна

$$\varepsilon_{\text{г}} = \varepsilon(\text{CO}_2) + \beta\varepsilon(\text{H}_2\text{O}). \quad (3.131)$$

Величины $\varepsilon(\text{CO}_2)$, β , $\varepsilon(\text{H}_2\text{O})$ находят по графикам [1, прил., рис. 2–4]. Значения парциального давления $p(\text{CO}_2)$ и $p(\text{H}_2\text{O})$ определяют по зависимости $p_i = r_i p_{\text{общ}}$ (Па, или бар).

Эффективная толщина газового слоя $s_{\text{эф}}$, м, определяется по формуле

$$s_{\text{эф}} = \eta \frac{4V}{F} \approx 3,6 \frac{V}{F}, \quad (3.132)$$

где η – коэффициент эффективности газового излучения, равный 0,85–0,9; V – объем, заполненный излучающим газом, м^3 ; F – поверхность стен, ограждающих этот объем газов, м^2 .

Если принять значение $\eta = 0,9$, то для слоя цилиндрической формы (длинный цилиндр) диаметром d значение $s_{\text{эф}} = 0,9d$ м.

Плотность конвективного потока теплоты от газов на стенку $q_{\text{к}}$, $\text{Вт}/\text{м}^2$, определяют по формуле

$$q_{\text{к}} = \alpha_{\text{к}}(t_{\text{г}} - t_{\text{ст}}), \quad (3.133)$$

где $\alpha_{\text{к}}$ – коэффициент теплоотдачи от газов к стенке, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $t_{\text{г}}$, $t_{\text{ст}}$ – температуры соответственно газов и внутренней поверхности стенки, $^{\circ}\text{C}$.

Коэффициент теплоотдачи от газов к стенке $\alpha_{\text{к}}$ при их турбулентном движении определяется с использованием критериального уравнения:

$$\text{Nu} = a \text{Re}^b \varphi, \quad (3.134)$$

где Nu – критерий Нуссельта, равный $\alpha d / \lambda$; Re – критерий Рейнольдса, равный $w d / \nu$; λ и ν – теплопроводность, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ и кинематическая вязкость, $\text{м}^2/\text{с}$, газов при фактической температуре; d – диаметр трубы (сушильного барабана), м; w – скорость газов, м/с, a – коэффициент, равный 0,018; b – число степени, равное 0,8; φ – поправочный коэффициент, зависящий от отношения длины трубы к ее диаметру и критерия Re [3, прил. 12].

После подстановки указанных значений в формулу (3.134) получается новая формула:

$$\alpha_k = 0,018 \frac{\lambda}{d} \text{Re}^{0,8}. \quad (3.135)$$

Коэффициент теплоотдачи излучением находят по формуле, Вт/м²,

$$\alpha_{\text{л}} = \frac{q}{t_{\text{Г}} - t_{\text{СТ}}}. \quad (3.136)$$

Общий коэффициент теплоотдачи от газов к стенке $\alpha_{\text{общ}}$ определяют суммированием $\alpha_{\text{л}}$ и $\alpha_{\text{к}}$.

Общая плотность теплового потока составит, Вт/м²,

$$\alpha_{\text{общ}} = \alpha_{\text{общ}} (t_{\text{Г}} - t_{\text{СТ}}). \quad (3.137)$$

Долю теплоотдачи конвекцией находят по соотношению

$$\% \text{ теплоотд. конв} = \frac{\alpha_{\text{к}}}{\alpha_{\text{общ}}} 100. \quad (3.138)$$

3.5. Эксергетический анализ тепловых процессов

Эксергетический анализ процесса сжигания топлива проводится на основе данных по тепловому балансу процесса горения. Формула расчета эксергетического баланса имеет вид

$$e_{x, \text{Т}} + e_{q, \text{Т}} + E_{\text{В}} = E_{\text{п.с}} + D_{\text{Т}}, \quad (3.139)$$

где $e_{x, \text{Т}}$ – химическая эксергия топлива, кДж/кг (кДж/м³); $e_{q, \text{Т}}$ – эксергия теплового потока топлива, кДж/кг (кДж/м³); $E_{\text{В}}$ – эксергия воздуха, подаваемого на горение, кДж/кг (кДж/м³), топлива; $E_{\text{п.с}}$ – эксергия продуктов сгорания, кДж/кг (кДж/м³), топлива; $D_{\text{Т}}$ – потери эксергии, кДж/кг.

Удельная химическая эксергия топлива $e_{x, \text{Т}}$ рассчитывается по следующим приближенным формулам:

$$- \text{ для газообразного топлива, кДж/м}^3, e_{x, \text{Т}} \approx 0,95 Q_{\text{В}}; \quad (3.140)$$

$$- \text{ для каменных углей, кДж/кг, } e_{x, \text{Т}} \approx 1,08 Q_{\text{В}}^{\text{п}}; \quad (3.141)$$

$$- \text{ для бурых углей, кДж/кг, } e_{x, \text{Т}} \approx (1,15 - 1,20) Q_{\text{В}}^{\text{п}}; \quad (3.142)$$

$$- \text{ для жидкого топлива, кДж/кг, } e_{x, \text{Т}} \approx 0,975 Q_{\text{В}}^{\text{п}}. \quad (3.143)$$

Эксергия теплового потока ($e_{q, T}$) топлива равна, кДж/кг,

$$e_{q, T} = h_T \bar{v}_e = c_T t_T \left(1 - \frac{T_0}{T_T} \right). \quad (3.144)$$

Если топливо поступает на горение с температурой окружающей среды ($T_T = T_0$), то $e_{q, T} = 0$.

Для жидкого топлива, которое перед подачей в форсунки подогревается, $e_{q, T} \neq 0$.

Эксергия воздуха (E_B), необходимого для сжигания 1 кг (m^3) топлива, определяется по формуле

$$E_B = L_\alpha \rho_B \left[c_{pm, B} (T_B - T_0) - T_0 \left(c_{pm, B} \ln \frac{T_B}{T_0} - R_B \ln \frac{p_B}{p_0} \right) + \sum R_i T_0 \ln \frac{1}{r_i} \right], \quad (3.145)$$

где L_α – расход воздуха, m^3/kg ; ρ_B – плотность воздуха, kg/m^3 , при температуре окружающей среды T_0 ; $c_{pm, B}$ – удельная средняя изобарная теплоемкость воздуха, $kJ/(kg \cdot K)$, в интервале температур от t_0 до t_B ; T_0 , T_B и p_0 , p_B – соответственно абсолютная температура, К, и давление, Па, окружающей среды и воздуха, подаваемого на горение; R_B , R_i – газовые постоянные соответственно воздуха и компонентов воздуха, $kJ/(kg \cdot K)$; r_i – объемная доля компонентов в воздухе.

Если $T_B = T_0$, то эксергия воздуха будет определяться только его давлением.

Эксергия продуктов сгорания ($E_{п.с}$) рассчитывается по формуле

$$E_{п.с} = V_\alpha \rho_{п.с} \left[c_{pm, п.с} (T_d - T_0) - T_0 \left(c_{pm, п.с} \ln \frac{T_d}{T_0} - R_{п.с} \ln \frac{p_{п.с}}{p_0} - \sum R_{i, п.с} \ln \frac{1}{r_i} \right) \right], \quad (3.146)$$

где V_α – объем образующихся продуктов горения, m^3/kg (m^3/m^3); $\rho_{п.с}$ – плотность продуктов горения, kg/m^3 , при T_0 ; $c_{pm, п.с}$ – удельная средняя изобарная теплоемкость продуктов сгорания, $kJ/(kg \cdot K)$, в интервале температур от T_0 до T_d ; T_d – абсолютная действительная температура горения, К; $R_{п.с}$ и R_i – газовые постоянные соответственно продуктов сгорания и газов, $kJ/(kg \cdot K)$; r_i – объемные доли газов, входящих в продукты горения.

Подсчитав левую часть уравнения эксергетического баланса (3.139) и $E_{п.с}$, можно найти потери эксергии при сжигании D_T .

Эксергетический КПД процесса сжигания топлива в тепловой установке можно определить по формуле

$$\eta_{ex, сж} = \frac{E_{п. с}}{e_{x, T} + e_{q, T} + E_B}. \quad (3.147)$$

Потери эксергии при сжигании топлива D_T могут быть определены также по формуле Гюи – Стодолы, в которой изменение энтропии (Δs) рассчитывается по формуле, кДж/кг (кДж/м³),

$$\Delta s = Q_H^p \left(\frac{1}{T_d} - \frac{1}{T_k} \right), \quad (3.148)$$

где T_d и T_k – соответственно действительная и калориметрическая температуры горения топлива, К.

Тогда эксергетические потери D_T находят по формуле, кДж/кг (кДж/м³),

$$D_T = T_0 Q_H^p \left(\frac{1}{T_d} - \frac{1}{T_k} \right), \quad (3.149)$$

а эксергетический КПД сжигания ($\eta_{ex, сж}$) – по формуле

$$\eta_{ex, сж} = \frac{e_{x, T} + e_{q, m} + E_B - D_T}{e_{x, T} + e_{q, T} + E_B}. \quad (3.150)$$

Эксергетический КПД процесса сжигания топлива при атмосферном давлении изменяется от 0,45 (для промышленных котельных и печей) до 0,7 (для современных парогенераторов). При повышении давления газообразного топлива, подаваемого на горение, величина $\eta_{ex, сж}$ повышается и, например, для газовых турбин находится в пределах 0,55–0,60.

Эксергия продуктов сгорания $E_{п. с}$, полученных при сжигании топлива в топке, может быть определена и в виде эксергии теплового потока $e_{q, п. с}$, кДж/кг (кДж/м³),

$$e_{q, п. с} = H_{общ} \eta_T \left(1 - \frac{T_0}{T_T} \right), \quad (3.151)$$

где $H_{общ}$ – энтальпия топлива и воздуха, поступающих на горение в топку, кДж/кг (кДж/м³) (левая часть уравнения теплового баланса процесса горения); η_T – КПД топки; T_T – теоретическая температура горения топлива, К.

4. ЗАДАНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

Задача 1. Выполнить расчет процесса горения топлива по исходным данным, приведенным в табл. 4.1.

Задача 2. Провести расчет топливосжигающего устройства. Исходные данные для расчета приведены в табл. 4.2. Топливо и его характеристики принять из задачи № 1.

Задача 3. Определить требуемый напор для создания потока дымовых газов в тепловой установке. Количество образующихся дымовых газов – V_0 , м³/ч, средняя температура газов – t_{cp} , °С, состав газов (об. %) принять из задачи № 1, средняя скорость дымовых газов в газоходах – w_{cp} , м/с. Длина дымовых каналов (прямоугольного сечения для четных номеров или круглого сечения для нечетных номеров по списку в журнале) от тепловой установки до дымососа – L , м, потери давления в установке, теплообменных или пылеочистительных аппаратах – p , Па. На пути к дымососу канал имеет n поворотов под углом 90°, четыре поворота под углом 45° и m поворотов под углом 60°. Канал имеет три спуска по 1, 2, 3 м и два подъема по 3, 4 м соответственно. Исходные данные для расчета приведены в табл. 4.3.

Задача 4. Провести расчет геометрического напора, создаваемого кирпичной дымовой трубой высотой 60 м (для четных номеров по списку) и 80 м (для нечетных номеров по списку). Подобрать дымосос, работающий совместно с дымовой трубой, для удаления дымовых газов из тепловой установки в окружающую среду. Все данные для расчетов принять из задач № 1, 3 и методических указаний к задаче.

Задача 5. Определить общую плотность теплового потока от дымовых газов на стенку сушильного барабана, если температура газов внутри барабана равна 1/2 действительной температуры продуктов горения топлива (задача № 1), степень черноты стенки барабана 0,8; содержание CO₂ и H₂O в дымовых газах принять равным половине их количества в продуктах горения топлива (задача № 1), диаметр сушильного барабана 2 м (для четных номеров по списку) и 3 м (для нечетных номеров по списку), скорость газов w_0 2 м/с, температура стенки барабана на 20% меньше температуры дымовых газов.

Задача 6. Провести эксергетический анализ процесса сжигания топлива, т. е. определить потери эксергии и эксергетический КПД процесса. Все необходимые данные принять из задачи № 1.

Таблица 4.1

Исходные данные для расчета процесса горения топлива

№ по списку в журнале	Топливо (№ табл. прил., поряд. номер)	Исходные данные						
		Козф. избытка воздуха, α	Температура окружающей среды, °С	Отн. влажность воздуха, φ	Температура подогрева воздуха, °С	Температура подогрева топлива, °С	Бинарное топливо	
							Q_H^p , кДж/кг	Соотношение
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1; 1	1,35	20	70	–	–	–	–
2	1; 2	1,28	25	80	–	–	–	–
3	1; 3	1,30	10	90	–	–	–	–
4	1; 4	1,40	15	85	–	–	–	–
5	2; 1	1,20	30	60	–	100	–	–
6	2; 2	1,25	35	65	–	110	–	–
7	2; 3 и 1; 5	1,30	20	80	–	90	–	3 : 2, мас.
8	1; 6 и 1; 10	1,45	40	55	200	–	18 000	–
9	3; 1	1,05	20	75	–	–	–	–
10	3; 2	1,10	40	50	–	–	–	–
11	3; 7	1,15	35	60	700	–	–	–
12	3; 3 и 3; 8	1,20	5	90	400	–	–	1 : 2, об.
13	3; 4 и 2; 7	1,01	0	80	600	110 мазут	–	0,15 кг/м ³
14	3; 9 и 2; 4	1,12	8	75	–	90 мазут	–	0,5 кг/м ³ газа
15	1; 14 и 1; 7	1,40	15	60	–	–	20 000	–
16	2; 5	1,07	10	90	–	130	–	–
17	2; 6	1,20	20	85	–	115	–	–
18	3; 10	1,02	25	75	500	–	–	–
19	3; 11	1,05	30	60	–	–	–	–
20	3; 6	1,10	35	80	–	–	–	–

Окончание табл. 4.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
21	3; 5 и 3; 9	1,15	15	70	–	–	–	1 : 3, об.
22	1; 12	1,10	25	65	250	–	–	–
23	1;16	1,30	35	70	–	–	–	–
24	1; 9	1,40	15	75	–	–	–	–
25	1; 15	1,50	38	55	100	–	–	–
26	1; 11 и 1; 8	1,10	10	70	–	–	23 000	–
27	1; 13 и 1; 17	1,30	25	65	150	–	–	2 : 1, мас.

Таблица 4.2

Исходные данные для расчета топливосжигающих устройств

№ по списку в журнале	Вид устройства	Исходные данные									
		Q , МВт	q_R , кДж/(кг·ч)	Q_v , кДж/(кг·ч)	l_{ϕ} , м	b_{ϕ} , м	δ_1 , мм	δ_2 , мм	P , Па	B , кг/ч	V_r , м ³ /ч
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Топка слоевая	1,5	$2,0 \cdot 10^6$	$0,9 \cdot 10^6$	—	—	—	—	—	—	—
2		1,3	$1,8 \cdot 10^6$	$1,3 \cdot 10^6$	—	—	—	—	—	—	—
3	Топка камерная квадратная	0,7	—	$0,6 \cdot 10^6$	—	1,5	—	—	—	—	—
4	Горелка пылеугольная двухканальная	—	—	—	1,8	1,4	2,5	3,5	—	300	—
5	Топка камерная круглая горизонтальная	2,2	—	$0,8 \cdot 10^6$	—	2,0	—	—	—	—	—
6	Форсунка пневматическая двухканальная	1,8	—	—	—	—	—	—	600 воздуха	—	—
7	Форсунка механическая	2,5	—	—	—	—	—	—	$2,4 \cdot 10^6$ мазута	—	—
8	Горелка пылеугольная двухканальная	—	—	—	—	—	3,0	5,0	—	$2,5 \cdot 10^3$	—
9	Топка камерная прямоугольная	3,5	—	$1,7 \cdot 10^6$	2,0	—	—	—	—	—	—
10	Горелка инжекционная	—	—	—	—	—	—	—	$0,3 \cdot 10^5$ газа	—	15
11	Горелка «труба в трубе»	—	—	—	—	—	—	—	—	—	300
12	Горелка инжекционная	—	—	—	—	—	—	—	$0,5 \cdot 10^5$ газа	—	25
13	Топка слоевая	1,0	$4,1 \cdot 10^6$	$1,0 \cdot 10^6$	—	—	—	—	—	—	—
14	Топка камерная круглая горизонтальная	3,0	—	$1,1 \cdot 10^6$	1,7	—	—	—	—	—	—
15	Топка камерная вертикальная прямоугольная	1,3	—	$0,7 \cdot 10^6$	—	1,3	—	—	—	—	—

Окончание табл. 4.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
16	Форсунка пневматическая двухканальная	–	–	–	–	–	–	–	$5,0 \cdot 10^3$ воздуха	25	–
17	Форсунка пневматическая двухканальная	–	–	–	–	–	–	–	$3,0 \cdot 10^6$ воздуха	15	–
18	Горелка ГНП	–	–	–	–	–	–	–	$4,0 \cdot 10^3$ газа	–	120
19	Горелка инжекционная	–	–	–	–	–	–	–	$0,2 \cdot 10^5$ газа	–	30
20	Горелка двухканальная	–	–	–	–	–	2,0	3,0	$2,0 \cdot 10^3$ газа	–	–
21	Горелка одноканальная	–	–	–	–	–	–	–	$5,0 \cdot 10^4$	–	50
22	Топка камерная вертикальная прямоугольная	1,5	–	$0,5 \cdot 10^6$	1,3	–	–	–	–	–	–
23	Топка камерная круглая вихревая	0,8	–	$0,7 \cdot 10^6$	–	–	–	–	–	–	–
24	Горелка пылеугольная двухканальная	1,5	–	–	–	–	3,0	4,0	–	–	–
25	Топка шахтно-мельничная	0,9	–	$0,6 \cdot 10^6$	–	–	–	–	–	–	–
26	Горелка пылеугольная одноканальная	1,3	–	–	–	–	2,0	3,0	–	–	–
27	Топка слоевая	1,4	$3,5 \cdot 10^6$	$1,0 \cdot 10^6$	–	–	–	–	–	–	–

Таблица 4.3

Исходные данные для расчета напоров к задаче № 3

№ по списку в журнале	$V_0 \cdot 10^3,$ м ³ /ч	$t_{cp},$ °C	$L,$ м	$p,$ Па	$n,$ шт.	$m,$ шт.	$w,$ м/с
1	10	140	140	1 000	1	3	10
2	11	145	410	1 500	2	1	10
3	12	150	150	500	3	2	5
4	13	155	160	600	4	4	6
5	14	160	170	700	4	1	7
6	15	165	180	800	3	2	10
7	16	170	190	900	2	3	11
8	17	175	200	1 000	4	3	12
9	18	180	210	1 100	5	1	4
10	19	185	220	1 200	1	3	5
11	20	190	230	1 300	3	1	6
12	21	200	240	1 400	6	2	7
13	22	210	250	1 500	2	5	8
14	23	220	260	1 600	3	4	9
15	24	230	270	1 650	2	2	10
16	25	240	280	1 700	3	3	11
17	26	250	290	1 850	6	0	12
18	27	260	300	1 900	0	2	13
19	28	270	310	2 000	5	5	5
20	29	280	320	1 000	1	1	6
21	30	290	330	1 050	2	2	7
22	31	300	340	1 100	3	3	8
23	32	310	350	1 150	3	7	9
24	33	320	370	1 200	0	7	10
25	34	330	390	1 300	3	6	9
26	35	320	400	1 000	3	5	8
27	36	300	410	1 200	4	2	6

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1

Состав твердого топлива

№ п/п	Топливо	Марка и сорт	W ^p , мас. %	A ^p , мас. %	Состав горючей массы, мас. %				
					[C] ^г	[H] ^г	[S] ^г	[N] ^г	[O] ^г
1	Каменный уголь	Д	13,0	19,6	75,0	5,6	5,9	1,5	12,0
2		Г	8,0	16,0	80,5	5,4	4,3	1,5	8,3
3		Т	4,5	16,0	90,0	4,2	2,2	1,5	2,1
4		АК	4,0	6,0	94,0	1,8	1,9	1,0	1,3
5		ПС	9,0	16,0	86,0	5,0	0,7	2,0	6,3
6		Т	8,0	16,0	90,5	4,3	0,7	2,0	2,5
7		Г	8,5	11,0	83,0	5,8	0,7	2,7	7,8
8		Д	12,0	17,0	85,0	3,0	0,5	1,5	10,0
9		А	5,0	7,0	92,5	2,0	1,5	1,5	2,5
10	Бурый уголь	Б	29,0	20,0	70,0	4,5	0,6	1,3	23,6
11			12,0	34,0	65,0	4,5	3,0	2,5	25,0
12	Горючий сланец	—	10,0	45+17	70,0	10,0	3,0	12,0	5,0
13			15,0	40+22	65,0	12,0	3,0	14,0	6,0
14	Торф	Фрезерный	50,0	22,0	57,8	6,0	0,3	2,5	33,4
15			55,0	41,0	60,0	5,0	1,0	3,5	30,5
16	Древесина	Щепа	40,0	2,5	50,0	7,0	—	0,5	42,5
17			45,0	3,0	48,0	8,0	—	0,7	43,3

Таблица 2

Состав жидкого топлива

№ п/п	Топливо	Марка	W ^p , мас. %	A ^p , мас. %	Состав горючей массы, мас. %				
					[C] ^г	[H] ^г	[S] ^г	[N] ^г	[O] ^г
1	Мазут	М40	2,0	1,0	87,2	11,7	0,5	0,3	0,3
2			3,0	0,2	87,4	11,2	0,5	0,4	0,5
3			3,0	0,3	87,6	10,7	0,7	0,5	0,5
4			3,0	0,3	85,6	11,4	3,2	0,2	0,2
5			1,0	0,1	85,2	11,6	2,5	0,35	0,35
6			2,0	0,2	85,0	12,0	2,6	0,2	0,2
7			4,0	0,3	87,3	10,8	0,8	0,55	0,55

Таблица 3

Состав газообразного топлива

№ п/п	Топливо	Содержание индивидуальных газов, об. %										
		CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	CO	H ₂	H ₂ S	CO ₂	N ₂	O ₂
1	Природный газ	93,2	4,4	0,8	0,6	0,3	—	—	—	0,1	0,8	—
2		98,0	0,3	0,1	0,1	—	—	—	—	0,3	1,2	—
3		85,0	4,4	2,4	1,8	1,3	—	—	—	0,1	5,0	—
4		81,7	5,0	1,0	1,2	0,6	—	—	0,6	0,4	8,5	—
5		98,2	1,33	0,12	0,15	—	—	—	—	0,1	0,1	—
6	Попутный газ нефтедобычи	50,0	15,0	10,0	5,0	3,0	—	—	0,3	11,0	5,7	—
7	Коксовый газ	23,0	2,0	—	—	—	7,0	5,7	0,5	2,0	7,5	1,0
8	Генераторный газ	0,5	—	—	—	—	33,0	1,0	—	0,5	65,0	—
9		0,5	—	—	—	—	27,5	13,5	0,2	5,5	52,6	0,2
10	Газ подземной газификации бурых углей	23,0	2,0	—	—	—	14,3	40,0	0,5	2,0	7,5	1,0
11	Биогаз	60,0	—	—	—	—	—	0,8	3,0	36,2	—	—

ЛИТЕРАТУРА

1. Плышевский, С. В. Тепловые процессы в технологии силикатных материалов: учеб. пособие / С. В. Плышевский, М. И. Кузьменков. – Минск: БГТУ, 2006. – 332 с.
2. Перегудов, В. В. Теплотехника и теплотехническое оборудование: учеб. пособие / В. В. Перегудов, М. И. Роговой. – М.: Стройиздат, 1990. – 336 с.
3. Левченко, П. В. Расчеты печей и сушилок силикатной промышленности: учеб. пособие / П. В. Левченко. – М.: Высш. шк., 1968. – 367 с.
4. Чечеткин, А. В. Теплотехника: учебник / А. В. Чечеткин, Н. А. Замянец. – М.: Высш. шк., 1986. – 344 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	3
1. Программа курса.....	4
1.1. Введение. Этапы развития теории тепловых процессов.....	4
1.2. Источники и процессы получения теплоты. Виды и характеристика топлива.....	4
1.3. Физико-химические основы горения топлива и расчет процесса горения	5
1.4. Сжигание топлива в теплогенераторах и тепловых установках.....	6
1.5. Электронагрев и его применение в тепловых установках технологии силикатных материалов.....	6
1.6. Теплообмен в тепловых установках.....	7
1.7. Аэродинамика газовых потоков в тепловых установках технологии силикатных материалов.....	7
1.8. Тепловые процессы в материалах и изделиях, подвергаемых тепловой обработке	8
1.9. Основы энерготехнологии силикатных материалов	8
2. Вопросы для самопроверки.....	10
3. Методические указания по выполнению контрольной работы.....	13
3.1. Расчет горения топлива.....	14
3.2. Расчет топливосжигающих устройств.....	25
3.3. Расчет устройств для перемещения газов.....	33
3.4. Расчет процессов теплообмена.....	41
3.5. Эксергетический анализ тепловых процессов.....	43
4. Задания для выполнения контрольной работы.....	46
Приложение.....	52
Литература.....	54

ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ТЕХНОЛОГИИ СИЛИКАТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Составитель **Плышевский** Сергей Васильевич

Редактор *Е. И. Гоман*
Компьютерная верстка *Е. И. Гоман*

Подписано в печать 12.01.2011. Формат 60×84¹/₁₆.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 3,3. Уч.-изд. л. 3,4.
Тираж 100 экз. Заказ

Отпечатано в Центре издательско-полиграфических
и информационных технологий учреждения образования
«Белорусский государственный технологический университет».
220006. Минск, Свердлова, 13а.
ЛИ № 02330/0549423 от 08.04.2009.
ЛП № 02330/0150477 от 16.01.2009.