

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**(ДГТУ)**

КАФЕДРА «ТЕПЛОГАЗОСНАБЖЕНИЕ, КЛИМАТЕХНИКА И АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ»

**Практикум**

по дисциплине **«Совершенствование технологических процессов и конструкций генераторов теплоты»**



Ростов-на-Дону

2025 год

УДК 662.995

Составители: Е.П. Лысова, А.Л. Тихомиров

Практикум по дисциплине «Совершенствование технологических процессов и конструкций генераторов теплоты » ДГТУ, г. Ростов-на-Дону, 2025 г.

Практикум содержит необходимый теоретический материал, основные зависимости, рабочее задание и контрольные вопросы для самопроверки.

Предназначено для магистрантов всех форм обучения направления 08.04.01 «Строительство» профиля «Теплогазоснабжение и вентиляция».

УДК 662.995

Ответственный за выпуск:

зав. кафедрой Теплогазоснабжение, климатехника и альтернативные энергоустановки

Беспалов Вадим Игоревич

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

**Содержание**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | Общие положения………………………………………………………… | 4 |
| 1 | Изучение свойств сжигаемого органического топлива и определение состава загрязняющих веществ, содержащихся в дымовых газах генераторов теплоты……………………………….……………...……. | 9 |
| 2 | Изучение влияния загрязняющих веществ, содержащихся в дымовых газах генераторов теплоты, на здоровье человека и состояние окружающей среды………………………………..………………..…… | 12 |
| 3 | Аналитический расчет горения газообразного топлива………………. | 18 |
| 4 | Аналитический расчет горения твердого и жидкого топлива………… | 22 |
| 5 | Определение действительного количества воздуха, подаваемого в топку и действительных объемов продуктов сгорания топлива………. | 27 |
| 6 | Определение энтальпий воздуха и продуктов сгорания топлива…….. | 30 |
| 7 | Составление теплового баланса генератора теплоты………………….. | 35 |
| 8 | Расчет валовых выбросов загрязняющих веществ от дымовой трубы котельной…………………………………………….……………………. | 44 |
|  | Перечень рекомендуемых информационных ресурсов…...…………… | 48 |

**Общие положения**

Практикум представляет собой комплекс рекомендаций по выполнению практических работ по дисциплине «Совершенствование технологических процессов и конструкций генераторов теплоты».

Компетенции, индикаторы достижения компетенций, уровни освоения «знать – уметь – владеть» указаны в рабочей программе дисциплины и в оценочных материалах (оценочных средствах) для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.

В процессе изучения дисциплины студент обязан активно использовать все формы обучения: посещать лекции, практические и лабораторные занятия, получать консультации преподавателя по выполнению курсового проекта и выполнять все виды самостоятельной работы, предусмотренной учебным планом и рабочей программой дисциплины.

Изучение курса должно вестись систематически и сопровождаться составлением подробного конспекта. Следует иметь в виду, что все разделы и темы изучаемой дисциплины являются в равной мере важными и часто взаимосвязаны. Как и в любой другой науке, нельзя приступать к изучению последующих разделов, не усвоив предыдущие.

**Практические занятия** являются важной формой обучения, способствующей углублению теоретических знаний студентов и направлены на закрепление полученного в ходе лекционных занятий и самостоятельной работы материала. Практические занятия направлены на приобретение обучающимися необходимых навыков посредством обсуждения основных вопросов курса, выполнения заданий, ответов на вопросы преподавателя, подготовки сообщений. Дидактическая цель практических работ – формирование у обучающихся профессиональных умений и навыков, необходимых для изучения последующих учебных дисциплин, например, «Спецкурс для объектов профессиональной деятельности».

**Целями проведения практических занятий являются:**

* + - обобщение, систематизация, углубление, применение полученных теоретических знаний обучающимися;
    - формирование компетенций (части компетенций) познавательной деятельности обучающимися (критическое мышление; исследование внешней среды для выявления ее возможностей и ресурсов; разрешение проблемных ситуаций, умение структурировать и преобразовывать информацию; способность к приращению накопленных знаний);
    - выработка у обучающихся профессионально значимых качеств (способность обучаться самостоятельно; готовность решать сложные вопросы, проявлять творческую инициативу и пр.);
    - приближение практических заданий к реальным условиям работы того или иного специалиста.

**При подготовке к практическим занятиям студентам следует:**

* + ознакомиться с темой и планом занятия, чтобы выяснить круг вопросов, которые будут обсуждаться на занятии;
  + внимательно прочитать материал лекций, относящихся к данному занятию, ознакомиться с учебным материалом по учебнику и учебным пособиям;
  + выписать основные термины (или полностью ответ на вопрос для устного сообщения);
  + уяснить, какие учебные элементы остались неясными и постараться получить на них ответ у преподавателя;
  + готовиться можно индивидуально, парами или в составе малой группы, последние являются эффективными формами работы.

Практические занятия по дисциплине могут проводиться в различных формах (выполнение коллективных и индивидуальных заданий), они дают возможность непосредственно понять алгоритм применения теоретических знаний, излагаемых в учебной литературе и на лекциях. Поэтому студент должен активно участвовать в выполнении всех видов практических работ.

**Структура практических занятий по дисциплине**

Практическое занятие состоит из следующих элементов: вводная часть, основная и заключительная.

Вводная часть обеспечивает подготовку студентов к выполнению заданий работы и включает в себя: формулировку темы, цели занятия, обоснование его значимости в профессиональной подготовке студентов; проверку готовности студентов к практическому занятию; объяснение последовательности выполнения заданий.

Основная часть практического занятия включает в себя процесс выполнения практикоориентированных заданий, которое может сопровождаться дополнительными разъяснениями по ходу работы, устранением трудностей при их выполнении, а также устный опрос обучающихся по отдельным темам дисциплины на практических занятиях возможно заслушивание сообщений, докладов с последующим их обсуждением.

Практическая работа – работа обучающихся, направленная на формирование практических умений – профессиональных (умений выполнять определенные действия, операции, необходимые в последующем в профессиональной деятельности) или учебных (умений решать задачи и др.), необходимых в последующей учебной деятельности.

При выполнении практических работ необходимо выполнить рабочее задание (индивидуально или коллективно всей группой).

В ходе практических занятий обучающимся рекомендуется применять следующую последовательность выполнения рабочего задания:

1) изучить теоретическую часть практической работы, в тетради кратко оформить теоретический материал, расчетные зависимости;

2) используя исходные данные (вариант исходных данных для выполнения работы выдает преподаватель) выполнить рабочее задание;

3) при подготовке к защите практической работы устно ответить на контрольные вопросы.

Преподаватель дает пояснения каждого этапа работы с выполнением поясняющих схем и таблиц на доске или демонстрирует презентацию. Затем обучающиеся выполняют этот этап практической работы применительно к своему индивидуальному заданию. Преподаватель осуществляет контроль самостоятельной работы обучающихся и консультирование по наиболее сложным работам, вызывающим у обучающихся затруднения. В случае, если обучающийся не выполнил требуемый объем работы, который объяснялся на практическом занятии, то он должен закончить эту работу самостоятельно, вне времени практического занятия, получая, при необходимости, дополнительную консультацию преподавателя.

Результаты работы на практических занятиях по дисциплине должны быть представлены в виде отчета (оформленной практической работы), который выполняют в тетради.

Заключительная часть содержит: подведение общих итогов занятия; оценку результатов работы отдельных студентов (либо всей группы в целом); выдачу рекомендаций по устранению пробелов в системе их знаний и умений, по улучшению результатов работы.

К каждому практическому занятию приведены контрольные вопросы для устного опроса обучающихся, которые студенты могут использовать для самоконтроля при подготовке к практическому занятию. Преподаватель может провести выборочный опрос по этим вопросам в ходе проведения, либо в конце практических занятий.

Защита практической работы проводится по ее завершению. Студент представляет выполненную работу преподавателю, который проверяет правильность ее выполнения, делает пометки и исправления (при необходимости) и передает студенту для защиты практической работы. Как правило, проверка правильности выполнения работы и ее защита выполняются на практическом занятии в день ее выполнения, либо на следующем занятии по расписанию (по указанию преподавателя).

Всего по дисциплине предусмотрено 8 практических работ:

1. Изучение свойств сжигаемого органического топлива и определение состава загрязняющих веществ, содержащихся в дымовых газах генераторов теплоты (4 часа);
2. Изучение влияния загрязняющих веществ, содержащихся в дымовых газах генераторов теплоты, на здоровье человека и состояние окружающей среды (4 часа);
3. Аналитический расчет горения газообразного топлива (4 часа);
4. Аналитический расчет горения твердого и жидкого топлива (4 часа);
5. Определение действительного количества воздуха, подаваемого в топку и действительных объемов продуктов сгорания топлива (2 часа);
6. Определение энтальпий воздуха и продуктов сгорания топлива (4 часа);
7. Составление теплового баланса генератора теплоты (6 часов);
8. Расчет валовых выбросов загрязняющих веществ от дымовой трубы котельной (4 часа).

**Порядок защиты и оценивания практической работы**

Порядок защиты и оценивания практической работы указаны в оценочных материалах (оценочных средствах) для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине. Максимальное количество баллов по результатам выполнения практических работ составляет 20 баллов в первом и втором тематическом блоке (1 и 2 контрольной точке). В первый тематический блоке (контрольную точку) входит 4 практические работы (максимальное количество баллов по результатам выполнения одной практических работ составляет 5 баллов), во второй – 4 работы (максимальное количество баллов по результатам выполнения одной практических работ составляет 5 баллов).

По результатам выполнения практической работы на первой (второй) контрольной точке 5 баллов выставляется, если работа выполнена правильно и в полном объеме, студент активно работает в течение всего периода на практических занятиях, дает полные ответы на вопросы преподавателя в соответствии с планом практического занятия и показывает при этом глубокое владение соответствующей литературой по рассматриваемым вопросам, способен выразить собственное отношение к данной проблеме, проявляет умение самостоятельно и аргументировано излагать материал, анализировать факты, делать самостоятельные обобщения и выводы.

По результатам выполнения практической работы 4,5 балла выставляется, если работа выполнена правильно и в полном объеме, студент активно работает в течение всего практического занятия, дает полные ответы на вопросы преподавателя в соответствии с планом практического занятия и показывает при этом глубокое владение соответствующей литературой по рассматриваемым вопросам, способен выразить собственное отношение к данной проблеме, проявляет умение самостоятельно и аргументировано излагать материал, анализировать факты, делать самостоятельные обобщения и выводы, но допускает неточности в ответах.

По результатам выполнения практической работы 4 балла выставляется, если работа выполнена правильно и в полном объеме, студент активно работает в течение практического занятия, дает практически полные ответы на вопросы преподавателя, изложение материала логическое, обоснованное фактами, освещение вопросов завершено выводами, студент обнаружил умение анализировать факты, а также выполнять учебные задания. Но в ответах допущены неточности, некоторые незначительные ошибки, имеются погрешности оформления работы.

По результатам выполнения практической работы 3,5 баллов выставляется, если работа выполнена правильно, практически в полном объеме, студент активно работает в течение практического занятия, дает практически полные ответы на вопросы преподавателя, изложение материала логическое, обоснованное выводами, студент обнаружил умение анализировать факты, а также выполнять учебные задания. Но в ответах допущены неточности, некоторые незначительные ошибки, освещение вопросов не всегда завершено выводами, имеет место недостаточная аргументированность при изложении материала, имеются погрешности оформления работы.

По результатам выполнения практической работы 3 баллов выставляется в том случае, когда работа выполнена с незначительными неточностями, практически в полном объеме, студент в целом овладел содержанием вопросов по данной теме, обнаруживает знание лекционного материала и учебной литературы, пытается анализировать факты, делать выводы и решать задачи. Но на занятии ведет себя пассивно, отвечает только по вызову преподавателя, дает неполные ответы на вопросы, работа оформлена неаккуратно.

По результатам выполнения практической работы 2 балла выставляется в том случае, когда работа выполнена неаккуратно, с неточностями и не в полном объеме, но студент в целом овладел содержанием вопросов по данной теме, обнаруживает знание лекционного материала и учебной литературы, пытается анализировать факты, делать выводы и решать задачи. При этом на занятии ведет себя пассивно, отвечает только по вызову преподавателя, дает неполные ответы на вопросы, допускает ошибки при освещении теоретического материала.

По результатам выполнения практической работы 1 балл и менее баллов выставляется в случае, когда студент обнаружил несостоятельность осветить вопрос, либо вопрос раскрыт неправильно, бессистемно, с грубыми ошибками, при этом отсутствуют понимание основной сути вопроса, выводы, обобщения.

**Практическая работа 1**

**«Изучение свойств сжигаемого органического топлива и определение состава загрязняющих веществ, содержащихся в дымовых газах генераторов теплоты»**

**Цель работы:** в зависимости от вида сжигаемого топлива научиться определить состав загрязняющих веществ, содержащихся в дымовых газах.

**Теоретическая часть**

Предприятия, вырабатывающие электроэнергию при сжигании органического топлива, называются **тепловыми электростанциями (ТЭС)**. При сжигании топлива химическая энергия превращается в тепловую энергию пара, которая затем в паровой турбине переходит в механическую энергию, а турбогенератор уже делает ее электрической.

Предприятия, вырабатывающие как электрическую, так и тепловую энергию, называются **теплоэлектроцентралями (ТЭЦ)**. Электрическая энергия ТЭЦ подается в электросеть, а тепловая – в теплопроводы.

При сжигании органического топлива в топках **промышленных и коммунальных котлоагрегатов** и **теплогенераторах** производится тепловая энергия (водяной пар или горячая вода на отопление или горячее водоснабжение). Котельные установки, предназначенные для снабжения тепловой энергией предприятий для обеспечения технологических процессов, принято называть **производственными котельными**. В случае, когда котельная вырабатывает тепловую энергию и нагревает воду для технологического процесса предприятия и нужд отопления, ее называют **производственно-отопительной.** Если котельная установка сооружается лишь для потребностей отопления и горячего водоснабжения, ее называют **отопительной**. Котельные могут быть различной мощности.

Существенное влияние на состав образующихся загрязняющих веществ при сжигании топлива оказывают его вид и режим горения. На тепловых электростанциях используется твердое, жидкое и газообразное топливо.

При полном сгорании органического топлива в атмосферу поступают диоксид углерода и пары воды, при неполном, в зависимости от вида и способа сжигания топлива, к ним могут добавляться твердые частицы золы и сажи, оксиды серы, углерода, азота, тяжелые металлы, галогениды (соединения фтора, хлора и т.п.), летучие органические соединения (ЛОС), диоксины, фураны и другие загрязняющие вещества.

**При сжигании природного газа** основными загрязняющими веществами являются оксиды азота (монооксид азота и диоксид азота), оксиды углерода (монооксид углерода и диоксид углерода) и бенз(а)пирен. Токсичность отходящих газов связaнa, в первую очередь, с оксидами aзота, содержание бенз(a)пиренa незначительно.

**При сжигании жидкого топлива** к вышеперечисленным веществам добавляются оксиды серы и зола.

**При сжигании твердого топлива**, помимо вышеперечисленных ЗВ, выделяется значительное количество твердых частиц, состоящих из золовых частиц (летучая зола), несгоревшего твердого топлива и сажи, причем основную долю составляют золовые частицы.

Бенз(а)пирен также содержится в составе жидкого и твердого топлива. Поэтому возможен его переход из топлива в продукты сгорания вместе с невыгоревшими сажистыми и коксовыми частицами.

В качестве **твердого топлива** в теплоэнергетике используют угли (бурые, каменные, антрацитовый штыб), горючие сланцы и торф. Горючая часть топлива включает органическую, состоящую из углерода, водорода, кислорода, органической серы, и неорганическую часть (в состав горючей части топлива ряда месторождений входит пиритная сера FeS2). Негорючая (минеральная) часть топлива состоит из влаги и золы. Основная часть минеральной составляющей топлива в процессе сжигания переходит в летучую золу, уносимую дымовыми газами. Другая часть в зависимости от конструкции топки и физических особенностей минеральной составляющей топлива может превращаться в шлак.

Зольность отечественных углей колеблется в широких пределах (10–55 %). Химический состав золы твердого топлива достаточно разнообразен. Обычно зола состоит из оксидов кремния, алюминия, титана, калия, натрия, железа, кальция, магния. Кальций в золе может присутствовать в виде свободного оксида, а также в составе силикатов, сульфатов и других соединений. Более детальные анализы минеральной части твердых топлив показывают, что в золе в небольших количествах могут быть и другие элементы, например, германий, бор, мышьяк, ванадий, марганец, цинк, уран, серебро, ртуть, фтор, хлор. Микропримеси перечисленных элементов распределяются в различных по размерам частиц фракциях летучей золы неравномерно, и обычно их содержание увеличивается с уменьшением размеров этих частиц. В составе золы твердых видов топлива могут присутствовать радиоактивные изотопы калия, урана и бария. Эти выбросы практически не влияют на радиационную обстановку в районе ТЭС, хотя их общее количество может превышать выбросы радиоактивных аэрозолей на АЭС той же мощности.

Твердое топливо может содержать серу в следующих формах: колчедана Fe2S и пирита FeS2, в составе молекул органической части топлива и в виде сульфатов в минеральной части. Соединения серы в результате горения превращаются в оксиды серы, причем около 99 % составляет сернистый ангидрид SО2. Сернистость углей в зависимости от месторождения составляет 0,3-6,0 %. Сернистость горючих сланцев достигает 1,4-1,7 %, торфа – 0,1 %.

В качестве **жидкого топлива** в теплоэнергетике применяются мазут, сланцевое масло, дизельное топливо. В состав золы мазута входят пентаоксид ванадия (V2О5), а также Ni2O3, А12О3, Fe2O3, SiO2, МgО и другие оксиды.

Зольность мазута не превышает 0,3 %. При полном его сгорании содержание твердых частиц в дымовых газах составляет около 0,1 г/м3, однако это значение резко возрастает в период очистки поверхностей нагрева котлов от наружных отложений. В жидком топливе отсутствует пиритная сера (FeS2). Сера в мазуте находится преимущественно в виде органических соединений, элементарной серы и сероводорода Н2S. Ее содержание зависит от сернистости нефти, из которой она получена. В мазуте, сжигаемом в котельных и на ТЭЦ, содержится много сернистых соединений. В сланцевом масле содержание серы не более 1 %.

**Газообразное топливо** представляет собой наиболее «чистое» органическое топливо, так как при его полном сгорании из токсичных веществ образуются только оксиды азота. При неполном сгорании в выбросах присутствует оксид углерода (СО). ТЭС на природном газе экологически значительно чище угольных, мазутных и сланцевых, но нельзя забывать о вреде, который наносит природе добыча газа и прокладка тысячекилометровых трубопроводов. В составе загрязняющих веществ, характерных для объектов газовой промышленности, обычно выделяют сероводород H2S.

Природные газы могут быть бессернистыми или содержать значительное количество сероводорода. Добыча и переработка сероводородсодержащих газов, токсичность и летучесть компонентов которых выше, чем у нефти, сопровождается выделением больших количеств H2S в атмосферу и является более опасной по загрязнению воздуха и других экологических объектов по сравнению с природным газом, свободным от сероводорода. В процессе переработки газов, содержащих Н2S, происходит разрушение и износ оборудования, в результате чего в окружающую среду в опасных объемах выделяются сероводород и сопутствующие ему токсичные сернистые, азотные и другие соединения.

**Практическая часть**

**Рабочее задание**

Используя различные источники информации, заполнить графы таблицы 1. Практическая работа выполняется коллективно всей группой.

Таблица 1 – Характеристика видов органического топлива

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Вид органического топлива | Примеры топлива | Характеристика топлива | Загрязняющие вещества, образующиеся при сжигании топлива |
| Твердое |  |  |  |
| Жидкое |  |  |  |
| Газообразное |  |  |  |

**Контрольные вопросы** (ответить устно)

1. Какие предприятия называют тепловыми электростанциями (ТЭС)?

2. Какие предприятия называют теплоэлектроцентралями (ТЭЦ)?

3. Какие котельные называют производственными?

4. Какие котельные называют производственно-отопительными?

5. Какие котельные называют отопительными?

6. Назовите основные загрязняющие вещества, образующиеся при сжигании природного газа.

7. Назовите основные загрязняющие вещества, образующиеся при сжигании жидкого топлива.

8. Назовите основные загрязняющие вещества, образующиеся при сжигании твердого топлива.

9. Приведите примеры твердого топлива.

10. Дайте краткую характеристику твердого топлива.

11. Приведите примеры жидкого топлива.

12. Дайте краткую характеристику жидкого топлива.

13. Приведите примеры газообразного топлива.

14. Дайте краткую характеристику газообразного топлива.

**Практическая работа 2**

**«Изучение влияния загрязняющих веществ, содержащихся в дымовых газах генераторов теплоты, на здоровье человека и состояние окружающей среды»**

**Цель работы:** определить величины ПДК (ПДКм.р., ПДКс.с.) и классы опасности загрязняющих веществ, изучить влияние образующихся загрязняющих веществ на здоровье человека и состояние окружающей среды.

**Теоретическая часть**

Производство тепловой и электрической энергии сопровождается существенным материальным и энергетическим загрязнением окружающей среды. Работа котельных сопровождается непрерывным поступлением в атмосферу загрязняющих веществ – продуктов полного и неполного сгорания органических видов топлива, а также сбросом загрязненных вод, в том числе низкопотенциального тепла, в водоемы и водотоки и загрязнением почвенного покрова.

Загрязнения поверхностных водных объектов котельными обусловлено сбросом неочищенных или малоочищенных сточных вод, причем уровень загрязнения зависит от вида сжигаемого органического топлива, применяемой технологии сброса, типа охлаждающей системы, а, следовательно, количества используемой воды и реагентов. Котельные являются также источниками теплового загрязнения водоемов и водотоков, так как используют воду как охлаждающую среду.

Акустическое (шумовое и вибрационное) загрязнения от котельных связано в основном с использованием котлов, паровых и газовых турбин, а также процессами транспортировки и погрузки топлива, отходов и побочных продуктов, использованием крупных насосов и вентиляторов; предохранительных клапанов; систем охлаждения и т.п. Однако, как правило, зона воздействия шума и вибрации, производимого котельными, относительно невелика.

При сжигании твердого топлива образуются золошлаковые отходы, для размещения которых требуется отчуждение значительного количества земель. Земли, отведенные под золошлаковые отходы, практически безвозвратно изымаются из полезного использования, так как золошлаки могут содержать примеси различных микроэлементов (никель Ni, кобальт Co, кадмий Cd, свинец Pb, сурьма Sb, хром Cr, марганец Mn, мышьяк As, ртуть Hg и и др.).

Но все же, основная масса ЗВ от котельных поступает в атмосферу с дымовыми (отходящими) газами.

Загрязнение воздушного бассейна городских территорий выбросами оксидов серы от котельных происходит из-за присутствия серы в органическом топливе. Топливо содержит серу в виде неорганических сульфидов или органических соединений. Среди оксидов серы, образующихся в процессе сжигания, преобладает диоксид серы (SO2). Диоксид серы (сернистый ангидрид) – бесцветный, со специфическим неприятным запахом газ, поражающий преимущественно органы дыхания. При вдыхании воздуха, загрязненного диоксидом серы, поражается пищевой канал, нарушаются окислительно-восстановительные процессы, угнетается ферментативная активность, снижается иммунобиологическая реактивность организма и наблюдаются нарушения со стороны высшей нервной деятельности. Диоксид серы негативно влияет на зеленые насаждения, особенно чувствительны к нему хвойные и фруктовые деревья. Этот газ может также вызывать коррозию металлических покрытий (крыш, памятников).

При сжигании твердого и жидкого видов органического топлива 1-3% серы также окисляется до триоксида серы (SO3) при наличии в топливе переходных металлов, катализирующих реакцию. Триоксид серы адсорбируется соединениями, входящими в состав твердых частиц, и, в случае жидкого топлива, участвует в формировании кислой сажи.

Принято считать, что природный газ не содержит серы.

Из оксидов азота, образующихся при сжигании органических видов топлива на котельных, основными являются монооксид азота NO и диоксид азота NO2 (их смесь – NOx – составляет более 90% всех выбросов оксидов азота). Оксиды азота образуются в результате реакции между кислородом и азотом воздуха («термические» NOx), формируются из азота, содержащегося в топливе («топливные» NOx) или в результате преобразования молекулярного азота во фронте пламени в присутствии промежуточных углеводородных соединений («быстрые» NOx).

Оксиды азота в ряду загрязнителей атмосферного воздуха занимают особое место. При попадании в атмосферу оксид азота NO в результате фотохимических реакций переходит в диоксид азота NO2.

Оксид азота – бесцветный газ. При вдыхании человек может его не почувствовать, так как не происходит раздражение дыхательных путей, однако попадая в кровь, он связывается с гемоглобином, вызывая кислородное голодание тканей и органов.

Диоксид азота – бурый газ с характерным неприятным острым запахом. Он сильно раздражает слизистые оболочки дыхательных путей. Попадая в организм человека, диоксид азота взаимодействует с влагой с образованием азотной и азотистой кислоты, которые разъедают стенки альвеол легких. Даже небольшие концентрации диоксида азота вызывают кашель, нарушение дыхания, увеличивают число детей с учащенным дыханием и больных бронхитом.

Под воздействием солнечной радиации оксид и диоксид азота участвуют в фотохимических процессах, происходящих в тропосфере и стратосфере. На растения оксиды азота могут воздействовать непосредственно, вызывая пожелтение или побурение листьев и игл в результате окисления хлорофилла, через кислотные осадки и косвенно, участвуя в фотохимических реакциях образования таких сильных окислителей, как озон и пероксиацетилнитрат (ПАН). Озон и ПАН, в свою очередь, также влияют на процесс фотосинтеза растений, их рост и развитие. Негативное воздействие оксидов азота в атмосфере усиливается в присутствии диоксида серы, так как эти вещества обладают синергизмом.

Наличие оксида углерода СО в выбросах от работы котельных незначительно. Образование СО при сжигании твердого топлива происходит при выгорании летучих веществ и при горении кокса. Оксид углерода не имеет цвета и запаха, не раздражает слизистую оболочку, что усиливает опасность отравления им. Обладая повышенным сродством к гемоглобину крови, оксид углерода связывает его, образуя карбоксигемоглобин, вследствие чего в тканях развивается кислородное голодание. Особенно чувствительны к кислородному голоданию клетки нервной системы. Оксид углерода легче воздуха, поэтому значительная часть его уносится в верхние слои воздуха и приземный слой атмосферы загрязняется сравнительно мало. Сжигание органического топлива приводит к появлению диоксида углерода – газа без цвета и запаха, который является одним из основных парниковых газов и способствует развитию парникового эффекта. Диоксид углерода является основным продуктом реакции горения всех видов органического топлива. Количество выбрасываемого диоксида углерода связано с содержанием углерода в исходном органическом топливе, причем при сжигании газообразного топлива в воздушный бассейн выделяется значительно меньшие СО2, чем при сжигании твердого и жидкого топлива.

Другими парниковыми газами, образующимися при работе котельных, являются метан (СН4) и закись азота (N2O). Парниковая активность этих газов гораздо выше, чем у диоксида углерода, однако, содержание в отходящих газах незначительно. Твердые частицы, выбрасываемые через дымовую трубу котельной, состоят из золовых частиц, несгоревшего топлива и сажи, причем основную долю составляют золовые частицы.

Летучая зола на 55-77% состоит из твердых частиц размером до 5 мкм, причем ее количество зависит от зольности исходного органического топлива. Зола включает в себя 42-49% оксида кремния (IV), 23-37% алюмосиликата, 9,8-16% соединений железа, кальция, магния. В летучей золе содержатся значительные количества радиоактивных примесей. Частицы золы способны глубоко проникать в легкие и являться причиной возникновения силикоза. Зола, обладая удовлетворительными аутогезионными свойствами, в большинстве случаев образует агрегаты. Наличие золовых частиц приводит к повреждению поверхностей нагрева котла, так как зола обладает абразивными свойствами. Оседая на площади поверхности нагрева котла, зола снижает теплопередачу от газов к стенке котла, уменьшая тем самым КПД котла.

Коксовые и сажевые частицы – это продукты недожога, в состав которых входит 98% углерода, остальное составляет водород, входящий в состав сажи или сопутствующих ей сложных углеводородов. Хотя частицы сажи составляют менее 10% общей массы загрязнителей атмосферы от котельной, ущерб от данного вида загрязнителей существенен. Сажистые частицы могут вызвать поражение легких. Сажа сама по себе не обладает токсичностью, но из-за наличия в ней смолистых веществ (бенз(а)пирена) приобретает свойства канцерогена, длительное воздействие которого может способствовать развитию рака легких. Присутствие сажи в воздушном бассейне городских территорий способствуют ускорению химических и фотохимических реакций, снижает прозрачность воздуха, увеличивает количество осадков, туманов, влияет на почву и растительность.

Образующиеся в процессе сжигания топлива в топке основные загрязняющие вещества (NO, NO2, SO2, CO, СО2, твердые частицы – зола, сажа) сами по себе не наносят значительного вреда окружающей среде (ОС). Гораздо больший ущерб ОС наносят продукты их химического и фотохимического превращения в атмосфере. В результате таких трансформаций образуются вещества во много раз более токсичные и опасные. Так, при взаимодействии оксидов серы с парами воды в облаках образуется серная и сернистая кислоты, которые с осадками падают на землю (кислотные дожди). Аналогичным образом из оксидов азота образуется азотная и азотистая кислота. Диоксид серы SO2 активно взаимодействует в атмосфере с оксидами азота NOx, образуя токсичные комплексы, действие которых значительно сильнее, чем отдельных их компонентов, активно участвует в образовании фотохимического смога.

Загрязнение компонентов окружающей среды выбросами тяжелых металлов (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, Zn, V) от котельных является результатом их естественного присутствия в органических видах сжигаемого топлива. Большинство их выбрасывается в форме соединений (например, оксиды, хлориды) в составе твердых частиц. Только ртуть Hg и селен Se частично присутствуют в газообразной фазе. Содержание тяжелых металлов в угле, как правило, существенно больше, чем в нефти или в природном газе.

Котельные являются также источниками поступления в воздушный бассейн городов хлористого и фтористого водорода. Выбросы этих ЗВ являются результатом следового присутствия хлора и фтора в органическом топливе (угле и нефти). В присутствии влаги в воздухе хлористый и фтористый водород преобразуются в аэрозоли соляной и фтористоводородной (плавиковой) кислоты соответственно.

Кратко влияние основных загрязняющих веществ, образующихся при работе котельных, на компоненты окружающей среды представлено в таблице 1.

Таблица 1

****

**Практическая часть**

**Рабочее задание**

Используя различные источники информации, заполнить графы таблицы 2. Практическая работа выполняется коллективно всей группой.

Таблица 2 – Влияние загрязняющих веществ, содержащихся в дымовых газах генераторов теплоты

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Наименование загрязняющего вещества | Класс опасности | Значение ПДК, мг/м3 | | Влияние на здоровье человека | Влияние на окружающую среду |
| ПДКм.р. | ПДКс.с. |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Диоксид серы SO2 |  |  |  |  |  |
| Триоксида серы SO3 |  |  |  |  |  |
| Монооксид азота NO |  |  |  |  |  |
| Диоксид азота NO2 |  |  |  |  |  |
| Закись азота N2O |  |  |  |  |  |
| Оксида углерода СО |  |  |  |  |  |
| Диоксида углерода |  |  |  |  |  |
| Метан СН4 |  |  |  |  |  |
| Летучая зола |  |  |  |  |  |
| Коксовые и сажевые частицы |  |  |  |  |  |
| Хлористый водород HCl |  |  |  |  |  |
| Фтористый водород HF |  |  |  |  |  |
| Сероводород  H2S |  |  |  |  |  |
| Бенз(а)пирен  C20H12 |  |  |  |  |  |
| Летучие органические вещества |  |  |  |  |  |
| Тяжелые металлы:  Мышьяк As |  |  |  |  |  |
| Кадмий Cd |  |  |  |  |  |
| Хром Cr |  |  |  |  |  |

Окончание таблицы 2

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Медь Cu |  |  |  |  |  |
| Ртуть Hg |  |  |  |  |  |
| Никель Ni |  |  |  |  |  |
| Свинец Pb |  |  |  |  |  |
| Селен Se |  |  |  |  |  |
| Цинк Zn |  |  |  |  |  |
| Ванадий V |  |  |  |  |  |

**Контрольные вопросы** (ответить устно)

1. Каким образом происходит загрязнение атмосферного воздуха котельными?

2. Каким образом происходит загрязнение поверхностных водных объектов котельными?

3. Почему котельные являются источниками теплового загрязнения водоемов и водотоков?

4. Каким образом происходит акустическое (шумовое и вибрационное) загрязнения от котельных?

5. Почему при сжигании твердого топлива образуются золошлаковые отходы?

6. Почему при сжигании топлива происходит загрязнение воздушного бассейна выбросами оксидов серы?

7. Каким образом диоксид серы (сернистый ангидрид) влияет на здоровье человека?

8. Каким образом диоксид серы (сернистый ангидрид) влияет на состояние окружающей среды?

9. Почему при сжигании топлива происходит загрязнение воздушного бассейна выбросами оксидов азота?

10. Каким образом оксиды азота влияют на здоровье человека?

11. Каким образом оксиды азота влияют на состояние окружающей среды?

12. Почему при сжигании топлива происходит загрязнение воздушного бассейна выбросами оксида углерода?

13. Каким образом оксид углерода влияет на здоровье человека?

14. Каким образом оксид углерода влияет на состояние окружающей среды?

15. Почему сжигание органического топлива приводит к появлению диоксида углерода?

16. Каким образом диоксид углерода влияет на состояние окружающей среды?

17. Назовите парниковыми газами, образующимися при работе котельных.

18. Почему при сжигании топлива происходит загрязнение воздушного бассейна выбросами твердых частиц?

19. Каким образом твердые частицы влияют на здоровье человека?

20. Каким образом твердые частицы влияют на состояние окружающей среды?

21. Что такое летучая зола?

22. Что такое коксовые и сажевые частицы?

23. Почему происходит загрязнение компонентов окружающей среды выбросами тяжелых металлов?

**Практическая работа 3**

**«Аналитический расчет горения газообразного топлива»**

**Цель работы:** определить расход воздуха, необходимого для полного сжигания единицы газообразного топлива, выход и состав продуктов полного сгорания.

**Теоретическая часть**

Состав газообразного топлива является важнейшей начальной характеристикой, позволяющей определить такие показатели процесса горения как расход окислителя и выход продуктов сгорания.

Газообразное топливо представляет собой смесь горючих и негорючих газов. Состав такого топлива определяется процентным содержанием в нем соответствующих газов и для сухого топлива в общем случае представляется в виде:

*CO + H2 + CH4 + CmHn + H2S + CO2 + N2 + O2 = 100%*, (1)

*горючая часть негорючая часть*

*(балласт)*

где *CmHn* – любые газообразные углеводороды (кроме *CH4*), входящие в состав газового топлива.

Пересчет с сухой массы на рабочую для газообразного топлива производится по формуле:

*CОp = CОc · K*, (2)

*CH4 p = CH4 c · K* и т. д. (3)

Значение *К* для газообразного топлива определяется из выражения:

*К= (100 − W) / 100*, (4)

где *W* – объем водяных паров на 100 нм3 газа (соответствует процентному содержанию H2O в газе) [[1]](#footnote-1).

*W= 100 ·d*г */ (803,6 + d*г*)*, (5)

где *d*г – влагосодержание газового топлива, г/м3 (определяется количеством водяных паров, приходящихся на 1 м3 сухого газового топлива, приведенного к нормальным условиям – температуре 273 К и давлению 0,1013 МПа (760 мм. рт. ст.).

Важнейшей характеристикой газообразного топлива является теплота сгорания, т.е. количество тепла, которое выделилось при сжигании единицы массы или объема топлива. Различают высшую и низшую теплоту сгорания. Низшей теплотой сгорания *Qн*, кДж/м3, называют количество тепла, выделяемое при полном сгорании топлива без учета тепла конденсации водяных паров. Высшей теплотой сгорания *Qв*, кДж/м3, называют количество тепла, выделяемое при полном сгорании топлива с учетом тепла конденсации водяных паров.

Для газообразного топлива важными характеристиками также являются:

* плотность газа по отношению к плотности воздуха определяет возможность скопления газа в верхней или нижней части помещений или установок (плотность природного газа в нормальных условиях составляет 0,74 кг/м3);
* концентрационные пределы взрываемости смесей газового топлива с воздухом характеризуют диапазон концентраций, в пределах которых эти смеси способны взрываться при наличии источника зажигания (для природного газа в смеси с воздухом концентрационные пределы взрываемости составляют 5-15 %, причем концентрационные пределы взрываемости могут быть расширены за счет предварительного подогрева воздуха либо газа).

Расход кислорода и количество образующихся продуктов сгорания для газообразного топлива – рассчитывают по стехиометрическим уравнениям реакций для газообразных компонентов топлива:

*2СО + О2 = 2СО2*, (6)

*2Н2 + О2 = 2Н2О*, (7)

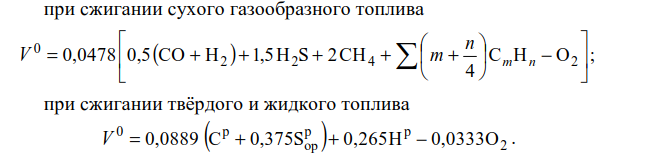
*2Н2S + 3O2 = 2SO2 + 2H2O*, (8)

*СН4 + 2О2 = СО2 + 2Н2О*, (9)

*СmHn + (m + n/4)O2 = mCO2 + 0,5n · H2O*. (10)

Суммируя затраты кислорода на сжигание горючих составляющих на 1 м3 топлива и учитывая кислород, содержащийся в топливе, получают теоретически необходимое количество кислорода для сжигания 1 м3 топлива.

Под **теоретически необходимым количеством воздуха для горения** понимают количество воздуха, которое требуется для полного окисления 1 м3 газообразного топлива. При этом считают, что кислород топлива затрачивается на окисление горючих элементов. Учитывая, что содержание кислорода в воздухе 21 % по объему, теоретически необходимое количество воздуха для горения *Vо* для газообразного топлива, м3/м3составляет:

. (11)

Реакции горения при высоких температурах идут с большой скоростью, поэтому состав конечных продуктов близок к равновесному. Состав продуктов сгорания при сжигании 1 м3 газообразного можно записать в следующем виде:

*Vг = VCO2 + VSO2 + VH2O + VN2 + VO2 + VCO + VH2 + VCH4*. (12)

При полном сгорании 1 м3 газообразного топлива

*VCO = VH2 = VCH4 = 0*,

а также отсутствии избыточного воздуха

*VO2* =0.

Следовательно, в образующихся газообразных продуктах должны содержаться лишь продукты полного окисления горючих элементов *СО2*, *SО2*, *Н2О* и азот воздуха *N2*. Получающиеся в этом случае объемы газов называют теоретическими.

**Теоретические (минимальные) объемы продуктов сгорания топлива**, полученные при полном сгорании топлива с теоретически необходимым количеством воздуха (т.е. коэффициент избытка воздуха α =1) определяются следующим образом.

Объем двухатомных газов при сжигании сухого газообразного топлива:

, (13)

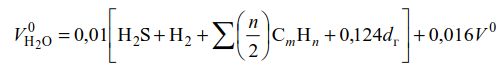
Объем трехатомных газов (диоксид углерода и диоксид серы принято объединять и называть «сухие трехатомные газа», обозначая через *RO2*) при сжигании сухого газообразного топлива:

, (14)

Объем сухих газов:

 (15)

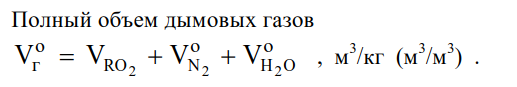
Объем водяных паров при сжигании сухого газообразного топлива:

, (16)

где *d*г – влагосодержание газообразного топлива, отнесенное к 1 м3 сухого газа, г/м3.

Химический состав газообразного топлива приводится на сухую массу. Для пересчёта состава топлива на рабочую массу необходимо знать значение влагосодержания. Для расчетов принять влагосодержание равным 10 г/м3.

Полный объем дымовых газов, м3/м3:

. (17)

**Практическая часть**

**Рабочее задание**

Используя исходные данные, представленные в таблице 1 (вариант исходных данных для выполнения работы выдает преподаватель), определить расход воздуха, необходимого для полного сжигания единицы газообразного топлива, выход и состав продуктов полного сгорания.

**Порядок выполнения работы**

1. Сформировать блок исходных данных, используя таблицу 1.

2. Рассчитать теоретически необходимое количество воздуха для горения газообразного топлива, м3/м3 (формула (11)).

3. Рассчитать теоретические (минимальные) объемы продуктов сгорания топлива, м3/м3 (формулы (13)-(15)).

4. Рассчитать объем водяных паров при сжигании сухого газообразного топлива, м3/м3 (формула (16)).

5. Рассчитать полный объем дымовых газов, м3/м3 (формула (17)).

В расчетах принять нормальные условия, т.е. температуру 0°С, давление 760 мм. рт. ст. (101,3 кПа).

Таблица 1 – Исходные данные для выполнения работы

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Вариант | Состав газа, % по объему | | | | | | | | Плотность, кг/м3  (при н.у.) | Теплота сгорания, кДж/м3  (при н.у.) | |
| CH4 | C2H6 | C3H8 | C4H10 | C5H12 | CO2 | H2S | N2  + редкие газы | Высшая | Низшая |
| 0 | 95,10 | 2,300 | 0,700 | 0,400 | 0,800 | 0,200 | - | 0,500 | 0,722 | 41886,8 | 37821,9 |
| 1 | 86,10 | 2,000 | 0,600 | 0,340 | 0,350 | 8,500 | - | 2,000 | 0,869 | 37181,4 | 33475,5 |
| 2 | 99,20 | 0,120 | 0,005 | - | - | 0,095 | - | 0,600 | 0,723 | 39061,4 | 35123,0 |
| 3 | 98,50 | 0,200 | 0,050 | 0,012 | 0,001 | 0,500 | - | 0,700 | 0,729 | 39455,6 | 35482,5 |
| 4 | 97,64 | 0,100 | 0,010 | - | - | 0,300 | - | 1,950 | 0,730 | 38841,8 | 34925,6 |
| 5 | 85,00 | 4,900 | 1,600 | 0,750 | 0,550 | 0,600 | 1,300 | 5,000 | 0,840 | 40670,7 | 36664,7 |
| 6 | 74,80 | 8,800 | 3,900 | 1,800 | 6,400 | - | - | 4,300 | 1,043 | 52321,0 | 47458,0 |
| 7 | 82,70 | 6,000 | 3,000 | 1,000 | 1,200 | 0,100 | - | 7,000 | 0,661 | 41700,0 | 37738,5 |
| 8 | 93,00 | 3,100 | 0,700 | 0,600 | - | 0,100 | - | 2,500 | 0,771 | 40615,8 | 36654,3 |
| 9 | 93,20 | 2,100 | 1,200 | 1,000 | 1,200 | 0,800 | - | 0,500 | 0,807 | 42867,6 | 38739,3 |

**Контрольные вопросы** (ответить устно)

1. Что такое газообразное топливо?

2. Каким образом описывается состав газообразного топлива?

3. Какие компоненты газообразного топлива относят к его горючей части?

4. Какие компоненты газообразного топлива относят к его негорючей части (балласту)?

5. Назовите важнейшую характеристику газообразного топлива.

6. Что такое низшая теплота сгорания? Назовите единицы измерения.

7. Что такое высшей теплотой сгорания? Назовите единицы измерения.

8. Назовите и дайте характеристику важных характеристик газообразного топлива.

9. На основании чего рассчитывают расход кислорода и количество образующихся продуктов сгорания для газообразного топлива?

10. Что понимают под теоретически необходимым количеством воздуха для горения?

11. Как рассчитывают теоретически необходимое количество воздуха для горения?

12. Каким образом определяют теоретические (минимальные) объемы продуктов сгорания топлива, полученные при полном сгорании топлива?

13. Чему равен коэффициент избытка воздуха при определяют теоретических (минимальных) объемов продуктов сгорания топлива, полученных при полном сгорании топлива?

14. Какие газы называют «сухие трехатомные газа», обозначая через *RO2*?

15. Как рассчитывают объем двухатомных газов при сжигании сухого газообразного топлива?

16. Как рассчитывают объем трехатомных газов при сжигании сухого газообразного топлива?

17. Как определяют объем сухих газов?

18. Как рассчитывают объем водяных паров при сжигании сухого газообразного топлива?

19. Как рассчитывают полный объем дымовых газов?

20. Назовите единицы измерения теоретически необходимого количество воздуха и теоретических (минимальных) объемов продуктов сгорания газообразного топлива.

**Практическая работа 4**

**«Аналитический расчет горения твердого и жидкого топлива»**

**Цель работы:** определить расход воздуха, необходимого для полного сжигания единицы твердого (жидкого) топлива, выход и состав продуктов полного сгорания.

**Теоретическая часть**

Состав твердого (жидкого) топлива является важнейшей начальной характеристикой, позволяющей определить такие показатели процесса горения как расход окислителя и выход продуктов сгорания.

Твердые и жидкие органические топлива представляют собой сложные химические соединения горючих и негорючих элементов. Методами химического анализа определяется так называемый элементарный состав этих топлив, т. е. процентное содержание в массе органического топлива тех или иных химических элементов. Основными химическими элементами, входящими в состав любого твердого или жидкого топлива, являются углерод *C*, водород *H*, кислород *O* и в небольших количествах сера *S* и азот *N*. Помимо указанных элементов в составе твердого (жидкого) топлива имеются негорючие минеральные вещества, образующие при сжигании топлива золу *A*, влагу *W*. Золу и влагу называют внешним балластом топлива.

Процентное содержание указанных химических элементов вместе с составляющими внешнего балласта в общей массе топлива называют элементарным составом рабочей массы топлива. Элементарный состав рабочей массы топлива выражается в виде:

*Cp + Hp + Spop + Op + Np  + Spк + Ap + Wp = 100%*, (1)

*органическая органический внешний*

*часть внутренний балласт*

*балласт*

*горючая часть*

где индекс «*p*» указывает на то, что данный состав относится к рабочей массе топлива.

В элементарный состав топлива входит сера, которая в конкретном топливе может содержаться в трех видах и соответственно называется органической *Sор*, колчеданной *Sк* и сульфатной *Sс*. Органическая сера входит в состав высокомолекулярных органических соединений топлива, колчеданная – представляет собой сульфиды металлов (чаще всего *FeS2*), сульфатная – сульфаты кальция и железа и входят в минеральную часть топлива. Органическая и колчеданная сера *Sор+к* при горении топлива окисляется с выделением теплоты, а сульфатная сера дальнейшему окислению не подвергается.

Летучая (горючая) сера *Sл* входит в состав органических соединений и серного колчедана (пирита) *FeS2*, т. е.

*Sл = Sор + Sк.*

Следует отметить, что летучая сера, входящая в горючую часть топлива, является только частью общего содержания серы. Другую часть составляет сульфатная сера, входящая в минеральные соли (*CaSО4*, *MgSО4*, *FeSО4* и др.).

Следовательно:

*Sобщ = Sл + Sc*.

Для одного и того же топлива количество минеральных примесей и влажность могут изменяться в достаточно широких пределах в зависимости от условий его добычи, транспортировки, хранения и т.п. В связи с этим для удобства сравнительной оценки тепло-химических свойств различных сортов топлива введены условные понятия сухой, горючей и органической масс топлива. Составляющие этих расчетных масс топлива обозначаются теми же символами, что и для рабочей массы, но соответственно с индексами «*с*», «*г*» и «*о*» вместо индекса «*р*».

Сухой массой называется обезвоженная, а горючей – обезвоженная и обеззоленная масса топлива.

Элементарный состав сухой массы топлива:

*Cc + Hc + Oc + Nc + Scop+к + Ac = 100%*. (2)

Элементарный состав горючей массы топлива:

*Cг + Hг + Oг + Nг + Sгop+к = 100%*. (3)

Важнейшей характеристикой твердого (жидкого) топлива является теплота сгорания, т.е. количество тепла, которое выделилось при сжигании единицы массы или объема топлива. Различают высшую и низшую теплоту сгорания.

Низшей теплотой сгорания *Qн*, кДж/кг, называют количество тепла, выделяемое при полном сгорании топлива без учета тепла конденсации водяных паров.

Высшей теплотой сгорания *Qв*, кДж/кг, называют количество тепла, выделяемое при полном сгорании топлива с учетом тепла конденсации водяных паров.

Для твердого топлива важными характеристиками также являются:

* влажность топлива (наличие в топливе влаги неблагоприятно отражается на его основных технологических характеристиках: снижает теплоту сгорания, увеличивает объем продуктов сгорания, что приводит к снижению КПД топочных устройств);
* зольность – это масса золы, отнесенная к единице массы угля и выраженная в процентах (зольность определяет содержание минеральных примесей в топливе. Примеси твердого топлива образованы большим числом различных минеральных веществ, главными из которых обычно являются алюмосиликаты (Al2O3 · 2SiO2 · 2H2O), кремнезем (SiO2), карбонаты (CaCO3, MgCO3, FeCO3), сульфиды (FeS2, CaS), сульфаты (CaSO4, MgSO4), соли щелочных металлов (NaCl, KCl). Помимо перечисленных основных компонентов в минеральных примесях твердого топлива присутствуют часто в повышенных концентрациях соединения многих редких элементов – платины, палладия, никеля, кобальта, германия, урана и др. При сжигании топлива многие компоненты его минеральных примесей подвергаются химическим преобразованиям, при которых масса и состав образующейся золы всегда отличаются от массы и состава исходных минеральных примесей топлива);
* выход летучих веществ и характеристика коксового остатка позволяют оценить пригодность углей для коксования, а также предугадать поведение топлива в технологических процессах переработки и предложить рациональные способы сжигания (при нагревании твердого топлива до высоких температур происходит разложение углеводородов (в основном кислородсодержащих молекул) с образованием газообразных продуктов (CO, H2, CH4, CO2 и др.), получивших название «летучие вещества». Выход летучих веществ из твердого топлива происходит в интервале температур 110-1100 °C. После удаления летучих веществ из зоны нагрева остается твердый остаток, называемый коксовым остатком.).

Одними из важных характеристик жидкого топлива (мазута) являются содержания серы и вязкость. Под условной вязкостью понимают отношение времени непрерывного истечения 200 мл продукта при определенной температуре (50 °C) ко времени истечения дистиллированной воды при 20 °C. Ею определяются способы и длительность сливных и наливных операций, условия транспортировки топлива и эффективность работы форсунок.

Расход кислорода и количество образующихся продуктов сгорания для твердого и жидкого топлива вычисляют из стехиометрических уравнений реакций горения, записанных для каждого горючего составляющего, т. е. углерода, серы и водорода:

*С + О2 = СО2*, (4)

*S + О2 = SО2*, (5)

*2Н2 + О2 = 2Н2О*. (6)

Под **теоретически необходимым количеством воздуха для горения** понимают количество воздуха, которое требуется для полного окисления 1 кг твердого или жидкого топлива. При этом считают, что кислород топлива затрачивается на окисление горючих элементов.

Учитывая, что содержание кислорода в воздухе 21 % по объему, теоретически необходимое количество воздуха для горения *Vо* для твердого и жидкого топлива, м3/кг, составляет:

*V0 = 0,0889 (CP + 0,375 Spop) + 0,265HP – 0,0333Op*. (7)

Реакции горения при высоких температурах идут с большой скоростью, поэтому состав конечных продуктов близок к равновесному. Состав продуктов сгорания при сжигании 1 кг твердого или жидкого топлива можно записать в следующем виде:

*Vг = VCO2 + VSO2 + VH2O + VN2 + VO2 + VCO + VH2 + VCH4*. (8)

При полном сгорании 1 кг твердого или жидкого топлива

*VCO = VH2 = VCH4 = 0*,

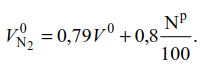
а также отсутствии избыточного воздуха

*VO2* =0.

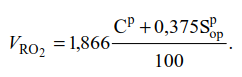
Следовательно, в образующихся газообразных продуктах должны содержаться лишь продукты полного окисления горючих элементов *СО2*, *SО2*, *Н2О* и азот воздуха *N2*. Получающиеся в этом случае объемы газов называют теоретическими.

**Теоретические (минимальные) объемы продуктов сгорания топлива**, полученные при полном сгорании топлива с теоретически необходимым количеством воздуха (т.е. коэффициент избытка воздуха α =1) определяются следующим образом.

Объем двухатомных газов при сжигании твердого и жидкого топлива:

 (9)

Объем трехатомных газов (диоксид углерода и диоксид серы принято объединять и называть «сухие трехатомные газа», обозначая через *RO2*) при сжигании твердого и жидкого топлива:

 (10)

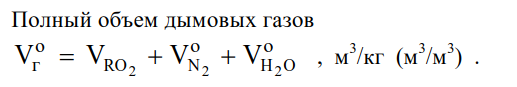
Объем сухих газов:

 (11)

Объем водяных паров при сжигании твердого и жидкого топлива:

. (12)

Полный объем дымовых газов, м3/кг:

. (13)

**Практическая часть**

**Рабочее задание**

Используя исходные данные, представленные в таблице 1 (вариант исходных данных для выполнения работы выдает преподаватель), определить расход воздуха, необходимого для полного сжигания единицы твердого (жидкого) топлива, выход и состав продуктов полного сгорания.

**Порядок выполнения работы**

1. Сформировать блок исходных данных, используя таблицу 1.

2. Рассчитать теоретически необходимое количество воздуха для горения твердого (жидкого) топлива, м3/кг (формула (7)).

3. Рассчитать теоретические (минимальные) объемы продуктов сгорания топлива, м3/кг (формулы (9)-(11)).

4. Рассчитать объем водяных паров при сжигании твердого (жидкого) топлива, м3/кг (формула (12)).

5. Рассчитать полный объем дымовых газов, м3/кг (формула (13)).

В расчетах принять нормальные условия, т.е. температуру 0°С, давление 760 мм. рт. ст. (101,3 кПа).

Таблица 1 – Исходные данные для выполнения работы

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Вариант | Топливо | Состав рабочей массы топлива, % | | | | | | | | Низшая теплота сгорания, МДж/кг  (при н.у.) |
| *Wp* | *Ap* | *Spк* | *Spop* | *Cp* | *Hp* | *Np* | *Op* |
| 0 | Мазут 40  низкосернистый | 0,15 | 0,03 | 0,39 | | 87,33 | 11,90 | 0,20\* | | 41,68 |
| 1 | Уголь третий бурый рядовой | 17,0 | 35,7 | 0,8 | | 33,6 | 2,5 | 0,9 | 9,5 | 12,56 |
| 2 | Мазут 100  сернистый | 0,49 | 0,05 | 1,80 | | 85,71 | 11,45 | 0,50\* | | 39,57 |
| 3 | Уголь газовый жирный рядовой | 8,0 | 32,2 | 2,1 | 0,7 | 48,7 | 3,3 | 0,7 | 4,3 | 19,38 |
| 4 | Уголь жирный рядовой | 8,0 | 29,4 | 0,6 | 0,4 | 52,6 | 3,3 | 1,5 | 4,2 | 20,77 |
| 5 | Уголь первый бурый рядовой | 52,0 | 14,4 | 0,4 | | 22,2 | 2,1 | 0,3 | 8,6 | 7,45 |
| 6 | Мазут 40  сернистый | 0,49 | 0,05 | 1,80 | | 85,71 | 11,45 | 0,50\* | | 39,57 |
| 7 | Уголь газовый рядовой | 7,5 | 37,9 | 3,0 | 1,3 | 41,5 | 3,2 | 0,5 | 5,1 | 16,71 |
| 8 | Мазут 100  низкосернистый | 0,15 | 0,03 | 0,39 | | 87,33 | 11,90 | 0,20\* | | 41,68 |
| 9 | Уголь **длинно-пламенный рядовой** | 11,5 | 28,8 | 1,7 | 0,8 | 44,2 | 2,9 | 1,5 | 8,6 | 16,87 |

\* для расчетов принимать как кислород

**Контрольные вопросы** (ответить устно)

1. Что представляют собой твердые и жидкие органические топлива?

2. Что такое элементарный состав топлива?

3. Назовите элементарный состав любого твердого или жидкого топлива.

4. Какие компоненты твердого (жидкого) топлива относят к его горючей части?

5. Какие компоненты твердого (жидкого) топлива относят к его органической части?

6. Какие компоненты твердого (жидкого) топлива относят к его органическому внутреннему балласту?

7. Какие компоненты твердого (жидкого) топлива относят к его внешнему балласту?

8. В каких трех видах может содержаться сера в твердом (жидком) топливе?

9. Что такое летучая (горючая) сера?

10. Что такое общая сера?

11. Назовите важнейшую характеристику твердого (жидкого) топлива.

12. Что такое низшая теплота сгорания? Назовите единицы измерения.

13. Что такое высшей теплотой сгорания? Назовите единицы измерения.

14. Назовите важные характеристики твердого топлива.

15. Что называют влажностью твердого топлива?

16. Что называют зольностью твердого топлива?

17. Что такое выход летучих веществ и характеристика коксового остатка твердого топлива?

18. Назовите важных характеристики жидкого топлива (мазута).

19. Что понимают под условной вязкостью?

20. На основании чего рассчитывают расход кислорода и количество образующихся продуктов сгорания для газообразного топлива?

21. Что понимают под теоретически необходимым количеством воздуха для горения?

22. Как рассчитывают теоретически необходимое количество воздуха для горения?

23. Каким образом определяют теоретические (минимальные) объемы продуктов сгорания топлива, полученные при полном сгорании топлива?

24. Какие газы называют «сухие трехатомные газа», обозначая через RO2?

25. Как рассчитывают объем двухатомных газов при сжигании сухого газообразного топлива?

26. Как рассчитывают объем трехатомных газов при сжигании сухого газообразного топлива?

27. Как определяют объем сухих газов?

28. Как рассчитывают объем водяных паров при сжигании твердого (жидкого) топлива?

29. Как рассчитывают полный объем дымовых газов?

30. Назовите единицы измерения теоретически необходимого количество воздуха и теоретических (минимальных) объемов продуктов сгорания твердого (жидкого) топлива.

**Практическая работа 5**

**«Определение действительного количества воздуха, подаваемого в топку и действительных объемов продуктов сгорания топлива»**

**Цель работы:** рассчитать действительное количество воздуха, подаваемого в топку и действительные объемы продуктов сгорания для газообразного и твердого (жидкого) топлива.

**Теоретическая часть**

**Действительное количество воздуха**, которое подается в топку котла, как правило, больше теоретического для обеспечения более полного выгорания топлива, т.к. в процессе горения по мере расходования топлива и кислорода и уменьшения действующих концентраций выгорание замедляется, а в камерах сгорания котлов условия реагирования ухудшаются из-за несовершенства аэродинамики топочных устройств и, как следствие, недостаточно полного смешения вступающих в процесс горения больших масс топлива и воздуха.

Отношение действительно поданного количества воздуха *Vв* к теоретически необходимому *V0* называют коэффициентом избытка воздуха:

α = *Vв* / *V0*. (1)

Коэффициент избытка воздуха показывает, во сколько раз в зону горения поступило воздуха больше, чем это теоретически необходимо для полного сгорания вещества.

Расчетный коэффициент избытка воздуха можно принять для разных топлив в следующих пределах:

для твердых 1,15 ÷ 1,25,

жидких 1,02 ÷ 1,1,

газовых 1,05 ÷ 1,1.

Разный избыток воздуха нужен при сжигании одного и того же топлива, но в разных топочных устройствах (например, в прямоточной или вихревой топочной камере), отличающихся эффективностью перемешивания.

Уменьшение избытка воздуха дает экономию расхода энергии на тягодутьевых машинах и повышает КПД котла, однако подача его ниже расчетного значения αт ведет к быстрому росту недожога топлива и снижению экономичности котла.

Поскольку котельные агрегаты в отечественном котлостроении в большинстве случаев выполняются по схеме с уравновешенной тягой, то давление внутри котла ниже атмосферного, что приводит к присосам холодного воздуха через неплотности в котле. Присосы определяются в долях от теоретически необходимого объема воздуха:

*,* (2)

где *ΔVi* – объем присосанного воздуха в пределах i‑й поверхности котла.

Тогда избыток воздуха за *i*‑ой по порядку поверхностью нагрева (плоскости стенок корпуса котельного агрегата, которые создают границу между продуктами сгорания и теплоносителем) после топки определяется как

 (3)

где αт – коэффициент избытка воздуха в топке котельного агрегата;

Δαi – присосы воздуха, определяются по нормативному методу [3] (в среднем принимают от 0 до 0,2).

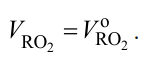
В топочной камере также имеют место присосы воздуха Δαт. С учетом этого избыток воздуха в зоне горелок будет составлять:

 (4)

**Действительные объемы продуктов сгорания** определяются по среднему значению коэффициента избытка воздуха αср в поверхностях нагрева, равному полусумме значений на входе и выходе из нее, м3/кг или м3/м3.

Действительный объем продуктов сгорания будет больше теоретического за счет азота, кислорода и водяного пара, содержащихся в избыточном воздухе.

Так как воздух практически не содержит трехатомных газов, то их объем не зависит от коэффициента избытка воздуха и остается постоянным, равным теоретическому:

 (5)

В реальных условиях при любом (сколь угодно большом) значении коэффициента избытка воздуха на окисление горючих компонентов пойдет лишь тот объем, который теоретически необходим, согласно стехиометрическим соотношениям, а весь избыточный воздух добавится к продуктам сгорания. Поэтому речь уже пойдет не об объеме азота, а об объеме двухатомных газов, ведь, кроме азота, избыточный воздух содержит и кислород.

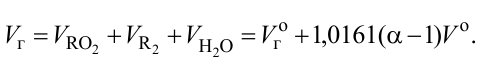
Объем двухатомных газов включает в себя теоретический объем азота и избыточный воздух:

(6)

Действительный объем водяных паров увеличивается (по сравнению с теоретическим) на количество водяных паров, внесенных с избыточным воздухом:

. (7)

Суммарный объем продуктов сгорания:

, (8)

или

. (9)

**Практическая часть**

**Рабочее задание**

На основании исходных данных (вариант исходных данных для выполнения работы выдает преподаватель) и выполненных в практических работах 3 и 4 расчетов для газообразного и твердого (жидкого) топлива, рассчитать действительное количество воздуха, подаваемого в топку и действительные объемы продуктов сгорания для газообразного и твердого (жидкого) топлива.

**Порядок выполнения работы**

1. Определить действительное количество воздуха, которое подается в топку котла, м3/м3 (м3/кг) (формула (1));

2. Определить действительный объем продуктов сгорания, м3/м3 (м3/кг) (формулы (5)- (6));

3. Определить действительный объем водяных паров, м3/м3 (м3/кг) (формула (7));

4. Определить суммарный объем продуктов сгорания, м3/м3 (м3/кг) (формулы (8)- (9)).

**Контрольные вопросы** (ответить устно)

1. Что называют действительным количеством воздуха?

2. Почему действительное количество воздуха, которое подается в топку котла, больше теоретического?

3. Что такое коэффициент избытка воздуха?

4. Что показывает коэффициент избытка воздуха?

5. Назовите пределы значений расчетного коэффициента избытка воздуха для разных топлив.

6. Каким образом определяют действительные объемы продуктов сгорания?

7. Почему действительные объемы продуктов сгорания будут больше теоретических?

8. Почему объем трехатомных газов не зависит от коэффициента избытка воздуха и остается постоянным, равным теоретическому?

9. Каким образом определяют объем двухатомных газов?

10. Какие газы относят к двухатомным?

11. Каким образом определяют действительный объем водяных паров?

12. Каким образом определяют суммарный объем продуктов сгорания?

**Практическая работа 6**

**«Определение энтальпий воздуха и продуктов сгорания»**

**Цель работы:** рассчитать теплосодержание (энтальпию) воздуха и продуктов сгорания для газообразного и твердого (жидкого) топлива.

**Теоретическая часть**

Количество теплоты, кДж, содержащееся в воздухе или продуктах сгорания, называют **теплосодержанием (энтальпией) воздуха и продуктов сгорания**.

При выполнении расчетов принято энтальпию воздуха и продуктов сгорания относить к 1 кг сжигаемого твердого и жидкого топлива или к 1 м3 (при нормальных условиях) газообразного топлива.

Для всех видов топлив **энтальпия теоретического объема воздуха** (кДж/кг или кДж/м3) при коэффициенте избытка воздуха α = 1:

, (1)

где – теоретически необходимое количество воздуха для горения, м3/кг (м3/м3);

 – удельная теплоемкость влажного воздуха, кДж/(кг · К) или кДж/(м3 ⋅ К), может приниматься равной удельной теплоемкости сухого воздуха;

 – температура воздуха, °C;

– энтальпия 1 м3 влажного воздуха при постоянном давлении, кДж/кг или кДж/м3 (принимают для каждой выбранной температуры по таблице 2).

Для всех видов топлив **энтальпия теоретического объема продуктов сгорания** (кДж/кг или кДж/м3) при коэффициенте избытка воздуха α=1 подсчитывается как сумма энтальпий смеси газов при температуре :

 (2)

где *(сϑ)RO2, (сϑ)H2O, (сϑ)N2* – энтальпии 1 м3 при постоянном давлении соответственно трехатомных газов, водяных паров и азота, кДж/кг или кДж/м3 (принимают для каждой из выбранной температур по таблице 2);

 – температура продуктов сгорания, °С.

Таблица 2 – Энтальпии 1 м3 воздуха и газов и 1 кг золы

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| , °С | *(сϑ)RO2*,  кДж/кг (кДж/м3) | *(сϑ)H2O*,  кДж/кг (кДж/м3) | *(сϑ)N2*,  кДж/кг (кДж/м3) | ,  кДж/кг (кДж/м3) | ,  кДж/кг |
| 100 | 170,1 | 129,89 | 150,84 | 132,404 | 80,87 |
| 200 | 357,83 | 260,20 | 304,61 | 266,48 | 169,28 |
| 300 | 559,37 | 392,18 | 462,995 | 403,10 | 263,97 |
| 400 | 772,636 | 527,10 | 626,82 | 542,19 | 360,34 |
| 500 | 997,22 | 664,53 | 795,26 | 684,65 | 458,81 |
| 600 | 1223,48 | 804,48 | 967,89 | 830,46 | 560,62 |
| 700 | 1462,31 | 946,94 | 1148,06 | 980,46 | 662,86 |
| 800 | 1705,33 | 1093,59 | 1336,61 | 1131,3 | 767,61 |
| 900 | 1952,54 | 1244,43 | 1525,16 | 1282,14 | 875,71 |
| 1000 | 2203,94 | 1395,27 | 1726,28 | 1437,17 | 984,65 |
| 1100 | 2459,53 | 1546,11 | 1927,40 | 1596,39 | 1097,78 |
| 1200 | 2719,31 | 1696,95 | 2132,71 | 1755,61 | 1206,72 |
| 1300 | 2979,09 | 1851,98 | 2346,40 | 1914,83 | 1361,75 |
| 1400 | 3234,06 | 2011,20 | 2560,09 | 2078,24 | 1583,82 |
| 1500 | 3507,03 | 2166,23 | 2782,16 | 2241,65 | 1759,80 |
| 1600 | 3771,00 | 2325,45 | 3004,23 | 2405,06 | 1877,12 |
| 1700 | 4039,16 | 2484,67 | 3230,49 | 2568,47 | 2065,67 |
| 1800 | 4307,32 | 2643,89 | 3460,94 | 2731,88 | 2187,18 |
| 1900 | 4575,48 | 2807,30 | 3691,39 | 2899,48 | 2388,30 |
| 2000 | 4847,83 | 2966,52 | 3930,22 | 3067,08 | 2514,00 |
| 2100 | 5120,18 | 3129,93 | 4164,86 | 3234,68 | - |
| 2200 | 5392,53 | 3293,34 | 4403,69 | 3402,28 | - |

С достаточной точностью принимают энтальпию дымовых газов  по диоксиду углерода, т.к. считают, что диоксида серы образуется мало и весь объем относят к :

. (3)

**Энтальпия действительного количества воздуха**, поданного для горения (кДж/кг или кДж/м3), определяется по формуле:

. (4)

**Энтальпия избыточного количества воздуха в продуктах сгорания** (кДж/кг или кДж/м3) при температуре :

. (5)

Для газообразного топлива **энтальпия действительного количества продуктов сгорания** (при коэффициенте избытка воздуха *α* > 1) будет равна сумме энтальпии теоретического объема дымовых газов и энтальпии избыточного воздуха:

. (6)

Для твердого и жидкого топлива энтальпия действительного количества продуктов сгорания (при коэффициенте избытка воздуха *α* > 1) составит:

, (7)

где – энтальпия золы, кДж/кг.

Энтальпия золы невелика по сравнению с другими составляющими и учитывается, когда приведенный унос летучей золы, (% ·кг)/МДж, с потоком газов значителен:

*aун · >1,4,*

где *aун* – доля золы, уносимая потоками газов, зависит от вида топки и способа сжигания (для камерных топок с твердым шлакоудалением *а*ун *=* 0,95, при жидком шлакоудалении *а*ун *=* 0,5-0,7; при слоевом сжигании *а*ун *=* 0,15-0,2; в циклонных топках *а*ун *=* 0,1-0,15);

– приведенная зольность топлива, (% ·кг)/МДж.

.

Расчет энтальпии продуктов сгорания производится при действительных коэффициентах избытка воздуха после каждой поверхности нагрева.

Расчет следует производить для всего возможного диапазона температур после поверхностей нагрева, поскольку на данном этапе расчета температура газов за той или иной поверхностью нагрева еще неизвестна, расчет энтальпий газов делается на весь возможный за данной поверхностью диапазон температур.

В дальнейших расчетах при пользовании значениями энтальпии допускается линейная интерполяция в интервале температур 100°С. Поэтому при расчетах энтальпии интервал температур не должен быть более 100°С.

Для поверхностей нагрева выбирают следующие диапазоны температур:

* топка 900-1400°С и 1800-2000°С;
* пароперегреватель 500-1000°С;
* конвективные пучки 200-700°С;
* водяной экономайзер 200-300°С;
* воздухоподогреватель 100-200°С.

Для паровых котлов основными поверхностями нагрева являются топка, пароперегреватель, конвективные пучки, водяной экономайзер, воздухоподогреватель (подогрев воздуха является обязательным при сжигании топлива с высоким содержанием влаги или твердого топлива в камерной топке; при сжигании твердого топлива в слое или жидких и газообразных топлив в камере в большинстве случаев для котельных агрегатов малой производительности подогрев воздуха не осуществляют).

Для водогрейных котлов основными поверхностям нагрева являются топка, конвективные пучки, водяной экономайзер, воздухоподогреватель.

**Практическая часть**

**Рабочее задание**

1. На основании исходных данных (вариант исходных данных для выполнения работы выдает преподаватель) и выполненных в практических работах 3, 4 и 5 расчетов для газообразного и твердого (жидкого) топлива, рассчитать теплосодержание (энтальпию) воздуха и продуктов сгорания для газообразного и твердого (жидкого) топлива.

2. Результаты расчета энтальпий воздуха и продуктов сгорания занести в таблицу 3.

Таблица 3

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Поверхность нагрева, коэффициент избытка воздуха за ней | Температура после поверхности нагрева, ºС | Энтальпия, кДж/кг или кДж/м3 | | | | |
|  |  |  |  |  |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Топочная камера  = | 900 |  |  |  |  |  |
| 1000 |  |  |  |  |  |
| 1100 |  |  |  |  |  |
| 1200 |  |  |  |  |  |
| 1300 |  |  |  |  |  |
| 1400 |  |  |  |  |  |
| 1800 |  |  |  |  |  |
| 1900 |  |  |  |  |  |
| 2000 |  |  |  |  |  |
| Паро-перегреватель  = | 500 |  |  |  |  |  |
| 600 |  |  |  |  |  |
| 700 |  |  |  |  |  |
| 800 |  |  |  |  |  |
| 900 |  |  |  |  |  |
| 1000 |  |  |  |  |  |
| Конвективные пучки  = | 200 |  |  |  |  |  |
| 300 |  |  |  |  |  |
| 400 |  |  |  |  |  |
| 500 |  |  |  |  |  |
| 600 |  |  |  |  |  |
| 700 |  |  |  |  |  |
| Водяной экономайзер  = | 200 |  |  |  |  |  |
| 300 |  |  |  |  |  |
| Воздухо-подогреватель  = | 100 |  |  |  |  |  |
| 200 |  |  |  |  |  |

3. По результатам расчета построить -ϑ диаграммы:

1) теоретического и действительного значения энтальпии воздуха и энтальпии избыточного воздуха;

2) теоретического и действительного значения энтальпии продуктов сгорания.

**Порядок выполнения работы**

1. Определить энтальпию теоретического объема воздуха, кДж/кг или кДж/м3 (формула (1)).

2. Определить энтальпию теоретического объема продуктов сгорания, кДж/кг или кДж/м3 (формула (2)-(3)).

3. Определить энтальпию действительного количества воздуха, поданного для горения, кДж/кг или кДж/м3 (формула (4)).

4. Определить энтальпию избыточного количества воздуха в продуктах сгорания, кДж/кг или кДж/м3 (формула (5)).

5. Определить энтальпию действительного количества продуктов сгорания кДж/кг или кДж/м3 (формула (6)-(7)).

Для упрощения расчета принять котел, работающий под наддувом, т.е. коэффициент избытка воздуха на выходе из топки αт равен его значению в горелке αгор и сохраняется неизменным по всему газовому тракту (αср = 1,1).

Пример построения -ϑ диаграммы действительного значения энтальпии продуктов сгорания представлен на рисунке 1.

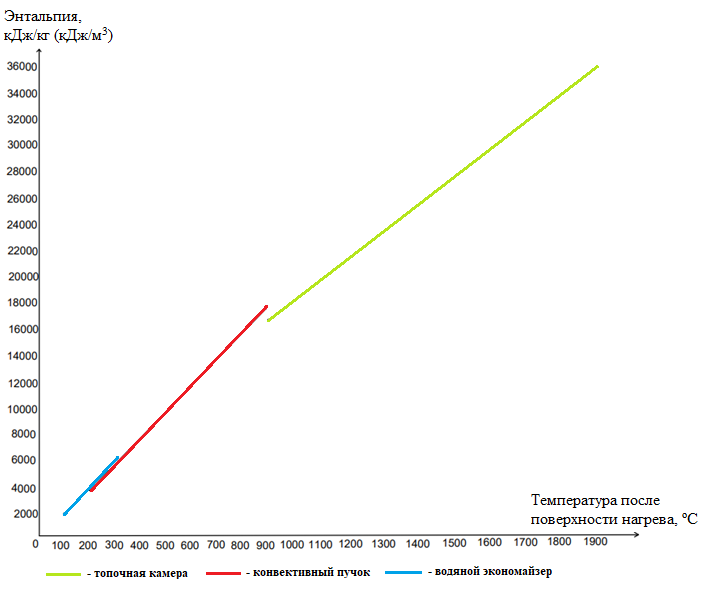


Рисунок 1 – -ϑ диаграмма действительного значения энтальпии продуктов сгорания

**Контрольные вопросы** (ответить устно)

1. Что такое теплосодержание (энтальпия) воздуха?

2. Что такое теплосодержание (энтальпия) продуктов сгорания?

3. В каких единицах измеряют энтальпию?

4. Каким образом определяют энтальпию теоретического объема воздуха?

5. Какое значение коэффициента избытка воздуха принимают для всех видов топлив при определении энтальпии теоретического объема воздуха?

6. Каким образом определяют энтальпию теоретического объема продуктов сгорания?

7. Какое значение коэффициента избытка воздуха принимают для всех видов топлив при определении энтальпии теоретического объема продуктов сгорания?

8. Каким образом определяют энтальпию действительного количества воздуха, поданного для горения?

9. Каким образом определяют энтальпию избыточного количества воздуха в продуктах сгорания?

10. Каким образом определяют энтальпию действительного количества продуктов сгорания для газообразного топлива?

11. Каким образом определяют энтальпию действительного количества продуктов сгорания для твердого и жидкого топлива?

12. Какое значение коэффициента избытка воздуха принимают для всех видов топлив при определении энтальпии действительного количества продуктов сгорания?

13. Назовите поверхности нагрева для паровых котлов.

14. Назовите поверхности нагрева для водогрейных котлов.

15. Назовите диапазоны температур для расчета энтальпий для различных поверхностей нагрева.

**Практическая работа 7**

**«Составление теплового баланса генератора теплоты»**

**Цель работы:** на основании теплового баланса вычислить КПД генератора теплоты и необходимый расход топлива.

**Теоретическая часть**

В котельной установке при сжигании органического топлива происходит преобразование химической энергии топлива в тепловую энергию продуктов сгорания. Выделившаяся теплота за вычетом потерь передается рабочему веществу – теплоносителю, в результате получается полезная продукция, например водяной пар или вода.

Эффективность использования топлива в топочном устройстве котельной установки, а также направления его совершенствования устанавливаются тепловым (энергетическим) балансом котельного агрегата. Тепловой баланс составляется на 1 кг твердого или жидкого топлива либо на 1 м3 газообразного топлива при нормальных условиях и при установившемся режиме.

При составлении теплового баланса котельного агрегата устанавливается равенство между поступившим в агрегат количеством тепла, называемым располагаемым теплом , и суммой полезно использованного тепла *Q1* и тепловых потерь *Q2-6*. На основании теплового баланса вычисляются КПД котельного агрегата и необходимый расход топлива.

Располагаемое тепло определяется по формулам:

для твердого и жидкого топлива, кДж/кг

(1)

для газообразного топлива, кДж/м3

, (2)

где , – низшая теплота сгорания рабочей массы твердого и жидкого и, соответственно, сухой массы газообразного топлива, кДж/кг (кДж/м3);

– теплота, вносимая в топку воздухом, подогретым вне котла, кДж/кг (кДж/м3);

– физическая теплота (энтальпия) топлива, определяемая его температурой, кДж/кг (кДж/м3);

– теплота, вносимая в топку с паровым дутьем или при паровом распылении мазута (учитывается при сжигании мазута с применением форсунок парового распыливания), кДж/кг.

Для большинства видов достаточно сухих и малосернистых твердых топлив принимают , а для большинства видов газового топлива принимают .

Однако, для сильно влажных твердых и жидких топлив учитывается физическая теплота топлива , которая зависит от температуры и теплоемкости поступающего на горение топлива:

, (3)

где –теплоемкость рабочего топлива, кДж/(кг · К);

– температура топлива, °С.

Для твердых топлив в летний период времени принимают = 20 °С, а теплоемкость, кДж/(кг · К), топлива рассчитывают по формуле:

, (4)

где – рабочая влага твердого топлива, % (общая влага рабочей массы топлива, т. е. топлива, находящегося в таком состоянии, в каком оно прибывает потребителю);

– теплоемкость сухой массы топлива, кДж/(кг К) (составляет для бурых углей 1,13 кДж/(кг К), для каменных углей 1,09 кДж/(кг·К), для углей А, ПА, Т 0,92 кДж/(кг·К)).

В зимний период принимают =0 °С и физическую теплоту не учитывают.

Обязательным является учет при сжигании мазута, поскольку он подогревается для распыла. Температура жидкого топлива (мазута) должна быть высокой для обеспечения тонкого распыла в форсунках котельного агрегата. Обычно она составляет = 90-140 °С. Теплоемкость мазута, кДж/(кг · К), составляет:

. (5)

Для газообразного топлива учет целесообразен при сжигании топлива с низкой теплотой сгорания (например, доменного газа) при условии специального нагрева его до относительно высокой температуры (200-300°С), когда составляет 7-10 % от . При сжигании газового топлива с высокой теплотой сгорания (например, природного газа) имеет место повышенное соотношение массы воздуха и газа (примерно 10:1). В этом случае топливо – природный газ обычно не подогревают.

Подогрев воздуха до 70 °С осуществляется за счет рециркуляции горячего воздуха, более высокий подогрев – с помощью калориферов. учитывают лишь при подогреве воздуха вне агрегата, перед его поступлением в воздухоподогреватель котла за счет постороннего источника теплоты (подогрев в паровом калорифере отборным или отработанным паром, в водяном калорифере, подогрев в автономном подогревателе при сжигании дополнительного топлива).

В случае предварительного (внешнего) подогрева воздуха в калориферах при сжигании высокосернистых мазутов и, углей, теплоту такого подогрева включают в располагаемую теплоту топлива. Количество теплоты, полученной воздухом при его подогреве в другой установке, определяют по формуле:

, (6)

где *βгв* – отношение количества горячего воздуха к теоретически необходимому;

Δαвп – присосы воздуха в воздухоподогревателях;

– энтальпия теоретического объема воздуха при температуре его предварительного подогрев (т.е. на входе в воздухоподогреватель), кДж/кг или кДж/м3 (определяется по температуре согласно таблице 1).

–энтальпия теоретического объема холодного воздуха, кДж/кг или кДж/м3 (при температуре *tхв* =30 °С).

Таблица 1 – Температура воздуха на входе в воздухоподогреватель котельного агрегата

|  |  |
| --- | --- |
| Топливо | Рекомендуемая температура, ºС |
| Твердое сухое | 30 |
| Твердое умеренно влажное | 45-55 |
| Твердое сильно влажное | 60-70 |
| Природный газ | 30 |
| Мазут малосернистый | 30 |
| Мазут сернистый | 50-70 |
| Мазут высокосернистый | 80-100 |

Воздух предварительно подогревают вне котла чаще всего при сжигании высокосернистых мазутов и углей.

Для газообразного топлива к расчетам принимаем .

При использовании для распыла мазута паромеханических форсунок в топку котельного агрегата вместе с разогретым мазутом поступает пар из общестанционной магистрали. Он вносит в топку дополнительную теплоту *Qф*, кДж/кг, определяемую по формуле:

 (7)

где *dф* – удельный расход пара на 1 кг мазута, кг/кг (при номинальной нагрузке находится в пределах 0,03÷0,05 кг/кг);

*iф* – энтальпия пара, поступающего в форсунку, кДж/кг (параметры пара, поступающего на распыл мазута, обычно составляют 0,3-0,6 МПа и 280-350 °С).

2380– условно принимаемая энтальпия пара, содержащегося в уходящих газах кДж/кг.

Располагаемая теплота расходуется на производство полезной теплоты и тепловые потери. Общее уравнение теплового баланса на единицу топлива, кДж/кг (кДж/м3):

(8)

где *Q1* – полезно используемая теплота, кДж/кг (кДж/м3);

*Q2* – потери теплоты с уходящими газами, кДж/кг (кДж/м3);

*Q3* – потери теплоты с химической неполнотой сгорания топлива, кДж/кг (кДж/м3);

*Q4* – потери теплоты с механической неполнотой сгорания, кДж/кг (кДж/м3);

*Q5* – потери теплоты в окружающую среду через обмуровку (ограждения), кДж/кг (кДж/м3);

*Q6* – потери с физической теплотой шлака, кДж/кг (кДж/м3).

Тепловой баланс котла составляется применительно к установившемуся тепловому режиму, а потери теплоты выражаются в процентах от располагаемой теплоты:

 (9)

Разделив правую и левую части выражения (9) на и умножив на 100%, получим уравнения теплового баланса в следующем виде:

*100 =q1 +q2 +q3 +q4 +q5 +q6*. (10)

Отношение полезно использованного тепла к располагаемому представляет собой **коэффициент полезного действия (КПД) брутто котельного агрегата**. КПД брутто не учитывает затраты энергии на собственные нужды котельного агрегата (электрическая энергия на привод насосов, вентиляторов, дымососов, размол топлива; тепловая энергия на паровую обдувку поверхностей нагрева и с продувочной водой (на продувку).

Коэффициент полезного действия котельного агрегата с учетом расхода электроэнергии и тепла на собственные нужды называют **КПД нетто котельного агрегата**:

Коэффициент полезного действия брутто котла определяется по обратному балансу, % ,

*ηк = q1 = 100 - q2 - q3 - q4 - q5 - q6*. (11)

Большая часть теплоты, вносимой в топку, воспринимается поверхностями нагрева и передается рабочему телу. За счет этой теплоты производятся подогрев воды. Это полезно используемая теплота, остальная часть составляет тепловые потери.

**Потери теплоты с уходящими газами** обусловлены тем, что дымовые газы покидают котел при достаточно еще высокой температуре. Следовательно, они уносят с собой некоторое количество теплоты топлива, которое в дальнейшем выбрасывается в атмосферу.

Температура уходящих газов зависит от многих факторов. Она определяется степенью форсировки топки (количеством сжигаемого топлива в час), избытком воздуха, степенью загрязнения котла и других поверхностей нагрева. Высокая температура уходящих газов может быть вызвана неисправностью перегородок, отделяющих один газоход от другого, а также присосом воздуха через неплотности кладки, топочных дверок и т. д. Одной из важнейших причин потери тепла с уходящими газами является большой избыток воздуха, определяемый содержанием углекислоты в уходящих газах. Для снижения температуры уходящих газов и уменьшения потери теплоты за котлом устанавливают экономайзерные поверхности. В отопительных котельных экономайзерные поверхности часто отсутствуют, тогда температура уходящих газов ориентировочно определяется по температуре газов за котлом.

В тепловом балансе котельного агрегата наибольшими из потерь, как правило, являются потери теплоты с уходящими газами *q2,* %:

, (12)

где – энтальпия уходящих газов, при соответствующих значениях αух и выбранной температуре уходящих газов, кДж/кг (кДж/м3);

– энтальпия теоретического объема холодного воздуха, определяется при температуре *tв* = 30 0С, кДж/кг (кДж/м3);

αух – коэффициент избытка воздуха в уходящих газах (берется в сечении газохода после последней поверхности нагрева);

*q4* – потеря теплоты от механической неполноты горения (учитывается при сжигании твердых топлив – углей, торфа, сланцев, а для природного газа q4 = 0), %.

Потеря теплоты с уходящими газами занимает обычно основное место среди тепловых потерь котельного агрегата, составляя 5-15% располагаемой теплоты топлива, и определяется объемом и составом продуктов сгорания, существенно зависящих от балластных составляющих топлива и от температуры уходящих газов. С повышением температуры уходящих газов потери тепла увеличиваются. При росте температуры уходящих газов на 12-16°С *q2* повышаются примерно на 1 %. Поэтому желательно иметь возможно более низкую температуру дымовых газов, покидающих котельный агрегат.

Помимо температуры, большое влияние на величину потерь тепла с уходящими газами оказывает объем дымовых газов, покидающих котельный агрегат. Увеличение коэффициента избытка воздуха в топке, а также присосы холодного воздуха обусловливают повышение объема уходящих газов, удаляемых в атмосферу, и их энтальпии. В результате потери тепла с уходящими газами увеличиваются. При этом несколько интенсифицируется конвективный теплообмен и возрастает гидродинамическое сопротивление в газоходах котла.

Рекомендуемые температуры уходящих газов, °С, приведены в таблицах 2,3.

Таблица 2 – Рекомендуемые температуры уходящих газов, °С, при сжигании твердых топлив

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Твердое топливо, приведенная влажность, % кг/МДж | Массовый расход пара при расчетной паропроизводительности котельного агрегата *Dпе* до 20 кг/с | Массовый расход пара при расчетной паропроизводительности котельного агрегата *Dпе* более 20 кг/с при температуре питательной воды | | |
| tпв = 150 ºС | tпв = 215-230 ºС | tпв = 270 ºС |
| Сухое, Wпрр ≤ 0,7 | 120-140 | 110-120 | 120-130 | 130-140 |
| Влажное, Wпрр = 1 ÷ 5 | 140-150 | 120-130 | 140-150 | 150-160 |
| Сильновлажное, Wпрр > 5 | 150-160 | 130-140 | 160-170 | 170-180 |

Таблица 3 – Рекомендуемые температуры уходящих газов, °С, при сжигании мазута и природного газа

|  |  |
| --- | --- |
| Жидкое и газообразное топливо | Температура уходящих газов, °С |
| Мазут  Высокосернистый  Сернистый  Малосернистый и низкосернистый | 160-165  150  140 |
| Природный газ | 120-130 |

В продуктах сгорания топлива могут находиться газообразные горючие компоненты СО, Н2, СН4 (продукты химического недожога). Их догорание за пределами топочной камеры практически невозможно вследствие низких температур и концентраций как горючих компонентов, так и кислорода.

Теплота, которая осталась химически связанной в газообразных продуктах неполного окисления смеси, содержащихся в дымовых газах, не используется в котельном агрегате составляет **потери от химической неполноты сгорания (химического недожога)**.

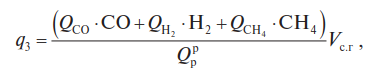
Химическая неполнота сгорания топлива может являться следствием:

* общего (или местного) недостатка воздуха;
* плохого смесеобразования (способ сжигания топлива, конструкция горелочного устройства);
* низких или высоких значений теплонапряжения топочного объема (в первом случае – низкая температура в топке; во втором – уменьшение времени пребывания газов в объеме топки и невозможность в связи с этим завершения реакции горения).

**Потери теплоты с химическим недожогом** зависят от вида топлива, способа его сжигания, конструкции горелок, аэродинамики камеры сгорания и принимаются на основании опыта эксплуатации котельных агрегатов.

Потери теплоты с химическим недожогом определяются суммарной теплотой сгорания продуктов неполного окисления горючей массы топлива (СО, Н2, СН4). Теплота, потерянная в результате неполного сгорания горючих веществ, составляет химический недожог топлива *Q3*, кДж/кг (кДж/м3).

В общем случае потери теплоты от химического недожога рассчитывают на основании данных полного газового анализа продуктов сгорания. Расчет потерь теплоты *q3*, %, производят по формуле:

 (13)

или

*,*

где *QCO*, *QH2*, *QCH4* – теплоты сгорания продуктов неполного горения, кДж/кг (кДж/м3);

*СО*, *Н2*, *СН4* – объемные содержания продуктов неполного сгорания топлива в сухих продуктах сгорания, %;

*Vс.г* — объем сухих продуктов сгорания, м3/кг (м3/ м3).

Химический недожог при сжигании газообразного и жидкого топлива составляет *q3* = 0-0,5 %, а при сжигании твердого топлива в факеле принимается равным нулю.

Теплота сгорания углерода, содержащегося в твердых частицах топлива, унесенных дымовыми газами или удаленных из топки вместе со шлаком и провалом, не используется в котельном агрегате и составляет **потери от механической неполноты сгорания топлива (потери тепла с механическим недожогом).**

Механическая неполнота сгорания сопутствует сжиганию также жидких и газообразных топлив. Тяжелые углеводороды, содержащиеся в них, подвергаясь разложению, выделяют значительные количества свободного углерода в виде сажи. Особенно сильное сажеобразование наблюдается при горении вязких мазутов. Сажеобразование при сжигании твердых топлив иногда относят к потерям от химического недожога *q3*.

Потери тепла с механическим недожогом определяются недожогом топлива в шлаке[[2]](#footnote-2), провале[[3]](#footnote-3) и уносе[[4]](#footnote-4). Они зависят от избытка воздуха в топке, способа сжигания топлива, способа шлакоудаления.

Механический недожог при сжигании твердых топлив (торфа, углей, сланцев) представляет собой коксовые частицы, которые покидают зону высоких температур, не успев полностью догореть. Механический недожог при сжигании газа и мазута может иметь место также в виде твердых частиц или сажи, возникающих в высокотемпературной зоне при недостатке кислорода.

При камерном сжигании твердого топлива потери теплоты с механической неполнотой сгорания *q4* подразделяются на потери с уносом *q4* ун и со шлаком q4 шл, при этом преобладающую часть составляет *q4* ун.

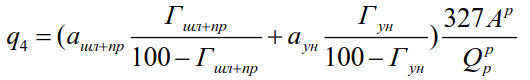
Потери *q4* существенно зависят от коэффициента избытка воздуха.

При избытке воздуха ниже оптимального недожог определяется неполнотой перемешивания топлива с воздухом на выходе из горелки и развитием зон с недостатком кислорода, хотя температурный уровень достаточно высок.

При α > αопт наблюдается снижение температуры в зоне горения и замедление реакций окисления. Одновременно уменьшается время пребывания частиц в высокотемпературной зоне ввиду увеличения объема продуктов сгорания.

Повышенные потери *q4* у низкореакционных топлив определяются поздним воспламенением коксовых частиц и затянутым горением в кинетической области, в связи с этим низкореакционные топлива весьма чувствительны к режиму эксплуатации.

Потери теплоты с механической неполнотой сгорания рассчитываются по формуле:

, (14)

где *ашл+ пр* и *аун* –доля золы в шлаке, провале и в уносе соответственно;

*Гшл+пр* и *Гун* – содержание горючих в шлаке, провале и уносе, %;

32700 кДж/кг – теплота сгорания горючих (углерода) в шлаке, провале и уносе (327 = 32700/100 – перевод *ашл+ пр* и *аун* из % в доли единицы).

Для определения доли золы топлива в уносе и содержания в них горючих соединений отбирают пробы летучей золы из дымовых газов.

В нормальных условиях эксплуатации потери с механическим недожогом при сжигании твердых топлив составляют *q4* = 0,5-5%. При сжигании газа и мазута потери с механическим недожогом невелики – как правило, менее 0,5-1%, и их в расчетах не учитывают.

Наружные поверхности топки и газоходов, опускные и пароотводящие трубы экранов, коллекторы экранов, пароперегревателей и водяных экономайзеров, барабаны, трубопроводы, воздухопроводы и газопроводы при работе котельного агрегата всегда имеют температуру, более высокую, чем окружающая среда. За счет конвекции (и частично излучения) происходят потери тепла этими поверхностями в окружающую среду (*q5*). Они зависят от размера и температуры его наружной поверхности, качества обмуровки и тепловой изоляции, а также от температуры окружающего воздуха.

**Потери теплоты от наружного охлаждения** *q5* невелики и составляют от 0,2 до 2,5 %. Они зависят от толщины обмуровки и теплопроводности материала изоляции и принимаются, как правило, по нормативам в зависимости от мощности котла (расхода пара) при условии, что температура поверхности внешнего слоя изоляции не превышает 45°С.

**Потери с физической теплотой удаляемых шлаков** *q6*, %, при твердом шлакоудалении весьма невелики и учитываются только для многозольных топлив. В случае жидкого шлакоудаления определение потерь с теплотой шлаков обязательно при любой зольности топлива.

Расчет потерь с физической теплотой шлаков, %, проводят по формуле:

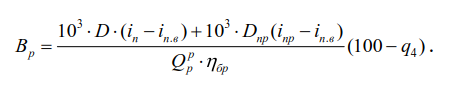
, (15)

где – доля шлакоулавливания в топочной камере, %;

– энтальпия шлакоудаления (при твердом шлакоудалении принимается *tшл* = 600 °С и =560 кДж/кг).

В случае жидкого шлакоудаления температура вытекающего шлака принимается *tшл* = *tнж*. Температура нормального жидкого шлакоудаления *tнж* определяется по таблицам теплотехнических характеристик энергетических топлив.

Расчетный расход топлива для парового котла, вырабатывающего насыщенный пар, кг/час (м3/час), определяют по формуле:

 (16)

где *iп* – энтальпия насыщенного пара (при абсолютном давлении насыщенного пара 14 кгс/см2 *iп* = 666,2 ккал/кг);

*iп.в* – энтальпия питательной воды (при температуре питательной воды 100°С *iп.в =* 100,4 ккал/кг);

*iпр.* – энтальпия продувочной воды (при температуре продувочной воды 194,1°С *iпр.* = 197,3 ккал/кг);

*D* – паропроизводительность котла, т/ч;

*Dпр* – непрерывная продувка котла, т/ч (для расчетов принять *Dпр = 0,03·D*).

Расчетный расход топлива для водогрейного котла, кг/час (м3/час), определяют по формуле:

, (17)

где – мощность водогрейного котла, Гкал/ч.

Для учета потери тепла на охлаждение по газоходам определяется **коэффициента сохранения теплоты:**

. (18)

**Практическая часть**

**Рабочее задание**

Используя исходные данные, представленные в таблице 4 (вариант исходных данных для выполнения работы выдает преподаватель) и выполненные в практических работах 3-6 расчеты для газообразного и твердого (жидкого) топлива на основании теплового баланса вычислить КПД генератора теплоты и необходимый расход топлива.

Таблица 4

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Вариант | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Тепловая мощность водогрейного котла, Гкал/ч | 0,1 | 1,1 | 0,22 | 0,63 | 0,8 | 0,52 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,6 |
| Количество котлов, шт. | 3 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 | 2 |

**Порядок выполнения работы**

1. Определить располагаемое тепло, кДж/кг (кДж/м3) (формулы (1)-(7)).

2. Рассчитать потери теплоты, % (формулы (12)-(18)).

3. Рассчитать коэффициент полезного действия брутто котла, % (формула (11)).

4. Определить расчетный расход топлива для водогрейного котла, кг/час (м3/час) (формула (19)).

5. Определить коэффициента сохранения теплоты (формула (20)).

**Контрольные вопросы** (ответить устно)

1. Что является полезной продукцией при сжигании органического топлива?

2. Что называют тепловым балансом котельного агрегата? Что показывает тепловой (энергетический) баланс котельного агрегата?

3. Каким образом составляется тепловой баланс?

4. Какое равенство устанавливается при составлении теплового баланса котельного агрегата?

5. Какие величины вычисляют на основании теплового баланса котельного агрегата?

6. Что называют располагаемым теплом?

7. Что называют тепловыми потерями? Назовите виды тепловых потерь.

8. Как определяют располагаемое тепло для твердого и жидкого топлива?

9. Как определяют располагаемое тепло для газообразного топлива?

10. Назовите общее уравнение теплового баланса на единицу топлива.

11. Что называют коэффициентом полезного действия брутто котельного агрегата?

12. Что называют коэффициентом полезного действия нетто котельного агрегата?

13. Чем обусловлены потери теплоты с уходящими газами?

14. От чего зависит температура уходящих газов?

15. Какие потери теплоты являются наибольшими в тепловом балансе котельного агрегата?

16. Чем обусловлены потери теплоты от химической неполноты сгорания топлива?

17. Следствием чего может являться химическая неполнота сгорания топлива?

18. От чего зависят потери теплоты с химическим недожогом?

19. Чем обусловлены потери от механической неполноты сгорания топлива?

20. От чего зависят потери теплоты от наружного охлаждения?

21. Как определяют коэффициента сохранения теплоты? Для чего его используют?

22. Как определяют расчетный расход топлива котла?

**Практическая работа 8**

**«Расчет валовых выбросов загрязняющих веществ от дымовой трубы котельной»**

**Цель работы:** рассчитать валовые выбросы основных загрязняющих веществ, образующихся при сжигании органического топлива.

**Теоретическая часть**

Расчет валовых выбросов загрязняющих веществ при сжигании твердого топлива, мазута и газа приведен для топок промышленных и коммунальных котлоагрегатов и теплогенераторов производительностью до 30 т/ч.

**Валовый выброс твердых (сажистых) частиц** в дымовых газах, т/год, определяют по формуле:

, (1)

где – зольность топлива, %;

– количество израсходованного топлива, т/год;

– безразмерный коэффициент, характеризующий долю уносимой с дымовыми газами летучей золы, зависит от типа топки и топлива (таблица 1);

– эффективность золоуловителей, % (таблица 2).

Таблица 1 – Значения коэффициента χ в зависимости от типа топки и топлива

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Тип топки | Топливо | Безразмерный коэффициент, характеризующий долю уносимой с дымовыми газами летучей золы |
| С неподвижной решеткой и ручным забросом | Бурые и каменные угли | 0,0023 |
| Антрацит Аси АМ | 0,0030 |
| Антрацит АРМ | 0,0078 |
| С забрасывателями и цепной решеткой | Бурые и каменные угла | 0,0035 |
| Шахтная | Твердое топливо | 0,0019 |
| Шахтно-цепная | Торф кусковой | 0,0019 |
| Камерные топки | Мазут | 0,0100 |
| Легкое жидкое топливо | 0,0100 |
| Слоевые топки бытовых котлоагрегатов | Дрова | 0,0050 |
| Бурые угли | 0,0011 |
| С пневмомеханическими забрасывателями и неподвижной решеткой | Каменные угли | 0,0011 |
| Бурые и каменные угли | 0,0026 |
| Антрацит АРШ | 0,0088 |

Таблица 2 – Средние эксплуатационные эффективности аппаратов пылеулавливания и газоочистки отходящих газов котельных

|  |  |
| --- | --- |
| Аппарат, установка | Эффективность улавливания, % |
| Батарейные циклоны типа БЦ-2 | 85 |
| Батарейные циклоны на базе секции СЭЦ-24 | 93 |
| Батарейные циклоны типа ЦРБ-150У | 93-95 |
| Электрофильтры | 97-99 |
| Центробежные скрубберы ЦС-БТИ | 88-90 |
| Групповые циклоны ЦН-15 | 85-90 |
| Жалюзийные золоуловители | 75-85 |

**Валовый выброс мазутной золы в пересчете на ванадий**, т/год, определяют по формуле:

, (2)

где – содержание ванадия в мазуте, г/т;

– количество израсходованного топлива, т/год;

, – коэффициенты оседания и улавливания оксидов ванадия ( = 0, = 0)

Содержание ванадия в мазуте, г/т, определяется в зависимости от зольности мазута по формуле:

. (3)

**Валовый выброс оксида углерода**, т/год, определяют по формуле:

, (4)

где *m* – количество израсходованного топлива, т/год, (тыс. м3/год);

*q4* – потери теплоты вследствие механической неполноты сгорания, % (таблица 3);

*ССО* – выход оксида углерода при сжигании топлива, кг/т, (кг/тыс. м3):

, (5)

где – потери теплоты вследствие химической неполноты сгорания топлива, %;

– коэффициент, учитывающий долю потери теплоты вследствие химической неполноты сгорания топлива, обусловленный наличием в продуктах сгорания оксида углерода (R = 1 – для твердого топлива, R = 0,5 – для газа, R = 0,65 – для мазута);

– низшая теплота сгорания натурального топлива, МДж/кг, МДж/м3.

**Валовый выброс оксидов азота**, т/год, в пересчете на диоксид азота определяют по формуле:

, (6)

где – параметр, характеризующий количество оксидов азота, образующихся на 1 ГДж тепла, кг/ГДж (для природного газа и мазута принимают в диапазоне 0,06-0,165; для антрацита – 0,09-0,165; для бурого угля – 0,14-0,24; для каменного угля – 0,15-0,26);

– коэффициент, зависящий от степени снижения выбросов оксидов азота в результате применения технических решений (для котлов производительностью до 30 т/ч β = 0).

**Валовый выброс оксидов серы**, т/год, в пересчете на диоксид серы (определяется только для твердого и жидкого топлива) определяют по формуле:

, (7)

где – содержание серы в топливе (таблица 1);

– доля оксидов серы, связываемых летучей золой топлива (для эстонских и санкт-петербургских сланцев принимается равной 0,8; остальных сланцев – 0,5; углей Канско-Ачинского бассейна – 0,2 (Березовских – 0,5); торфа – 0,15; экибастузских – 0,02; прочих углей – 0,1; мазута – 0,02; газа – 0);

– доля оксидов серы, улавливаемых в золоуловителе (для сухих золоуловителей принимается равной 0).

**Практическая часть**

**Рабочее задание**

Рассчитать валовые выбросы основных загрязняющих веществ, образующихся при сжигании органического (газообразного и твердого или жидкого) топлива, используя исходные данные (вариант исходных данных для выполнения работы выдает преподаватель) и выполненные в практических работах 3, 4 и 7 расчеты.

**Порядок выполнения работы**

1. Принять, что сжигании природного газа наряду с основными продуктами сгорания (CO2, H2O) с дымовыми газами в атмосферный воздух поступают диоксид азота и оксид углерода.

2. На основании исходных данных и выполненных в практических работах 3 и 7 расчетов для газообразного топлива определить:

1) валовый выброс оксидов азота (формула (6));

2) валовый выброс оксида углерода (формулы (4)-(5)).

3. Принять, что при сжигании твердого топлива наряду с основными продуктами сгорания (CO2, H2O) в атмосферу поступают твердые частицы (летучая зола с частицами несгоревшего топлива), оксиды серы, углерода и азота, а при сжигании мазутов с дымовыми газами выбрасываются оксиды углерода, серы, азота и мазутная зола (в пересчете на соединения ванадия).

4. На основании исходных данных и выполненных в практических работах 4 и 7 расчетов для твердого топлива определить:

1) валовый выброс твердых (сажистых) частиц (формула (1));

2) валовый выброс оксида углерода (формулы (4)-(5));

3) валовый выброс оксидов азота (формула (6));

4) валовый выброс оксидов серы (формула (7)).

5. На основании исходных данных и выполненных в практических работах 4 и 7 расчетов для жидкого топлива определить:

1) валовый выброс мазутной золы в пересчете на ванадий (формулы (2)-(3));

2) валовый выброс оксида углерода (формулы (4)-(5));

3) валовый выброс оксидов азота (формула (6));

4) валовый выброс оксидов серы (формула (7)).

**Контрольные вопросы** (ответить устно)

1. Какие вещества поступают в атмосферный воздух при сжигании природного газа?

2. Какие вещества поступают в атмосферный воздух при сжигании твердого топлива?

3. Какие вещества поступают в атмосферный воздух при сжигании жидкого топлива (мазута)?

4. Назовите единицы измерения валового выброса загрязняющих веществ.

5. Как рассчитывают валовый выброс твердых (сажистых) частиц при сжигании топлива?

6. Как рассчитывают валовый выброс мазутной золы в пересчете на ванадий при сжигании топлива?

7. Как рассчитывают валовый выброс оксида углерода при сжигании топлива?

8. Как рассчитывают валовый выброс оксидов азота при сжигании топлива?

9. Как рассчитывают валовый выброс оксидов серы при сжигании топлива?

10. Почему при сжигании топлива происходит загрязнение воздушного бассейна выбросами оксидов серы?

11. Почему при сжигании топлива происходит загрязнение воздушного бассейна выбросами оксидов азота?

12. Почему при сжигании топлива происходит загрязнение воздушного бассейна выбросами оксида углерода?

13. Почему сжигание органического топлива приводит к появлению диоксида углерода?

14. Почему при сжигании топлива происходит загрязнение воздушного бассейна выбросами твердыми частицами?

Перечень рекомендуемых информационных ресурсов

1. Брюханов, О.Н. Газифицированные котельные агрегаты: учебник / О.Н. Брюханов, В.А. Кузнецов. – Москва: ИНФРА-М, 2021. – 392 с.

2. Генераторы тепла и автономное теплоснабжение зданий: учебно-методическое пособие / сост. Муканов Р.В. – Астрахань: Астраханский государственный архитектурно-строительный университет, ЭБС АСВ, 2021. – 110 c.

3. Теплоснабжение города: учебное пособие / сост. Гончар В.В., Чудинов Д.М. – Москва: Ай Пи Ар Медиа, 2021. – 57 c.

4. Бойко, Е.А. Котельные установки: учебное пособие / Е.А. Бойко. - 2-е изд., перераб. и доп. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2021. –668 с.

5. Барочкин, Е.В. Котельные установки: учебное пособие / Е.В. Барочкин, В.Н. Виноградов, А.Е. Барочкин; под. ред. д-ра техн. наук, проф. Е.В. Барочкина. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. – 440 с.

6. Тепловой расчет котлов (нормативный метод). – Издание 3-е, перераб и доп. – СПб, 1998 г. – 259 с.

7. СП 41-104-2000 Проектирование автономных источников теплоснабжения. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200006878?section=text> (дата обращения: 24.02.2024 г.)

8. СП 89.13330.2016 Котельные установки. Актуализированная редакция СНиП II-35-76 (с Изменением N 1). – URL: <https://docs.cntd.ru/document/456054199?section=text> (дата обращения: 24.02.2024 г.)

9. Мунц, В. А. Котельные установки и парогенераторы: учебное пособие / В. А. Мунц, Е. Ю. Павлюк, А. С. Прошин. – Екатеринбург: Изд‑во Урал. ун‑та, 2020. – 208 с.

10. Смородин, С.Н. Тепловой и аэродинамический расчеты котельных установок: учеб.пособие. - 5-е изд., перераб. и доп. / С.Н. Смородин, А.Н. Иванов, В.Н. Белоусов, В.Ю. Лакомкин. – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2018. – 200 с.

11. Белоусов, В.Н. Топливо и процессы горения в теплоэнергетических установках: учебное пособие. Часть 2 / В.Н. Белоусов, С.Н. Смородин, В.Д. Цимбал. – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2020. – 151 с.

12. Смородин, С.Н. Котельные установки и парогенераторы: учеб.пособие. 2-е изд-е, испр./ С.Н. Смородин, А.Н. Иванов, В.Н. Белоусов. – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2018. – 185 с.

13. Жуков, Н.П. Котельные установки: учебное пособие / Н.П. Жуков, Н.Ф. Майникова, О.Н. Попов, Е.В. Пудовкина, А.О. Антонов. – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2013. – 80 с.

1. Все объемы газов в дальнейшем указаны при температуре 0°С и давлении 760 мм. рт. ст. Эти (нормальные) условия отмечаются в характеристике размерности формулы нм3. [↑](#footnote-ref-1)
2. *Ч*асть очаговых остатков (т.е. смеси негорючих и горючих веществ, остающихся после сгорания твердого топлива), организованно удаляемых из топки. [↑](#footnote-ref-2)
3. Часть очаговых остатков, провалившихся сквозь зазоры полотна колосниковой решетки. [↑](#footnote-ref-3)
4. *Ч*асть очаговых остатков, которая выносится продуктами сгорания за пределы топочной камеры. [↑](#footnote-ref-4)