

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«МУРМАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»**

Кафедра строительства,
теплоэнергетики
и транспорта

Б1.В.02 КОТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И ПАРОГЕНЕРАТОРЫ

*Методические указания к самостоятельной работе
по направлению подготовки
13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» (уровень бакалавриата),
профиль подготовки «Энергообеспечение предприятий»*

Мурманск
2020

Составитель - Пантеев Сергей Петрович, доцент кафедры строительства, теплоэнергетики и транспорта».

Методические указания к самостоятельной работе по дисциплине: «Котельные установки и парогенераторы» по направлению подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» (уровень бакалавриата), профиль подготовки «Энергообеспечение предприятий» рассмотрены и одобрены на заседании кафедры-разработчика строительства, теплоэнергетики и транспорта 14.02.2020 протокол № 6.
дата

Рецензент – Нечаев Евгений Павлович, кандидат технических наук.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОБЩИЕ ОРГАНИЗАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ	3
ТЕМАТИЧЕСКИЙ ПЛАН	5
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	6
СОДЕРЖАНИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ИЗУЧЕНИЮ ТЕМ ДИСЦИПЛИНЫ	7
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ЭКЗАМЕНУ	18
ЗАДАНИЕ НА КУРСРВОЙ ПРОЕКТ	21
ТЕСТЫ-1	27
ТЕСТЫ-2	31
ПРИЛОЖЕНИЕ -А	45
ПРИЛОЖЕНИЕ-Б	46
ПРИЛОЖЕНИЕ-В	47
ПРИЛОЖЕНИЕ-Г	48
ПРИЛОЖЕНИЕ-Д	52
ПРИЛОЖЕНИЕ-Е	117

ОБЩИЕ ОРГАНИЗАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Значительные резервы для решения задачи повышения качества профессиональной подготовки имеет самостоятельная работа студентов. Наряду с аудиторными занятиями, она представляет важнейшую форму организации учебного процесса. Самостоятельная работа выполняет ряд важных функций. Ведущими из них являются:

углубление и расширение знаний и умений по конкретной дисциплине; обеспечение их межпредметной интеграции;

целенаправленное развитие умений учиться, составляющих основу развития у студента методологической культуры;

обеспечение дифференциации и индивидуализации обучения.

Все это составляет необходимые условия становления конкурентноспособного, инициативного, ответственного работника, готового к эффективному выполнению профессиональной деятельности.

Особенно важную роль самостоятельная работа играет в развитии методологической культуры студентов. Вуз готовит студентов, прежде всего, к профессиональной практической деятельности. Но успех в практике, особенно в современных условиях, когда она представляет собой многогранное, динамично развивающееся явление, невозможен без умения самостоятельно осмысливать собственную деятельность и ее результаты с точки зрения достижений современной науки. Умение осуществлять рефлексию профессиональной деятельности с научных позиций является важной составляющей профессиональной компетентности. На этапе профессионального образования в вузе студенты делают лишь первые шаги в этом направлении, и именно поэтому они нуждаются в четкой организации самостоятельной работы, которая в сравнении с аудиторными занятиями имеет существенные отличительные особенности.

Склонность студентов к недооценки роли самостоятельной работы в освоение профессии превращается в своеобразный барьер на пути ее полноценной организации.

Выпускник программы бакалавриата согласно ФГОСВО 13.03.01 ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА И ТЕПЛОТЕХНИКА должен обладать УНИВЕРСАЛЬНЫМИ компетенциями (УК) из которых компетенция **УК-7** напрямую относится к самостоятельной работе: «способностью к самоорганизации и самообразованию».

Выпускник программы бакалавриата при изучении дисциплины «Котельные установки и парогенераторы» формирует следующие профессиональными компетенциями (ПК):

ПК-1 способен к разработке схем размещения объектов профессиональной деятельности в соответствии с технологией производства.

Эти компетенции студент может получить только при упорной самостоятельной работе по изучению конкретной дисциплины.

Немного об общих вопросах. Поговорим о пользе конспектирования лекций и других материалов с которыми студент самостоятельно работает.

Основной закон живой природы гласит: функция определяет орган. Наличие правильной работы без перенапряжения формирует любой живой орган. И наоборот, отсутствие работы приводит к дистрофии органа и потери его потенциала до полной невозможности восстановить нормальные функции.

Следствие из этого закона: нет бесполезной работы, вредно только пустое времяпровождение. Оно отнимает время, как у работы, так и у отдыха. Отдых это серьёзная работа, направленная на восстановление сил и структур органов и самого организма.

И ещё одно следствие этого закона: удовольствие должно быть заработано, то есть создано организмом через внутренние ферменты. Удовольствие, полученное от веществ внешнего происхождения: наркотиков, алкоголя, никотина укорачивает жизнь и ухудшает её качество. Чем сильнее такое удовольствие, тем короче и страшнее жизнь. Здесь нарушается работа главного органа – мозга, он сам определяет и руководит созданием

веществ, которые подавляют боль, создают атмосферу блаженства. Когда в организм попадают подобные искусственные вещества, мозг как орган в этом направлении не работает (его нормальные функции отсутствуют, и он деградирует). Мозг главный элемент организма и когда он перестаёт руководить созданием нужных ферментов в других органах и последние без работы деградируют и теряют способность синтезировать нужные вещества. При отсутствии поступлений из внешнего мира нужных веществ мозг начинает всеми способами требовать от органов создавать эти элементы, но они уже не умеют их производить. Требовать выполнения своих распоряжений мозг умеет делать превосходно. Главный способ у него - это создавать различные боли в деградирующих органах и в самом себе. И организм становится рабом деградировавшего мозга, который неумолимо требует для себя всё новых и новых доз удовольствия. Пусть вас минует судьба жить с деградирующим мозгом!

Перейдём к нормальному функционированию мозга. Обучение это формирования мозга, закрепление в его структурах необходимой информации, методов и приёмов. Какими путями информация попадает в мозг? Это происходит через слух, зрение, обоняние, через работу органов, которыми управляет мозг при чтении, произношении, записывании, обдумывании. Чем больше каналов задействовано при получении информации, тем глубже и крепче она закрепляется. Есть хорошая аналогия между запоминанием, усвоением определенной дисциплины и пробиванием лыжни по свежему первому снегу.

У Вас это не первая дисциплина (лыжня), вы уже проложили ряд связанных с данной дисциплиной трас (введение в специальность, общая теплотехника, термодинамика и т.д.). Кто это сделал основательно и правильно: оставил на лыжне специальные знаки (вешки), запомнил ориентиры в окружающей обстановке, тому будет много легче даже по занесённой временем лыжне пробивать новую трассу по верх старой, при этом не проваливаясь. Чем плотнее была прежняя лыжня и чем точнее вы на неё вышли, тем легче вы по ней пройдёте. И чтобы вновь пробиваемая лыжня дольше сохранилась, и Вам легче её можно было бы найти, необходимо также дополнительно протаптывать её, ставить вешки, запоминать ориентиры.

Аналогии:

лыжня – дисциплина и её отображение в мозгу;

протаптывать лыжню – слушать лекцию, записывать лекцию (при этом работают четыре канала: слух, зрение, проговаривание и записывание), прочтение конспекта с пометками собственных мыслей, чтение дополнительной литературы с отметками в конспекте, решение задач;

ставить вешки – выделять в речи лектора, конспекте главные слова, делать отметки на полях конспектов с приходящими по данному поводу ассоциациями, находить аналогии с другими дисциплинами и заносить их в конспект.

Прокладывая качественные лыжни других смежных дисциплин, Вы уплотните всё поле теплотехники и будете свободно, не проваливаясь двигаться в любом направлении.

Чем чаще Вы будете пробегать по этим лыжням, тем плотнее они будут, и тем легче по ним будет двигаться, и тогда сохранятся они до самого Вашего конца, когда они растают вместе с мозгом.

Необходимо сказать о том, что обучение не должно быть насильственным и длительным, как это делают многие студенты – сутками перед экзаменом пытаются запомнить материал дисциплины. Да, Вы может запомните что то для сдачи экзамена, но оно также быстро вылетит у Вас из головы, как туда и попало. Предмет необходимо осваивать не напрягаясь, но каждый день минут по 15 пробегаая, анализируя новый материал, возвращаясь к уже пройденному. Материал тогда ляжет плотно и на долго почти на уровне подсознания.

«Когда вы задумываете что-то новое или работаете над тем, что вам поручили, прислушиваетесь ли вы к своему внутреннему голосу? Ведь отчасти наша интуиция является накопленным опытом. Все полученные знания навсегда остаются в нас, хоть мы и

не всегда знаем, как до них добраться. И в моменты сильного напряжения они прорываются из нашего подсознания и подсказывают нам правильный путь к изобретениям, которые способны изменить мир» - говорил Никола Тесла.

Здесь ещё необходимо сказать и о других органах, которые обеспечивают нормальную работу мозга. Это главный орган - насос (сердце) и сосудистая система, поставляющие кислород (удаляющие углекислый газ) мозгу и другим органам через лёгкие, питательные вещества из желудка, печени, кишечника. Все эти органы также должны работать в нормальном режиме, быть натренированными, чтобы обеспечивать функционирование всего организма даже в экстремальных условиях. Для этого сердце и лёгкие необходимо постоянно нагружать, тренировать силу и выносливость (длительные процедуры, не менее получаса, с нагрузкой близкой к максимальным значениям). Вместе с тренировкой сердца будут тренироваться все остальные органы и системы, будут расширяться и приобретать эластичность сосуды, будет увеличиваться объём лёгких, печень и селезёнка будут увеличивать производство необходимых организму ферментов и т. д. Также нельзя забывать и о системе терморегуляции организма, она также должна постоянно работать, то есть её необходимо так же тренировать (баня, контрастные процедуры).

Уверенность человека в правоте своего дела, его душевные силы и физическая форма неразрывно связаны между собой. Природа основных составляющих успеха — упорная работа, постоянное самосовершенствование, сила воли и интуиция.

ТЕМАТИЧЕСКИЙ ПЛАН

1. **Общие сведения.** История развития отечественного котлостроения, принцип действия котла. Классификация котельных установок, маркировка котлов. Основные параметры котлов. Конструкции котлов. Тепловые схемы котельных и ТЭЦ.

Элементы котла (пароперегреватели, регулирование температуры пара при работе котла, устройства для регулирования температуры пара, работа пароперегревателя при растопке котла, экономайзеры и др.).

2. **Топливо.** Оборудование топливоподготовки и топочные устройства котлов (топливо для стационарных котлов, твёрдое топливо, жидкое топливо, газообразное топливо, физико-технические свойства топлива, элементы динамики горения топлива). Общие сведения о топочных устройствах, топочных устройства для твёрдого топлива. топки для жидкого и газообразного топлива.

3. **Золоудаление.** Улавливание твердых веществ из дымовых газов, шлакоудаление в топочной камере, характеристики летучей золы, типы и характеристики золоуловителей, инерционные золоуловители циклоны, прочие инерционные золоуловители, мокрые золоуловители, электрофильтры, удаление золы и шлака из котлов и с территории теплогенерирующей установки, ручное шлакозолоудаление, механизированное шлакозолоудаление, пневмошлакозолоудаление, гидрошлакозолоудаление.

4. **Арматура и внутриколлекторные устройства**

5. **Общие сведения о котельной арматуре, внутрибарабанные устройства котлов,** устройства для очистки пара в барабане котла, трубопроводы и арматура, трубопроводы котлоагрегата, контрольно-измерительные устройства, арматура котлоагрегата.

6. **Каркас, кожух, футеровка, теплоизоляция.** Общие сведения о каркасах, кожухах, футеровке и теплоизоляции котлов, гарнитура и обмуровка стальных водогрейных и паровых котлов.

7. **Материальный и тепловой баланс процесса сгорания топлива.** Горение твердого топлива, горение жидкого топлива, горение газового топлива, материальный баланс процессов горения топлива, расчёт объема воздуха для горения твердого и жидкого

топлив, расчёт объема воздуха для горения газообразного топлива, коэффициент избытка воздуха, определение объемов газов в продуктах сгорания твёрдого и жидкого топлива, определение объемов газов в продуктах сгорания газообразного топлива, определение коэффициента избытка воздуха, тепловой баланс процесса сгорания топлива. энтальпия продуктов сгорания и воздуха, расчёт энтальпии продуктов сгорания для твёрдого топлива, тепловой баланс котла. уравнение теплового баланс и потери котла, определение расхода топлива. предварительный тепловой баланс.

8. **Расчет теплообмена в топке.** Общие сведения, определение конструктивных размеров топки, определение температуры газов за топкой, методика расчёта теплообмена в топке.

9. **Тепловой расчет испарительного пучка труб.** Общие сведения, методика расчёта конвективных поверхностей нагрева.

10. **Конструктивный расчет хвостовых поверхностей нагрева.** Конструктивный расчет водяного экономайзера. конструктивный расчет воздухоподогревателя.

11. **Определение аэродинамического сопротивления котла.** Общие сведения, определение сопротивлений трения, сопротивление поперечно омываемых труб, местные сопротивления. определение мощности вентилятора. методика расчета сопротивления ГВт, выбор серийного дымососа, выбор способа регулирования параметров рабочего режима. параметры работы дымососа.

12. **Расчет выбросов загрязняющих веществ при сжигании топлива в котлоагрегатах котельных.** Выбросы загрязняющих веществ при сжигании органического топлива, методы подавления и улавливания вредных компонентов дымовых газов на электростанциях, защита от оксидов серы, защита от оксидов азота, расчет батарейного циклона, расчёт мокрого золоуловителя, расчет выброса загрязняющих веществ при сжигании топлива в котлоагрегатах котельной.

13. **Расчеты прочности элементов котлов.** Общие сведения, методика прочностного расчета.

14. **Водоподготовка и водный режим котельных установок.** Основы водоподготовки, общие сведения о воде, требования, предъявляемые к воде и пару, фильтрация и коагуляция питательной воды, снижение жесткости и поддержание требуемой величины щелочности в питательной воде, умягчение воды способом катионного обмена, внутрикотловая обработка воды, деаэрация воды, водно-химический режим котла, ступенчатое испарение воды, сепарация и промывка пара, контроль водно-химического режима котлов, выбор и расчет системы водоподготовки. деаэрация питательной и подпиточной воды. выбор и расчет деаэратора, расчет фильтров и режимов их работы, обессоливание воды.

15. **Эксплуатация котельных установок.** Общие положения, основные требования к персоналу котельных установок, организация дежурной службы, техническая документация котельной, режимы работы котлов, распределение нагрузки между параллельно работающим котлами, состояние паровых котлов в эксплуатации, пуск парового котла в работу, обслуживание парового котла во время работы, методы эксплуатационного контроля избытков воздуха, требования к организации безопасной эксплуатации паровых котельных установок.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соколов, Б. А. Паровые и водогрейные котлы малой и средней мощности: учеб. пособие для вузов / Б. А. Соколов. - Москва: Академия, 2008. - 126, [1] с.: ил. -

(Высшее профессиональное образование. Энергетика). - Библиогр.: с. 124-125. - ISBN 978-5-7695-4745-4: 223-85. 31.38 - С 59 (количество экземпляров – 28).

2. Минкина, С. А. Тепловой и аэродинамический расчеты котельных агрегатов: учебное пособие / С. А. Минкина. — Самара: Самарский государственный архитектурно-строительный университет, ЭБС АСВ, 2013. — 104 с. — ISBN 978-5-9585-0542-5. — Текст: электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS: [сайт]. — URL: <http://www.iprbookshop.ru/20485.html> (дата обращения: 12.02.2019). — Режим доступа: для авторизир. пользователей

Дополнительная литература

1. Губарев, А. В. Паротеплогенерирующие установки промышленных предприятий: учебное пособие для вузов / А. В. Губарев. — Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, ЭБС АСВ, 2013. — 240 с. — ISBN 978-5-361-00193-4. — Текст: электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS: [сайт]. — URL: <http://www.iprbookshop.ru/28379.html> (дата обращения: 12.02.2019). — Режим доступа: для авторизир. пользователей.

2. Топлива: производство, применение, свойства: справочник: пер. с англ. / ред. [Б. Элверс], Т. Н. Митусова. - Санкт-Петербург: Профессия, 2012. - 413 с.: ил. - На обл. авт.: Б. Элверс. - Загл. ориг.: Handbook of fuels. - Библиогр. в конце гл. - ISBN 978-5-91884-037-5: 2700-00. 35.514 - Т 58 (количество экземпляров – 1).

3. Котлы малой, средней мощности и топочные устройства: Каталог-справочник. – М.: НИИинформтяжмаш, 1967. – 210с. (имеется в электронном виде).

4. Эстеркин Р. И. Котельные установки. Курсовое и дипломное проектирование. Л.: Энергоатомиздат. Ленигр. Отд. 1989. -280с., ил. (имеется в электронном виде).

5. Зыков А. К. Паровые и водогрейные котлы. Справочное пособие. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 128с. С ил.. (имеется в электронном виде).

6. Сидельковский Л. Н. Котельные установки промышленных предприятий. – 3-е изд., - М.: Энергоатомиздат, 1998. – 528с. С ил.. (имеется в электронном виде).

7. Котлы и котельно-вспомогательное оборудование ЗАО ПО «Бийскэнергомаш»: Каталог. ЦНИИТтяжмаш. – М.: Б. И., 1999. 43с.

8. Эстеркин Р. И. Промышленные котельные установки: Учебник для техникумов. – 2-е изд., перераб. – Л.: Энергоатомиздат. Ленигр. Отд. 1985. -400с., ил.

9. «Судовые паровые котлы»: Методические указания к выполнению курсового проекта. /Состав. Б. И. Бубер., С. А. Клименко: - Мурманск. 1987.

10. Тепловой расчёт котлов (нормативный метод). – 3-е изд., переработанное и дополн.. Изд. НПОЦКТИ. – СПб. 1998. 266с. С ил. (имеется в электронном виде).

11. Баранов В. М. Расчёт тепловых процессов топки котла. Методические указания по выполнению курсовой работы. – Хабаровск. Изд-во ДВТУПС. 2003. – 24с с ил. (имеется в электронном виде).

12. Аэродинамический расчет котельных установок (нормативный метод) / под ред. С. И. Мочана. – 3-е изд. – Л., Энергия, 1977. – 256 с.

13. Справочник проектировщика. Вентиляция и кондиционирование воздуха / под общ. ред. И. Г. Старовойта. – М.: Стройиздат, 1978. – 514 с.

14. Дымососы и вентиляторы. Каталог II – 79. – М.: НИИЭИинфорэнергомаш, 1980. – 224 с.

15. Стационарные паровые и водогрейные котлы. Методические указания к выполнению курсового проекта по дисциплине «Стационарные паровые и водогрейные котлы» для студентов специальности 140106 «Энергообеспечение предприятий» Пантеев С. П. – Мурманск: изд. МГТУ 2012. – 170с (имеется в электронном виде).

16. Котельные установки и парогенераторы. Бойко Е. А. - Учебное пособие. Красноярск: ФАО РФ ГОУВПО КГТУ, 2005. - 292 с.

17. Теплогенерирующие установки. Часть 1: учебное пособие / А.В. Губарев, Ю.В. Васильченко; Под общ. ред. Ю.В. Васильченко. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2008. – 162 с. (имеется в электронном виде).

18. Теплогенерирующие установки. Часть 2: учебное пособие / А.В. Губарев, Ю.В. Васильченко; Под общ. ред. Ю.В. Васильченко. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2008. – 148 с. (имеется в электронном виде).

19. Теплогенераторы котельных. Фокин В. - М. М.: «Издательство Машиностроение-1», 2005. 160 с.

20. СП 89. 13330.2012 Котельные. Актуализированная редакция СНиП II-35-78 Котельные установки. – М, 2012, 68с. (имеется в электронном виде).

21. Соколов Б.А. Котельные установки и их эксплуатация: учебник для нач. проф. Образования/ Б.А.Соколов. -2-е изд., испр. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 432с.: ил.

22. Тарасюк В.М. Эксплуатация котлов: практ. Пособие для оператора котельной / В.М. Тарасюк; под ред. Б.А. Соколова. – М.:ЭНАС, 2008. – 272с.: ил.

Для изучения дисциплины и выбора характеристик прототипа котла: 1 - 5.

Для проведения теплового расчёта котла и его элементов пользоваться методическими указаниями в 6 – 18.

Перечень сайтов:

1. www.bikz.ru – сайт Бийского котельного завода.
2. www.bkzn.ru – сайт Барнаульского котельного завода.
3. www.tkz.taganrog.ru – сайт Таганрогского котельного завода «Красный котельщик».
4. www.izhkotel.ru – сайт Ижевского котельного завода.
5. www.kotel.ru/dorogobuzh – сайт Дорогобужского котельного завода.
6. www.ziosab.ru – официальный сайт Подольского котлозавода.
7. www.zenit-sib. –сайт ООО НТК «Зенит г. Новосибирск.
8. www.ufaventvash. – сайт завода «Уфавентмаш г. Уфа.
9. www.ventilator.spb. – сайт завода «Вентилятор г. Санкт-Петербург.

СОДЕРЖАНИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ИЗУЧЕНИЮ ТЕМ ДИСЦИПЛИНЫ

Тема 1. Введение. Общие сведения. Элементы котла

Необходимо изучить, законспектировать и знать:

История и перспективы развития отечественной теплоэнергетики. Вклад российских ученых в развитие энергетики. Состояние и перспективы развития энергетики России. Место парового котла в тепловой схеме ТЭС. Принципиальная схема современной котельной установки. Общие понятия о котельных установках.

Методические рекомендации по изучению темы.

Особое внимание обратить на структурную схему промышленного предприятия, на технологические схемы котельных установок.

Рекомендуемая по данной теме литература: [1] стр. 3-13, [2] стр. 10-29, [15] стр. [14] стр. 10-13, [4] стр. 5-13, [15] стр. 33-45.

Вопросы и задачи для самопроверки по данной теме:

1. Назовите имена ученых в области развития котельной техники в XVIII-XIX?
2. Что из себя представляет котел И.И. Ползунова, и назовите основные его технические решения?
3. Укажите отличительные особенности конструкции котла В.И. Шухова?
4. Перечислите открытия, которые положены в основу создания современных котельных агрегатов.
5. Опишите конструкцию котла, спроектированного В.В. Табулевым.
6. В чем заключалась новизна «Турбинного паровика», и какие основные технические идеи он в себя включал?
7. Назовите основные современные научно-исследовательские институты России, занимающиеся исследованиями в области котельной техники.
8. Что представляет собой тепловая схема?
9. Какие различают типы тепловых схем? Что на них изображают?
10. Как классифицируются котельные в зависимости от характера тепловых нагрузок?
11. Как классифицируются котельные по надежности отпуска тепла потребителям?
12. Укажите рекомендуемый порядок изображения оборудования на тепловых схемах котельных с водогрейными котлами.

Тема 2. Топливо.

Необходимо изучить, законспектировать и знать:

Энергетическое топливо - основные определения, классификация. Органическое топливо: общие положения, происхождение органического топлива, состав топлива. Характеристики топлива. Понятие высшей и низшей теплоты сгорания топлива, определение теплоты сгорания. Пересчет теплоты сгорания при изменении влажности топлива. Понятие условного топлива. Обозначения приведенных характеристик топлива и обозначения показателей топлива: содержание элементов, низшей и высшей теплотворной способности.

После изучения темы студент должен уметь пересчитывать состав твердого, жидкого и газообразного топлива из рабочей массы в сухую, в горючую, в органическую и наоборот. Подсчитывать для любого вида топлива высшую и низшую теплотворную способность топлива. Примеры и задачи для закрепления знаний расположены в ПРИЛОЖЕНИИ-Д.

Рекомендуемая по данной теме литература: [2] стр. 13-18, [4] стр.14-19, [15] стр. 3-12, [17] стр. 16-20.

Методические рекомендации по изучению темы.

Рабочую низшую теплоту сгорания твердого и жидкого топлива приближенно определяют по формуле Д.И. Менделеева. Теплота сгорания отдельных газов, входящих в состав газообразного топлива находится из справочной литературы, в частности в табл. 1.3[15].

Вопросы и задачи для самопроверки по данной теме:

1. Назовите основные источники энергии для получения тепла.
2. Укажите, какие углеводородные энергетические ресурсы относятся к категории «нетрадиционных»?
3. Дайте определение органического топлива.
4. По каким категориям классифицируют органическое топливо?

5. Укажите, какие горючие и какие негорючие вещества входят в состав рабочей массы твердого и жидкого органического топлива?
6. Какие компоненты входят в состав сухой массы газообразного топлива?
7. В чем состоит отличие между высшей и низшей теплотой сгорания органического топлива?
8. Что называют условным топливом? С какой целью вводится понятие условного топлива?
9. Укажите важнейшие технические характеристики органического топлива. Что они характеризуют?
10. Какими способами получают искусственные горючие газы?
11. На какие группы в зависимости от месторождения подразделяют природные газы?
12. Пересчитать для топлива из задания на РГЗ его компоненты в сухую, горючую и органическую массы.
13. Определить для топлива из задания курсовой работы высшую и низшую теплотворную способность.

Тема 3. Горение топлива

Необходимо изучить, законспектировать и знать:

Теоретические основы процесса горения. Основы теории горения. Кинетика химических реакций. Порядок химических реакций. Энергия активации. Понятие о цепных реакциях. Простые (неразветвленные) реакции горения. Сложные или разветвленные реакции горения. Смешанные реакции горения. Горение углерода. Диффузная и кинетическая области гетерогенного горения. Топочные процессы. Смесеобразование. Основные стадии процесса горения топлива. Количественные показатели и качественная характеристика топочного процесса. Определение коэффициентов избытка воздуха по газоходам. Расчет объемов и энтальпий воздуха и продуктов сгорания. Материальные балансы процессов горения. Теоретически необходимое для горения количество воздуха. Теоретические объемы продуктов полного сгорания топлив. Действительные объемы продуктов сгорания при полном и неполном горении.

После изучения темы студент должен уметь: определять скорость химической реакции по концентрации реагирующих веществ, температуре и давлению; объемы продуктов полного сгорания топлив; объемы и энтальпию воздуха и продуктов сгорания топлив. Примеры и задачи для закрепления знаний расположены в ПРИЛОЖЕНИИ-Д.

Рекомендуемая по данной теме литература: [2] стр. 34-43, [4] стр.19-32, [15] стр. 3-12, [16] стр. 4-13.

Вопросы и задачи для самопроверки по данной теме:

1. Какой процесс называют горением?
2. Назовите две области процесса горения. Чем они определяются?
3. Чем определяется температура воспламенения горючей смеси?
4. Какими способами осуществляется стабилизация фронта воспламенения горючей смеси?
5. Каким параметром определяется скорость горения жидкого топлива?
6. С какой целью производится расчет горения топлива?
7. Что собой представляют и чем определяются полное и неполное сгорание топлива?
8. Почему в реальных условиях приходится подавать большее количество воздуха на горение, чем это теоретически необходимо?
9. Что называется коэффициентом избытка воздуха?

10. Определить для топлива из задания курсовой работы объемы продуктов полного сгорания топлив; объемы и энтальпию воздуха и продуктов сгорания топлив.

Тема 4. Тепловой баланс котельного агрегата

Необходимо изучить, законспектировать и знать:

Определение теплового баланса, к.п.д. и расход топлива котельного агрегата. Основные составляющие теплового баланса. Располагаемое и полезно используемое тепло. Потери тепла с уходящими газами (q_2). Потери тепла от химической неполноты сгорания (q_3). Потери тепла от механической неполноты сгорания топлива (q_4). Потери тепла в окружающую среду (q_5). Потери с физическим теплом шлака (q_6). Составление золowego баланса.

После изучения темы студент должен уметь: определять потери тепла, расход топлива котельного агрегата, КПД котельного агрегата. Примеры и задачи для закрепления знаний расположены в ПРИЛОЖЕНИИ-Д.

Рекомендуемая по данной теме литература: [2] стр. 43-54, [4] стр. 32-61, [16] стр. 69-79, [17] стр. 65-68.

Вопросы и задачи для самопроверки по данной теме:

1. Что называется тепловым балансом парогенератора или водогрейного котла?
2. Чем обусловлена и от каких факторов зависит потеря тепла с уходящими газами?
3. Что такое потеря тепла от химической неполноты горения и какие факторы на нее влияют?
4. При сжигании каких топлив появляется потеря тепла от механической неполноты горения и чем она обусловлена? Какие факторы влияют на эту потерю?
5. Что такое потеря тепла в окружающую среду и какие факторы на нее влияют?
6. Чем обусловлена потеря с физическим теплом шлаков и в каких случаях она учитывается?
7. Как производится определение КПД брутто парогенератора и водогрейного котла по прямому и обратному балансу?
8. Что называется КПД нетто парогенератора или водогрейного котла и какие факторы влияют на него?
9. Из чего складывается располагаемое тепло?
10. Определить для котла из задания курсовой работы все потери тепла, КПД брутто, расход топлива и располагаемое тепло.

Тема 5. Топочные устройства

Необходимо изучить, законспектировать и знать:

Характеристики и конструкцию топочных устройств для сжигания твёрдого, жидкого и газообразного топлива. Классификация слоевых топок. Смесеобразование при слоевых процессах. Работа слоевой топки. Методы механизации слоевых процессов. Топки с шурующей планкой. Топки с подвижным слоем топлива. Топки с цепными решетками. Принципиальная схема и условия работы цепной решетки. Огневая работа слоя и топки. Аэродинамическая схема цепной решетки. Показатели работы топок с цепными решетками. Наклонно-переталкивающие решетки. Топки с обратно переталкивающей решеткой, «каскадные» топки. Топки с нижней подачей топлива. Шахтно-цепная топка для кускового

торфа системы профессора Макарьева. Топки с двухступенчатым очагом горения (факельно-слоевая). Области применения различных типов слоевых топок. Пылеприготовление. Пыль и ее характеристика. Физические свойства пыли. Тонкость помола пыли. Основные законы измельчения материалов. Выбор экономически выгодной тонкости помола угля. Коэффициент размолоспособности и способы его определения. Взрывобезопасность пылевоздушных смесей. Абразивность летучей золы. Сушка топлива в процессе пылеприготовления. Цели и задачи сушки. Процесс сушки. Мельница как сушильный агрегат. Тепловой батане сушильно-мельничной системы. Порядок расчета сушильной производительности мельницы. Газовые барабанные сушилки. Паровые трубчатые сушилки. Трубы-сушилки. Классификация схем пылеприготовления. Индивидуальная схема пылеприготовления без промбункера. Схема с промбункером. Разомкнутая схема пылеприготовления. Центральная схема пылеприготовления. Элементы пылеприготовительных установок. Питатели сырого угля Сепараторы (пылеразделители). Пылеотделители. Мигалки. Питатели пыли. Пылеугольные бункеры. Классификация пылеугольных мельниц. Шаровые барабанные мельницы. Быстроходные молотковые мельницы. Шахтные молотковые мельницы. Мельницы-вентиляторы. Мельницы среднеходные. Пневмомельницы. Пылеугольные и вихревые топki. Смесеобразование и горение при факельных процессах. Типы пылеугольных топок. Топочные устройства мощных энергетических блоков. Цельносварные экраны котельных агрегатов. О высокотемпературной коррозии экранов. Типы пылеугольных горелок. Работа топок с упрощенной системой пылеприготовления. Шлакование пылеугольных топок и борьба с ним. Топки с жидким шлакоудалением. Растопка пылеугольных топок. Циклонный принцип сжигания топлива. Пневматические топki ЦКТИ - Шершнева и ЛИИ – Померанцева. Подача жидкого и газообразного топлива к парогенераторам. Приемные устройства мазута. Технологическая схема подготовки мазута. Технологическая схема подачи газового топлива. Топки для жидкого и газообразного топлива. Некоторые особенности сжигания жидкого топлива. Типы мазутных форсунок. Особенности сжигания газообразного топлива. Горелки для газообразного топлива. Смешанное сжигание газообразного и твердого топлива.

После изучения темы студент должен уметь: различать конструкции топочных устройств для сжигания твёрдого, жидкого и газообразного топлива; рассчитывать сушильную производительность мельницы.

Рекомендуемая по данной теме литература: [4] стр. 61-182(основная), [15] стр. 20-31, [17] стр. 62-65; [18] стр. 25-33.

Вопросы и задачи для самопроверки по данной теме:

1. Как принято классифицировать топki для сжигания твердого топлива?
2. Что называется тепловой мощностью топki и как она определяется?
3. Что такое удельная нагрузка сечения топki, зеркала горения, топочного объема и как она определяется?
4. Как принято классифицировать форсунки для сжигания жидкого топлива?
5. Как можно классифицировать газовые горелки в зависимости от перемешивания в них топлива с воздухом?
6. Какие устройства, сооружения и механизмы входят в систему топливоподачи твердого топлива?
7. Каковы признаки самовозгорания твердого топлива на складе?
8. Какие действия предпринимаются при появлении признаков самовозгорания твердого топлива?
9. Опишите принцип действия шаровой барабанной мельницы.
10. Опишите принцип действия молотковой мельницы.

11. Опишите принцип действия валковой среднеходной мельницы.
12. Для каких целей в системах пылеприготовления используются сепараторы, циклоны, питатели сырого угля и пыли, бункера?
13. Какие существуют способы шлакозолоудаления в котельных? В каких случаях каждый из них используется?
14. В чем заключается подготовка мазута перед сжиганием?
15. За счет чего поддерживается определенная температура мазута в резервуарах (баках)?
16. С какой целью, и в каких устройствах производится очистка мазута от твердых фракций?
17. Какие части включает в себя система газоснабжения предприятия? Кем они обслуживаются?
18. Для чего предназначены газорегуляторные пункты и установки?
19. Какие устройства входят в состав основного оборудования газорегуляторного пункта? Для чего каждое из них предназначено?
20. Какие устройства должны быть установлены перед горелками в зависимости от их мощности и степени автоматизации?
21. С какой целью на газопроводе перед котлами устанавливается клапан-отсекатель? В каких случаях и каким образом он срабатывает?
22. Для котла из задания курсовой работы подобрать и описать конструкцию топочного устройства.

Тема 6. Теплопередача в топке

Необходимо изучить, законспектировать и знать:

Метод и последовательность расчета теплообмена в топочных устройствах.

Необходимо особое внимание обратить на определение конструктивных характеристик топок.

После изучения темы студент должен уметь: рассчитывать теплообмен в топках котлов. Примеры и задачи для закрепления знаний расположены в ПРИЛОЖЕНИИ-Д.

Рекомендуемая по данной теме литература: [2] стр. 54-68; [4] стр. 182-196; [13] стр. 48-68, 147-164; [16] стр. 79-89.

Вопросы и задачи для самопроверки по данной теме:

1. На чем базируется расчет топочных камер парогенераторов и водогрейных котлов?
2. В каком случае можно считать завершенным расчет теплообмена в топке при проверочном тепловом расчете котла?
3. В каком случае тепловой расчет топки можно считать завершенным?
4. Что называется коэффициентом тепловой эффективности экрана?
5. Как учитывается распределение температуры по высоте топочной камеры при ее расчете?
6. Как учитывается расположение труб в экранах и их загрязнение?
7. Построить расчётную конструктивную схему топки для котла из задания курсовой работы по данным приложения 2 [13] стр. 147-164. Вычислить лучевоспринимающую и общую поверхность топки.
8. Провести расчёт топки для котла из задания курсовой работы.

Тема 7. Рабочие процессы в котельных агрегатах

Необходимо изучить, законспектировать и знать:

Классификацию и конструкцию пароперегревателей и конвективных пучков. Тепловая и гидродинамическая неравномерность в работе пароперегревателя. Анализ причин аварий перегревателей, меры предупреждения и борьбы с авариями. Режим работы пароперегревателя при растопке. Регулирование температуры перегретого пара. Поверхностные пароохладители. Пароохладители впрыскивающего типа. Регулирование температуры перегрева путем смешения перегретого пара с насыщенным. Комбинация радиационного и конвективного пароперегревателей. Газовое регулирование температуры перегрева. Особенности регулирования вторичного перегрева пара. Газовые методы регулирования промежуточного перегрева пара. Паровые методы регулирования промежуточного перегрева. Методы и последовательность расчета теплообмена в конвективных поверхностях и пароперегревателях.

Необходимо особое внимание обратить на определение конструктивных характеристик конвективных поверхностей и пароперегревателей.

После изучения темы студент должен уметь: рассчитывать теплообмен в конвективных поверхностях и пароперегревателях котлов. Примеры и задачи для закрепления знаний расположены в ПРИЛОЖЕНИИ-Д.

Рекомендуемая по данной теме литература: [1] стр.28-55; [2] стр.69-89; [4] стр. 196-211, 381-396; [13] стр. 68-87,147-164; [16] стр. 79-89.

Вопросы и задачи для самопроверки по данной теме:

1. Для каких целей в паровом котле используется пароперегреватель?
2. Каковы условия работы труб пароперегревателя?
3. Как конструктивно выполняются пароперегреватели?
4. Каковы основные задачи теплового расчета пароперегревателей?
5. Какие способы регулирования перегрева пара применяются?
6. Как осуществляется передача тепла от продуктов сгорания к воде в конвективных поверхностях нагрева?
7. Каким образом определяется средний температурный напор в поверхности нагрева?
8. Как влияют наружные загрязнения конвективных поверхностей нагрева на процесс передачи тепла и надежность работы металла труб?
9. Как влияют внутренние загрязнения на надежность работы конвективных поверхностей нагрева?
10. Построить расчётную конструктивную схему конвективного пучка для котла из задания курсовой работы по данным приложения 2 [13] стр. 147-164. Вычислить поверхность теплообмена конвективных пучков, площадь живого сечения конвективных пучков, количество труб в пучках по ходу продуктов сгорания и поперёк хода.
11. Провести расчёт конвективного пучка для котла из задания курсовой работы.

Тема 8. Вспомогательные устройства парогенераторов

Необходимо изучить, законспектировать и знать:

Классификацию водяных экономайзеров. Чугунные экономайзеры. Стальные экономайзеры. Растопочный режим экономайзера. Борьба с внутренней и наружной коррозией. Назначение воздухоподогревателей. Типы и конструкции воздухоподогревателей. Пластинчатый рекуперативный воздухоподогреватель. Трубчатые рекуперативные воздухоподогреватели. Регенеративные воздухоподогреватели. Чугунные воздухоподогреватели. Расчет водяных экономайзеров. Расчет воздухоподогревателей.

Рекомендуемая по данной теме литература: [1] стр.69-89; [2] стр. 89-93; [4] стр. 403-407; [13] стр. 87-131.

Вопросы и задачи для самопроверки по данной теме:

1. Для каких целей в паровом котле используется водяной экономайзер?
2. Какие экономайзеры называются некипящими?
3. При каких условиях применяются чугунные экономайзеры, как конструктивно устроен чугунный экономайзер?
4. Как конструктивно выполняется стальной экономайзер?
5. Для каких целей в паровом котле используется воздухоподогреватель?
6. Чем отличается регенеративный воздухоподогреватель от рекуперативного?
7. Описать экономайзер котла из задания курсовой работы.
8. Определить количество теплоты, отданное продуктами сгорания в экономайзере для котла из задания курсовой работы.

Тема 9. Питательные устройства, трубопроводы и арматура

Необходимо изучить, законспектировать и знать:

Конструкции и принцип работы устройств сепарации и промывки пара. Схемы продувок котлов. Назначение внутриколлекторных устройств.

Рекомендуемая по данной теме литература: [4] стр. 274-291; [17] стр. 8-9; [18] стр. 16-24.

Вопросы и задачи для самопроверки по данной теме:

1. Поясните работу и устройство различных сепараторов пара. Что общего в их принципе действия?
2. Перечислите основные дефекты котельной арматуры. Назовите их причины, последствия, предпринимаемые для их ликвидации меры.
3. Объясните, как устроены и работают питательные клапаны?
4. Какие конструктивные меры для повышения надежности циркуляции воды предпринимаются в водотрубных котлах?
5. Поясните расположение и назначение внутриколлекторных устройств.
6. Назначение промывочного дырчатого щита.
7. Назначение внутрибарабанных и выносных циклонов.
8. Поясните схему продувки котла при ступенчатом испарении.
9. Опишите принцип работы парового барабанного котла с естественной циркуляцией.
10. С какой целью производится периодическая и непрерывная продувка котла?
11. В чем заключается сущность ступенчатого испарения?
12. Какие сепарационные устройства и какая продувка применяется в котле из задания курсовой работы.

Тема 10. Тяга и дутье

Необходимо изучить, законспектировать и знать:

Основы расчета аэродинамического сопротивления газо-воздушного тракта котла. Методику расчёта самотяги любого участка газового тракта, включая дымовую трубу. Методику расчёт сопротивления трения для изотермического потока. Методику расчёт местных сопротивлений. Конструкцию и принцип работы и регулирования дымососов и вентиляторов. Методику расчета дутьевых и тяговых устройств.

Рекомендуемая по данной теме литература: [2] стр. 211-233; [4] стр. 254-263; [13] стр. 132-138; [15] стр. 80-85; [17] стр. 31-33; [18] стр. 13-16.

Вопросы и задачи для самопроверки по данной теме:

1. Чем обусловлены сопротивления, препятствующие движению потока?
2. От чего зависит коэффициент сопротивления трения движению потока?
3. От чего зависит коэффициент местного сопротивления пучков труб при поперечном их омывании?
4. Какие основные требования предъявляются к дымососу и вентилятору котельного агрегата?
5. Перечислите основные характеристики тягодутьевых устройств котельного агрегата.
6. Каким образом производится выбор тягодутьевых устройств по каталогам?
7. Какие вентиляторы и дымососы установлены на котле из задания курсовой работы.

Тема 11. Основные материалы и строительные конструкции

Необходимо изучить, законспектировать и знать:

Условия работы металлических элементов котла. Влияние температуры на механические свойства малоуглеродистых сталей. Предел прочности, предел текучести, пластичность металла, удельную вязкость и ползучесть. Расчётную температуру стенки элементов котла. Металлы элементов котла. Основы расчета на прочность элементов котла.

Рекомендуемая по данной теме литература: [4] стр. 431-441; [17] стр. 8-10.

Вопросы и задачи для самопроверки по данной теме:

1. Какие виды сталей используются для изготовления элементов котла?
2. Что такое ползучесть металла?
3. Как устанавливается допустимая скорость ползучести?
4. Перечислите основные легирующие добавки к сталям. Как они влияют на окалиностойкость и жаропрочность?
5. Назовите основные марки сталей, используемых в котлостроении, перечислите требования к ним.
6. Охарактеризуйте условия работы материалов, используемых для изготовления элементов котлов. Сформулируйте основные требования к стали для обеспечения надежной и длительной работы КУ.
7. Перечислите основные прочностные характеристики сталей, укажите, в соответствии с какими критериями производится выбор материалов для различных элементов котлов.

8. Поясните методику выбора допускаемых напряжений и величин коэффициентов запаса прочности.
9. Поясните методику расчета прочности цилиндрических элементов.
10. Какие конструктивные и эксплуатационные факторы оказывают влияние на прочность элементов котлов?
11. В стенке сосуда под внутренним давлением в каком сечении напряжение больше: в продольном или поперечном?
12. Определите напряжение в стенке трубы экрана топки и в стенке барабана котла из задания курсовой работы.

Тема 12. Теплотехнические измерения и автоматика

Необходимо изучить, законспектировать и знать:

Контрольно-измерительные приборы и автоматика (КИПиА). Измерение температуры. Манометрический термометр. Принцип действия термометров сопротивления – платиновых (ТСП) и медных (ТСМ). Измерение давления. Манометры (жидкостные, мембранные, пружинные). Тягонапоромер жидкостный (ТНЖ). Водоуказательные приборы. Проверка работы водоуказательных стёкол. Мембранный дифференциальный манометр (ДМ) используется для пропорционального регулирования уровня воды в барабанных паровых котлах. Уровнемерная колонка УК предназначена для позиционного регулирования уровня воды в барабане котла. Приборы для измерения расхода жидкостей (воды, мазута), газов и пара: скоростные объемные, измеряющие объем жидкости или газа по скорости потока и суммирующие эти результаты; дроссельные, с переменным и постоянным перепадом давлений или ротаметры. Объемный ротационный счетчик (типа РГ). Газоанализаторы предназначены для контроля полноты сгорания топлива, избытка воздуха и определения в продуктах сгорания объемной доли углекислого газа, кислорода, окиси углерода, водорода, метана: химические (ГХП, ОРСА, ВТИ); физические, работающие по принципу измерения физических параметров (плотности газа и воздуха, их теплопроводности); хроматографические, основанные на адсорбции (поглощении) компонентов газовой смеси. Приборы безопасности, обеспечивающие своевременное и надежное автоматическое отключение котла или его элементов при недопустимых отклонениях от заданных режимов эксплуатации. Случаи автоматического прекращают подачу топлива к горелкам. Автоматика безопасности (АБ) состоит из датчиков, щита управления со звуковой и световой сигнализацией, клапанов отсекающих газа. Технологическому контролю подлежат следующие параметры: давление, температура, расход пара; температура уходящих газов и продуктов сгорания; давление и температура воздуха; разрежение в топке и газоходах; количество и качество топлива; качество воды и пара; расход электроэнергии и др. Для автоматизации управления работой теплоэнергетического оборудования котельных, кроме КИП, применяют: устройства дистанционного управления; устройства защиты; автоматические устройства для управления периодическими операциями пуска и остановки оборудования; автоматические блокировки – устройства, ограждающие оборудование от неправильных операций; автоматическое регулирование с помощью авторегуляторов; предупредительную, контрольную, аварийную и командную сигнализацию. Параметры, контролируемые первичными приборами. Система АМК-У для комплексной автоматизации работы паровых котлов производительностью до 1,6 т/ч и водогрейных котлов, работающих на жидком и газообразном топливе. Средствами управления КСУ-2П-1, КСУ-2П-2, КСУ-2П-3. Система автоматизации газомазутных водогрейных котлов типа КВ-ГМ (теплопроизводительностью 11,6; 23,3; 34,9 МВт) на базе комплекса КСУ-30-ГМ.

Рекомендуемая по данной теме литература: [4] стр. 502-514; [17] стр. 9-16; [18] стр.

36-46.

Вопросы и задачи для самопроверки по данной теме:

1. Какими приборами производится измерение температуры?
2. Поясните принцип действия термометров сопротивления.
3. Какими приборами производится измерение давления?
4. Поясните принцип действия манометров (жидкостных, мембранных, пружинных).
5. Опишите конструкцию водоуказательных приборов.
6. Опишите конструкцию, принцип действия приборов для измерения расхода жидкостей (воды, мазута), газов и пара.
7. Какие типы газоанализаторов предназначены для контроля полноты сгорания топлива, избытка воздуха и определения в продуктах сгорания объемной доли углекислого газа, кислорода, окиси углерода, водорода, метана?
8. Какие параметры работы котла подлежат технологическому контролю?
9. Какие функции выполняют устройства защиты?
10. Опишите систему управления, применяемую на котле из задания курсовой работы.

Тема 13. Эксплуатация котельных установок.

Необходимо изучить, законспектировать и знать:

Общие положения, основные требования к персоналу котельных установок, организация дежурной службы, техническая документация котельной, режимы работы котлов, распределение нагрузки между параллельно работающим котлами, состояние паровых котлов в эксплуатации, пуск парового котла в работу, обслуживание парового котла во время работы, методы эксплуатационного контроля избытков воздуха, требования к организации безопасной эксплуатации паровых котельных установок.

Рекомендуемая по данной теме литература: [1] стр.29-65; [19] стр. 375-419; [20] стр. 39-270.

Вопросы и задачи для самопроверки по данной теме:

1. Что называется системой планово-предупредительного ремонта оборудования, каковы её цели?
2. Какие виды работ включает в себя система ППР?
3. Что такое техническое обслуживание, виды технического обслуживания и какие виды работ они в себя включают?
4. Какие виды ремонтов включает в себя система ППР?
5. Кто из специалистов организации может быть назначен ответственным за исправное состояние и безопасную эксплуатацию котлов?
6. При каком перерыве в работе по специальности необходимо проходить переподготовку персоналу, связанному с эксплуатацией котлов?
7. С какой периодичностью должна проводиться инвентаризация количества поступившего на склад и израсходованного котельной топлива?
8. Каким способом должна производиться подача топлива в котельные?
9. Что не допускается делать для предупреждения самовозгорания каменного угля?
10. Какой должна быть максимальная температура мазута в приемных емкостях и резервуарах?

11. Какой должна быть максимальная величина колебания давления газа в газопроводе котельной?
12. Какой должна быть минимальная величина пробного давления при гидравлическом испытании трубопроводов?
13. Где должны находиться режимные карты по эксплуатации котлов?
14. С какой периодичностью проводятся режимно-наладочные испытания котлов, работающих на твердом и жидком топливе?
15. С какой периодичностью проводятся режимно-наладочные испытания котлов, работающих на газообразном топливе?
16. Какой уровень воды должен поддерживаться в котле?
17. При каком условии допускается спускать воду из остановленного парового котла с естественной циркуляцией?
18. С какой периодичностью должны проводиться гидравлические испытания котлов?
19. Какое минимальное время выдержки под пробным давлением во время проведения гидравлических испытаний котла?
20. С какой периодичностью проводится проверка водоуказательных приборов продувкой и сверка показаний сниженных указателей уровня воды?

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ к экзамену

1. Каково назначение парогенераторов и водогрейных котлов?
2. Из каких основных элементов состоит парогенерирующая установка?
3. Каково назначение топки, пароперегревателя, водяного экономайзера и воздухоподогревателя?
4. Из каких узлов состоит воздушный тракт котельной установки?
5. Какие поверхности нагрева называются экранными?
6. Чем отличаются производственно-отопительные котельные установки от производственных?
7. Что называется химическим топливом?
8. Как принято классифицировать топлива в зависимости от способа их получения?
9. Что такое теплота сгорания топлива?
10. Что называется условным топливом?
11. Из каких основных элементов состоит твердое топливо?
12. Что такое высшая и низшая теплота сгорания топлива?
13. Как определяется теплота сгорания твердого топлива?
14. Из каких химических элементов состоит мазут и какие марки его используются в промышленных и отопительных котельных установках?
15. Какими параметрами характеризовать мазут?
16. Что собой представляет газообразное топливо?
17. Из каких газов состоит природный газ?
18. В чем заключается токсичность газообразного топлива?
19. Как принято характеризовать взрываемость газов?
20. Что называется горением топлива?
21. Назовите основные зоны, на которые принято расчленять процесс горения твердого топлива.
22. Какой принцип положен в основу классификации топочных устройств?
23. Дайте характеристику зоны предварительной подготовки топлива.
24. Дайте характеристику зоны огневой газификации.
25. Каким путем происходит образование истинной горючей смеси?

26. Что такое материальный баланс процесса горения и каков принцип его составления?
27. Что такое теоретический объем воздуха, необходимый для организации процесса горения, и как он определяется?
28. Из каких газов состоят продукты сгорания при полном и неполном горении, как определяется теоретический объем продуктов сгорания?
29. Что называется коэффициентом избытка воздуха и какое он имеет значение для характеристики процесса горения?
30. Из каких газов складывается действительный объем продуктов сгорания при полном горении топлива?
31. Что называется энтальпией продуктов сгорания и как она вычисляется?
32. Что такое присосы воздуха и как они влияют на объем продуктов сгорания, покидающих парогенератор или водогрейный котел?
33. Что называется тепловым балансом парогенератора или водогрейного котла?
34. Чем обусловлена и от каких факторов зависит потеря тепла с уходящими газами?
35. Что такое потеря тепла от химической неполноты горения и какие факторы на нее влияют?
36. При сжигании каких топлив появляется потеря тепла от механической неполноты горения и чем она обусловлена? Какие факторы влияют на эту потерю?
37. Что такое потеря тепла в окружающую среду и какие факторы на нее влияют?
38. Чем обусловлена потеря с физическим теплом шлаков и в каких случаях она учитывается?
39. Как производится определение к. п. д. брутто парогенератора и водогрейного котла по прямому и обратному балансу?
40. Что называется к. п. д. нетто парогенератора или водогрейного котла и какие факторы влияют на него?
41. Из чего складывается располагаемое тепло?
42. Как принято классифицировать топки для сжигания твердого топлива?
43. Что называется тепловой мощностью топки и как она определяется?
44. Что такое удельная нагрузка сечения топки, зеркала горения, топочного объема и как она определяется?
45. Как принято классифицировать форсунки для сжигания жидкого топлива?
46. Как можно классифицировать газовые горелки в зависимости от перемешивания в них топлива с воздухом?
47. Что называется коэффициентом тепловой эффективности экрана?
48. На чем базируется расчет топочных камер парогенераторов и водогрейных котлов?
49. Как учитывается распределение температуры по высоте топочной камеры при ее расчете?
50. Дайте характеристику условий протекания процесса кипения в парогенераторе.
51. Как осуществляется передача тепла от продуктов сгорания к воде в конвективных поверхностях нагрева?
52. Как влияют наружные загрязнения конвективных поверхностей нагрева на процесс передачи тепла и надежность работы металла труб?
53. Как влияют внутренние загрязнения на надежность работы конвективных поверхностей нагрева?
54. Каков механизм естественной циркуляции?
55. В чем заключается принцип многократной принудительной циркуляции?
56. На каких уравнениях базируется расчет конвективных поверхностей нагрева?
57. Какая вода, поступающая в котельный цех, называется сырой, питательной,

подпиточной, котловой?

58. Назначение непрерывной и периодической продувки.
59. Каково назначение сепарационных устройств?
60. Изложите принцип работы сепарации с циклонами.
61. Что такое промывка пара питательной водой?
62. Каковы условия работы труб пароперегревателя?
63. Как конструктивно выполняются пароперегреватели?
64. Каковы основные задачи теплового расчета пароперегревателей?
65. Какие способы регулирования перегрева пара применяются?
66. Какие экономайзеры называются некипящими?
67. При каких условиях применяются чугунные экономайзеры, как конструктивно устроен чугунный экономайзер?
68. Как конструктивно выполняется стальной экономайзер?
69. Как конструктивно выполняются рекуперативные воздухоподогреватели?
70. Каков принцип работы воздухоподогревателя с промежуточным теплоносителем?
71. Что такое естественная и искусственная тяга?
72. От чего зависит сила тяги, создаваемая дымовой трубой?

Список заданий к экзамену в осеннюю сессию для очной формы обучения

1. Как изменится рабочая концентрация углерода C^p в топливе, если влажность топлива W^p уменьшится от 28% до 15%?
2. Как изменится рабочая концентрация углерода C^p в топливе, если зольность топлива A^p уменьшится от 16% до 8%?
3. Как изменится рабочая концентрация водорода H^p в топливе, если влажность топлива W^p уменьшится от 18% до 5%, а зольность топлива A^p увеличится с 9% до 16%?
4. Определите сухую концентрация углерода C^c в топливе, если его рабочая концентрация составляет $C^p = 66\%$, а влажность топлива $W^p = 8\%$.
5. Определите сухую концентрация водорода H^c в топливе, если его рабочая концентрация составляет $H^p = 3\%$, а влажность топлива $W^p = 7\%$.
6. Как изменится рабочая влажность топлива W^p в топливе, если зольность топлива A^p увеличится с 9% до 16%?
7. Определите горючую концентрация углерода C^r в топливе, если его рабочая концентрация составляет $C^p = 66\%$, а влажность топлива $W^p = 8\%$, зольность топлива $A^p = 30\%$.
8. Определите горючую концентрация водорода H^r в топливе, если его рабочая концентрация составляет $H^p = 3\%$, а влажность топлива $W^p = 7\%$, зольность топлива $A^p = 26\%$.
9. Как изменится низшая теплота сгорания топлива Q_n^p при рабочей концентрации водорода $H^p = 3\%$, если влажность топлива W^p уменьшится от 28% до 15%?
10. Как изменится низшая теплота сгорания топлива Q_n^p , если зольность топлива A^p уменьшится от 16% до 8%?
11. Как изменится сухая концентрация углерода C^c в топливе, если влажность топлива W^p уменьшится от 28% до 15%?
12. Как изменится сухая концентрация углерода C^c в топливе, если зольность топлива A^p уменьшится от 16% до 8%?
13. Как изменится рабочая концентрация водорода H^p в топливе, если влажность топлива W^p уменьшится от 18% до 5%, а зольность топлива A^p увеличится с 9% до 16%?

Список заданий к экзамену в весеннюю сессию для очной формы обучения

1. Как изменится теоретический объем V_0^0 продуктов сгорания топлива, если его рабочая влажность топлива уменьшится от 28% до 15%?

2. Как изменится теоретический объём V_{Γ}^0 продуктов сгорания топлива, если его рабочая зольность топлива A^p уменьшится от 35% до 17%?
3. Как изменится теоретический объём трёхатомных газов $V_{\text{RO}_2}^0$ продуктов сгорания топлива, если его рабочая влажность топлива W^p уменьшится от 28% до 15%?
4. Как изменится теоретический объём азота V_N^0 продуктов сгорания топлива, если его рабочая влажность топлива W^p уменьшится от 33% до 15%, а его рабочая зольность топлива A^p увеличилась с 15% до 27%?
5. Определите энтальпию продуктов сгорания I_{Γ} при коэффициенте избытка воздуха $\alpha=1,22$, если энтальпия продуктов сгорания I_{Γ}^0 при коэффициенте избытка воздуха $\alpha=1$ при этой температуре $I_{\Gamma}^0=1324\text{кДж/кг}$ и энтальпия воздуха $I_{\text{в}}^0=1134\text{кДж/кг}$.
6. Как изменится объём V_{Γ} продуктов сгорания топлива, если коэффициенте избытка воздуха α изменится с $\alpha_1=1.1$ до $\alpha_2=1,22$, теоретический объём воздуха $V^0=6,11\text{м}^3/\text{кг}$, теоретический объём продуктов сгорания топлива $V_{\Gamma}^0=6,66\text{м}^3/\text{кг}$?
7. Определите теоретический объём водяных паров $V_{\text{H}_2\text{O}}^0$, получаемых при сжигании топлива, в котором рабочая влажность $W^p=13\%$ и рабочая концентрация водорода $H^p=3,3\%$.
8. Аналитически определите плотность углекислого газа CO_2 при нормальных условиях.
9. Аналитически определите плотность водяных паров H_2O при нормальных условиях.
10. Аналитически определите плотность азота N_2 при нормальных условиях.
11. Аналитически определите плотность кислорода O_2 при нормальных условиях.
12. Определите низшую теплотворную способность смеси топлив $Q_{\text{н.см}}^p$, если массовая концентрация первого топлива 70%, а низшая теплотворная способность первого топлива $Q_{\text{н1}}^p=20,34\text{Мдж/кг}$, а второго - $Q_{\text{н2}}^p=13,61\text{Мдж/кг}$.
13. Как изменится теоретический объём трёхатомных газов $V_{\text{RO}_2}^0$ продуктов сгорания топлива, если его рабочая влажность топлива W^p увеличится с 18% до 35%?
14. Как изменится теоретический объём азота V_N^0 продуктов сгорания топлива, если его рабочая влажность топлива W^p уменьшится от 37% до 18%, а его рабочая зольность топлива A^p увеличилась с 10% до 21%?

Примечание: для заочной формы обучения задания объединяются.

ЗАДАНИЕ НА КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

Тип котла и его характеристики выбираются согласно варианту (варианты распределяет преподаватель) из табл. 2, топливо из табл. 3. Методические указания для выполнения работы в [13].

Таблица 2 - Тип котла и его характеристики

№ ва р	Тип котла	Паропроизводит.			Р _к МПа (изб.)	Пит. вода		Воздух		Топливо	α	ФИО студента	х
		D _{общ} кг/с	D _{пер} кг/с	D _п кг/с		t _{пв} °C	t _{зэк} °C	t _{хв} °C	t _{гв} °C				
1	КЕ-2,5-14С	0,70	-	0,07	1,4	100	145	30	-	КУ Т с РПК	1,35		
2	КЕ-2,5-14С	0,70	-	0,07	1,0	100	-	60	-	КУ Т с РПК	1,4		
3	КЕ-4-14С	1,11	-	1,11	1,4	10	140	30	-	КУ ТЛЗМ	1,38		
4	КЕ-4-14С	1,10	-	1,10	1,4	100	150	25	120	КУ ТЛЗМ	1,30		
5	КЕ-6,5-14С	1,8	-	1,8	1,4	100	150	25	180	КУ ТЛЗМ	1,30		
6	КЕ-6,5-14С	1,6	-	1,6	1,3	90	-	30	-	КУ ТЛЗМ	1,30		
7	КЕ-10-14С	2,78	-	2,78	1,4	90	170	30	180	КУ ТЛЗМ	1,28		
8	КЕ-10-24С	2,78	-	2,78	2,4	100	200	30	180	КУ ТЛЗМ	1,28		
9	КЕ-25-14С	6,94	-	6,94	1,4	90	170	25	180	КУ ТЛЗМ	1,28		
10	КЕ-25-24С	6,95	-	6,95	2,4	100	200	30	180	КУ ТЛЗМ	1,28		
11	ДЕ-4-14ГМ	1,11	-	1,11	1,4	100	170	30	-	Мазут	1,15		
12	ДЕ-4-14ГМ	1,10	-	1,10	1,4	90	165	25	-	Газ	1,10		
13	ДЕ-6,5-14ГМ	1,8	-	1,8	1,4	90	140	25	120	Газ	1,08		
14	ДЕ-6,5-14ГМ	1,7	-	1,7	1,4	90	175	28	130	Мазут	1,10		
15	ДЕ-10-14ГМ	2,8	-	2,8	1,4	100	170	30	150	Мазут	1,20		
16	ДЕ-10-14ГМ	2,7	-	2,7	1,4	100	165	32	130	Газ	1,10		
17	ДЕ-16-14ГМ	4,45	-	4,45	1,4	90	140	25	180	Газ	1,05		
18	ДЕ-16-14ГМ	4,10	-	4,10	1,4	100	165	25	160	Мазут	1,10		
19	ДЕ-25-14ГМ	7,00	-	7,00	1,4	90	170	30	180	Газ	1,05		
20	ДЕ-25-14ГМ	6,80	-	6,80	1,4	100	170	30	120	Газ	1,03		
21	ДКВр 2,5-13ГМ	0,7	-	0,7	1,3	98	140	30	215	Мазут	1,30		
22	ДКВр 2,5-13С	0,7	-	0,7	1,3	98	140	60	205	КУ Т с РПК	1,50		
23	ДКВр 4-13ГМ	1,11	-	1,11	1,3	100	145	60	210	Мазут	1,30		
24	ДКВр 4-13ГМ	1,10	-	1,10	1,3	90	130	60	220	Газ	1,20		
25	ДКВр 6,5-13С	1,8	-	1,8	1,3	90	140	60	205	КУ Т с РПК	1,30		
26	ДКВр 6,5-13ГМ	1,8	-	1,8	1,3	100	150	60	210	Мазут	1,28		
27	ДКВр 6,5-13ГМ	1,8	-	1,8	1,3	90	150	60	105	Газ	1,18		
28	ДКВр 10-13С	2,78	-	2,78	1,3	100	156	30	200	КУ Т с РПК	1,2		
29	ДКВр 10-23ГМ	2,70	-	2,70	2,3	100	200	60	205	Мазут	1,18		
30	ДКВр 10-13ГМ	2,80	-	2,80	1,3	100	150	20	215	Газ	1,15		

Таблица 3 - Вид и состав топлива

Каменный уголь								
№ варианта	Марка	C ^r , %	H ^r , %	S ^r , %	O ^r , %	N ^r , %	A ^c , %	W ^p , %
1	ГР	82	5,7	0,7	10,6	1	11	8
2	ГР	84,5	5,1	0,6	8,6	1,2	34	5,5
3	ДР	77,5	6,2	0,5	14,9	0,9	32	6
4	ГО	80,9	5,7	0,6	11,5	1	32	7,5
5	ДР	78,8	6,1	0,5	13,8	1,6	23	10
6	ГР	81	5,9	0,5	10,6	2	20	10
7	ССР	85,4	4,4	0,3	9	0,9	18	7
8	ЖО	86	5,9	0,4	6	1,7	13	6
9	ДО	76,9	5,4	0,6	16	1,1	23	7,5
10	ДР	78,6	5,1	0,5	14	1,4	19,4	6
22	ДО	77	5,6	1,6	14,7	1,1	31	13
25	ДО	80	5,2	0,7	11,8	2,3	17	12
28	ГР	78	5,5	0,4	13,7	2,4	12,5	11
Мазут		C ^p , %	H ^p , %	S ^p , %	O ^p , %	N ^p , %	A ^c , %	W ^p , %
11	М40	85,95	10,87	2,80	0,18	0,20	0,10	0,5
14	М40	86,01	10,81	2,85	0,13	0,20	0,10	0,5
15	М40	86,11	10,56	2,83	0,20	0,30	0,80	0,5
18	М40	86,47	11,01	1,90	0,32	0,30	0,08	1,0
21	М100	83,71	10,72	3,02	0,57	2,00	0,13	1,5
23	М100	86,49	10,04	2,81	0,00	0,66	0,34	0,3
26	М100	85,32	10,47	2,67	1,00	0,54	0,12	0,8
29	М100	87,25	10,81	0,43	0,53	1,00	0,06	1,0
Газ		CH ₄ , %	C ₂ H ₆ , %	C ₃ H ₈ , %	C ₄ H ₁₀ , %	C ₅ H ₁₀ , %	N ₂ , %	
12	Шебилинский	89,9	3,1	0,9	0,4	1	4,7	
13	Ставропольский	98	0,4	0,2	0,4	-	1	
16	Ухтинский	88	1,9	0,2	0,3	1,5	8,1	
17	Газлинский	94,2	1,6	0,1	0,8	0,9	2,4	
19	Сахалинский	95	2,2	0,6	0,8	0,2	1,2	
20	Саратовский	84,5	3,8	1,9	0,9	1,1	7,8	
24	Шебилинский	90	3,0	0,9	0,4	1	4,7	
27	Ставропольский	97,3	1,1	0,2	0,4	-	1	
30	Ухтинский	88,5	1,4	0,2	0,3	1,5	8,1	

Каждому студенту выдаётся задание на индивидуальном бланке соответствующего варианта, приводимые ниже.

Пример бланка задания.

Каменный уголь								
№ варианта	Марка	C ^r , %	H ^r , %	S ^r , %	O ^r , %	N ^r , %	A ^c , %	W ^p , %
1	ГР	82	5,7	0,7	10,6	1	11	8
Паропроизводи			Пит. вода	Воздух				

Тип котла	Т.			Р _к МПа (изб.)					Топливо	α	ФИО студента
	D _{об} щ кг/с	D _п ер кг/с	D _н кг/с		t _{пв} °C	t _{зэк} °C	t _{хв} °C	t _{гв} °C			
KE-2,5-14C	0,7 0	-	0,07	1,4	100	145	30	-	КУ Т с РПК	1,3 5	Иванов А.И.

Дата: _____. Руководитель проекта: _____ С.П. Пантеев

Методические указания к выполнению курсового проекта

Указания по оформлению

Курсовой проект выполняется на листах А4 (210х297мм) печатным способом с использованием текстовых редакторов (Microsoft Office Word). Текст должен быть набран шрифтом кегля 14 (Times New Roman) с интервалом 1,0 (или 1,5). В титульном листе должно быть указано:

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

«МУРМАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт арктических технологий

Кафедра «Строительства, энергетики и транспорта»

КП по дисциплине «Котельные установки и парогенераторы»

Специальность 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»

Профиль подготовки: «Энергообеспечение предприятий»

Квалификация (степень) выпускника Бакалавр

Курс

Группа

Шифр

Вариант

Выполнил: студент Иванов И. И. подпись _____, дата _____

Проверил: доцент Пантеев С.П. подпись _____, дата _____

Мурманск

Год

Листы **КП** (кроме титульного) должны иметь нижний заполненный штамп согласно ГОСТ 2.106-79 «Общие требования к текстовым документам» и ГОСТ 2.106—68

«Текстовые документы» или нижний колонтитул с фамилией студента и номером страницы.

После титульного листа крепится официальное задание на РГЗ.

Основная надпись и дополнительные графы для текстовых конструкторских документов (первый и заглавный лист), Форма 2, ГОСТ 2.104-2006 согласно Приложение В.

Основная надпись и дополнительные графы для текстовых конструкторских документов (последующие листы), Форма 2а, ГОСТ 2.104-2006 согласно Приложение Г.

КУРСОВОЙ ПРОЕКТ выполняется в следующей последовательности:

- а) краткое описание котлоагрегата;
- б) краткое описание принятых к установке топочных устройств и горелок;
- в) обоснование выбранной температуры уходящих газов;
- г) выбор и описание принятых к установке хвостовых поверхностей нагрева;
- д) определение конструктивных характеристик котлоагрегата;
- е) расчет объемов воздуха и продуктов сгорания при сжигании топлива;
- ж) расчет энтальпий воздуха и продуктов сгорания при сжигании топлива;
- з) расчёт предварительного баланса котла;
- и) расчет топки;
- к) расчет конвективных пучков;
- л) расчет хвостовых поверхностей нагрева;
- м) расчёт окончательного баланса котла.

Графическая часть курсовой работы.

На листах (два А3) должны быть выполнены в масштабе:

продольная конструктивная схема котлоагрегата совместно с хвостовыми поверхностями нагрева;

поперечная конструктивная схема топки и конвективных газоходов;

план котлоагрегата совместно с хвостовыми поверхностями нагрева;

спецификация с перечнем основных элементов котлоагрегата.

На чертеже должны быть проставлены все размеры топки и конвективных газоходов (диаметры труб, коллекторов и барабанов, шаги между трубами, габаритные размеры), которые используются в расчётах строго с буквенным обозначением по расчёту.

Оформление: барабаны и коллектора изображаются контуром по внешнему диаметру и осью; трубы изображаются осями и в разрезе (+).

Примерный объем отдельных разделов КП приведён в таблице 4.

Таблице 4 - Примерный объем отдельных разделов КП

Раздел курсовой работы	Объем, %
------------------------	-------------

Краткое описание котлоагрегата с топочным устройством и горелками	5
Выбор и описание принятых к установке хвостовых поверхностей нагрева	5
Определение конструктивных характеристик котлоагрегата	5
Расчет объемов и энтальпий воздуха и продуктов сгорания	15
Составление теплового баланса и расчет топки	20
Расчет конвективных поверхностей нагрева	20
Расчет хвостовых поверхностей нагрева	5
Оформление чертежей	15
Оформление пояснительной записки	10

Все размещаемые в записке иллюстрации (рисунки) нумеруются арабскими цифрами. Листы пояснительной записки нумеруют, начиная с титульного листа. На второй странице приводится официальное задание, и далее идут листы записки в порядке, указанном в оглавлении. В конце записки помещается список использованной литературы и оглавление с указанием номера страницы. Содержание записки распределяется на разделы, подразделы, пункты и подпункты.

Разделы должны иметь порядковые номера, обозначенные арабскими цифрами с точкой. Подразделы должны иметь порядковые номера в пределах каждого раздела. Номера подразделов состоят из номера раздела и подраздела, разделенных точкой. Между номером подраздела и его названием также ставится точка.

Текст набирается размером 14 с межстрочным интервалом 1,5 с одинаковым по всему тексту отступом «красной строки 1,25см.

Наименования разделов и подразделов должны быть краткими, соответствовать содержанию, их записывают в виде заголовков буквами более крупного шрифта или выделяют «жирным». Разделы, подразделы от предыдущего текста отделяются двумя одинарными межстрочными интервалами, а от последующего - одним.

Таблицы нумеруются по всему документу или по разделам (первая цифра № раздела, точка, номер подраздела, номер таблицы, пробел, тире , пробел и название с заглавной буквы). Таблицы с названием отделяются от текста сверху и снизу одним одинарным межстрочным интервалом. В таблицах размер шрифта можно уменьшать до 10.

Рисунки должны иметь номера в подрисуночном тексте, как и таблицы, только вместо тире ставится точка. Рисунки с подрисуночным текстом отделяются от текста сверху и снизу одним одинарным межстрочным интервалом.

Название таблиц, подрисуночных текстов, название разделов, подразделов и межстрочные интервалы, сопряжённые с ними должны быть одинарными.

На все рисунки и таблицы в тексте должны быть ссылки.

Формулы нумеруются (ЦИФРА В КРУГЛЫХ СКОБКАХ), если на них в тексте есть ссылки.

Ссылка на литературные истоф

При выполнении курсовой работы необходимо следовать приведёнными в [13] методическими указаниями и литературой.

ТЕСТЫ-1

Необходимо в контрольную таблицу (приложение 1) в ячейках с номером вопроса отметить галочкой номера правильных ответов и передать преподавателю на проверку.

1. Какую область имеет процесс горения топлива?

- 1.1. Статическую. 1.2. Топочную. 1.3. Камерную.
1.4. Кинетическую. 1.5. Горючую. 1.6. Динамическую.

2. Что такое горение топлива?

- 2.1. Это медленно протекающий физико-химический процесс взаимодействия горючей его части с окислителем, сопровождающийся выделением тепла и света.
2.2. Это быстро протекающий физико-химический процесс взаимодействия горючей его части с окислителем, сопровождающийся выделением тепла и света.
2.3. Это быстро протекающий тепловой процесс взаимодействия топлива с воздухом, сопровождающийся поглощением тепла и света.
2.4. Это медленно протекающий тепловой процесс взаимодействия топлива с воздухом, сопровождающийся поглощением тепла и света.
2.5. Это быстро протекающий химический процесс взаимодействия дымовых газов с воздухом, сопровождающийся поглощением тепла и света.
2.6. Это быстро протекающий тепловой процесс взаимодействия продуктов сгорания с воздухом, сопровождающийся поглощением тепла и света.

3. К какой группе горения можно отнести систему «жидкость + газ»?

- 3.1. К конвективной. 3.2. К химической. 3.3. К гомогенной.
3.4. К физико-химической. 3.5. К гетерогенной. 3.6. К термической

4. Как называется процесс горения газообразного топлива, если окислитель находится в одном агрегатном состоянии и граница раздела фаз отсутствует?

- 4.1. Гетерогенным; 4.2. Гомогенным; 4.3. Диффузионным;
4.4. Скоростным; 4.5. Конвективным; 4.6. Разделительным.

5. Какая температура газа называется температурой воспламенения?

- 5.1. Максимальная температура, при которой происходит воспламенение смеси.
5.2. Максимальная температура, при которой ещё не происходит воспламенение смеси.
5.3. Минимальная температура, при которой ещё не происходит воспламенение смеси.
5.4. Минимальная температура, при которой происходит воспламенение смеси.
5.5. Максимальная температура, при которой происходит уже не произойдёт воспламенение смеси.
5.6. Минимальная температура, при которой происходит уже не произойдёт воспламенение смеси.

6. Какие типы камерных топок применяются на котельных?

- 6.1. Циклонные. 6.2. Слойные. 6.3. Цепные.
6.4. Колосниковые. 6.5. Полумеханические. 6.6. Механические.

7. Как подразделяются слоевые топки по способу механизации операций оборудования?

- 7.1. Автоматизированные. 7.2. Полуавтоматизированные. 7.3. Колосниковые.
- 7.4. Неавтоматизированные. 7.5. Немеханизированные. 7.6. Сигнальные.

8. Для каких углей предназначены топки с шурующей планкой?

- 8.1. Для сжигания малозольных бурых углей.
- 8.2. Для сжигания полуантрацитов.
- 8.3. Для сжигания антрацитов.
- 8.4. Для сжигания тощих углей.
- 8.5. Для сжигания многозольных бурых углей.
- 8.6. Для сжигания спекающихся каменных углей.

9. В чём заключается преимущество камерных топок перед слоевыми?

- 9.1. Проще автоматизация.
- 9.2. Меньше измерительных приборов.
- 9.3. Возможность повышения единичной мощности котла.
- 9.4. Меньше металлоёмкость.
- 9.5. Возможность работы без подачи воздуха.
- 9.6. Вместо воздуха можно подать чистый кислород.

10. Что является основным фактором, определяющим экономическую сторону помола пыли?

- 10.1. Дисперсность пыли.
- 10.2. Количество топлива, подаваемого в топку.
- 10.3. Выход летучих.
- 10.4. Содержание серы в топливе.
- 10.5. Температура уходящих газов из котла.
- 10.6. Длина факела.

11. Для чего предназначены горелки?

- 11.1. Для подачи воздуха в топку котла.
- 11.2. Для факельного сжигания твёрдого топлива.
- 11.3. Для освещения топки во время ремонта.
- 11.4. Для разогрева мазута перед пуском котла.
- 11.5. Для сброса дымовых газов в дымовую трубу.
- 11.6. Для лучшего горения топлива в топке.

12. За счёт чего распыляется топливо в центробежных форсунках?

- 12.1. За счёт давления специального насоса.
- 12.2. За счёт разрежения дымососа.
- 12.3. Под действием сопел, вмонтированных в форсунки.
- 12.4. Под действием центробежных сил, возникающих при закручивании топливного потока
- 12.5. Под действием давления воздуха, подаваемого в форсунки.
- 12.6. Под действием сил инерции.

13. Какие бывают инжекционные горелки?

- 13.1. Только высокого и среднего давлений.
- 13.2. Только низкого и среднего давлений.
- 13.3. Только высокого и низкого давлений.

- 13.4. Только среднего давления.
- 13.5. Только высокого давления.
- 13.6. Только низкого давления.

14. Почему котлы с наддувом применять более перспективно, чем котлы без наддува?

- 14.1. Отпадает нужда в дутьевых вентиляторах.
- 14.2. Улучшается теплопередача от дымовых газов к пару.
- 14.3. Уменьшается гидравлическое сопротивление проходу дымовых газов в топке котла.
- 14.4. Отпадает нужда в дымососах.
- 14.5. Отпадает нужда в дымовых трубах.
- 14.6. Отпадает нужда в водяных экономайзерах котла.

15. Для чего служит дробеочистка?

- 15.1. Для очистки настенных экранов топки от золовых отложений.
- 15.2. Для очистки ширмовых пароперегревателей от золовых отложений.
- 15.3. Для очистки воздухоподогревателя от золовых отложений.
- 15.4. Для очистки фестона от золовых отложений.
- 15.5. Для очистки внутренней поверхности топки от золовых отложений.
- 15.6. Для очистки потолочных пароперегревателей от золовых отложений.

16. Чем отличается регенеративный воздухоподогреватель от рекуперативного?

- 16.1. Диаметром трубок.
- 16.2. Количеством трубок.
- 16.3. Рекуперативный имеет трубчатую конструкцию, а регенеративный разделён на секции.
- 16.4. Рекуперативный воздухоподогреватель – вращающийся, а регенеративный нет.
- 16.5. Рекуперативные воздухоподогреватели используются на крупных энергетических котлах, а регенеративные на мелких.
- 16.6. Рекуперативные изготавливаются из чугуна, а регенеративные – из стали.

17. При сжигании какого топлива установка пиковых водогрейных котлов является более экономичной?

- 17.1. При сжигании бурого угля.
- 17.2. При сжигании каменного угля.
- 17.3. При сжигании антрацита.
- 17.4. При сжигании мазута.
- 17.5. При сжигании торфа.
- 17.6. При сжигании горючих сланцев.

18. К чему не приводит закипание воды в горизонтальных трубах конвективных пакетов водогрейного котла?

- 18.1. Перегрев металла труб.
- 18.2. К деформации труб.
- 18.3. К провисанию труб.
- 18.4. К развальцовке труб.
- 18.5. К появлению свищей.
- 18.6. К разрыву сварных швов.

19. К чему не приводит закипание воды в вертикальных экранных трубах водогрейного котла?

- 19.1. К нарушению гидродинамики.
- 19.2. К разрушению труб.
- 19.3. К гидравлическим ударам.
- 19.4. К выпадению солей.
- 19.5. К коррозии металла труб.
- 19.6. К перегреву и повреждению металла

20. Что можно не показывать на принципиальной тепловой схемы отопительной котельной?

20.1. Линии связи между оборудованием. 20.2. Вспомогательное оборудование котла. 20.3. Сам водогрейный котёл. 20.4. Вакуумный деаэратор. 20.5. Арматуру и диаметры трубопроводов на линиях связи. 4.5. Сетевой насос.

21. Какое оборудование не входит в состав водопитательной установки на смешивающей котельной?

21.1. Атмосферные деаэраторы. 21.2. Питательные насосы.
21.3. Охладитель выпара. 21.4. Водяной подогреватель ХОВ.
21.5. Конденсатные насосы. 21.6. Соединительные трубопроводы с арматурой.

22. Почему температура подпиточной воды, подаваемой в тепловую сеть с открытым водоразбором в летнее время, не должна превышать 75⁰С?

22.1. С целью экономии тепла.
22.2. Из-за высокой температуры наружного воздуха.
22.3. Таковы санитарные требования.
22.4. Из-за небольшой паропроизводительности котлов.
22.5. Из-за большого водоразбора теплопотребителями.
22.6. Согласно производственной инструкции.

23. Какое оборудование не входит в тракт топочных газов и дутьевого воздуха?

23.1. Калориферы. 23.2. Борова. 23.3. золоуловители. 23.4. Деаэраторы питательной воды. 23.5. Тягодутьевые машины. 23.6. Дымовые трубы.

24. Для чего предназначены расширители непрерывной продувки котлов?

24.1. Для расширения пара к промышленному потребителю.
24.2. Для расширения химически очищенной воды перед деаэратором.
24.3. Для сохранения тепла подпиточной воды котлов.
24.4. Для сохранения тепла подпиточной воды тепловых сетей.
24.5. Для сохранения тепла при продувках котлов.
24.6. Для сохранения тепла в помещениях котельной в зимний период.

25. В течение какого времени должна проводиться вентиляция газоходов котла перед его растопкой с помощью дымососа?

25.1. Полчаса-час. 25.2. 5-15 минут. 25.3. 20-25 минут. 25.4. 1-3 минуты. 25.5. 1—2 часа. 25.6. 2-3 часа.

26. Чем может быть вызвана кратковременная остановка котла?

26.1. Для вывода его в капитальный ремонт.
26.2. Разрывом трубок пароперегревателя.
26.3. Отсутствием топлива.
26.4. Отсутствием воды.
26.5. Нарушением его нормальной работы.
26.6. При прекращении действия всех питательных насосов.

27. Что не влияет на климат Земли?

27.1. Антропогенный рост концентрации парниковых газов в атмосфере;
27.2. Усиление радиационного прогрева атмосферы (парникового эффекта) и рост средней температуры.
27.3. Рост числа отрицательных явлений таких как деятельность человека.
27.4. Изменение углеродного баланса.
27.5. Глубина морей и океанов.
27.6. Выброс газов из котельных.

28. Что такое ПДВ в экологии?

- 28.1. Подогреватель высокого давления.
- 28.2. Предельно допустимая высота дымовых труб.
- 28.3. Предельно допустимые выбросы.
- 28.4. Поверхностный деаэратор вакуумный.
- 28.5. Марка питательного насоса.
- 28.6. Тип котельного агрегата.

29. Что не входит в охрану окружающей среды?

- 29.1 Охрана таяния льдов. 29.2. Охрана воды.
- 29.3. Охрана атмосферного воздуха. 29.4. Охрана земель.
- 29.5. Охрана растительности. 29.6. Охрана животных.

30. Чем достигается безопасность труда при обслуживании отопительных котельных?

- 30.1. Приходом на работу без опоздания.
- 30.2. Своевременной сдачей смены.
- 30.3. Оформлением технической документации.
- 30.4. Выполнением работ механизированным способом.
- 30.5. Добросовестным трудом.
- 30.6. Выполнением правил техники безопасности.

31. Какова основная задача энергетических предприятий, эксплуатирующих коммунальные отопительные котельные?

- 31.1. Обеспечение надёжного теплоснабжения потребителей электроэнергией.
- 31.2. Обеспечение надёжного теплоснабжения потребителей теплом.
- 31.3. Обеспечение надёжного теплоснабжения потребителей топливом
- 31.4. Обеспечение надёжного теплоснабжения потребителей и электроэнергией и теплом.
- 31.5. Обеспечение надёжного теплоснабжения потребителей холодной водой.
- 31.6. Обеспечение надёжного теплоснабжения потребителей паровоздушной смесью.

ТЕСТЫ 2**1. Теплота сгорания каких из перечисленных видов твердого топлива имеет наибольшее значение?**

- a. горючие сланцы;
- b. антрациты;
- c. торф;
- d. древесина.

2. Количество теплоты, выделяемое при полном сгорании единицы массы или объема топлива без учета скрытой теплоты конденсации водяных паров – это

- a. жаропроизводительность топлива;
- b. высшая теплота сгорания топлива;
- c. теплоемкость топлива;
- d. низшая теплота сгорания топлива.

3. Попутные природные газы по сравнению с сухими природными газами

- a. содержат большее количество тяжелых углеводородов и обладают более высокой теплотой сгорания;
- b. содержат меньшее количество тяжелых углеводородов и обладают более высокой теплотой сгорания;
- c. содержат большее количество тяжелых углеводородов и обладают меньшей теплотой сгорания;
- d. содержат меньшее количество тяжелых углеводородов и обладают меньшей теплотой сгорания.

4. Укажите, в каком из предложенных вариантов все компоненты входят в состав горючей части газообразного топлива?

- a. кислород, диоксид углерода, монооксид углерода;
- b. диоксид углерода, водород, углеводороды метанового ряда;
- c. водород, монооксид углерода, углеводороды метанового ряда;
- d. азот, кислород, углеводороды метанового ряда.

5. От каких параметров зависит скорость химической реакции горения?

- a. от концентрации реагирующих веществ, расхода подаваемого на горение топлива и температуры;
- b. от концентрации реагирующих веществ, температуры и давления;
- c. от концентрации реагирующих веществ, расхода подаваемого на горение топлива и давления;
- d. от расхода подаваемого на горение топлива, температуры и давления.

6. В каком случае может произойти принудительное воспламенение смеси газообразного топлива с воздухом?

- a. если содержание в смеси горючего газа ниже нижнего концентрационного предела воспламенения;
- b. если содержание в смеси горючего газа находится между нижним и верхним концентрационными пределами воспламенения;
- c. если содержание в смеси горючего газа выше верхнего концентрационного предела воспламенения;
- d. если содержание в смеси горючего газа ниже нижнего концентрационного предела воспламенения или выше верхнего концентрационного предела воспламенения.

7. Коэффициент избытка воздуха – это

- a. отношение теоретически необходимого воздуха для горения к действительному количеству воздуха;
- b. отношение избыточного количества воздуха, подаваемого на горение, к теоретически необходимому количеству воздуха;
- c. отношение теоретически необходимого количества воздуха для горения к избыточному количеству воздуха, подаваемому в топку;
- d. отношение действительного количества воздуха, подаваемого для организации процесса горения к теоретически необходимому количеству воздуха.

8. Теоретически для сгорания 1 м^3 природного газа требуется $9,5 \text{ м}^3$ воздуха. Определите коэффициент избытка воздуха в топке, если действительно на горение подали $10,5 \text{ м}^3$ воздуха.

- a. 0,1;
- b. 1,1;
- c. 10,5;
- d. 1.

9. При сжигании 1 м^3 природного газа образовались следующие объемы компонентов продуктов сгорания: $\text{CO}_2 - 1 \text{ м}^3$; $\text{N}_2 - 8 \text{ м}^3$; $\text{H}_2\text{O} - 2,2 \text{ м}^3$. Определите объем сухих продуктов сгорания, если теоретически необходимый объем воздуха на горение составляет 10 м^3 , а коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,1$.

- a. 10 м^3 ;
- b. $12,2 \text{ м}^3$;
- c. $7,8 \text{ м}^3$;
- d. 19 м^3 .

10. Температура дымовых газов на выходе из водяного экономайзера равна 500°C . При этой температуре и коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1$ энтальпия дымовых газов равна 8000 кДж/м^3 , а энтальпия воздуха равна 6500 кДж/м^3 . Определите действительную энтальпию дымовых газов на выходе из водяного экономайзера, если коэффициент избытка воздуха здесь равен $\alpha = 1,25$.

- a. 14500 кДж/м^3 ;
- b. 9625 кДж/м^3 ;
- c. 16125 кДж/м^3 ;
- d. 10000 кДж/м^3 .

11. Теоретический объем воздуха, идущий на сжигание 1 м^3 природного газа равен $10 \text{ м}^3/\text{м}^3$. Определите энтальпию теоретически необходимого количества воздуха при температуре 600°C , если его удельная энтальпия при этой температуре равна 830 кДж/м^3 .

- a. 6000 кДж/м^3 ;
- b. 83 кДж/м^3 ;
- c. 8300 кДж/м^3 ;
- d. 5170 кДж/м^3 .

12. Для ликвидации очагов горения в штабеле твердого топлива необходимо

- a. залить штабель водой;
- b. вскрыть штабель, перенести очаги горения на специальную площадку и на ней залить водой;
- c. вскрыть штабель и залить очаги горения водой;
- d. вскрыть штабель и засыпать очаги горения землей.

13. Укажите, какие типы мельниц могут быть использованы для размола твердого топлива?

- a. только молотковые и валковые среднеходные;
- b. только шаровые барабанные и молотковые;
- c. только валковые среднеходные и шаровые барабанные;
- d. шаровые барабанные, молотковые и валковые среднеходные.

14. Какие способы шлакозолоудаления могут применяться в котельных с котлами, оборудованными топками для слоевого сжигания топлива?

- a. скреперный, скребковый, пневматический;
- b. пневматический, гидравлический, вагонеточный;
- c. пневматический, скребковый, гидравлический;
- d. скреперный, гидравлический, вагонеточный.

15. Подготовка мазута перед его сжиганием заключается в

- a. удалении механических примесей;

- b. повышении давления мазута и его подогреве;
- c. удалении механических примесей, повышении давления мазута и его подогреве;
- d. удалении механических примесей, повышении давления мазута, его подогреве и аэрации.

16. Какие из перечисленных ниже операций осуществляются в газорегуляторном пункте?

- a. снижение давления газа и поддержание его на необходимом в эксплуатации уровне;
- b. контроль за температурой газа;
- c. очистка газа от механических примесей;
- d. в газорегуляторном пункте осуществляются все перечисленные выше операции.

17. Максимально допустимое рабочее давление газа в газопроводе за регулятором давления составляет 5 кПа. При каком давлении должен сработать предохранительный запорный клапан?

- a. 5 кПа;
- b. 5,25 кПа;
- c. 6,25 кПа;
- d. 10 кПа.

18. Выберите из предложенного списка тип трубопроводной арматуры, условное графическое изображение которой показано на рисунке.

- a. клапан запорный проходной;
- b. клапан регулирующий;
- c. клапан обратный
- d. задвижка



Рисунок

19. Выберите из предложенного списка тип трубопроводной арматуры, условное графическое изображение которой показано на рисунке.

- a. клапан запорный проходной;
- b. клапан регулирующий;
- c. клапан обратный
- d. задвижка



Рисунок

20. Выберите из предложенного списка тип устройства, условное графическое изображение которого показано на рисунке.

- a. теплообменник (подогреватель) поверхностный;
- b. теплообменник смешивающий;
- c. компрессор
- d. насос



Рисунок

21. Выберите из предложенного списка тип устройства, условное графическое изображение которого показано на рисунке.

- a. теплообменник (подогреватель) поверхностный;
- b. теплообменник смешивающий;
- c. компрессор
- d. насос



Рисунок

22. К какому типу относится котельная, вырабатывающая тепловую энергию для нужд отопления, вентиляции и горячего водоснабжения промышленных зданий?

- a. производственная;
- b. производственно-отопительная;
- c. отопительная;
- d. нет правильного ответа.

23. Какие потребители тепла относятся к потребителям первой категории?

- a. потребители, нарушение теплоснабжения которых связано с опасностью для жизни людей;
- b. потребители, нарушение теплоснабжения которых связано с повреждением технологического оборудования;
- c. потребители, нарушение теплоснабжения которых связано с массовым браком продукции;
- d. все вышеперечисленные потребители.

24. Для снижения давления пара до необходимого технологическому потребителю в производственных котельных используется

- a. деаэратор;
- b. барботер;
- c. редукционная установка;
- d. расширитель непрерывной продувки.

25. Какой расход теплоты необходим, чтобы нагреть химически очищенную воду в подогревателе от 50 °С до 70 °С? Расход химически очищенной воды 5 кг/с. Теплоемкость воды принять равной 4,2 кДж/(кг·°С). Потерями теплоты в подогревателе пренебречь.

- a. 420 кВт;
- b. 100 кВт;
- c. 21 кВт;
- d. нет правильного ответа.

26. Для нагрева сырой воды в подогревателе расходуется 630 кВт теплоты. Расход нагреваемой воды – 10 кг/с. Определите конечную температуру нагреваемой воды, если ее начальная температура равна 5 °С. Теплоемкость воды принять равной 4,2 кДж/(кг·°С). Потерями теплоты в подогревателе пренебречь.

- a. 17,6 °С;
- b. 53 °С;
- c. 20 °С;
- d. нет правильного ответа.

27. Определите расход воды на подогреватели сетевой воды, если расчетная тепловая нагрузка потребителей системы теплоснабжения – 10 МВт. Температура сетевой воды перед сетевыми подогревателями равна 70 °С, после них – 150 °С. Теплоемкость воды принять равной 4,2 кДж/(кг·°С). Потерями теплоты в подогревателе пренебречь.

- a. $\approx 0,03$ кг/с;
- b. ≈ 30 кг/с;
- c. $\approx 190,5$ т/ч;
- d. нет правильного ответа.

28. В подогревателе сетевой воды вода нагревается от 70 °С до 150 °С. Расход сетевой воды – 20 кг/с. Определите расход греющего пара на подогреватель сетевой воды, если разность энтальпий пара перед подогревателем и конденсата после подогревателя равна 2500 кДж/кг. Теплоемкость воды принять равной 4,2 кДж/(кг·°С). Потерями теплоты в подогревателе пренебречь.

- a. $\approx 2,7$ кг/с;
- b. $\approx 148,8$ кг/с;
- c. $\approx 148,8$ т/ч;
- d. нет правильного ответа.

29. Частью какого тракта котельной установки является барабан?

- a. топливного;
- b. пароводяного;
- c. газоздушного;
- d. топливного и газоздушного.

30. В паровом котле

- a. за счет теплоты, выделяющейся при сгорании органического топлива, генерируется пар заданных параметров;
- b. за счет теплоты конденсации водяного пара нагревается вода для нужд теплоснабжения;
- c. потенциальная энергия перегретого водяного пара преобразуется в электроэнергию;
- d. нет правильного ответа.

31. За счет чего происходит движение воды и пароводяной смеси в испарительной системе барабанных котлов с естественной циркуляцией?

- a. за счет работы циркуляционного насоса;
- b. за счет того, что плотность воды в необогреваемых трубах больше плотности пароводяной смеси в обогреваемых трубах;
- c. за счет того, что плотность воды в необогреваемых трубах меньше плотности пароводяной смеси в обогреваемых трубах;
- d. нет правильного ответа.

32. К какому типу котлов по характеру движения воды, пароводяной смеси и пара относится котел ДЕ-25-14ГМ?

- a. барабанный с естественной циркуляцией;
- b. барабанный с многократной принудительной циркуляцией;
- c. прямоточный;
- d. нет правильного ответа.

33. К какому типу котлов по характеру движения воды относится котел ПТВМ-50?

- a. барабанный с естественной циркуляцией;
- b. барабанный с многократной принудительной циркуляцией;
- c. прямоточный;
- d. нет правильного ответа.

34. К какому типу котлов по характеру перемещения продуктов сгорания и воды относится котел АВ-2?

- a. вертикально-водотрубный;
- b. горизонтально-водотрубный;

- c. водотрубно-газотрубный;
- d. газотрубный.

35. К какому типу котлов по характеру перемещения продуктов сгорания и воды относится котел БГМ-35М?

- a. вертикально-водотрубный;
- b. горизонтально-водотрубный;
- c. водотрубно-газотрубный;
- d. газотрубный.

36. Какие потери теплоты определяют величину КПД топочных устройств?

- a. потери теплоты с уходящими газами и от химической неполноты горения;
- b. потери теплоты от химической и механической неполноты горения;
- c. потери теплоты от механической неполноты горения и от наружного охлаждения;
- d. потери теплоты от наружного охлаждения и с уходящими газами.

37. Какие виды органического топлива можно сжигать в камерных топках?

- a. только твердое;
- b. только газообразное;
- c. только газообразное и жидкое;
- d. твердое, жидкое и газообразное.

38. Инжекционные горелки все без исключения являются

- a. горелками с полным предварительным смешением газа с воздухом;
- b. горелками с неполным предварительным смешением газа с воздухом;
- c. горелками без предварительного смешения газа с воздухом;
- d. нет правильного ответа.

39. Форсунки, в которых распыление топлива происходит за счет потенциальной энергии мазута, называются

- a. механическими
- b. пневматическими;
- c. ротационными;
- d. нет правильного ответа.

40. В котле экраны, размещенные на стенах топки, являются

- a. только конвективными поверхностями;
- b. только радиационными поверхностями;
- c. могут быть конвективными или радиационными поверхностями;
- d. нет правильного ответа.

41. Пар в пароперегревателе может быть перегрет за счет

- a. теплообмена излучением либо конвективного теплообмена с продуктами сгорания топлива;
- b. теплообмена излучением либо за счет смешения с частью продуктов сгорания топлива;
- c. теплообмена излучением, либо конвективного теплообмена, либо за счет смешения с частью продуктов сгорания топлива;
- d. конвективного теплообмена либо за счет смешения с частью продуктов сгорания топлива.

42. Для чего предназначен водяной экономайзер?

- a. для подогрева воздуха, идущего на горение, за счет использования теплоты, отдаваемой котловой водой;
- b. для подогрева питательной воды перед ее поступлением в испарительную часть котла за счет использования теплоты конденсации водяного пара;
- c. для подогрева питательной воды перед ее поступлением в испарительную часть котла за счет использования физической теплоты перегретого пара;
- d. для подогрева питательной воды перед ее поступлением в испарительную часть котла за счет использования теплоты продуктов сгорания органического топлива.

43. Где в водогрейном котле обычно размещают пароперегреватель?

- a. в верхней части топки или на выходе из топочной камеры;
- b. на выходе из топочной камеры или в конвективном газоходе;
- c. исключительно в конвективном газоходе;
- d. в водогрейных котлах не предусмотрен пароперегреватель.

44. С какой целью осуществляется непрерывная продувка котла?

- a. для удаления растворенных в котловой воде солей;
- b. для удаления шлама, осевшего в элементах котла;
- c. для снижения давления пара на выходе из котла;
- d. нет правильного ответа.

45. С какой целью осуществляется периодическая продувка котла?

- a. для удаления растворенных в котловой воде солей;
- b. для удаления шлама, осевшего в элементах котла;
- c. для снижения давления пара на выходе из котла;
- d. нет правильного ответа.

46. Что входит в задачу поверочного расчета котла?

- a. определение КПД котла, расхода топлива, размеров поверхностей нагрева;
- b. определение КПД котла, расхода топлива, параметров теплоносителей на границах всех поверхностей нагрева;
- c. определение расхода топлива, размеров поверхностей нагрева, параметров теплоносителей на границах всех поверхностей нагрева;
- d. определение КПД котла, размеров поверхностей нагрева, параметров теплоносителей на границах всех поверхностей нагрева.

47. Какая из статей потерь теплоты в котле является наибольшей?

- a. потеря теплоты с уходящими газами;
- b. потеря теплоты от химической неполноты горения;
- c. потеря теплоты от механической неполноты горения;
- d. потеря теплоты от наружного охлаждения.

48. Чем обусловлена потеря теплоты от механической неполноты горения?

- a. тем, что температура продуктов сгорания, покидающих котел, выше температуры окружающего воздуха;
- b. наличием в уходящих продуктах сгорания горючих газов CO , H_2 , CH_4 ;
- c. наличием в очаговых остатках твердых горючих частиц;
- d. тем, что шлак, удаляемый из топки, имеет высокую температуру.

49. Каким образом определяется КПД брутто котла по уравнению обратного баланса?

- a. $\eta_k = \frac{Q_1}{Q_p} 100$;
- b. $\eta_k = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6)$;
- c. $\eta_k = \frac{Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6}{Q_p} 100$;
- d. нет правильного ответа.

50. Полное количество теплоты, полезно используемое в водогрейном котле – 100 МВт. Коэффициент полезного действия котла – 90 %. Определите расход природного газа, подаваемого в топку котла, если его теплота сгорания равна 30 МДж/м³. Тепло, внесенное в топку топливом и воздухом при его подогреве вне котла, не учитывать.

- a. 27 м³/с;
- b. 0,27 м³/с;
- c. 3 м³/с;
- d. 3,7 м³/с.

51. Паропроизводительность котла – 50 т/ч. Расход природного газа на котел составляет 1,5 м³/с. Определите отнесенное к 1 м³ топлива количество теплоты, воспринятое паром в пароперегревателе, если в процессе перегрева пара его энтальпия меняется на величину 620 кДж/кг.

- a. 46500 кДж/м³;
- b. 20667 кДж/м³;
- c. 5741 кДж/м³;
- d. 12917 кДж/м³.

52. Определите средний температурный напор в водяном экономайзере, если температура продуктов сгорания на входе в него составляет 700 °С, а на выходе равна 450 °С. Температура воды на входе в экономайзер составляет 100 °С, на выходе – 150 °С. Схема движения – противоток.

- a. 200 К;
- b. 450 К;
- c. 300 К;
- d. 900 К.

53. Поверхность нагрева водяного экономайзера составляет 1000 м². Средний температурный напор в экономайзере – 400 К. Коэффициент теплопередачи равен 100 Вт/(м²·К). Определите величину тепловосприятия экономайзера, отнесенного к 1 м³ топлива, если расход природного газа составляет 5 м³/с.

- a. 8000 кДж/м³;
- b. 800 кДж/м³;
- c. 50 кДж/м³;
- d. 1250 кДж/м³.

54. Коэффициент сопротивления трения движению потока зависит от

- a. длины канала и числа Рейнольдса;
- b. относительной шероховатости стенок канала и длины канала;
- c. длины и эквивалентного диаметра канала;
- d. относительной шероховатости стенок канала и числа Рейнольдса.

55. Изотермический поток газа, плотность которого равна 0,8 кг/м³, движется в канале со скоростью 5 м/с. Длина канала – 10 м, эквивалентный диаметр – 0,5 м.

Коэффициент сопротивления трения составляет 0,025. Определите величину сопротивления трения движению потока.

- a. 0,025 Па;
- b. 5 Па;
- c. 1 Па;
- d. нет правильного ответа.

56. Коэффициент местного сопротивления пучков труб при поперечном их омывании зависит

- a. только от количества рядов труб и расположения труб в пучке;
- b. только от критерия Рейнольдса;
- c. от количества рядов труб, расположения труб в пучке и от критерия Рейнольдса;
- d. нет правильного ответа.

57. Поток газа, плотность которого равна $0,8 \text{ кг/м}^3$, поперечно оmyвает пучок труб. Скорость потока газа в сжатом сечении газохода составляет 5 м/с. Определите сопротивление пучка труб, если коэффициент местного сопротивления пучка труб равен 4.

- a. 4 Па;
- b. 8 Па;
- c. 40 Па;
- d. нет правильного ответа.

58. Чем определяется выбор высоты дымовой трубы?

- a. обеспечением рассеивания вредных веществ до допустимых санитарными нормами концентраций в зоне нахождения людей;
- b. полным давлением дымососа;
- c. обеспечением рассеивания вредных веществ до допустимых санитарными нормами концентраций в зоне нахождения людей и полным давлением дымососа;
- d. нет правильного ответа.

59. В каких аппаратах выделение твердых примесей, содержащихся в газах, происходит под действием центробежных сил?

- a. в осадительных камерах;
- b. в рукавных фильтрах;
- c. в циклонах;
- d. в электрофильтрах.

60. В каком из перечисленных ниже аппаратов отделение частиц золы и пыли от потока газов происходит при непосредственном контакте запыленных газов с жидкостью?

- a. насадочный скруббер;
- b. циклон;
- c. осадительная камера;
- d. жалюзийный золо-пылеуловитель.

61. По какой реакции происходит связывание диоксида серы при мокром известняковом способе очистки продуктов сгорания?

- a. $\text{CaCO}_3 + \text{SO}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 = \text{CaSO}_4 + \text{CO}_2$;
- b. $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{SO}_2 = \text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{CO}_2$;
- c. $\text{MgO} + \text{SO}_2 = \text{MgSO}_3$;

d. нет правильного ответа.

62. Какие существуют источники образования оксидов азота?

- a. образование NO_x из молекулярного азота воздуха при температуре выше 1300 °C;
- b. образование NO_x путем реакции молекулярного азота воздуха с углеводородными радикалами;
- c. образование NO_x из азота, содержащегося в топливе;
- d. все перечисленные выше ответы верны.

63. В каком варианте ответа все перечисленные мероприятия по снижению выбросов оксидов азота являются первичными?

- a. использование горелок с низким выбросом NO_x , рециркуляция дымовых газов, селективное каталитическое восстановление оксидов азота;
- b. ступенчатое сжигание топлива, рециркуляция дымовых газов, селективное некаталитическое восстановление оксидов азота;
- c. впрыск воды в ядро факела, селективное каталитическое восстановление оксидов азота, селективное некаталитическое восстановление оксидов азота;
- d. ступенчатая подача воздуха, рециркуляция дымовых газов, впрыск воды в ядро факела.

64. Общей жесткостью воды называется

- a. суммарное содержание в воде бикарбонат-ионов и ионов магния;
- b. суммарное содержание в воде хлорид и сульфат-ионов;
- c. суммарное содержание в воде ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} ;
- d. суммарное содержание в воде ионов Ca^{2+} и силикат-ионов.

65. Общей щелочностью воды называется

- a. сумма содержащихся в ней катионов щелочных металлов и анионов слабых кислот;
- b. сумма содержащихся в ней гидроксильных ионов и анионов слабых кислот;
- c. разность между содержанием карбонатов и бикарбонатов;
- d. разность между содержанием катионов щелочноземельных металлов и гуматов;

66. Допустимое содержание свободной углекислоты в питательной воде составляет

- a. 10 мкг/л;
- b. 20 мг/л;
- c. 30 мг-экв/л;
- d. не допускается.

67. В результате осветления на осветлительных (механических) фильтрах и Na-катионирования происходит

- a. снижение щелочности, удаление свободной углекислоты;
- b. частичное снижение солесодержания;
- c. удаление взвешенных веществ, умягчение;
- d. снижение щелочности, частичное снижение солесодержания.

68. К методам обработки воды путем осаждения относятся

- a. известкование, известково-содовый, термический методы;
- b. Na-Cl-ионирование;

- c. $\text{NH}_4\text{--Na}$ –катионирование;
- d. H –катионирование с «голодной» регенерацией фильтров.

69. Катионирование – это

- a. обмен катионов Ca^{2+} , Mg^{2+} и Fe^{2+} на катионы обрабатываемой воды;
- b. обмен катионов Na^+ , H^+ , NH_4^+ на катионы обрабатываемой воды;
- c. обмен катионов Na^+ , H^+ , NH_4^+ на анионы обрабатываемой воды;
- d. обмен ионов Cl^- , SO_4^{2-} на анионы обрабатываемой воды.

70. Анионирование – это

- a. обмен анионов OH^- , CO_3^{2-} , Cl^- на анионы, содержащиеся в обрабатываемой воде;
- b. обмен анионов OH^- , CO_3^{2-} , Cl^- на катионы, содержащиеся в обрабатываемой воде;
- c. обмен ионов Na^+ , H^+ , NH_4^+ на катионы, содержащиеся в обрабатываемой воде;
- d. обмен ионов NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-} на анионы, содержащиеся в обрабатываемой воде.

71. Внутрикотловая обработка воды – это

- a. ввод в котел кислотных реагентов, которые в сочетании с подогревом воды в котле вызывают осаждение солей жесткости;
- b. ввод в котел щелочных реагентов, которые в сочетании с подогревом воды в котле вызывают осаждение солей жесткости;
- c. ввод в котел щелочных реагентов, которые вызывают удаление углекислоты;
- d. ввод в котел кислотных реагентов, которые вызывают удаление соединений азота.

72. При H -катионировании с «голодной» регенерацией фильтров удельный расход кислоты на регенерацию

- a. в 2–2,5 раза больше теоретического;
- b. в 2–2,5 раза меньше теоретического;
- c. равен его теоретическому удельному расходу;
- d. в 1,5 раза больше теоретического.

73. На какие котлы распространяются «Правила устройства и безопасной эксплуатации паровых и водогрейных котлов»?

- a. на паровые котлы с давлением менее 0,07 МПа и водогрейные котлы с температурой воды ниже 115 °С;
- b. на паровые котлы с давлением более 0,07 МПа и водогрейные котлы с температурой воды выше 115 °С;
- c. на котлы, устанавливаемые на морских и речных судах;
- d. все варианты ответа верны.

74. Какие инструкции определяют условия безопасной и экономичной работы котлов и отдельных их элементов?

- a. технические;
- b. по технике безопасности;
- c. должностные;
- d. аварийные.

75. В каких случаях проходят стажировку лица из числа оперативного персонала?

- a. только при подготовке по новой должности;
- b. только при перерыве в работе по специальности свыше 12 месяцев;
- c. при подготовке по новой должности, либо при перерыве в работе по специальности свыше 12 месяцев;
- d. при подготовке по новой должности, либо при перерыве в работе по специальности свыше 6 месяцев.

76. Разрешается ли изменять положение задвижек, вентиля и кнопок управления на оборудовании в ходе противоаварийных тренировок?

- a. разрешается;
- b. разрешается только на резервном оборудовании;
- c. не разрешается;
- d. нет правильного ответа.

77. Установленная теплопроизводительность всех котлов в котельной составляет 12 МВт, а удельные капиталовложения равны 20 у.е/кВт. Определите величину общих капиталовложений в источник теплоснабжения.

- a. 20 у.е;
- b. 240 у.е;
- c. 600 у.е;
- d. 240000 у.е.

78. Среднечасовой отпуск теплоты котельной на нужды отопления и вентиляции составляет 100 МВт. Определите годовой отпуск теплоты на отопление и вентиляцию, если число часов использования отопления и вентиляции в год равно 5000 ч.

- a. 500000 МВт;
- b. $1,8 \cdot 10^9$ МВт;
- c. $12 \cdot 10^6$ МВт;
- d. $50 \cdot 10^9$ МВт.

79. При производстве тепловой энергии наибольшей статьей эксплуатационных издержек являются затраты

- a. на топливо;
- b. на потребляемую электроэнергию;
- c. на используемую воду;
- d. на заработную плату.

80. Общие капиталовложения в источник теплоснабжения – 1 млн. у.е. Затраты на амортизацию составляют 50 тыс. у.е/год. Определите простой срок окупаемости проекта, если величина чистой прибыли составляет 150 тыс. у.е/год.

- a. 10 лет;
- b. 17 лет;
- c. 0,2 года;
- d. 5 лет.

Объём выполненных работ, необходимый для получения зачёта по дисциплине «Котельные установки и парогенераторы».

(осенний семестр)

Для получения зачёта студент должен предоставить преподавателю на зачёте:

1. Рукописный конспект лекций в общей тетради с пронумерованными и подписанными студентом листами. Листы должны быть с полями, на которых должны быть собственные пометки и разъяснения.
2. РГР, выполненное согласно выданному варианту задания и оформленное по методическим указаниям. Объём РГР в осеннем семестре согласно пунктам «а» - «з» (стр. 10 задание и МУ...).
3. Рукописные ответы на контрольные вопросы на практических заданиях (требования – см. п.1).
4. Ответы на тесты 1 и 2 (при более 50% правильных ответов) на распечатанных бланках из МУ к СРС КУ и ПГ.

При выполнении не в полном объёме выше перечисленных пунктов возможно получение зачёта при положительных ответах на устные вопросы для самопроверки по всем темам из МУ для самостоятельной работы.

Объём выполненных работ, необходимый для получения зачёта по дисциплине «Котельные установки и парогенераторы».
(весенний семестр)

Для получения зачёта студент должен предоставить преподавателю на зачёте:

1. Рукописный конспект лекций в общей тетради с пронумерованными и подписанными студентом листами. Листы должны быть с полями, на которых должны быть собственные пометки и разъяснения.
2. Рукописный отчёт о проведённых лабораторных работах в общей тетради (требования – см. п.1).
3. РГР в полном объёме, выполненное согласно выданному варианту задания и оформленное по методическим указаниям.
4. Рукописные ответы на контрольные вопросы на практических заданиях (требования – см. п.1).
5. РГР, выполненная в полном объёме и надлежаще оформленная.
6. Ответы на тесты 1 и 2 (при более 80% правильных ответов) на распечатанных бланках из МУ к СРС КУ и ПГ.

ПРИЛОЖЕНИЕ-А

Таблица контроля ответов тестов-1 КУ и ПГ.

№ вопроса	№ ответа					
	1	2	3	4	5	6
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						
18						
19						
20						
21						
22						
23						
24						
25						
26						
27						
28						
29						
30						
31						

Необходимо распечатать бланк и в ячейках соответствующих правильному ответу поставить галочку.

Студент (ФИО): _____ Группа _____ Дата _____ 201

Подпись _____

Число правильных ответов: _____

Оценка: _____

ПОДПИСЬ ПРЕПОДАВАТЕЛЯ _____

ПРИЛОЖЕНИЕ-Б

Таблица контроля ответов тестов-2 КУ и ПГ.

№ вопроса	Индекс правильного ответа				№ вопроса	Индекс правильного ответа			
	a	b	c	d		a	b	c	d
1					41				
2					42				
3					43				
4					44				
5					45				
6					46				
7					47				
8					48				
9					49				
10					50				
11					51				
12					52				
13					53				
14					54				
15					55				
16					56				
17					57				
18					58				
19					59				
20					60				
21					61				
22					62				
23					63				
24					64				
25					65				
26					66				
27					67				
28					68				
29					69				
30					70				
31					71				
32					72				
33					73				
34					74				
35					75				
36					76				
37					77				
38					78				
39					79				
40					80				

Необходимо распечатать бланк и в ячейках соответствующих правильному ответу поставить галочку.

Студент (ФИО): _____ Группа _____ Дата _____ 2013

Подпись _____

Число правильных ответов: _____ ПОДПИСЬ ПРЕПОДОВАТЕЛЯ

Оценка: _____

Приложение В

Основная надпись и дополнительные графы для текстовых конструкторских документов (первый и заглавный лист), Форма 2, ГОСТ 2.104-2006.

Technical drawing of a title block (Forma 2) according to GOST 2.104-2006. The drawing shows a rectangular frame with various dimensions and fields for text. The total width is 287 and the total height is 185. The drawing includes fields for 'Котёл' (Boiler), 'Тепловой расчёт' (Thermal calculation), 'МГТУ К-ра «С,ТЭиТ»', and 'Формат' (Format). It also includes a table for 'Копировал' (Copied) and 'Формат' (Format).

Копировал	Формат
1	2
3	4
5	6
7	8
9	10
11	12
13	14
15	16
17	18
19	20
21	22
23	24
25	26
27	28
29	30
31	32
33	34
35	36
37	38
39	40
41	42
43	44
45	46
47	48
49	50
51	52
53	54
55	56
57	58
59	60
61	62
63	64
65	66
67	68
69	70
71	72
73	74
75	76
77	78
79	80
81	82
83	84
85	86
87	88
89	90
91	92
93	94
95	96
97	98
99	100

В поле (1) пишется: **Котёл ДЕ-4-14ГМ тепловой расчёт** (марка котла по РГЗ)

В поле (2) жирным шрифтом 16 пишется шифр документа:

ТиТ-15о.КУиПГ.КП.12.000ПЗ, где перед первой точкой номер группы, **12** - это вариант КП.

В поле (9) пишется: **МГТУ К-ра «С,ТЭиТ»**.

Боковые штампы не обязательны.

Приложение Г

Основная надпись и дополнительные графы для текстовых конструкторских документов (последующие листы), Форма 2а, ГОСТ 2.104-2006.

The diagram illustrates the layout of a title block for a design document, conforming to Form 2a of GOST 2.104-2006. It includes various fields for metadata and a large area for the main drawing or text.

Fields and Dimensions:

- Field (26):** A rectangular area at the top left with a width of 70 and a height of 14.
- Field (27):** A vertical column on the left side, divided into five sections with heights of 20, 35, 25, 25, and 35. The total height is 140. The width is 20.
- Field (28):** A small rectangular area at the bottom left with a width of 7 and a height of 10.
- Field (29):** A small rectangular area at the bottom left with a width of 10 and a height of 10.
- Field (30):** A small rectangular area at the bottom left with a width of 23 and a height of 15.
- Field (31):** A small rectangular area at the bottom left with a width of 15 and a height of 10.
- Field (32):** A small rectangular area at the bottom right with a width of 10 and a height of 10.
- Field (2):** A large rectangular area in the center, with a width of 185 and a height of 110.
- Field (3):** A small rectangular area at the bottom right with a width of 10 and a height of 10.
- Field (4):** A small rectangular area at the bottom right with a width of 10 and a height of 10.
- Field (5):** A small rectangular area at the bottom right with a width of 10 and a height of 10.
- Field (6):** A small rectangular area at the bottom right with a width of 10 and a height of 10.
- Field (7):** A small rectangular area at the bottom right with a width of 10 and a height of 10.
- Field (8):** A small rectangular area at the bottom right with a width of 10 and a height of 10.
- Field (9):** A small rectangular area at the bottom right with a width of 10 and a height of 10.
- Field (10):** A small rectangular area at the bottom right with a width of 10 and a height of 10.
- Field (11):** A small rectangular area at the bottom right with a width of 10 and a height of 10.
- Field (12):** A small rectangular area at the bottom right with a width of 10 and a height of 10.
- Field (13):** A small rectangular area at the bottom right with a width of 10 and a height of 10.
- Field (14):** A small rectangular area at the bottom right with a width of 10 and a height of 10.
- Field (15):** A small rectangular area at the bottom right with a width of 10 and a height of 10.
- Field (16):** A small rectangular area at the bottom right with a width of 10 and a height of 10.
- Field (17):** A small rectangular area at the bottom right with a width of 10 and a height of 10.
- Field (18):** A small rectangular area at the bottom right with a width of 10 and a height of 10.
- Field (19):** A small rectangular area at the bottom right with a width of 10 and a height of 10.
- Field (20):** A small rectangular area at the bottom right with a width of 10 and a height of 10.
- Field (21):** A small rectangular area at the bottom right with a width of 10 and a height of 10.
- Field (22):** A small rectangular area at the bottom right with a width of 10 and a height of 10.
- Field (23):** A small rectangular area at the bottom right with a width of 10 and a height of 10.
- Field (24):** A small rectangular area at the bottom right with a width of 10 and a height of 10.
- Field (25):** A small rectangular area at the bottom right with a width of 10 and a height of 10.
- Field (26):** A small rectangular area at the bottom right with a width of 10 and a height of 10.
- Field (27):** A small rectangular area at the bottom right with a width of 10 and a height of 10.
- Field (28):** A small rectangular area at the bottom right with a width of 10 and a height of 10.
- Field (29):** A small rectangular area at the bottom right with a width of 10 and a height of 10.
- Field (30):** A small rectangular area at the bottom right with a width of 10 and a height of 10.
- Field (31):** A small rectangular area at the bottom right with a width of 10 and a height of 10.
- Field (32):** A small rectangular area at the bottom right with a width of 10 and a height of 10.

В поле (2) жирным шрифтом 16 пишется шифр документа:

ТпТ-15о.КУиПГ.КП.12.000ПЗ как и на главном листе.

Приложение Д

ПРАКТИКУМ. ПРИМЕРЫ И ЗАДАЧИ**1. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ТОПЛИВ****1.1. Состав топлива**

Элементарный состав твердых и жидких топлив записывается в виде суммы содержания в них углерода С, водорода Н, кислорода О, серы S, азота N, золы А и влаги W (в процентах). В зависимости от того, какая масса топлива берется в расчет, каждому обозначению присваивается соответствующий надстрочный индекс:

– горючая масса:

$$C^r + H^r + O^r + S^r + N^r = 100 \%;$$

– сухая масса:

$$C^c + H^c + O^c + S^c + N^c + A^c = 100 \%;$$

– рабочая масса:

$$C^p + H^p + O^p + S^p + N^p + A^p + W^p = 100 \%.$$

Пересчет элементарного состава одной массы топлива на другую производится при помощи коэффициентов, приведенных в таблице 1.1.

Таблица 1.1 - Коэффициенты для пересчета элементарного состава топлив

Заданная масса топлива	Искомая масса топлива		
	рабочая	сухая	горючая
Рабочая	1	$100/(100 - W^p)$	$100/(100 - W^p - A^p)$
Сухая	$(100 - W^p)/100$	1	$100/(100 - A^c)$
Горючая	$(100 - W^p - A^p)/100$	$(100 - A^c)/100$	1

Пересчет элементарного состава топлива с одной влажности (зольности) на другую проводится по формуле:

$$x_1^p = x^p \frac{100 - W_1^p}{100 - W^p}; \quad x_1^p = x^p \frac{100 - A_1^p}{100 - A^p}. \quad (1.1)$$

ПРИМЕРЫ**Пример 1.1.**

При лабораторных исследованиях был получен следующий элементный состав кузнецкого угля марки СС на горючую массу: $C^r = 84 \%$; $H^r = 4,5 \%$; $N^r = 2 \%$; $O^r = 9 \%$; $S^r = 0,5 \%$. Влажность и зольность на рабочую массу равны

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

Решение.

Для пересчета с горючей массы на рабочую используем коэффициент пересчета:

$$K = (100 - W^p - A^p)/100 = (100 - 12 - 11,4)/100 = 0,766.$$

Отсюда получаем:

$$C^p = C^r K = 84 \cdot 0,766 = 64,34 \%;$$

$$H^p = H^r K = 4,5 \cdot 0,766 = 3,45 \%;$$

$$N^p = N^r K = 2 \cdot 0,766 = 1,53 \%;$$

$$O^p = O^r K = 9 \cdot 0,766 = 6,9 \%;$$

$$S^p = S^r K = 0,5 \cdot 0,766 = 0,38 \%.$$

Проверка:

Суммарный элементный состав топлива на рабочую массу:

$$64,34 + 3,45 + 1,53 + 6,9 + 0,38 + 12 + 11,4 = 100 \%.$$

Пример 1.2.

Задан следующий элементный состав на горючую массу кузнецкого угля марки СС пониженного качества: $C^r = 80,2 \%$; $H^r = 3,3 \%$; $N^r = 2,1 \%$; $O^r = 14 \%$; $S^r = 0,4 \%$. Известно, что зольность сухой массы $A^c = 22,12 \%$. Определить элементный состав топлива на рабочую массу при $W^p = 15 \%$.

Решение.

В соответствии с таблицей 1.1 коэффициент пересчета масс имеет вид $K = (100 - W^p - A^p)/100$. Для его использования пересчитаем зольность с сухой массы на рабочую:

$$A^p = A^c(100 - W^p)/100 = 22,12(100 - 15)/100 = 18,8 \%.$$

Отсюда получаем:

$$K = (100 - W^p - A^p)/100 = (100 - 15 - 18,8)/100 = 0,662.$$

Определяем элементный состав на рабочую массу:

$$C^p = C^r K = 80,2 \cdot 0,662 = 53,09 \%;$$

$$O^p = O^r K = 14 \cdot 0,662 = 9,27 \%;$$

$$H^p = H^r K = 3,3 \cdot 0,662 = 2,18 \%;$$

$$N^p = N^r K = 2,1 \cdot 0,662 = 1,39 \%;$$

$$S^p = S^r K = 0,4 \cdot 0,662 = 0,27 \%.$$

Проверяем полный элементный состав рабочей массы

$$53,09 + 2,18 + 9,27 + 1,39 + 0,27 + 18,8 + 15 = 100 \%.$$

ЗАДАЧИ

Задача 1.1.

Сушка березовского угля с составом рабочей массы: $W^p = 33 \%$; $A^p = 4,7 \%$; $S^p = 0,2 \%$; $C^p = 44,3 \%$; $H^p = 3 \%$; $N^p = 0,4 \%$; $O^p = 14,4 \%$ производится при разомкнутой схеме. Определить состав рабочей массы подсушенного до $W^p = 10 \%$ топлива. (Пояснение. При разомкнутой схеме приготовления сушильные газы сбрасываются в атмосферу, а при замкнутой – в топку вместе с угольной пылью).

Задача 1.2.

Содержание углерода в рабочей массе экибастузского угля составляет $C^p = 43,4 \%$ при $W^p = 7 \%$ и $A^p = 38,1 \%$. Определить содержание углерода в сухой массе при увеличении рабочей зольности топлива до $A^p = 45 \%$.

Задача 1.3.

Определить состав горючей массы нерюнгринского угля, если известен состав рабочей массы: $W^p = 9,5 \%$; $A^p = 12,7 \%$; $S^p = 0,2 \%$; $C^p = 66,1 \%$; $H^p = 3,3 \%$; $N^p = 0,7 \%$; $O^p = 7,5 \%$.

Задача 1.4.

Определить состав рабочей массы топлива, если в таблицах указан следующий состав $C^p = 38,6 \%$; $H^p = 2,6 \%$; $S^p = 3,8 \%$; $N^p = 0,8 \%$; $O^p = 3,1 \%$; $W^p = 11,0 \%$; $A^p = 40,1 \%$, а технический анализ показал, что действительная влажность составляет $W_{p1}^p = 16 \%$

1.2. Теплота сгорания топлива

Различают высшую Q_v и низшую Q_n теплоту сгорания топлива.

Высшая теплота сгорания топлива Q_v определяется по величине теплоты сгорания в калориметрической бомбе Q_b , исправленной с учетом кислотообразования при сгорании, ккал/кг:

$$Q_v = Q_b - 22,5S_b - 0,0015Q_b,$$

где $22,5S_b$ – теплота, выделяющаяся при окислении продуктов сгоревшей в бомбе серы S_b , %, от SO_2 и растворении последней в воде;

$0,0015Q_b$ – теплота образования азотной кислоты в бомбе для каменных и бурых углей.

Высшая теплота отличается от низшей прибавкой теплоты, выделяемой при конденсации паров, входящих в состав дымовых газов. Все расчеты экономичности агрегата ведутся по низшей теплоте сгорания.

Низшая и высшая теплота сгорания, кДж/кг, связаны зависимостью:

$$Q_n = Q_v - 25,1(9H + W). \quad (1.3)$$

Пересчет теплоты сгорания топлива:

$$Q_n^p = Q_v^p - 25,1(9H^p + W^p); \quad (1.4)$$

$$Q_n^c = Q_v^c - 226 H^c; \quad (1.5)$$

$$Q_n^r = Q_v^r - 226 H^r; \quad (1.6)$$

$$Q_{\text{н}}^{\text{p}} = Q_{\text{н}}^{\text{с}} (100 - W^{\text{p}})/100 - 25,1W^{\text{p}}; \quad (1.7)$$

$$Q_{\text{н}}^{\text{p}} = Q_{\text{н}}^{\text{г}} (100 - W^{\text{p}} - A^{\text{p}})/100 - 25,1W^{\text{p}}. \quad (1.8)$$

Здесь верхние индексы «р», «с», «г» относятся к рабочей, сухой и горючей массам топлива.

При изменении влажности от W_1^{p} до W_2^{p} или зольности топлива от A_1^{p} до A_2^{p} для определения теплоты сгорания используются зависимости:

$$Q_{\text{н}2}^{\text{p}} = (Q_{\text{н}1}^{\text{p}} + 25,1 W_1^{\text{p}})(100 - W_2^{\text{p}})/(100 - W_1^{\text{p}}) - 25,1 W_2^{\text{p}}; \quad (1.9)$$

$$Q_{\text{н}2}^{\text{p}} = Q_{\text{н}1}^{\text{p}} (100 - A_2^{\text{p}})/(100 - A_1^{\text{p}}). \quad (1.10)$$

При одновременном изменении влажности и зольности:

$$Q_{\text{н}2}^{\text{p}} = (Q_{\text{н}1}^{\text{p}} + 25,1 W_1^{\text{p}})(100 - W_2^{\text{p}} - A_2^{\text{p}})/(100 - W_1^{\text{p}} - A_1^{\text{p}}) - 25,1 W_2^{\text{p}} \quad (1.11)$$

Для приближенных расчетов, а также для проверки элементного состава топлива низшую теплоту сгорания $Q_{\text{н}}^{\text{п}}$, кДж/кг, определяют по формуле Менделеева:

$$Q_{\text{н}}^{\text{п}} = 339C^{\text{п}} + 1030H^{\text{п}} - 109(O^{\text{п}} - S^{\text{п}}) - 25,1W^{\text{п}}; \quad (1.12)$$

$$Q_{\text{н}}^{\text{г}} = 339C^{\text{г}} + 1030H^{\text{г}} - 109(O^{\text{г}} - S^{\text{г}}). \quad (1.13)$$

Расхождение рассчитанной $Q_{\text{н}}^{\text{г}}$ с величиной, полученной в калориметрической бомбе, не должно превышать ± 628 кДж/кг для топлив с зольностью менее 25 % и ± 837 кДж/кг – для других топлив.

Теплота сгорания газообразного топлива принимается по данным калориметрического анализа. При отсутствии таких данных теплота сгорания 1 м³ газа при нормальных условиях подсчитывается по формуле:

$$Q_{\text{н}}^{\text{с}} = 0,01[Q_{\text{с.в}}H_2S + Q_{\text{о.у}}CO + Q_{\text{вод}}H_2 + \Sigma(Q_{\text{у.в}}C_mH_n)], \quad (1.14)$$

где $Q_{\text{с.в}}$, $Q_{\text{о.у}}$ и т.д. – теплота сгорания отдельных составляющих, входящих в состав газообразного топлива, кДж/м³; последние должны приниматься по [4] либо по теплотехническим справочникам.

Вместо формулы (1.14), для определения теплоты сгорания 1 м³ чистого сухого газа при нормальных условиях можно пользоваться следующим выражением, кДж/м³ [5]:

$$Q_{\text{н}}^{\text{с}} = 126,4CO + 108,2H_2 + 358,5CH_4 + 592C_2H_4 + 638,5C_2H_6 + 859,8C_3H_8 + 913C_3H_9 + 1404C_6H_6 + 1134C_4H_8 + 1187C_4H_{10} + 1462 C_5H_{12} + 234,5H_2S.$$

При сжигании смеси двух твердых или жидких топлив, заданных массовыми долями (g_1 – массовая доля одного из топлив в смеси), теплота сгорания 1 кг смеси подсчитывается по формуле:

$$Q_{\text{н}}^{\text{п}} = Q_{\text{н}}^{\text{п}} g_1 + Q_{\text{н}}^{\text{п}} (1 - g_1). \quad (1.15)$$

Если же смесь задана в долях по тепловыделению каждого топлива (q_1 – доля по тепловыделению одного из топлив), то для перехода к массовым долям используется зависимость:

$$g_1 = q_1 Q_{\text{н}2}^{\text{п}} / [q_1 Q_{\text{н}2}^{\text{п}} + (1 - q_1) Q_{\text{н}1}^{\text{п}}]. \quad (1.16)$$

При сжигании смеси твердого или жидкого топлива с газообразным расчет ведется на 1 кг твердого или жидкого топлива с учетом количества газа $x \text{ м}^3$, приходящегося на 1 кг твердого или жидкого топлива:

$$Q_{\text{н}}^{\text{п}} = Q_{\text{н1}}^{\text{п}} + x Q_{\text{н2}}^{\text{п}}. \quad (1.17)$$

Если смесь задана в долях тепловыделения q_1 , то количество газа, м^3 , приходящегося на 1 кг твердого или жидкого топлива, может быть найдено по зависимости:

$$x = (1 - q_1) Q_{\text{н1}}^{\text{п}} / (q_1 Q_{\text{н2}}^{\text{п}}). \quad (1.18)$$

Жаропроизводительность топлива – это максимальная температура, развиваемая при полном сгорании топлива в теоретически необходимом объеме воздуха при температуре топлива и воздуха, равной 0°C .

Условное топливо характеризуется низшей теплотой сгорания $7000 \text{ ккал/кг} = 29,3 \text{ кДж/кг}$.

ПРИМЕРЫ

Пример 1.3.

Для кузнецкого угля (элементный состав см. в примере 1.1) определить $Q_{\text{н}}^{\text{с}}$, $Q_{\text{н}}^{\text{г}}$, $Q_{\text{в}}^{\text{п}}$, если низшая теплота сгорания рабочей массы равна $Q_{\text{н}}^{\text{п}} = 23990 \text{ кДж/кг}$.

Решение.

$$Q_{\text{в}}^{\text{п}} = Q_{\text{н}}^{\text{п}} + 25,1(W^{\text{п}} + 9H^{\text{п}}) = 23990 + 25,1(12 + 9 \cdot 3,45) = 25071 \text{ кДж/кг};$$

$$Q_{\text{н}}^{\text{с}} = (Q_{\text{н}}^{\text{п}} + 25,1 W^{\text{п}})100/(100 - W^{\text{п}}) - 226H^{\text{с}} = (23990 + 25,1 \cdot 12)100/(100 - 12) - 226 \cdot 3,92 = 27604 - 886 = 26718 \text{ кДж/кг};$$

$$Q_{\text{н}}^{\text{г}} = (Q_{\text{н}}^{\text{п}} + 25,1 W^{\text{п}})100/(100 - W^{\text{п}} - A^{\text{п}}) - 226 H^{\text{г}} = (23990 + 25,1 \cdot 12)100/(100 - 12 - 11,4) - 226 \cdot 4,5 = 30695 \text{ кДж/кг}.$$

Пример 1.4.

Насколько увеличивается высшая и низшая теплота сгорания рабочей массы угольной пыли назаровского угля ($W^{\text{п}} = 39\%$, $H^{\text{п}} = 2,6\%$) при переходе от замкнутой схемы сушки к разомкнутой с окончательной влажностью пыли $W^{\text{пл}} = 10\%$. Исходная низшая теплота сгорания рабочей массы топлива равна $Q_{\text{н}}^{\text{п}} = 13020 \text{ кДж/кг}$.

Решение.

Определяем низшую теплоту сгорания пыли:

$$Q_{\text{н}}^{\text{пл}} = (Q_{\text{н}}^{\text{п}} + 25,1 W^{\text{п}})(100 - W^{\text{пл}})/(100 - W^{\text{п}}) - 25,1 W^{\text{пл}} = (13020 + 25,1 \cdot 39)(100 - 10)/(100 - 39) - 25,1 \cdot 10 = 20403 \text{ кДж/кг}.$$

Находим высшую теплоту сгорания исходного топлива и пыли:

$$Q_{\text{в}}^{\text{п}} = Q_{\text{н}}^{\text{п}} + 25,1(9H^{\text{п}} + W^{\text{п}}) = 13020 + 25,1(9 \cdot 2,6 + 39) = 14586 \text{ кДж/кг};$$

$$Q_{\text{в}}^{\text{пл}} = Q_{\text{в}}^{\text{п}} (100 - W^{\text{пл}})/(100 - W^{\text{п}}) = 14586(100 - 10)/(100 - 39) = 21520 \text{ кДж/кг}.$$

Пример 1.5.

Определить теплоту сгорания газообразного топлива, имеющего следующий состав: метан $\text{CH}_4 = 94 \%$; этан $\text{C}_2\text{H}_6 = 2,8 \%$; пропан $\text{C}_3\text{H}_8 = 0,4\%$; бутан $\text{C}_4\text{H}_{10} = 0,3 \%$; пентан $\text{C}_5\text{H}_{12} = 0,1 \%$; азот $\text{N}_2 = 2 \%$; двуокись углерода $\text{CO}_2 = 0,4 \%$. Низшая теплота сгорания отдельных газовых составляющих имеет значения [2]: для метана 35818 кДж/м^3 ; для этана 63248 кДж/м^3 ; для пропана 91251 кДж/м^3 ; для бутана 118646 кДж/м^3 ; для пентана 146077 кДж/м^3 .

Решение.

Определим теплоту сгорания газа по формуле (1.14):

$$Q_{\text{в}}^{\text{с}} = 0,01 (0 + 0 + 0 + 35818 \cdot 94 + 63248 \cdot 2,8 + 91251 \cdot 0,4 + 118646 \cdot 0,3 + 146077 \cdot 0,1) = 36321 \text{ кДж/м}^3.$$

Пример 1.6.

При работе на сниженных нагрузках в топке котла сжигается $G_1 = 25 \text{ т/ч}$ твердого топлива с $Q_{\text{н1}}^{\text{п}} = 20934 \text{ кДж/кг}$ и $G_2 = 15 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{ч}$ газа с $Q_{\text{н2}}^{\text{п}} = 40 \cdot 10^3 \text{ кДж/кг}$. Определить условную теплоту сгорания смеси топлив $Q_{\text{н.усл.}}^{\text{п}}$.

Решение.

При сжигании твердого или жидкого топлива в смеси с газообразным расчет ведется по условной теплоте сгорания, отнесенной к 1 кг твердого или жидкого топлива:

$$Q_{\text{н.усл.}}^{\text{п}} = Q_{\text{н1}}^{\text{п}} + x Q_{\text{н2}}^{\text{п}},$$

где x – количество газа, м^3 , приходящегося на 1 кг твердого или жидкого топлива:

$$x = G_2 / G_1 = 15 \cdot 10^3 / (25 \cdot 10^3) = 0,6 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Тогда

$$Q_{\text{н.усл.}}^{\text{п}} = 20934 + 0,6 \cdot 40 \cdot 10^3 = 44934 \text{ кДж/кг}.$$

ЗАДАЧИ**Задача 1.5.**

Проверить правильность определения элементного состава топлива, если известны данные лабораторных исследований: $\text{C}^{\text{с}} = 62,17 \%$; $\text{H}^{\text{с}} = 4,1 \%$; $\text{O}^{\text{с}} = 5,17 \%$; $\text{N}^{\text{с}} = 1,29 \%$; $\text{S}^{\text{с}} = 3,27\%$, а также $\text{A}^{\text{п}} = 22,1 \%$; $\text{W}^{\text{п}} = 7,9 \%$; $Q_{\text{н}}^{\text{п}} = 22776 \text{ кДж/кг}$.

Задача 1.6.

При открытом способе добычи экибастузского угля произошло увеличение его зольности с 38,1 до 48 % в рабочей массе и влажности с 7 до 11 %. Определить, насколько изменится низшая теплота сгорания угля, если ее

исходное значение составляло при этом $Q^p_n = 16747$ кДж/кг.

Задача 1.7.

Определить теплоту сгорания смеси твердого топлива с низшей теплотой сгорания $Q^p_{1н} = 13020$ кДж/кг и мазута с $Q^p_{2н} = 38800$ кДж/кг при тепловой доле твердого топлива в смеси $q_1 = 0,3$.

Задача 1.8.

На ТЭЦ сжигается доменный газ и мазут. Доля тепловыделения доменного газа $q_2 = 0,6$. Определить количество газа на 1 кг мазута и теплоту сгорания смеси на 1 кг мазута. Мазут имеет $Q^p_{1н} = 38870$ кДж/кг, а доменный газ $Q^p_{2н} = 3710$ кДж/м³.

2. РАСЧЕТЫ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ТОПЛИВА

2.1. Теоретический расход воздуха

Для твердых и жидких топлив:

– объемный расход воздуха, м³/кг,

$$V^0 = 0,0889(C^p + 0,375S^p) + 0,265H^p - 0,0333O^p; \quad (2.1)$$

– массовый расход воздуха, кг/кг,

$$L^0 = 0,115(C^p + 0,375S^p) + 0,342H^p - 0,0431O^p. \quad (2.2)$$

При сжигании природного газа объемный расход, м³/м³:

$$V^0 = 0,0476[\Sigma (m + n/4)C_mH_n + 0,5(CO + H_2) + 1,5H_2S - O_2] \quad (2.3)$$

Значения объема воздуха, м³, рассчитываются при нормальных условиях, т.е. при 0 °С и 760 мм рт. ст.

Для смеси двух однородных топлив (твердых, жидких или газообразных) объемы воздуха определяются по формуле:

$$V^0 = g'V^{0'} + (1 - g')V^{0''}, \quad (2.4)$$

где g' – массовая доля первого топлива в смеси;

$V^{0'}$, $V^{0''}$ – соответственно объемные расходы воздуха для первого и второго топлив.

Для смеси твердого или жидкого топлива с газообразным:

$$V^0 = V^{0'} + xV^{0''}, \quad (2.5)$$

где x – количество газа в м³ приходящего на 1 кг твердого или жидкого топлива.

ПРИМЕРЫ

Пример 2.1.

Определить объемный и массовый расход воздуха для топлива, приведенного в примере 1.1.

Решение.

Определяем теоретическое количество сухого воздуха, необходимого для полного сжигания топлива ($\alpha = 1$) по (2.1) и (2.2).

Находим:

$$V^0 = 0,0889(64,34 + 0,375 \cdot 0,38) + 0,265 \cdot 3,45 - 0,0333 \cdot 6,9 = 6,42 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$L^0 = 0,115(64,34 + 0,375 \cdot 0,38) + 0,342 \cdot 3,45 - 0,0431 \cdot 6,9 = 8,3 \text{ кг/кг}.$$

Пример 2.2.

Определить объемный расход воздуха для сжигания природного газа Бухарского месторождения, имеющего горючий состав: метан $\text{CH}_4 = 94,9 \%$; этан $\text{C}_2\text{H}_6 = 3,2 \%$; пропан $\text{C}_3\text{H}_8 = 0,4 \%$; бутан $\text{C}_4\text{H}_{10} = 0,1 \%$; пентан $\text{C}_5\text{H}_{12} = 0,1 \%$.

Решение.

На основании состава топлива по формуле (2.3) находим:

$$V^0 = 0,0476[(1 + 4/4)94,9 + (2 + 6/4)3,2 + (3 + 8/4)0,4 + (4 + 10/4)0,1 + (5 + 12/4)0,1] = 9,73 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Пример 2.3.

Определить теоретически необходимое количество воздуха при сжигании смеси твердого и газообразного топлива (кузнецкого угля марки СС и бухарского природного газа), элементный состав которых приведен в примерах 1.1 и 2.2. Доля природного газа в общем тепловыделении $q'' = 0,4$, их низшие теплоты сгорания соответственно равны $Q_{\text{н}}^{\text{п}} = 27420 \text{ кДж/кг}$ и $Q_{\text{н}}^{\text{г}} = 36720 \text{ кДж/м}^3$.

Решение.

Для смеси твердого (или жидкого) и газообразного топлива теоретически необходимое для горения объемное количество воздуха определяется соотношением (2.4), а количество газа, приходящееся на 1 кг твердого топлива, находится по (1.18). Доля твердого топлива в тепловыделении смеси топлив:

$$q' = 1 - q'' = 1 - 0,4 = 0,6;$$

$$x = (1 - 0,6)27420 / (0,6 \cdot 36720) = 0,498;$$

$$V^0 = 6,42 + 0,498 \cdot 9,73 = 11,26 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

ЗАДАЧИ**Задача 2.1.**

Определить, насколько изменится теоретически необходимый объем воздуха при переходе на сжигание сушонки по разомкнутому циклу ($W^{\text{пл}} = 10 \%$). Исходное топливо – назаровский бурый уголь состава: $W^{\text{п}} = 39 \%$; $A^{\text{п}} = 7,3 \%$; $S^{\text{п}} = 0,4 \%$; $C^{\text{п}} = 37,6 \%$; $H^{\text{п}} = 2,6 \%$; $N^{\text{п}} = 0,4 \%$; $O^{\text{п}} = 12,7 \%$.

Задача 2.2.

Определить, насколько изменится теоретически необходимый объем воздуха, если зольность угля марки АШ (состав: $W^p = 8,5 \%$; $A^p = 30,2 \%$; $S^p = 1,6 \%$; $C^p = 56,4 \%$; $H^p = 3,6 \%$; $N^p = 1,7 \%$; $O^p = 5,9 \%$) увеличится до 35% .

Задача 2.3.

Определить, как изменится теоретически необходимый объем воздуха, если для условий примера 2.3 доля природного газа в общем тепловыделении увеличится до $q'' = 0,6$.

2.2. Состав и объем продуктов сгорания

При сжигании твердого и жидкого топлива образуются следующие объемы продуктов сгорания, $\text{м}^3/\text{кг}$:

$$- \text{ для трехатомных газов: } V_{\text{RO}} = 0,01866 (C^p + 0,375S^p); \quad (2.6)$$

$$- \text{ для азота: } V_N^0 = 0,79V^0 + 0,008N^p; \quad (2.7)$$

- для паров воды:

$$V_{\text{HO}}^0 = 0,111H^p + 0,0124W^p + 0,0161V^0 + 1,24G_\phi, \quad (2.8)$$

где G_ϕ – расход пара на распыл 1 кг мазута, $\text{кг}/\text{кг}$.

Объем дымовых газов (продуктов сгорания):

$$V_\Gamma^0 = V_{\text{RO}} + V_N^0 + V_{\text{HO}}^0. \quad (2.9)$$

При сжигании сланцев объем трехатомных газов за счет карбонатной углекислоты составит:

$$V_{\text{ROK}} = V_{\text{RO}} + 0,509(\text{CO}_2)_\text{к}/100, \quad (2.10)$$

где $(\text{CO}_2)_\text{к}$ – двуокись углерода в карбонатах, %.

Тогда полный объем газов при $\alpha = 1$ составит:

$$V_{\Gamma, \text{к}}^0 = V_\Gamma^0 + 0,509(\text{CO}_2)_\text{к}/100, \quad (2.11)$$

где V_Γ^0 определяется по (2.9).

При сжигании природного газа объем продуктов сгорания, $\text{м}^3/\text{м}^3$:

$$V_N^0 = 0,79 V^0 + 0,01N_2; \quad (2.12)$$

$$V_{\text{RO}} = 0,01(\Sigma m C_m H_n + \text{CO}_2 + \text{CO} + \text{H}_2\text{S}); \quad (2.13)$$

$$V_{\text{HO}}^0 = 0,01(\Sigma 0,5n C_m H_n + \text{H}_2\text{S} + \text{H}_2 + 0,124d_\Gamma + 0,0161V^0),$$

где d_Γ – влагосодержание газообразного топлива, которое в зависимости от температуры газа принимает значения:

$t, ^\circ\text{C}$	0	10	20
$d_\Gamma, \text{г}/\text{м}^3$	5,0	10,1	19,4

Действительные объемы воздуха и продуктов сгорания, $\text{м}^3/\text{кг}$, при коэффициенте избытка воздуха α :

$$V_B = \alpha V^0; \quad (2.14)$$

$$V_{HO} = V^0_{HO} + 0,0161(\alpha - 1)V^0; \quad (2.15)$$

$$V_r = V^0_r + 1,0161(\alpha - 1)V^0. \quad (2.16)$$

Масса продуктов сгорания, кг/кг, при сжигании твердого и жидкого топлива:

$$G_r = 1 - A_p/100 + 1,306\alpha V^0. \quad (2.17)$$

Плотность продуктов сгорания при сжигании газообразного топлива, кг/м³:

$$\rho^c_{r,тл} = 0,01[1,96CO_2 + 1,52H_2S + 1,25N_2 + 1,43O_2 + 1,25CO + 0,0899H_2 + \\ + \Sigma (0,536m + 0,045n)C_mH_n]; \quad (2.18)$$

$$G_r = \rho^c_{r,тл} + d_r \cdot 10^{-3} + 1,306 \alpha V^0. \quad (2.19)$$

Объемные доли трехатомных газов, водяного пара и безразмерная концентрация золы в продуктах сгорания:

$$R_{RO} = V_{RO}/V_r; \quad (2.20)$$

$$R_{HO} = V_{HO}/V_r; \quad (2.21)$$

$$\mu_{зл} = A^p \cdot a_{yh}/(G_r \cdot 100), \quad (2.22)$$

где a_{yh} – доля золы, уносимой продуктами сгорания. Для твердого шлакоудаления $a_{yh} = 0,95$.

Объем продуктов сгорания при рециркуляции газов, м³/кг:

$$V_{r,rc} = V_r + rV_{r,отб}, \quad (2.23)$$

где $V_{r,отб}$ – объем продуктов сгорания в сечении за местом отбора;

r – доля отбираемых газов на рециркуляцию.

Избытки воздуха в газовом тракте при известном значении избытка на выходе из топки α_t составляют: в объеме топки в зоне горелок $\alpha_{гор} = \alpha_t - \Delta\alpha_t$; в газоходе за топкой $\alpha_i = \alpha_t + \Sigma \Delta\alpha_i$,

где $\Delta\alpha_t$, $\Delta\alpha_i$ – присосы воздуха в топке и в поверхностях за топкой.

Относительный избыток горячего воздуха в горелке при сжигании пылевидного твердого топлива составляет:

$$\beta_{гор} = \alpha_{гор} - \Delta\alpha_{пл},$$

где $\Delta\alpha_{пл}$ – присосы воздуха в пылеприготовительной установке.

Переход к объему газа при нормальных условиях V_n производится по формуле:

$$V_n = V p T_n / (T p_n),$$

где V , p , T – соответственно объем, давление и температура при заданных (рабочих) условиях;

T_n , p_n – температура 273 К и давление 1 кгс/см² для нормальных условий.

ПРИМЕРЫ

Пример 2.4.

Определить объемы продуктов сгорания для кузнецкого угля марки СС, приведенного в примере 1.1.

Решение.

Определяем составляющие продуктов сгорания по формулам (2.6)–(2.8):

$$V_{\text{RO}} = 0,01866 (64,34 + 0,375 \cdot 0,38) = 1,2 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{HO}}^0 = 0,111 \cdot 3,45 + 0,0124 \cdot 12 + 0,0161 \cdot 6,417 = 0,64 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{N}}^0 = 0,79 \cdot 6,417 + 0,008 \cdot 1,53 = 5,08 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Суммарный объем продуктов сгорания по формуле (2.9);

$$V_{\text{r}}^0 = 1,2 + 0,64 + 5,08 = 6,92 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Пример 2.5.

Как изменится объем и объемные доли трехатомных продуктов сгорания и водяных паров при сжигании подмосковного бурого угля (состав: $W^{\text{p}} = 32 \%$; $A^{\text{p}} = 28,6 \%$; $S^{\text{p}} = 2,7 \%$; $C^{\text{p}} = 26 \%$; $H^{\text{p}} = 2,1 \%$; $N^{\text{p}} = 0,4 \%$; $O^{\text{p}} = 8,2\%$) при избытке воздуха $\alpha = 1,2$, если его влажность увеличилась до 40 %?

Решение.

Коэффициент пересчета на новую рабочую влажность:

$$K = (100 - W_2^{\text{p}}) / (100 - W_1^{\text{p}}) = (100 - 40) / (100 - 32) = 0,882.$$

Отсюда:

$$A_2^{\text{p}} = 28,6 \cdot 0,882 = 25,24 \%;$$

$$S_2^{\text{p}} = 2,7 \cdot 0,882 = 2,38 \%;$$

$$C_2^{\text{p}} = 26 \cdot 0,882 = 22,94 \%;$$

$$H_2^{\text{p}} = 2,1 \cdot 0,882 = 1,85 \%;$$

$$N_2^{\text{p}} = 0,4 \cdot 0,882 = 0,35 \%;$$

$$O_2^{\text{p}} = 8,2 \cdot 0,882 = 7,24 \%.$$

Проверка полученного элементного состава:

$$25,24 + 2,38 + 22,94 + 1,85 + 0,35 + 7,24 + 40 = 100 \%.$$

Объемы воздуха и продуктов сгорания для исходного топлива находим по формулам 2.1–2.9:

$$V^0 = 2,68 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{RO}} = 0,5 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{N}}^0 = 2,12 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{HO}}^0 = 0,69 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{r}}^0 = 3,31 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

При избытке воздуха $\alpha = 1,2$ объем газов для исходного топлива находим в соответствии с формулой (2.16):

$$V_{\text{r}} = 3,31 + 1,0161(1,2 - 1)2,68 = 3,85 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Объем водяного пара по (2.15):

$$V_{\text{HO}} = 0,69 + 0,0161(1,2 - 1)2,68 = 0,7 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Доли трехатомных газов и водяного пара в соответствии с формулами (2.20) и (2.21):

$$R_{RO} = 0,5/3,85 = 0,13; R_{HO} = 0,7/3,85 = 0,182.$$

Определяем объемы воздуха и продуктов сгорания для угля с влажностью $W_2^p = 40\%$.

Теоретическое количество сухого воздуха находим по формуле (2.1):

$$V_{в2}^0 = 0,0889(22,94 + 0,375 \cdot 2,38) + 0,265 \cdot 1,85 - 0,0333 \cdot 7,24 = 2,37 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Можно найти и так:

$$V_{в2}^0 = K V^0 = 0,882 \cdot 2,68 = 2,37 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Теоретические объемы продуктов сгорания для нового состава топлива рассчитываются по формулам (2.6)–(2.9):

$$V_{RO2} = 0,01866(22,94 + 0,375 \cdot 2,38) = 0,44 \text{ м}^3/\text{кг};$$

Можно найти и так:

$$V_{RO2} = K V_{RO} = 0,882 \cdot 0,5 = 0,44 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{HO2}^0 = 0,111 \cdot 1,85 + 0,0124 \cdot 40 + 0,0161 \cdot 2,37 = 0,74 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{N2}^0 = 0,79 \cdot 2,37 + 0,008 \cdot 0,35 = 1,88 \text{ м}^3/\text{кг};$$

Можно найти и так:

$$V_{N2}^0 = K V_N^0 = 0,882 \cdot 2,12 = 1,87 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{г2}^0 = 0,44 + 0,74 + 1,88 = 3,06 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Находим объемы газов по формулам (2.16) при избытке воздуха $\alpha = 1,2$:

$$V_{г2} = 3,06 + 1,0161(1,2 - 1) 2,37 = 3,54 \text{ м}^3/\text{кг};$$

и водяных паров по формуле (2.15):

$$V_{HO2} = 0,74 + 0,0161(1,2 - 1) 2,37 = 0,75 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Определяем доли трехатомных газов и водяных паров:

$$R_{RO2} = 0,44/3,54 = 0,124; R_{HO2} = 0,75/3,54 = 0,212.$$

Пример 2.6.

Определить коэффициент избытка воздуха в продуктах сгорания при сжигании экибастузского угля (состав: $W^p = 6,5\%$; $A^p = 36,9\%$; $S^p = 0,7\%$; $C^p = 44,8\%$; $H^p = 3\%$; $N^p = 0,8\%$; $O^p = 7,3\%$), если известно, что содержание кислорода в газоходе равно $O_2 = 3,5\%$; содержание трехатомных газов $RO_2 = 14,17\%$.

Решение.

Избыток воздуха в газоходе при известной концентрации кислорода определяется по формуле:

$$\alpha = 21/(21 - O_2),$$

где O_2 – содержание кислорода в продуктах сгорания, %.

При известном содержании RO_2 в газовом потоке значение α находят по формуле:

$$\alpha = RO_2^{\text{макс}} / RO_2,$$

где $RO_2^{\text{макс}}$ – максимальное содержание трехатомных газов в продуктах сгорания топлива при $\alpha = 1$.

1. Определяем избыток воздуха по кислороду:

$$\alpha = 21/(21 - 3,5) = 1,2.$$

2. Определяем избыток воздуха по RO_2 . Для экибастузского угля максимальное содержание трехатомных газов $V_{RO} = 0,84 \text{ м}^3/\text{кг}$, теоретический объем газов $V_{\Gamma}^0 = 4,94 \text{ м}^3/\text{кг}$.

В процентном отношении количество трехатомных газов:

$$RO_2^{\text{макс}} = (V_{RO} / V_{\Gamma}^0) 100 = (0,84/4,94) 100 = 17 \%,$$

$$\text{тогда } \alpha = 17 / 14,17 = 1,2.$$

Пример 2.7.

Для кузнецкого угля марки СС (состав $C^p = 64,34 \%$; $H^p = 3,45 \%$; $N^p = 1,53 \%$; $O^p = 6,9 \%$; $S^p = 0,38 \%$; $W^p = 12 \%$; $A^p = 11,4 \%$) определить плотность продуктов сгорания при температуре $\theta_{\Gamma} = 850^\circ\text{C}$ и избытке воздуха $\alpha = 1,2$, а также концентрацию золовых частиц $\mu_{\text{зл}}$ при доле уноса $a_{\text{ун}} = 0,95$. Суммарный объем продуктов сгорания при нормальных условиях $V_{\Gamma}^0 = 6,92 \text{ м}^3/\text{кг}$. Теоретическое количество сухого воздуха, необходимого для полного сжигания топлива ($\alpha = 1$) $V^0 = 6,42 \text{ м}^3/\text{кг}$.

Решение.

Для избытка воздуха $\alpha = 1,2$ по формуле (2.16):

$$V_{\Gamma} = 6,92 + 1,0161(1,2 - 1) 6,42 = 8,2, \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Масса продуктов сгорания на 1 кг топлива по формуле (2.17):

$$G_{\Gamma} = 1 - 11,4/100 + 1,306 \cdot 1,2 \cdot 6,42 = 10,94 \text{ кг/кг}.$$

Плотность газов при нормальных условиях (0°C и 760 мм рт. ст.):

$$\rho_{\Gamma}^0 = G_{\Gamma}/V_{\Gamma} = 10,94/8,2 = 1,33 \text{ кг/м}^3.$$

Плотность газов в реальных условиях

$$\rho_{\Gamma} = \rho_{\Gamma}^0 \cdot 273/(\theta_{\Gamma} + 273) = 1,33 \cdot 273/(850 + 273) = 0,324 \text{ кг/м}^3.$$

Расчетная концентрация золовых частиц в потоке газов составляет по формуле (2.22)

$$\mu_{\text{зл}} = 11,4 \cdot 0,95/(100 \cdot 10,94) = 9,89 \cdot 10^{-3} \text{ кг/кг}.$$

Пример 2.8.

Определить размеры коробов уходящих газов после парового котла, сжигающего сернистый мазут (состав: $S^p = 1,4 \%$; $C^p = 83,8 \%$; $H^p = 11,2 \%$; $O^p = 0,5 \%$; $W^p = 3,0 \%$; $A^p = 0,1 \%$). Расход мазута $B = 8,3$ кг/с, температура уходящих газов $\theta_{yx} = 150$ °С при избытке воздуха $\alpha = 1,18$. Принять скорость уходящих газов $w = 10$ м/с, соотношение сторон газохода 1:4, количество коробов 2.

Решение.

1. Определяем V_{Γ}^0 и V^0 и затем в соответствии с формулой (2.16) объем продуктов сгорания на 1 кг топлива:

$$V_{\Gamma} = 11,27 + 1,0161(1,18 - 1)10,45 = 13,18 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

2. Секундный расход уходящих газов:

$$V_c = V_{\Gamma} B(\theta_{yx} + 273)/273 = 13,18 \cdot 8,3(150 + 273)/273 = 169,5 \text{ м}^3/\text{с}.$$

3. Определяем необходимое сечение одного газохода:

$$F = V_c/(2w) = 169,5/(2 \cdot 10) = 8,475 \text{ м}^2.$$

4. Линейные размеры газохода в соответствии с соотношением сторон 1:4. Принимаем ширину газохода $b = 4h$. Тогда сечение газохода:

$$F = h b = 4h^2.$$

$$\text{При этом } h = (F/4)^{0,5} = (8,475/4)^{0,5} = 1,45 \text{ м}; b = 4 \cdot 1,45 = 5,8 \text{ м}.$$

ЗАДАЧИ

Задача 2.4.

Определить, насколько объем газов за пароперегревателем превосходит объем воздуха, поступающего через горелки в паровом котле с избытком воздуха за топочной камерой $\alpha_t = 1,2$, присосами воздуха в ней $\Delta\alpha_t = 0,05$, в пылесистеме $\Delta\alpha_{пл} = 0,04$ и присосами воздуха в пароперегревателе $\Delta\alpha_{пп} = 0,03$. Топливо – промпродукт каменных углей марки Г (состав $S^p = 0,5 \%$; $C^p = 51,4 \%$; $H^p = 3,8 \%$; $N^p = 1,9 \%$; $O^p = 6,6 \%$; $W^p = 12 \%$; $A^p = 23,8 \%$).

Задача 2.5.

Определить состав продуктов сгорания в уходящих газах (V_{RO} , V_{Γ}^0 , V_{NO} , V_{Γ}) при сжигании донецкого угля марки Д (состав: $S^p = 3,1 \%$; $C^p = 47 \%$; $H^p = 3,4 \%$; $N^p = 1 \%$; $O^p = 8 \%$; $W^p = 13 \%$; $A^p = 24,4 \%$) при $\alpha = 1$ и избытке воздуха в уходящих газах $\alpha_{yx} = 1,35$.

Задача 2.6.

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

Задача 2.7.

Определить теоретические объемы воздуха и продуктов сгорания при

разомкнутой схеме сушки назаровского бурого угля состава: $W^p = 39 \%$; $A^p = 7,3 \%$; $S^p = 0,4 \%$; $C^p = 37,6 \%$; $H^p = 2,6 \%$; $N^p = 0,4 \%$; $O^p = 12,7 \%$. Принять влажность пыли $W^{пл} = 15 \%$.

Задача 2.8.

Определить необходимое сечение канала горячего воздуха при температуре 300°C , избыточном давлении в газоходе 3000 Па для котла, сжигающего нерюнгринский уголь (состав: $W^p = 10 \%$; $A^p = 19,8 \%$; $S^p = 0,2 \%$; $C^p = 60 \%$; $H^p = 3,1 \%$; $N^p = 0,6 \%$; $O^p = 6,3 \%$ (п. 130 таблица 1 [8])) в количестве $23,8\text{ кг/с}$. При решении задачи принять скорость воздуха $w=15\text{ м/с}$, количество газоходов 2, форма – круглая (1-й вариант) и прямоугольная с соотношением сторон 2:1 (2-й вариант); принять $\beta = 1,16$ и барометрическое давление 750 мм рт. ст. (99990 Па). Сравнить полученный теоретический объем воздуха со справочным в таблице XII п. 130 [8].

Задача 2.9.

Определить теплоту сгорания смеси 30% угля с составом $C^r=85\%$; $H^r=4\%$; $N^r=3\%$; $S^r=2\%$; $O^r=6\%$; $A^r=16\%$; $W^p=30\%$ и 70% угля с составом $C^p=29,1\%$; $H^p=2,2\%$; $S^p=2,9\%$; $N^p=0,6\%$; $O^p=8,7\%$; $W^p=33,0\%$; $A^p=23,5\%$.

Задача 2.10.

Как изменится объем и объемные доли трехатомных газов и водяных паров, если при сжигании челябинского бурого угля (состав: $W^p = 17 \%$; $A^p = 32,4 \%$; $S^p = 0,9 \%$; $C^p = 35,9 \%$; $H^p = 2,6 \%$; $N^p = 1 \%$; $O^p = 10,2 \%$) избыток воздуха увеличить с $1,2$ до $1,3$?

Задача 2.11.

Какая масса и какой объем кислорода (при плотности $1,429\text{ кг/м}^3$) потребуются для полного сжигания 1 кг углерода?

Задача 2.12.

Какой объем CO_2 (при плотности $1,977\text{ кг/м}^3$) образуется в результате полного сжигания 1 кг углерода?

Задача 2.13.

Какой объем воздуха потребуется для полного сжигания 1 кг углерода?

Задача 2.14.

Определить плотность и удельный объем метана при нормальных условиях, если киломолярный объем составляет $22,4\text{ м}^3$.

Задача 2.15.

Определить массу пропана в емкости объемом 20 м^3 , если по показаниям манометра давление в ней составляет $0,5\text{ кг/см}^2$ и температура 27°C , а атмосферное давление 760 мм рт. ст. Киломолярная газовая постоянная $\mu R =$

8314 Дж/(кмоль·град).

Задача 2.16.

Определить низшую теплоту сгорания Q_n^c природного газа (при нормальных условиях) следующего состава: $H_2S = 1 \%$; $CH_4 = 76,7 \%$; $C_2H_6 = 4,5 \%$; $C_3H_8 = 1,7 \%$; $C_4H_{10} = 0,8 \%$; $C_5H_{12} = 0,6 \%$.

Задача 2.17.

Определить избыток воздуха в процентах, если по анализу продуктов горения в них содержится $14,3\% CO_2$, $5,1\% O_2$ и $1,4\% CO$.

Задача 2.18.

Определить количество воздуха (по массе и по объему), необходимое для сжигания мазута состава: $C = 86 \%$; $H_2 = 11,5 \%$; $O_2 = 1,5 \%$; $N_2 = 1 \%$. Плотность воздуха при нормальных условиях $\rho_{воз} = 1,293 \text{ кг/м}^3$.

3. ПЕРЕСЧЕТЫ СОСТАВА И ЭНТАЛЬПИИ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ

Энтальпия теоретически необходимых объемов воздуха и продуктов сгорания, кДж/кг, при расчетной температуре θ :

$$H_v^0 = V^0 (c \theta)_v; \quad (3.1)$$

$$H_r^0 = V_{RO}^0 (c \theta)_{RO} + V_N^0 (c \theta)_N + V_{HO}^0 (c \theta)_{HO}, \quad (3.2)$$

где $(c \theta)_v$, $(c \theta)_{RO}$, $(c \theta)_N$, $(c \theta)_{HO}$ – энтальпия 1 м^3 влажного воздуха, диоксида углерода, азота, водяных паров при температуре θ , °C, кДж/м³; определяются по таблице 13 [4, с.179] и таблица П5 [15] (приведена ниже).

Энтальпия продуктов сгорания при избытке воздуха $\alpha > 1$:

$$H_r = H_r^0 + (\alpha - 1) H_v^0 + H_{зл}. \quad (3.3)$$

Здесь $H_{зл}$ – энтальпия золы, кДж/кг:

$$H_{зл} = (c \theta)_{зл} A^p a_{ун} / 100,$$

где $a_{ун}$ – доля золы топлива, уносимая продуктами сгорания;

$(c \theta)_{зл}$ – энтальпия 1 кг золы при температуре θ , кДж/кг, определяется по таблице 13 [4, с.179].

При величине уноса золы из топки $a_{ун} < 0,4$ значением $H_{зл}$ можно пренебречь.

Энтальпия газов при наличии рециркуляции:

$$H_{г.рц} = H_r + r H_{г.отб}, \quad (3.4)$$

где H_r и $r H_{г.отб}$ – энтальпии газов основного потока и рециркулируемых газов, определенные при температурах в рассчитываемом сечении газотока.

Таблица П5. Удельные энтальпии компонентов продуктов сгорания и воздуха при нормальных условиях (0°C и 760 мм рт. ст.), кДж/м³, и золы, кДж/кг

$t, ^\circ\text{C}$	$(c_p)_{\text{CO}_2}$	$(c_p)_{\text{N}_2}$	$(c_p)_{\text{O}_2}$	$(c_p)_{\text{H}_2\text{O}}$	$(c_p)_\text{з}$	$(c_p)_{\text{ж}}$
100	170,0	129,6	131,8	150,5	132,4	80,8
200	357,5	259,9	267,0	304,5	266,4	169,1
400	771,9	526,5	551,0	626,2	541,8	360,1
600	1224,6	804,1	850,1	968,9	829,7	560,2
800	1704,9	1093,6	1159,9	1334,4	1129,1	767,0
1000	2203,5	1391,7	1477,5	1722,9	1437,3	983,9
1200	2716,6	1697,2	1800,7	2132,3	1753,4	1205,8
1400	3239,1	2008,7	2128,3	2559,1	2076,2	1582,6
1600	3768,8	2324,5	2460,5	3001,8	2402,9	1875,7
1800	4304,7	2643,7	2797,5	3458,4	2731,9	2185,5
2000	4844,1	2965,1	3138,4	3925,5	3065,6	2512,1
2200	5386,6	3289,2	3482,7	4401,9	3401,6	—

Таблица П6. Теплоемкости топлив

Топливо	Температура, $^\circ\text{C}$			
	0	100	200	300

А. Сухая масса твердого топлива $c_{\text{тл}}^c$, кДж/(кг·К)

Антрацит и тощий уголь	0,921	0,963	1,047	1,130
Каменный уголь	0,963	1,089	1,256	1,424
Бурый уголь	1,089	1,256	1,456	—
Сланцы	1,047	1,130	1,298	—
Фрезерный торф	1,298	1,507	1,800	—

Б. Рабочая масса твердого топлива

$$c_{\text{тл}}^p = 4,1868 \frac{W^p}{100} + \frac{100 - W^p}{100}, \text{ кДж/(кг·К)}$$

В. Жидкое топливо (мазут)

$$c_{\text{ж}} = 1,7375 + 0,002512 t_{\text{тл}}, \text{ кДж/(кг·К)},$$

где $t_{\text{тл}}$ — температура топлива, $^\circ\text{C}$.

Г. Газообразное топливо

$$c_{\text{г}} = 0,01 [\text{CH}_4 c_{\text{CH}_4} + \text{C}_2\text{H}_6 c_{\text{C}_2\text{H}_6} + \text{C}_3\text{H}_8 c_{\text{C}_3\text{H}_8} + \text{C}_4\text{H}_{10} c_{\text{C}_4\text{H}_{10}} + \text{C}_5\text{H}_{12} c_{\text{C}_5\text{H}_{12}} + \text{N}_2 c_{\text{N}_2} + \text{CO}_2 c_{\text{CO}_2} + \text{H}_2\text{S} c_{\text{H}_2\text{S}}], \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{К)},$$

где CH_4 , C_2H_6 ... — содержание газовых компонент в природном газе, %;
 c_{CH_4} , $c_{\text{C}_2\text{H}_6}$... — теплоемкости горючих и негорючих составляющих природного газа, кДж/(м³·К)

Средняя теплоемкость газов, кДж/(м³·К):

$t, ^\circ\text{C}$	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}	C_5H_{12}	N_2	CO_2	H_2S
0 ...	1,55	2,21	3,05	4,13	5,13	1,29	1,60	1,51
100 ...	1,64	2,49	3,51	4,71	5,84	1,30	1,70	1,53

ПРИМЕРЫ

Пример 3.1.

Определить энтальпии продуктов сгорания в точках смешения: в топке (при $\theta = 1700^\circ\text{C}$, $\alpha = 1,1$) и перед промежуточным перегревателем ($\theta_{\text{пп}} = 850^\circ\text{C}$ и $\alpha = 1,16$) при рециркуляции газов. Принять температуру в месте отбора газов на рециркуляцию $\theta_{\text{отб}} = 390^\circ\text{C}$; $\alpha_{\text{отб}} = 1,2$; $r_{\text{rc}} = 0,15$; топливо – мазут. Энтальпии дымовых газов $H_{\text{г}}^0$ при сгорании мазута и воздуха $H_{\text{в}}^0$ при $\alpha = 1$:

для 1700°C – $H_{\text{г}}^0 = 31522,5$ кДж/кг, $H_{\text{в}}^0 = 26814$ кДж/кг;
 для 850°C – $H_{\text{г}}^0 = 14595$ кДж/кг, $H_{\text{в}}^0 = 12609,5$ кДж/кг;
 для 390°C – $H_{\text{г}}^0 = 6303$ кДж/кг, $H_{\text{в}}^0 = 5512,2$ кДж/кг.

Решение.

По формуле (3.3) энтальпия газов при избытке воздуха $\alpha > 1$ составит:

при $\alpha = 1,1$ и $\theta = 1700^\circ\text{C}$

$$H_{\text{г}} = 31522,5 + (1,1 - 1) 26814 = 34204 \text{ кДж/кг};$$

при $\alpha = 1,16$ и $\theta = 850^\circ\text{C}$

$$H_{\text{г}} = 14595 + (1,16 - 1) 12609,5 = 16613 \text{ кДж/кг};$$

при $\alpha = 1,2$ и $\theta = 390^\circ\text{C}$

$$H_{\text{г}} = 6303 + (1,2 - 1) 5512,2 = 7405 \text{ кДж/кг}.$$

Энтальпии газов в точках смешения находим по формуле (3.4):

в топке:

$$H_{\text{г.рц}} = 34204 + 0,15 \cdot 7405 = 35315 \text{ кДж/кг};$$

в газоходе перед промежуточным нагревателем:

$$H_{\text{г.рц}} = 16613 + 0,15 \cdot 7405 = 17724 \text{ кДж/кг}.$$

Пример 3.2.

Элементный состав исходного топлива – экибастузского угля – следующий: $W^p = 6,5\%$, $A^p = 36,9\%$, $S^p = 0,7\%$, $C^p = 44,8\%$, $H^p = 3\%$, $N^p = 0,8\%$, $O^p = 7,3\%$. Низшая теплота сгорания $Q_{\text{н}}^p = 17380$ кДж/кг.

Для исходного топлива теоретические энтальпии газов и воздуха при $\theta = 1250^\circ\text{C}$ и энтальпия золы по табл. 13 [4, с.179] и таблица П5 [15] равны:

$$H_{\text{г}}^0 = 9888 \text{ кДж/кг};$$

$$H_{\text{в}}^0 = 8360 \text{ кДж/кг};$$

$$H_{\text{зл}} = 1283 \text{ кДж/кг}.$$

Насколько изменится энтальпия продуктов сгорания экибастузского угля на 1 кг топлива и в единицу времени при температуре 1250°C , $\alpha = 1,2$, если влажность его увеличится с 6,5 до 14 %, а зольность с 36,9 до 45 % ?

При решении принять $a_{\text{yh}} = 0,95$, исходный расход топлива $B = 25$ кг/с. КПД котла снизится при увеличении влажности и зольности на 0,5 % (с 92 до 91,5 %), расход топлива обратно пропорционален изменению низшей теплоты сгорания.

Решение.

Пересчет элементного состава на новую рабочую влажность:

$W^p_2 = 14 \%$ и новую рабочую зольность $A^p = 45 \%$ производится с помощью множителя:

$$K_2 = (100 - 14 - 45) / (100 - 6,5 - 36,9) = 0,724.$$

Новый элементный состав следующий:

$$S^p_2 = 0,5 \%, C^p_2 = 32,45 \%, H^p_2 = 2,15 \%, N^p_2 = 0,6 \%, O^p_2 = 5,3 \%, A^p_2 = 45 \%, W^p_2 = 14 \%.$$

Новая низшая теплота сгорания по формуле (1.9):

$$Q^p_H = (17380 + 25,1 \cdot 6,5) 0,724 - 25,1 \cdot 14 = 12350 \text{ кДж/кг}.$$

1. При избытке воздуха $\alpha = 1,2$ по формуле (3.3) энтальпия продуктов сгорания :

$$H_T = 9888 + (1,2 - 1)8360 + 1283 \cdot 36,9 \cdot 0,95/100 = 12010 \text{ кДж/кг}.$$

2. Определяем энтальпию продуктов сгорания для экибастузского угля с влажностью 14 % и зольностью 45 %.

В соответствии с новым элементным составом по формуле (2.1, 2.6–2.8) определяем теоретические объемы воздуха и газов:

$$V^0 = 3,32 \text{ м}^3/\text{кг}; V_{RO} = 0,61 \text{ м}^3/\text{кг}; V^0_{HO} = 0,47 \text{ м}^3/\text{кг}; V^0_N = 2,63 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Теоретические энтальпии газов и воздуха по формулам (3.1) и (3.2) при $\theta = 1250 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$H^0_B = 1833,8 \cdot 3,32 = 6088 \text{ кДж/кг};$$

$$H^0_T = 2846,7 \cdot 0,61 + 1774,95 \cdot 2,63 + 2238 \cdot 0,47 = 7456 \text{ кДж/кг}.$$

Значения $(с \theta)_B = 1833,8 \text{ кДж/м}^3$, $(с \theta)_{CO} = 2846,7 \text{ кДж/м}^3$, $(с \theta)_N = 1774,95 \text{ кДж/м}^3$, $(с \theta)_{HO} = 2238 \text{ кДж/м}^3$ приняты по табл. 13 [4, с.179].

При избытке воздуха $\alpha = 1,2$ энтальпия газов по формуле (3.3):

$$H_T = 7456 + (1,2 - 1)6088 + 1283 \cdot 0,47 \cdot 0,95/100 = 9222 \text{ кДж/кг}.$$

3. Определяем новый расход топлива при сохранении тепловой мощности котла:

$$B_2 = B_1 Q^p_{H1} \eta_{K1} / (Q^p_{H2} \eta_{K2}) = 25 \cdot 17380 \cdot 0,92 / (12350 \cdot 0,915) = 35,37 \text{ кг/с}.$$

Изменение энтальпии газов на 1 кг сожженного топлива:

$$H_{T1}/H_{T2} = 12010/9222 = 1,3.$$

Изменение энтальпии потока газов в единицу времени:

$$B_1 H_{T1} / B_2 H_{T2} = 25 \cdot 12010 / 35,37 \cdot 9222 = 0,92.$$

Пример 3.3.

Назаровский бурый уголь сжигается в топке с твердым шлакоудалением при $\alpha = 1,2$, $\theta = 1200 \text{ }^\circ\text{C}$. Как изменится температура продуктов сгорания на выходе

из топки, если в верхнюю часть топки введены газы рециркуляции? Коэффициент рециркуляции $r = 0,15$, температура газов рециркуляции $\theta_{rc} = 390^\circ\text{C}$; $\alpha_{отб} = 1,25$.

Энтальпии газов и воздуха при температурах 1200 и 390 °С:

при $\theta = 1200^\circ\text{C}$:

$$H_{\Gamma}^0 = 8546 \text{ кДж/кг};$$

$$H_{\text{в}}^0 = 6351 \text{ кДж/кг};$$

при $\theta = 390^\circ\text{C}$:

$$H_{\Gamma}^0 = 2506 \text{ кДж/кг};$$

$$H_{\text{в}}^0 = 1910 \text{ кДж/кг}.$$

Решение.

1. Определяем энтальпию газов при $\theta = 1200^\circ\text{C}$ и 390°C по формуле (3.3):

при $\theta = 1200^\circ\text{C}$ и $\alpha = 1,2$:

$$H_{\Gamma} = 9816 \text{ кДж/кг};$$

при $\theta = 390^\circ\text{C}$ и $\alpha = 1,25$:

$$H_{\Gamma} = 2983 \text{ кДж/кг}.$$

2. Определяем энтальпию газов в точке смешения по формуле (3.4):

$$H_{\Gamma,rc} = 9816 + 0,15 \cdot 2983 = 10263 \text{ кДж/кг}.$$

Избыток воздуха в газовом потоке после смешения:

$$\alpha_{см} = \alpha_{\Gamma} + (\alpha_{rc} - \alpha_{\Gamma})r = 1,2 + (1,25 - 1,2)0,15 = 1,207.$$

3. Определяем температуру газов после ввода рециркуляции газов. Для этого находим энтальпию смеси при $\alpha_{см} = 1,207$ в интервале температур 1200–1000 °С по формуле:

$$H_{\Gamma,см} = [H_{\Gamma}^0 + (\alpha_{см} - 1) H_{\text{в}}^0](1 + r).$$

При 1200 °С:

$$H_{\Gamma,см} = [8546 + (1,207 - 1)6351](1 + 0,15) = 11343 \text{ кДж/кг};$$

при 1000 °С:

$$H_{\Gamma,см} = [6970 + (1,207 - 1)5206](1 + 0,15) = 9258 \text{ кДж/кг}.$$

Интерполируя, получаем температуру газов на выходе из топки после рециркуляции газов:

$$\theta_{\Gamma}'' = 1200 - (1200 - 1000)(11343 - 10263)/(11343 - 9258) = 1096,4^\circ\text{C}.$$

Таким образом, температура газов за топкой снизилась на:

$$\theta_{\Gamma}'' = 1200 - 1096,4 = 103,6^\circ\text{C}.$$

Пример 3.4.

Насколько изменится энтальпия уходящих газов при сжигании природного газа Газли-Ташкент, если избыток воздуха за топочной камерой снизить с 1,1 до 1,05?

Принять присосы воздуха в газовом тракте (от выхода из топки до выхода из воздухоподогревателя) $\Delta\alpha_{прс} = 0,15$, температуру уходящих газов 120 °С. По

табл. 15 [4, с. 192] при $\theta = 200$ °С энтальпия воздуха и продуктов сгорания равна для данного топлива $H_{в200}^0 = 2566$ кДж/м³, $H_{г200}^0 = 3010$ кДж/м³.

Решение.

В соответствии с заданием, избыток воздуха в уходящих газах снизится с $\alpha_{yx} = \alpha_{г} + \Delta\alpha_{прс} = 1,1 + 0,15 = 1,25$ до $\alpha_{yx} = 1,2$.

1. Определим энтальпию газов при $\alpha = 1,25$ и температуре 200 °С:
 $H_{г200} = H_{г200}^0 + (\alpha - 1) H_{г200}^0 = 3010 + (1,25 - 1)2566 = 3651,5$ кДж/м³.

При температуре уходящих газов 120 °С:

$$H_{г120} = H_{г200} \cdot 120/200 = 3651,5 \cdot 120/200 = 2190,9 \text{ кДж/м}^3.$$

2. Энтальпия газов при $\alpha_{yx} = 1,2$ и температуре 200 °С:

$$H_{г200} = 3010 + (1,2 - 1)2566 = 3523,2 \text{ кДж/м}^3.$$

При температуре уходящих газов 120 °С

$$H_{г120} = 3523,2 \cdot 120/200 = 2113,9 \text{ кДж/м}^3.$$

Таким образом, понижение избытка воздуха за топкой на $\Delta\alpha = 0,05$ уменьшает энтальпию уходящих газов на 77 кДж/м³ (примерно на 3,5 %).

ЗАДАЧИ

Задача 3.1.

Определить энтальпию теоретически необходимого объема воздуха при сжигании 1 кг угля АШ и 1 кг назаровского бурого угля при температуре 350 °С.

Энтальпии воздуха при температурах 200 и 400 °С (при 0,1 МПа):

при $\theta = 200$ °С:

для угля АШ:

$$H_{в}^0 = 1412 \text{ кДж/кг};$$

для бурого угля:

$$H_{в}^0 = 965 \text{ кДж/кг}.$$

при $\theta = 400$ °С:

для угля АШ:

$$H_{в}^0 = 2873 \text{ кДж/кг};$$

для бурого угля:

$$H_{в}^0 = 1962 \text{ кДж/кг}.$$

Задача 3.2.

Как изменится энтальпия продуктов сгорания уходящих газов при сжигании ангреноского угля (состав: $W^p = 34,5$ %; $A^p = 14,4$ %; $S^p = 1,3$ %; $C^p = 39,1$ %; $H^p = 1,9$ %; $N^p = 0,2$ %; $O^p = 8,6$ %), если его влажность увеличить с 34,5 до 45 %?

Температуру уходящих газов принять 160 °С, $\alpha_{yx} = 1,4$. Значением $H_{зл}$

пренебречь.

Значения теплоемкостей при температуре уходящих газов:

При $\theta = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$: $(c \cdot \theta)_B = 132,4\text{ кДж/м}^3$; $(c \cdot \theta)_{RO} = 170\text{ кДж/м}^3$; $(c \cdot \theta)_N = 129,6\text{ кДж/м}^3$; $(c \cdot \theta)_{HO} = 150,5\text{ кДж/м}^3$.

При $\theta = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$: $(c \cdot \theta)_B = 266,4\text{ кДж/м}^3$; $(c \cdot \theta)_{RO} = 357,5\text{ кДж/м}^3$; $(c \cdot \theta)_N = 259,9\text{ кДж/м}^3$; $(c \cdot \theta)_{HO} = 304,5\text{ кДж/м}^3$.

4. ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС ПАРОВОГО КОТЛА

Тепловой баланс парового котла определяется равенством:

$$Q^P_H + Q_{B.VHSH} + Q_{TL} + Q_{\Phi} - Q_K + Q_{X.B} = Q_{\text{пол}} + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + N_{YX}, \quad (4.1)$$

где Q^P_H – низшая теплота сгорания рабочей массы, кДж/кг;

$Q_{B.VHSH}$ – теплота воздуха, подогретого вне котла, кДж/кг, $Q_{B.VHSH} = \beta' \cdot (H^0_{B.V} - H^0_{X.B})$; β' – отношение количества воздуха на входе в котел к теоретически необходимому;

$H^0_{B.V}$, $H^0_{X.B}$ – энтальпии теоретически необходимого объема воздуха при температурах воздуха на входе в котел и холодного воздуха, кДж/кг;

Q_{TL} – физическая теплота топлива, кДж/кг, равная произведению его теплоемкости c_{TL} на температуру топлива t_{TL} ;

Q_{Φ} – теплота, вносимая в котел при сжигании мазута с паровым дутьем, кДж/кг, $Q_{\Phi} = G_{\Phi}(h_{\Phi} - 2512)$; G_{Φ} и h_{Φ} – расход и энтальпия пара, идущего на распыл мазута в форсунках, кг/кг и кДж/кг;

Q_K – теплота, затраченная на разложение карбонатов сланцев, кДж/кг, $Q_K = 40,6(\text{CO}_2)$;

$Q_{X.B}$ – теплота холодного воздуха, соответствующая объему уходящих газов, кДж/кг, $Q_{X.B} = \alpha_{YX} H^0_{X.B}$; α_{YX} – избыток воздуха в уходящих газах;

$Q_{\text{пол}}$ – удельная теплота, полезно воспринятая рабочей средой в котле, кДж/кг;

$Q_3 - Q_6$ – потери теплоты соответственно с химическим и механическим недожогом, на наружное охлаждение и с теплотой шлака (золы), кДж/кг;

$N_{YX} = Q_2$ – энтальпия уходящих газов, кДж/кг.

В тепловом балансе парового котла выделяют *располагаемую теплоту* поступающего в топку топлива, включая теплоту его сгорания со всеми сопутствующими дополнительными источниками теплоты:

$$Q^P = Q^P_H + Q_{B.VHSH} + Q_{TL} + Q_{\Phi} - Q_K \quad (4.2)$$

При сжигании газа составляющие теплового баланса относятся к 1 м^3 газового топлива.

Удельное полезное тепловосприятие котла, кДж/кг:

$$Q_{\text{пол}} = Q_{\text{п.к}}/B, \quad (4.3)$$

где B – расход топлива, кг/с;

$Q_{\text{п.к}}$ – теплота, воспринятая рабочей средой в паровом котле, кДж/с,

$$Q_{\text{п.к}} = D_{\text{пе}}(h_{\text{пе}} - h_{\text{п.в}}) + D_{\text{пр}}(h' - h_{\text{п.в}}) + D_{\text{п.пс}}(h_{\text{п.пе}} - h_{\text{п.пе}}') + D_{\text{н.п}}(h' - h_{\text{п.в}}), \quad (4.3a)$$

где $D_{\text{пе}}$ – паропроизводительность котла, кг/с;

$h_{пе}, h_{п.в}, h', h''$ – энтальпии соответственно перегретого пара, питательной и продувочной (кипящей) воды и насыщенного пара, кДж/кг;

$D_{п.пе}$ – расход пара через промежуточный перегреватель, кг/с;

$h_{п.пе}'', h_{п.пе}'$ – энтальпия пара до и после промперегревателя, кДж/кг;

$D_{пр}$ – расход воды на продувку, кг/с;

$D_{н.п}$ – расход насыщенного пара, кг/с.

При наличии впрыска воды в промежуточный перегреватель для регулирования перегрева пара формула (4.3а) принимает вид:

$$Q_{п.к} = (D_{п.пе} - D_{впр}) (h_{п.пе}'' - h_{п.в}') + D_{впр}(h_{п.пе}'' - h_{впр}) + D_{пе}(h_{пе} - h_{п.в}) + D_{пр}(h' - h_{п.в}), \quad (4.3б)$$

где $D_{впр}$ и $h_{впр}$ – расход воды на впрыск в промежуточный перегреватель, кг/с, и ее энтальпия, кДж/кг.

Потери с физической теплотой шлаков $q_{бшл}$:

$$q_{бшл} = a_{шл}(c \cdot \theta)_{шл} A_p / Q_p^p, \quad (4.3в)$$

где $a_{шл} = 1 - a_{ун}$ – доля золы топлива в шлаке;

$a_{ун}$ – доля золы топлива, уносимая с продуктами сгорания и определяемая по табл. 17–19 [4, с. 200–201];

$(c \cdot \theta)_{шл}$ – энтальпия шлака, кДж/кг, принимаемая по табл. 13 [4, с. 179].

ПРИМЕРЫ

Пример 4.1.

Составить тепловой баланс барабанного парового котла производительностью 186,11 кг/с, имеющего следующие параметры пара (таблица 4.1). Топливо – высушенный березовский уголь: $Q_{сушн} = 21298$ кДж/кг и влажность $W^{суш} = 13$ %.

Таблица 4.1 - Значения параметров котла

Параметр	Значение
Температура перегретого пара	545 °С
Температура питательной воды	250 °С
Давление свежего пара на выходе	13,7 МПа
Давление питательной воды	16,2 МПа
Расход пара через промежуточный перегреватель	163,89 кг/с
Температура пара на входе в промежуточный перегреватель	333 °С
Давление пара после промежуточного перегревателя	2,44 МПа
Давление пара на входе в промежуточный перегреватель	2,66 МПа

При проведении расчетов принять:

температуры воздуха перед котлом и после калориферов $t_{х.в} = 30$ °С ($H_{х.в} = 223,6$ кДж/кг) и $t_{кф}'' = 55$ °С ($H_{кф}'' = 409,9$ кДж/кг);

избыток воздуха на входе в калориферы $\beta' = 1,198$;

температуру топлива после сушки 85 °С;

температуру уходящих газов $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($H_{yx} = 1256\text{ кДж/кг}$);
 температуру газов при отборе на сушку $386\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($H_{отб} = 4001,3\text{ кДж/кг}$);
 долю отбора газов на сушку $0,34$;
 долю уноса золы $a_{yh} = 0,5$ при зольности $Ar = 4,8\%$;
 температуру шлаков $t_{шл} = 1430\text{ }^{\circ}\text{C}$
 энтальпия шлака ($c \cdot \theta_{шл}$) $= 1637\text{ кДж/кг}$;
 избыток воздуха в уходящих газах $1,231$;
 впрыск в промежуточный перегреватель отсутствует.

Решение.

1. Определяем удельное количество теплоты, воспринятой рабочей средой в котле. Энтальпия перегретого пара и питательной воды при заданных температурах и давлениях принимается по термодинамическим таблицам воды и водяного пара: $h_{пе} = 3449,1\text{ кДж/кг}$; $h_{п.в} = 1086,5\text{ кДж/кг}$.

Энтальпия пара до и после промежуточного перегревателя:

$$h'_{п.пе} = 3083,6\text{ кДж/кг}; h''_{п.пе} = 3563\text{ кДж/кг}.$$

Тогда удельное количество теплоты, воспринятой рабочей средой в котле:

$$Q_{п.к} = 186,11 (3449,1 - 1086,5) + 163,89 (3563 - 3083,6) = 518270\text{ кДж/с}.$$

Продувка воды из барабана незначительна (менее $0,5\%$), и ее теплотой можно пренебречь.

2. Определяем располагаемую теплоту топлива по формуле (4.2).

Дополнительные источники теплоты:

$$Q_{в.внш} = 1,198(409,9 - 223,6) = 223,2\text{ кДж/кг}.$$

Теплоемкость топлива находится по зависимости:

$$c_{тл} = 4,1868 W_p/100 - \text{стл с } (100 - W_p)100,$$

где

$c_{тл}^c$ – теплоемкость сухого топлива, определяемая по таблице П6 [15] (см. ранее на стр. 21):

$$c_{тл} = 4,1868 \cdot 13/100 + 1,2309 (100 - 13)/100 = 1,615\text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}.$$

В итоге:

$$Q_p^p = 21298 + 223,2 + 1,615 \cdot 85 = 21658\text{ кДж/кг}.$$

3. В соответствии с таблицами П7 – П8 [15] и опытом сжигания углей, определяем тепловые потери $Q_3 - Q_5$: $q_3 = 0\%$; $q_4 = 0,3\%$; $q_5 = 0,3\%$.

Тогда: $Q_3 = 0$; $Q_4 = Q_p^p q_4/100 = 21658 \cdot 0,3/100 = 65\text{ кДж/кг}$;

$$Q_5 = Q_p^p q_5/100 = 21658 \cdot 0,3/100 = 65\text{ кДж/кг}.$$

4. Определяем потери теплоты с уходящими газами. Так как применяется разомкнутая схема сушки топлива, то эти потери складываются из теплоты газов, покидающих котел, и теплоты доли газов в месте отбора на сушку:

$$Q_2 = H_{yx}(1 - r_{отб}) + H_{отб} r_{отб};$$

$$Q_2 = 1256 (1 - 0,34) + 4001,3 \cdot 0,34 = 2189,4\text{ кДж/кг}.$$

5. Потери теплоты с физической теплотой шлаков $Q_{\text{бшл}}$, определяемые с использованием формулы (4.3а):

$$Q_{\text{бшл}} = Q_p^{\text{р}} q_{\text{бшл}}/100 = a_{\text{шл}}(c \cdot \theta)_{\text{шл}} A^{\text{р}}/100 = (0,5 \cdot 1637 \cdot 4,8)/100 = 78,6 \text{ кДж/кг},$$

где $a_{\text{шл}} = 1 - a_{\text{ун}}$ – доля золы топлива в шлаке;

$a_{\text{ун}} = 0,5$ – доля золы топлива, уносимая с продуктами сгорания и определяемая по таблицами П7 – П8 [15];

$(c \cdot \theta)_{\text{шл}} = 1637$ – энтальпия шлака, кДж/кг, принимаемая по таблице 4.1а.

Усредненные значения теплоемкости золы твердых топлив в таблице 4.1а

6. Теплота холодного воздуха:

$$Q_{\text{х.в}} = \alpha_{\text{yx}} H_{\text{х.в}}^0 = 1,231 \cdot 223,6 = 275 \text{ кДж/кг}.$$

Таким образом, в соответствии с равенством (4.1) тепловой баланс имеет вид:
 $21658 + 275 = 518270/V + 0 + 65 + 65 + 78,6 + 2189,4.$

7. Расход топлива $V = 518270/(21933 - 2398) = 26,5 \text{ кг/с}.$

Таблица 4.1а - Усредненные значения теплоемкости золы твердых топлив

Температура, °С	c_3 , кДж/(кг*К) (ккал/(кг*°С))	Температура, °С	c_3 , кДж/(кг*К) (ккал/(кг*°С))
100	0,81 (0,193)	1100	0,996 (0,238)
200	0,845 (0,202)	1200	1,005 (0,240)
300	0,879 (0,210)	1300	1,046 (0,250)
400	0,90 (0,215)	1400	1,130 (0,270)
500	0,917 (0,219)	1500	1,172 (0,280)
600	0,934 (0,223)	1600	1,172 (0,280)
700	0,946 (0,226)	1700	1,21 (0,290)**
800	0,958 (0,229)	1800	1,21 (0,290)
900	0,971 (0,232)*	1900	1,256 (0,300)
1000	0,984 (0,235)	2000	1,256 (0,300)
Примечание. Теплоемкость сухой массы твердого топлива ст равняется 0,879-1,13 кДж/(кг*К) [0,21-0,27 ккал/(кг*°С)]			
* c_3 при температурах более 900 °С даны с учетом теплоты перехода из твердого в жидкое состояние.			
** Значения c_3 при температуре >1600 °С получены экстраполяцией.			

Пример 4.2.

Определить, насколько изменится располагаемая теплота жидкого топлива при увеличении предварительного подогрева воздуха в калорифере с 40 до 100 °С. Отношение количества воздуха на входе в котел к теоретическому $\beta' =$

1,18; энтальпия теоретически необходимого объема воздуха при 100 °С $H_{x.B}^0 = 1390$ кДж/кг.

Решение.

Из формулы (4.2) следует, что $Q_{p2}^p - Q_{p1}^p = Q_{B.BHII.2} - Q_{B.BHII.1} = \Delta Q_{B.BHII}$.

В то же время:

$$\Delta Q_{B.BHII} = \beta' (H_{B2}^{0'} - H_{x.B}^0) - \beta' (H_{B1}^{0'} - H_{x.B}^0) = \beta' (H_{B2}^{0'} - H_{B1}^{0'}).$$

Энтальпия теоретически необходимого воздуха при 40 °С равна:

$$H_{B1}^{0'} = 1390 \cdot 40/100 = 556 \text{ кДж/кг.}$$

В соответствии с этим изменение располагаемой теплоты топлива составит:

$$Q_{p2}^p - Q_{p1}^p = \beta' (H_{B2}^{0'} - H_{B1}^{0'}) = 1,18 (1390 - 556) = 984 \text{ кДж/кг.}$$

Пример 4.3.

Определить, насколько изменится располагаемая теплота мазута при увеличении его подогрева с $t_{TЛ1} = 80$ °С до $t_{TЛ2} = 150$ °С.

Решение.

Аналогично примеру 4.2:

$$\Delta Q_p^p = Q_{p2}^p - Q_{p1}^p.$$

Теплота поступающего в горелку мазута:

$$Q_{TЛ} = c_{TЛ} t_{TЛ},$$

где теплоемкость мазута определяется по формуле:

$$c_{TЛ} = 1,737 + 0,00251 t_{TЛ}.$$

$$\text{Тогда: } \Delta Q_p^p = 1,737(150 - 80) + 0,00251(150^2 - 80^2) = 162,1 \text{ кДж/кг.}$$

При значении $Q_H^p = 39 \cdot 10^3$ кДж/кг доля ΔQ_p^p составит $162,1/(39 \cdot 10^3) = 0,00415$, или 0,415 %.

Пример 4.4.

Определить, насколько изменится располагаемая теплота мазута при использовании для распыла мазута пара в количестве 0,15 кг пара на 1 кг мазута. Принять давление пара 1,6 МПа, температуру пара 300 °С.

Решение.

Изменение располагаемой теплоты мазута:

$$\Delta Q_p^p = Q_\phi = G_\phi (h_\phi - 2512).$$

При $p = 1,6$ МПа и $t = 300$ °С $h_\phi = 3036$ кДж/кг. При этом:

$$\Delta Q_p^p = 0,15(3036 - 2512) = 78,6 \text{ кДж/кг.}$$

Пример 4.5.

Определить, насколько изменится расход топлива на барабанном котле при

включении продувки воды из барабана в количестве 2,5 % и сохранении полезной теплопроизводительности котла. Параметры пара и воды и их расходы принять по примеру 4.1.

Решение.

При отсутствии продувки:

$$Q_{\phi} = Q_{\text{п.к1}}/B_1 = 518270 / 26,5 = 19557 \text{ кДж/кг при расходе топлива } B_1 = 26,5 \text{ кг/с.}$$

При наличии продувки потери теплоты с продуваемой водой равны:

$$Q_{\text{пр}} = D_{\text{пр}}(h' - h_{\text{п.в}}).$$

При давлении в барабане 15,4 МПа $h' = 1627,6 \text{ кДж/кг}$.

В соответствии с формулой (4.3а) при продувке 2,5 %:

$$Q_{\text{п.к2}} = 186,11(3449,1 - 1086,5) + 163,89(3563 - 3086,6) + 186,11 \cdot 2,5(1627,6 - 1086,5)/100 = 520790 \text{ кДж/с.}$$

Расход топлива:

$$B_2 = 520790 / 19557,4 = 26,63 \text{ кг/с.}$$

Увеличение расхода топлива:

$$\Delta B/B_2 = (26,63 - 26,5)/26,5 = 0,00486, \text{ или } 0,486 \text{ \%}.$$

Пример 4.6.

Определить массу пропана в емкости объемом 20 м^3 , если по показаниям манометра давление в ней составляет $0,5 \text{ кг/см}^2$ и температура 27°C , а атмосферное давление 760 мм рт. ст. Киломольная газовая постоянная $R_{\mu} = 8314 \text{ Дж/(кмоль} \cdot \text{град)}$.

Решение.

$$m = P V / (R_{\mu} T) = 1,5 \cdot 9,81 \cdot 10^{-4} \cdot 20 / (8341 \cdot 300) = 1,18 \text{ кмоль} = 1,18 \cdot 44 = 51,75 \text{ кг.}$$

ЗАДАЧИ

Задача 4.1.

Определить располагаемую теплоту донецкого угля марки Г ($Q_{\text{н}}^{\text{p}} = 18,88 \text{ МДж/кг}$) при температуре холодного воздуха 30°C , температуре предварительного подогрева воздуха 50°C . Отношение количества воздуха на входе в котел к теоретически необходимому $\beta' = 1,35$, сушка топлива – замкнутая, физической теплотой топлива пренебречь.

Задача 4.2.

Насколько меняется Q_{p}^{p} бурого угля ($Q_{\text{н}}^{\text{p}} = 13,44 \text{ МДж/кг}$) при изменении температуры предварительного подогрева воздуха с 40 до 80°C ? При решении задачи принять $\beta' = 1,22$.

Задача 4.3.

Определить тепловосприятие котла $Q_{\text{пол}}$ при наличии отбора пара на собственные нужды. Расход пара на собственные нужды принять из промежуточного пароперегревателя в количестве 40 кг/с с параметрами $t_{\text{пе}} = 450^\circ\text{C}$, $p = 2,55$ МПа. Принять параметры и расходы свежего пара по примеру 4.1, при этом расход пара на входе в промежуточный перегреватель увеличить с 163,9 до 203,9 кг/с.

Задача 4.4.

Определить располагаемую теплоту фрезерного торфа ($Q^p_n = 8,12$ МДж/кг), а также энтальпию уходящих газов при изменении влажности W с 50 до 40 %. Принять: температуру холодного воздуха 30°C , предварительного подогрева воздуха на входе в воздухоподогреватель 50°C ; отношение расхода воздуха на входе в воздухоподогреватель к теоретически необходимому $\beta' = 1,25$; избыток воздуха за котлом $\alpha_{yx} = 1,4$; температуру уходящих газов $\theta_{yx} = 150^\circ\text{C}$; температуру топлива 20°C .

5. ТЕПЛООБМЕН ИЗЛУЧЕНИЕМ В ТОПОЧНОЙ КАМЕРЕ

Адиабатная температура горения определяется при избытке воздуха за топкой θ_T и энтальпии, равной полезному тепловыделению в топке.

Полезное тепловыделение находится по зависимости:

$$Q_T = Q^p_T (100 - q_3 - q_4 - q_{6\text{шл}})/(100 - q_4) + Q_B + Q_{B.VH} + r H^0_{г.отб}, \quad (5.1)$$

где Q_B – теплота, вносимая воздухом в топку,

$$Q_B = (\alpha_T - \Delta\alpha_T - \Delta\alpha_{пл}) H^0_{г.в} + (\Delta\alpha_T - \Delta\alpha_{пл}) H^0_{х.в}, \quad (5.2)$$

где $\Delta\alpha_T$ и $\Delta\alpha_{пл}$ – присосы воздуха в топке и в пылесистеме;

$H^0_{г.в}$, $H^0_{х.в}$ – энтальпия теоретически необходимого объема воздуха при температурах горячего и присосанного холодного воздуха, кДж/кг;

$Q_{B.VH}$ – теплота воздуха, подогретого вне парового котла, кДж/кг;

$r H^0_{г.отб}$ – энтальпия и доля газов, отбираемых на рециркуляцию;

q_3 , q_4 – соответственно потери теплоты с химическим, механическим недожогом, %;

$q_{6\text{шл}}$ – потеря теплоты со шлаком, %.

Параметр распределения температур по высоте топки:

$$M = A - BX_T, \quad (5.3)$$

где X_T – относительное положение максимума температур газов в топке.

Для однокамерных топок с горизонтальным расположением осей вихревых горелок и верхним выводом из топки продуктов сгорания X_T совпадает с относительным уровнем расположения горелок X_g .

Значение коэффициентов A и B в уравнении (5.3) определяется по таблице 5.1.

Таблица 5.1 - Значение коэффициентов A и B

Сжигаемое топливо, топочное устройство	Коэффициент
--	-------------

	A	B
Газ и мазут	0,54	0,20
Высокореакционное твердое топливо в камерной топке и все твердые топлива в слоевой топке	0,59	0,50
Малореакционные твердые топлива, каменные угли с повышенной зольностью в камерной топке	0,56	0,50

При отклонении положения максимальной температуры от среднего уровня горелок

При отклонении положения максимальной температуры от среднего уровня горелок

$$X_T = X_r + \Delta X, \quad (5.4)$$

где ΔX – поправка относительного превышения максимума температур над уровнем горелок, определяемая по таблице 5.2.

В остальных случаях, не оговоренных в таблице 5.2, $X_T = X_r$.

Независимо от полученного значения M по формуле (5.3) параметр M в призматических топках не должен для твердых топлив превышать 0,5. Для полуоткрытых топок параметр M принимают равным 0,48 при сжигании газа, мазута и высокореакционных топлив и 0,46 при сжигании антрацита, полуантрацита и тощего угля.

В топках с подовым расположением горелок рекомендуется принимать $M = 0,39 - 0,40$.

Число Больцмана:

$$B_0 = \varphi B_p V_{ср} \cdot 10^{11} / (5,67 \Psi_{ср} F_{ст} Ta^3). \quad (5.5)$$

Таблица 5.2 - Поправка ΔX относительного превышения максимума температур над уровнем горелок

Условия сжигания топлива	Поправка ΔX
Сжигание угольной пыли в прямоточных горелках (кроме горелок с плоскими струями) и в вихревых горелках (при двух и более ярусах, с фронтным или встречным расположением) в котлах производительностью $D > 116,67$ кг/с (420 т/ч)	0,05
То же при производительности котла $D < 116,67$ кг/с (420 т/ч)	0,10
При сжигании мазута и газа в топках с $D < 9,72$ кг/с (35 т/ч)	0,15
При сжигании мазута и газа с избытками воздуха в горелках $\alpha_T < 1$	$2(1 - \alpha_T)$
Поворотные горелки с поворотом вниз	– 0,1 на поворот 20°
То же вверх	+ 0,1 на

Средняя теплоемкость продуктов сгорания ($V \cdot c_{cp}$) 1 кг топлива, кДж/(кг·К), при избытке воздуха за топкой и в интервале температур газов $\theta_a - \theta''_T$ определяется по формуле:

$$(V \cdot c_{cp}) = (H_T - H''_T) / (\theta_a - \theta''_T). \quad (5.6)$$

При сжигании смеси твердого и жидкого топлива при определении числа Больцмана B_0 объем продуктов сгорания принимается на 1 кг смеси, а расход топлива равным суммарному расходу составляющих смеси топлив.

При сжигании природного газа в смеси с твердым или жидким топливом расчет ведется по расходу твердого (или жидкого) топлива и поэтому при определении числа Больцмана объем продуктов сгорания принимается по объему смеси, приходящемуся на 1 кг твердого или жидкого топлива ($V_{см} = V_{т.т} + x V_{г.т}$), а B_p – по расходу твердого (или жидкого) топлива. Здесь индексы «т.т» – твердое топливо, «г.т» – газообразное топливо; x – количество кубических метров горючего газа, приходящегося на 1 кг твердого (или жидкого) топлива.

Относительная температура продуктов сгорания за топкой:

$$\theta''_T = T''_T / T_a; \\ \theta''_T = B_0^{0,6} / (B_0^{0,6} + M \epsilon_0^{0,6}). \quad (5.7)$$

Абсолютная температура продуктов сгорания за топкой:

$$T''_T = T_a / [1 + M(\epsilon_T / B_0)^{0,6}]. \quad (5.8)$$

Поверхность стен топки, необходимая для охлаждения продуктов сгорания до заданной температуры на выходе из топки:

$$F_{ст} = B_p Q_{л} [(T_a / T''_T - 1)^2 / M^2]^{0,33} / (5,67 \cdot 10^{-11} \epsilon_T \Psi_T M T''_T T_a^3), \quad \text{ё(5.9)}$$

где $Q_{л}$ – удельное тепловосприятие экранов топки по балансу, кДж/кг,
 $Q_{л} = (Q_T - H''_T) \phi; \quad (5.10)$

ϕ – коэффициент сохранения теплоты, учитывающий долю теплоты газов, воспринятой поверхностью нагрева:

$\phi = 1 - q_5 / (\eta + q_5)$. Здесь q_5 – потеря теплоты на наружное охлаждение, %.

ПРИМЕРЫ

Пример 5.1.

Определить адиабатную температуру горения кузнецкого угля марки СС. Условия сжигания топлива: топка с жидким шлакоудалением, температура горячего воздуха $t_{г.вз} = 370$ °С, $\Delta\alpha_T = 0$, $\Delta\alpha_{пл} = 0$; котел работает под наддувом, рециркуляция газов –отсутствует, избыток воздуха за топкой $\alpha_T = 1,15$, доля золы топлива, уносимая с продуктами сгорания, $a_{yh} = 0,5$.

Решение.

1. Определяем энтальпию газов для ожидаемого диапазона адиабатной температуры продуктов сгорания (2200–2000 °С). Для этого используем теоретические (таблица XV п.33 [8]) (таблица П3 п.6 [15]) энтальпии H^0_B и H^0_G для данного топлива. Они равны:

при $\theta_1 = 2200$ °С:

$$H^0_B = 22757 \text{ кДж/кг (24865)}, H^0_G = 26737 \text{ кДж/кг (28855)};$$

при $\theta_2 = 2000$ °С:

$$H^0_B = 20508 \text{ кДж/кг (22408)}, H^0_G = 24050 \text{ кДж/кг (22408)}.$$

При избытке $\alpha_T = 1,15$ энтальпия газов равна:

при $\theta_1 = 2200$ °С:

$$H_{Г1} = H^0_G + (\alpha_T - 1) H^0_B = 28855 + (1,15 - 1)24865 = 32585 \text{ кДж/кг};$$

при $\theta_2 = 2000$ °С:

$$H_{Г2} = 25971 + (1,15 - 1)22408 = 29332 \text{ кДж/кг}.$$

Так как отсутствует предварительный подогрев воздуха $Q_{В,ВН} = 0$, физической теплотой топлива пренебрегаем; тогда (таблица I п.33 [8]) (таблица П1 п.6 [15]):

$$Q_p^P = Q_H^P = 25330 \text{ (27420) (23570) кДж/кг}.$$

2. Определяем потери теплоты q_3 и q_4 по таблице П8 [15]: с химическим недожогом $q_3 = 0$; с механическим недожогом $q_4 = 1$ %.

3. Потери с физической теплотой шлаков $q_{6шл}$:

$$q_{6шл} = a_{шл}(c \cdot \theta)_{шл} A^P / Q_p^P = 0,5 \cdot 2064,1 \cdot 14,1 / 27420 = 0,531 \text{ \%}.$$

Температура шлаков принята равной температуре нормального жидкого шлакоудаления $t_{н.ж} = 1700$ °С. Эта температура обеспечивает устойчивое образование жидкого шлака на поде топки. При этом $(c \cdot \theta)_{шл} = 2064$ кДж/кг.

4. Определяем теоретическую энтальпию горячего воздуха. По таблице XV п.33 [8] для данного топлива и соответствующей температуры значения энтальпии равны:

$$\text{при } t_{Г,В1} = 400 \text{ °С } H_{Г,В1} = 3960 \text{ кДж/кг};$$

$$\text{при } t_{Г,В2} = 200 \text{ °С } H_{Г,В2} = 1947 \text{ кДж/кг}.$$

Для температуры $t_{Г,В3} = 370$ °С:

$$\begin{aligned} H_B &= H_{В1} - (H_{В1} - H_{В2})(t_{Г,В1} - t_{Г,В3}) / (t_{Г,В1} - t_{Г,В2}) = \\ &= 3960 - (3960 - 1947)(400 - 370) / (400 - 200) = 3658 \text{ кДж/кг}. \end{aligned}$$

5. Теплота, вносимая воздухом определяется по формуле (5.2):

$$Q_B = (1,15 - 0 - 0)3658 + 0 = 4207 \text{ кДж/кг}.$$

6. Определяем полезное тепловыделение в топке по формуле (5.1):

$$Q_T = 27420(100 - 1 - 0 - 0,531) / (100 - 1) + 4207 - 0 + 0 = 31480 \text{ кДж/кг}.$$

Для $Q_T = 31480$ кДж/кг адиабатная температура будет:

$$\theta_a = \theta_2 + (\theta_1 - \theta_2)(Q_T - H_{r2}) / (H_{r1} - H_{r2}) = 2000 + (2200 - 2000)(31480 - 29332) / (32585 - 29332) = 2132 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Пример 5.2.

В соответствии с данными решения примера 5.1 найти изменение адиабатной температуры горения при повышении температуры горячего воздуха на $50 \text{ }^\circ\text{C}$.

Решение.

1. Определяем теоретическую энтальпию горячего воздуха при температуре $420 \text{ }^\circ\text{C}$. По таблице XV п.33 [8] для данного топлива при $t_{г.в1} = 400 \text{ }^\circ\text{C}$ $H_{г.в1} = 3960$ кДж/кг, при $t_{г.в2} = 600 \text{ }^\circ\text{C}$ $H_{г.в2} = 6065$ кДж/кг.

При температуре $t_{г.в3} = 420 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$H_{г.в}^0 = H_{г.в1} + (H_{г.в2} - H_{г.в1})(t_{г.в3} - t_{г.в1}) / (t_{г.в2} - t_{г.в1}) = 3960 + (6065 - 3960)(420 - 400) / (600 - 400) = 4170,5 \text{ кДж/кг}.$$

2. Тепло, вносимое с воздухом в топку определяем по формуле (5.2):

$$Q_{в} = 4170,5 (1,15 - 0 - 0) + 0 = 4796 \text{ кДж/кг};$$

3. Полезное тепловыделение в топке при температуре горячего воздуха $420 \text{ }^\circ\text{C}$ определяем по формуле (5.1):

$$Q_T = 27420(100 - 1 - 0 - 0,531) / (100 - 1) + 4796 = 32069 \text{ кДж/кг}.$$

4. Определяем адиабатную температуру горения:

$$\theta_a = \theta_2 + (\theta_1 - \theta_2)(Q_T - H_{r2}) / (H_{r1} - H_{r2}) = 2000 + (2200 - 2000)(32069 - 29332) / (32595 - 29332) = 2168 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Таким образом, увеличение температуры горячего воздуха на $50 \text{ }^\circ\text{C}$ повысило адиабатную температуру на $2168 - 2132 = 36 \text{ }^\circ\text{C}$.

Существует приближенный способ определения разницы адиабатных температур:

– определяем изменение энтальпии продуктов сгорания в интервале температур $200 \text{ }^\circ\text{C}$ при ее изменении от 2000 до $2200 \text{ }^\circ\text{C}$. В соответствии с примером 5.2:

$$\Delta H_r = H_{r1} - H_{r2} = 32585 - 29332 = 3253 \text{ кДж/кг};$$

– определяем изменение энтальпии горячего воздуха в интервале температур $200 \text{ }^\circ\text{C}$ при ее изменении от 400 до $600 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$\Delta H_{г.в} = (H_{г.в2} - H_{г.в1})(\alpha_T - \alpha_{пл}) = (6065 - 3960)(1,15 - 0) = 2420 \text{ кДж/кг}.$$

Изменение адиабатной температуры продуктов сгорания

$$\Delta \theta_a = \Delta t_{г.в} \Delta H_{г.в} / \Delta H_r = 50 \cdot 2420 / 3253 = 37 \text{ }^\circ\text{C}.$$

ЗАДАЧИ

Задача 5.1.

Определить, насколько повысится адиабатная температура горения при переходе от замкнутой схемы сушки при сжигании кузнецкого угля марки СС (см. пример 5.1) к разомкнутой схеме сушки дымовыми газами. Принять влажность пыли $W_{пл} = 2 \%$, при разомкнутой схеме – подачу пыли в горелки воздухом от компрессора, долю транспортирующего воздуха $\Delta\alpha_{г.в} = 0,012$, температуру транспортирующего воздуха 60°C , температуру пыли после пылевого бункера 85°C . Рециркуляция газов отсутствует, шлакоудаление – жидкое, доля уноса золы $0,5$.

Задача 5.2.

Определить изменение адиабатной температуры при введении рециркуляции газов в ядро горения в количестве $5\text{--}20 \%$ с интервалом 5% , Топливо – березовский бурый уголь, характеристики которого приведены в таблица ПЗ (топливо № 14) [15].

Размол топлива – в индивидуальной замкнутой схеме пылеприготовления с мелющими вентиляторами, забор газов на рециркуляцию за воздухоподогревателем при $\theta_{yx} = 130^\circ\text{C}$ и избытке воздуха $\alpha = 1,26$.

При этом следует принять: температуру горячего воздуха 250°C ; отбор газов на сушку $r_{отб} = 0,2$; температуру газов в отборе на сушку 400°C при $\alpha_{суш} = \alpha_T$; избыток воздуха в топке $\alpha^T = 1,2$; присос в топке $\Delta\alpha_T = 0$; присосы воздуха в пылесистеме $\Delta\alpha_{пл} = 0,2$; предварительный подогрев воздуха в калориферах отсутствует, физической теплотой топлива пренебречь.

6. РАСЧЕТ ТЕПЛОВОСПРИЯТИЯ РАДИАЦИОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В ТОПКЕ

Теплота, воспринятая радиационными поверхностями нагрева в топке, определяется либо на основе позонного расчета топки, либо на основе теплового расчета топочной камеры в целом по методу ЦКТИ.

При использовании результатов позонного расчета для определения тепловосприятия радиационной поверхности $Q_{р.п}$, кДж/кг, используется формула:

$$Q_{р.п} = q_{л} F_{л.р.п} / B_p, \quad (6.1)$$

где $q_{л}$ – удельный воспринятый тепловой поток, кВт/м²;

$F_{л.р.п}$ – площадь лучевоспринимающей рабочей поверхности нагрева, м²;

B_p – расход топлива в котле, кг/с.

Если радиационная поверхность нагрева располагается не в одной, а в нескольких зонах, то формула (6.1) принимает вид:

$$Q_{р.п} = q'_{л} F'_{л.р.п} / B_p + q''_{л} F''_{л.р.п} / B_p, \quad (6.2)$$

где индексы ' и '' относятся к зонам, в которых находится радиационная поверхность.

Удельный воспринятый тепловой поток $q_{л}$, кВт/м², определяется для зоны с учетом коэффициента тепловой эффективности радиационной поверхности в зоне Ψ , коэффициента излучения газовой среды в зоне ε и средней температуры газов в зоне $T_{ср}$, К, по формуле:

$$q_{л} = 5,67 \cdot 10^{-11} \Psi \varepsilon F'_{л.р.п} T_{ср}^4. \quad (6.3)$$

Если известно тепловосприятие зоны Q_z , кДж/кг, то тепловое восприятие отдельной радиационной поверхности нагрева в пределах зоны можно найти из выражения

$$Q_{р.п} = Q_z \eta_{ст} F_{р.п} \Psi_{р.п} / (\Sigma F_{р.п} \Psi), \quad (6.4)$$

где $\eta_{ст}$ – коэффициент распределения тепловосприятия между стенами топки по ее периметру: при однофронтном размещении горелок для задней стены топки $\eta_{ст.з} = 1,1$, для фронтной $\eta_{ст.ф} = 0,9$; для боковых стен и в других случаях размещения горелок $\eta_{ст.} = 1$.

При использовании данных общего теплового расчета топки в целом известными тепловыми характеристиками являются средний воспринятый тепловой поток $q_{л}$, кВт/м², и удельное тепловосприятие экранов топки $Q_{л}$, кДж/кг, топлива.

Тогда для интересующей нас радиационной поверхности нагрева ее удельное тепловосприятие можно получить из выражения:

$$Q_{р.п} = Q_z \eta_v \eta_{ст} F_{р.п} \Psi_{р.п} / (\Sigma F_{ст} \Psi_{ср}), \quad (6.5)$$

где η_v – коэффициент неравномерности тепловосприятия по высоте топки (см. рисунок 6.1);

$F_{ст}$ – поверхность стен топки в целом, м².

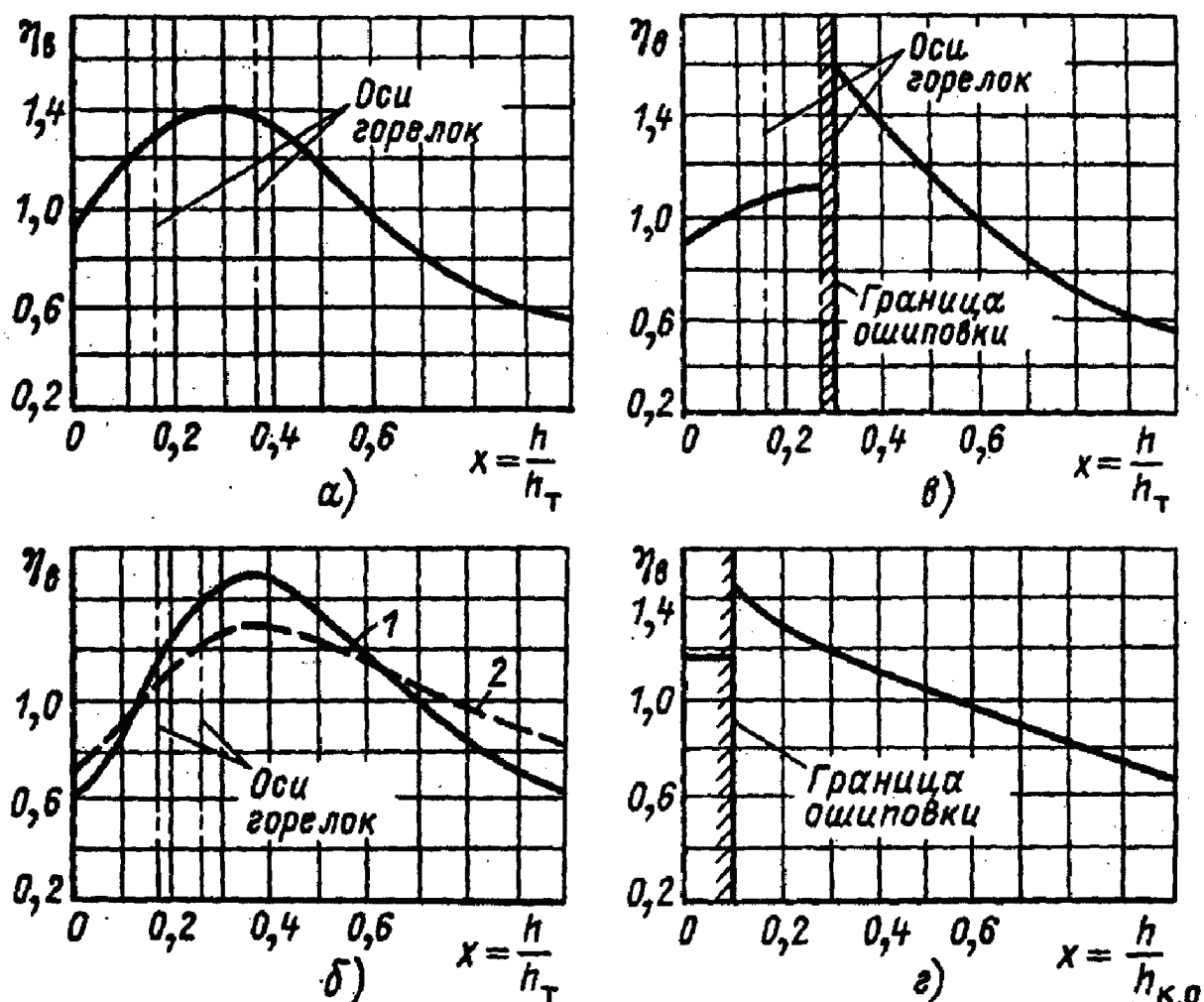


Рисунок 6.1. Коэффициент распределения тепловосприятости по высоте топки: а – газомазутные топки; б – пылеугольные топки (твердое шлакоудаление); 1 – антрацит, тощие и каменные угли, сухой бурый уголь; 2 – бурые угли, фрезерный торф; в – пылеугольные топки (жидкое шлакоудаление); г – камеры охлаждения двухкамерных топок.

При выполнении расчета для всех отдельных радиационных поверхностей топки должно соблюдаться условие $\Sigma Q_{р.п} = Q_{л.}$

ПРИМЕРЫ

Пример 6.1.

В топке котла Е – 500 – 13,8 ГМ ($p = 13,8$ МПа, $t_{мп} = 560$ °С) имеется радиационный пароперегреватель (РПП), выполненный из шести горизонтальных U – образных панелей по одной на боковых стенах ($n_6 = 2$) при ширине топки $b_T = 7,68$ м и по две на фронтальной и задней стенах ($n_\phi = 2$, $n_3 = 2$) при высоте топки $a_T = 13,52$ м, расположенных сверху испарительных вертикальных экранов. Каждая из панелей состоит из 30 труб ($n_{тр} = 30$) с наружным диаметром $d_{тр} = 36$ мм, толщиной стенки 5 мм и с шагом $s = 40$ мм. Ширина поверхности панели, занятая трубами:

$$l_{\text{тр}} = d_{\text{тр}} \cdot n_{\text{тр}} = 0,036 \cdot 30 = 1,08 \text{ м.}$$

Ширина ленты одной панели $b_{\text{л}} = 1,16 \text{ м}$. Интенсивность теплового потока в этой зоне $q_{\text{л}} = 157,6 \text{ кВт/м}^2$.

Нижняя отметка расположения панелей от пода топки 11,5 м.

Определить, насколько увеличится тепловосприятие радиационного пароперегревателя, если его сместить вниз на 4 м в зону с тепловым потоком $q_{\text{л}} = 235,7 \text{ кВт/м}^2$.

Удельный расход топлива принять $B_p = 9,25 \text{ кг/с}$.

Решение.

1. Определяем лучистую поверхность радиационного пароперегревателя:

$$F_{\text{л.р.п.}} = b_{\text{л}} \cdot n_{\text{б}} \cdot b_{\text{т}} \cdot l_{\text{тр}} + b_{\text{л}} \cdot n_{\text{ф}} \cdot a_{\text{т}} \cdot l_{\text{тр}} \cdot n_{\text{з}} = \\ = 1,16 \cdot 2 \cdot 13,52 \cdot 1,08 + 1,16 \cdot 2 \cdot 13,52 \cdot 1,08 \cdot 2 = 101,6 \text{ м}^2.$$

2. Определяем лучистое тепловосприятие радиационного пароперегревателя в исходном варианте:

$$Q'_{\text{р.п.}} = q_{\text{л}} F_{\text{л.р.п.}} / B_p = 157,6 \cdot 101,6 / 9,25 = 1731 \text{ кДж/кг.}$$

3. При смещении радиационного пароперегревателя вниз на 4 м:

$$Q''_{\text{р.п.}} = q'_{\text{л}} F_{\text{л.р.п.}} / B_p = 235,7 \cdot 101,6 / 9,25 = 2588,9 \text{ кДж/кг.}$$

Таким образом, со смещением радиационного пароперегревателя вниз на 4 м его тепловосприятие возрастает на:

$$2588,9 - 1731 = 857,9 \text{ кДж/кг.}$$

Пример 6.2.

Как изменится тепловосприятие радиационного перегревателя, приведенного в примере 6.1, при сжигании природного газа вместо мазута.

Из аналогичного позонного теплового расчета котла на природном газе получено: температура газов на входе в зону 1371°C , на выходе из нее 1238°C , коэффициент излучения топочной среды $\varepsilon_{\text{т}} = 0,76$, удельный расход топлива $B_p = 9,764 \text{ м}^3/\text{с}$.

Коэффициент тепловой эффективности радиационной поверхности в зоне $\Psi = 0,65$.

Решение. 1.

Определяем среднюю температуру в зоне:

$$T_{\text{ср}} = 0,5(\theta' + \theta'') + 273 = 0,5(1371 + 1238) + 273 = 1577,5 \text{ К;}$$

2. Определяем средний лучистый поток в зоне по формуле (6.3):

$$q_{\text{л.з}} = 5,67 \cdot 10^{-11} \Psi \cdot \varepsilon_{\text{т}} T_{\text{ср}}^4 = 5,67 \cdot 10^{-11} \cdot 0,65 \cdot 0,76 \cdot 1577,54 = 174,1 \text{ кВт/м}^2.$$

3. Определяем тепловосприятие радиационного пароперегревателя при сжигании природного газа:

$$Q_{\text{р.п.}} = q_{\text{л.з}} F_{\text{л.р.п.}} / B_p = 174,1 \cdot 101,6 / 9,764 = 1811,6 \text{ кДж/м}^3.$$

В связи с разной теплотой сгорания топлив (мазута и природного газа) сопоставим полное тепловосприятие радиационного пароперегревателя $Q_{р.п}^п$ кДж/с, в единицу времени из соотношения $Q_{р.п}^п = Q_{р.п} B_p$:
 при сжигании мазута $Q_{р.п}^п = 1731 \cdot 9,25 = 16011,8$ кДж/с;
 при сжигании газа $Q_{р.п}^п = 1811,6 \cdot 9,764 = 17688,5$ кДж/с.

Таким образом, при сжигании природного газа тепловосприятие радиационного пароперегревателя будет больше, что в основном объясняется повышенным коэффициентом тепловой эффективности экранов.

Пример 6.3.

В последней зоне топочной камеры с размерами: $V_T = 34760$ м³, $F_{ст} = 7092$ м², $h_T = 61,9$ м, $b_T = 18$ м, $a_T = 31,96$ м расположены 12 топочных ширм ($n = 12$) высотой $h_{ш} = 8$ и шириной $b_{ш} = 3,8$ м.

Определить тепловосприятие ширм, если омывание их продуктами сгорания продольное, температура газов на входе в ширмы 1152 °С и на выходе из нее 1048 °С.

Экраны в зоне топочных ширм и сами ширмы выполнены цельносварными (см. рисунок 6.2) из труб диаметром $d_{тр} = 32$ мм с шагом $S = 48$ мм.

Коэффициент теплоотдачи конвекцией в зоне ширм топочной камеры $\alpha_k = 7,15 \cdot 10^{-3}$ кВт/(м² · К); коэффициенты излучения $\epsilon = 0,811$ и коэффициент тепловой эффективности $\Psi = 0,4$. Удельный расход топлива $B_p = 126,6$ кг/с.

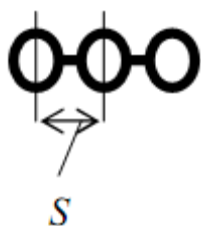


Рисунок 6.2. Схема цельносварных экранов

Решение.

1. Определяем среднюю температуру теплового потока в ширмах:

$$T_{ср} = 0,5(t_{вх} + t_{вых}) + 273 = 0,5(1152 + 1048) + 273 = 1373 \text{ К.}$$

2. Тепловой поток в топочных ширмах за счет радиации:

$$q_{л.ш} = 5,67 \cdot 10^{-13} \cdot \Psi \cdot \epsilon \cdot T_{ср}^4 = 5,67 \cdot 10^{-13} \cdot 0,4 \cdot 0,811 \cdot 1373^4 = 65,71 \text{ кВт/м}^2.$$

3. Поверхность лучистого теплообмена ширм:

$$F_{л.т.ш.} = b_{ш} h_{ш} 2n = 3,8 \cdot 8 \cdot 2 \cdot 12 = 729,6 \text{ м}^2.$$

4. Определяем тепловосприятие топочных ширм за счет радиации:

$$Q_{л.т.ш.} = q_{л.ш} F_{л.т.ш.} / B_p = 65,7 \cdot 729,6 / 126,6 = 278,5 \text{ кДж/кг.}$$

5. Определяем тепловосприятие топочных ширм конвекцией. Для условий расчета средняя температура газов $\theta_{ср} = 1100$ °С, температуру пара в ширмах принимаем $t_{ср} = 400$ °С.

Площадь поверхности конвективного теплообмена:

$$F_k = [\pi d_{тр} + (S - d_{тр})^2] h_{ш} (b_{ш}/S + 1) n = \\ = [3,14 \cdot 0,032 + (0,048 - 0,032)^2] 8 (3,8/0,048 + 1) 12 = 1017,8 \text{ м}^2.$$

Конвективный тепловой поток в топочных ширмах:

$$Q_{к.т.ш.} = \alpha_k (\theta_{ср} - t_{ср})(F_k - F_{л.т.ш.})/B_p = \\ = 7,15 \cdot 10^{-3} (1100 - 400)(1017,8 - 729,6)/126,6 = 11,4 \text{ кДж/кг}$$

Таким образом, суммарное тепловосприятие ширм:

$$Q_{т.ш.} = Q_{л.т.ш.} + Q_{к.т.ш.} = 378,5 + 11,4 = 389,9 \text{ кДж/кг.}$$

Возможно приближенное определение тепловосприятия топочных ширм другим методом.

Охлаждение продуктов сгорания в зоне расположения ширм вычисляется по формуле:

$$Q_3 = (H' - H'')\phi,$$

где H' , H'' – энтальпии продуктов сгорания на входе в зоне ширм и на входе из нее;

ϕ – коэффициент сохранения тепла в топке.

При температурах газов 1152°C и 1048°C энтальпии продуктов сгорания составляют 12864 кДж/кг и 11578 кДж/кг , $\phi = 0,998$, тогда:

$$Q_3 = (12864 - 11578)0,998 = 1283 \text{ кДж/кг.}$$

Тепловосприятие топочных ширм в связи с преобладанием радиационного тепловосприятия. Средний коэффициент эффективности экранов принимаем по [8] $\psi_{ср} = 0,446$

Определяем для приближенного расчета площадь потолочной лучевоспринимающей поверхности топки;

$$F_{п.л.} = a_T \cdot b_T = 31,98 \cdot 18 = 575,3 \text{ м}^2.$$

Определяем для приближенного расчета площадь лучевоспринимающих поверхностей стен топки в области ширм:

$$F_{с.л.ш.} = 2h_{ш} \cdot b_T + 2h_{ш} \cdot a_T = 2 \cdot 8 \cdot 18 + 2 \cdot 8 \cdot 31,98 = 799,4 \text{ м}^2.$$

Средняя лучевоспринимающая поверхность топки в области ширм:

$$F_{ср} = F_{л.т.ш.} + F_{п.л.} + F_{с.л.ш.} = 729,6 + 575,3 + 799,4 = 2104,3 \text{ м}^2.$$

Отсюда, значение тепловосприятия топочных ширм $Q_{п.р.}$, вычисленное по приближенному методу, составляет:

$$Q_{п.р.} = Q_3 (\Psi F_{л.т.ш.}) / (\Psi_{ср} F_{ср}) = 1283 (0,4 \cdot 729,6) / (0,446 \cdot 2104,3) = 399 \text{ кДж/кг.}$$

ЗАДАЧИ

Задача 6.1.

Как изменится тепловосприятие радиационного перегревателя в примере 6.2,

если его конструкцию выполнить из сдвоенных U – образных труб диаметром 42 мм, с шагом 45 мм, радиусом внутренней петли 105 мм, в ленте принять 20 труб.

Принять расположение одной петли в зоне 2, второй – в зоне 3 по всему периметру топки; тепловые потоки в зонах принять по примеру 6.2: $q_{л2} = 235,7$ кВт/м² и $q_{л3} = 157,6$ кВт/м².

Задача 6.2.

Как изменится поверхность стен призматической топочной камеры при установке в ней шести низкоопущенных ширм высотой 15 м и шириной 2 м из труб с наружным диаметром 32 мм и с шагом между трубами 45 мм?

В исходном варианте топка имеет объем $V_T = 2750$ м³, лучевоспринимающая поверхность экранов $F_{л.т} = 1388$ м². Как изменится соотношение $F_{л.т} / V_T$?

7. ТЕПЛОВСПРИЯТИЕ РАДИАЦИОННО-КОНВЕКТИВНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА

Количество теплоты Q_6 , кДж/кг, которое отдают продукты сгорания при их охлаждении в поверхности нагрева от температуры на входе θ' до температуры на выходе θ'' , определяется балансовым уравнением:

$$Q_6 = (H' - H'')\phi - Q_{доп}. \quad (7.1)$$

где H' , H'' – энтальпия продуктов сгорания при температурах θ' и θ'' , кДж/кг;

Q_6 – тепловосприятие по балансу дополнительных поверхностей, кДж/кг.

Количество теплоты $Q_{л.ш}$, кДж/кг, воспринимаемое поверхностью (ширмой, фестом) в результате прямого излучения из топочного объема, определяется как разность поступающей тепловой энергии через входное сечение $Q_{л.вх}$ и переизлученной на другие поверхности через выходное сечение $Q_{л.вых}$:

$$Q_{л.ш} = Q_{л.вх} - Q_{л.вых}. \quad (7.2)$$

При этом:

$$Q_{л.вх} = q_{л.ш} \cdot F_{л.вх} / B_p; \quad (7.3)$$

$$Q_{л.вых} = Q_{л.вх} (1 - \epsilon) / \beta + (5,76 \cdot 10^{-11} \cdot \epsilon \cdot T_{ср}^4 \cdot \xi_{п}) / B_p, \quad (7.4)$$

где $q_{л.ш}$ – интенсивность теплового потока в районе выходного окна топки, кВт/м²; принимается из позонного расчета топки либо при его отсутствии определяется по формуле:

$$q_{л.ш} = \beta \eta_v B_p Q_{л} / F_{ст}, \quad (7.5)$$

где β – коэффициент, учитывающий взаимный теплообмен между топкой и ширмами и определяемый в зависимости от температуры газов в конце топки θ''_T (см. рисунок 7.1);

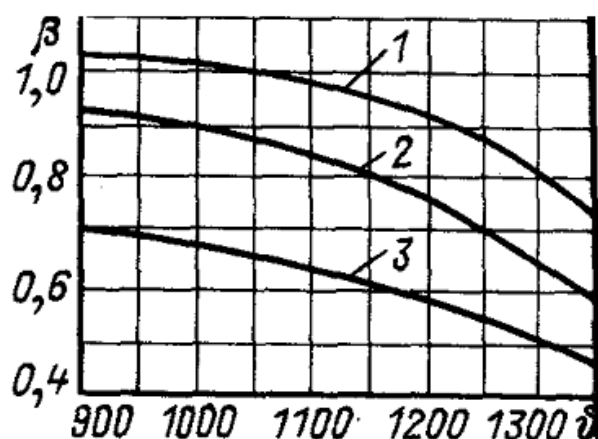


Рисунок 7.1. Коэффициент β , учитывающий теплообмен между топкой и ширмовой поверхностью пароперегревателя в зависимости от температуры газов в конце топки $\theta''_т$: 1 – для твердого топлива; 2 – для мазута; 3 – для газового топлива

η_v – коэффициент неравномерности тепловосприятости топки по высоте в районе выходного окна, принимается по графику (см. рисунок 6.1);

$Q_{\text{л}}$ – лучистое тепловосприятие поверхности стен топки, кДж/кг;

$F_{\text{ст}}$ – площадь поверхности стен топки, м^2 ;

ε – коэффициент излучения продуктов сгорания при средней температуре газов, определяется по зависимости:

$$\varepsilon = 1 - \exp(-kps),$$

где k – коэффициент ослабления лучей топочной средой;

p – давление газовой среды в топке;

s – эффективная толщина излучающего слоя:

$$s = 3,6V_{\text{т}} / F_{\text{ст}};$$

$V_{\text{т}}$ – объем топки, м^3 ;

при наличии ширм, включаемых в объем топки,

$$s = (3,6V_{\text{т}} / (F_{\text{св}} + F_{\text{ш.т}} + F_{\text{пр}})) (1 + F_{\text{ш.т}} V_{\text{св}} / (F_{\text{св}} + F_{\text{пр}}) V_{\text{т}});$$

$V_{\text{св}}$ – объем топки, свободный от ширм, м^3 ;

$F_{\text{св}}$ – поверхность стен части топки, свободной от ширм

$F_{\text{ш.т}}$ – поверхность ширм, установленных в топке (кроме ширм, установленных в окне);

$F_{\text{пр}}$ – поверхность стен топки, прилегающих к ширмам;

$\xi_{\text{п}}$ – поправочный коэффициент, зависящий от вида топлива, принимается равным: 0,5 при сжигании угля и мазута, 0,7 при сжигании природного газа и 0,2 при сжигании сланцев.

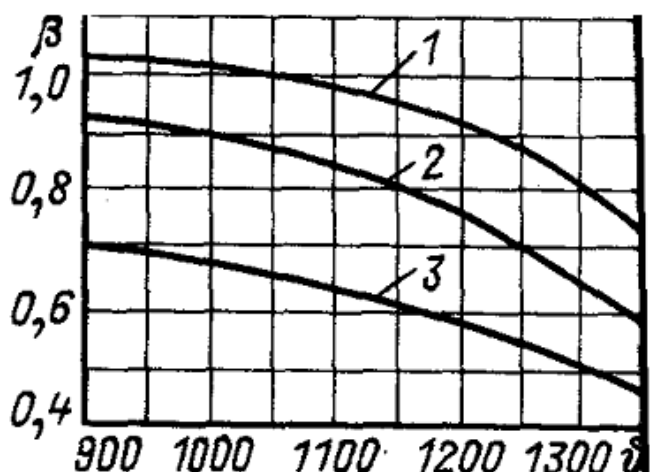


Рисунок 7.1. Коэффициент β , учитывающий теплообмен между топкой и ширмовой поверхностью пароперегревателя в зависимости от температуры газов в конце топки θ''_m : 1 – для твердого топлива; 2 – для мазута; 3 – для газового топлива.

Если фестон (котельный пучок) имеет число рядов в глубину $z_2 > 5$, то теплота излучения из топки полностью воспринимается этой поверхностью.

При меньшем числе рядов радиационная теплота фестона (котельного пучка) определяется по формуле:

$$Q_{л.ф} = q_{л.ф} \cdot F_{л.ф} / B_p \quad (7.6)$$

где $F_{л.ф}$ – лучевоспринимающая поверхность фестона (котельного пучка), m^2 , определяется по формуле:

$$F_{л.ф} = a h_{г.о} x_{ф},$$

где a – ширина газового окна, в котором находится фестон, м;

$h_{г.о}$ – расчетная высота газового окна, в котором находится фестон, м;

$x_{ф}$ – угловой коэффициент фестона, определяемый по графику (рисунок 7.2);

при числе труб $z_2 > 5$ $x_{ф} = 1$;

$q_{л.ф}$ – интенсивность теплового потока в районе фестона, kW/m^2 определяется из позонного расчета топки либо по формуле (7.5).

Если фестон установлен за ширмами:

$$Q_{л.ф} = Q_{л.вых} x_{ф}. \quad (7.7)$$

Рабочая среда в трубах воспринимает полное количество теплоты (радиационное и конвективное).

Приращение энтальпии среды составляе;

$$\Delta h = (Q_6 + Q_{л.ф}) B_p / D, \quad (7.8)$$

где D – расход среды через поверхность, kg/s .

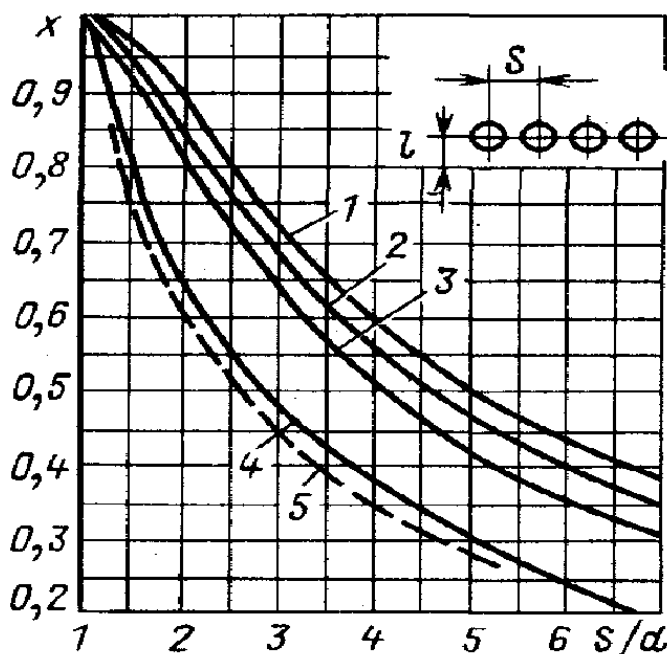


Рисунок 7.2. Угловой коэффициент однорядного гладкотрубного экрана в зависимости от расстояния до обмуровки (стенки газохода) l : 1 – с учетом излучения обмуровки, $l > 1,4d$; 2 – то же, $l = 0,8d$; 3 – то же, $l = 0,5d$; 4 – то же, $l = 0$; 5 – без учета излучения обмуровки.

ПРИМЕРЫ

Пример 7.1.

Определить тепловосприятие ширм пароперегревателя и приращение энтальпии пара.

При выполнении расчетов принять:

температуры газов на входе в ширмы пароперегревателя $\theta' = 1060^\circ\text{C}$;

на выходе из ширм пароперегревателя $\theta'' = 950^\circ\text{C}$;

энтальпии газов на входе в ширмы пароперегревателя $H' = 11983 \text{ кДж/кг}$;

энтальпии газов на выходе из ширмы пароперегревателя $H'' = 10605 \text{ кДж/кг}$;

температура рабочей среды (пара) на входе $t' = 417^\circ\text{C}$;

давление пара на входе в пароперегреватель $p' = 14,96 \text{ МПа}$;

давление пара на выходе из пароперегревателя $p'' = 14,67 \text{ МПа}$;

энтальпия пара на входе в пароперегреватель $h' = 3047 \text{ кДж/кг}$;

коэффициент сохранения тепла в котлоагрегате $\phi = 0,996$;

паропроизводительность котла $D = 136,81 \text{ кг/с}$;

удельный тепловой поток в ширмах $q_{\text{л.ш}} = 69,7 \text{ кВт/м}^2$;

площадь ширм на входе $F_{\text{л.вх}} = 52 \text{ м}^2$;

площадь ширм на выходе $F_{\text{л.вых}} = 45 \text{ м}^2$;

топливо – каменный уголь;

расход топлива в котле $B_p = 9,76 \text{ кг/с}$;

эффективная толщина излучающего слоя $S = 0,84 \text{ м}$;

давление в газоходе $0,1 \text{ МПа}$;

объемная доля водяного пара в продуктах сгорания $\gamma_{\text{H}_2\text{O}} = 0,091$;
 объемная доля трехатомных газов в продуктах сгорания $\gamma_{\text{п}} = 0,231$;
 массовая концентрация золы в продуктах сгорания $\mu_{\text{зл}} = 0,0227$, кг/кг;
 угловой коэффициент ширм $\varphi_{\text{ш}} = 0,14$.

Тип мельниц – среднеходовые. Дополнительное тепловосприятие других поверхностей в зоне расположения ширм $Q_{\text{доп}} = 91$ кДж/кг.

Решение.

1. По формуле (7.1) определяем тепловосприятие ширмовых поверхностей:
 $Q_6 = (H' - H'')\varphi - Q_{\text{доп}} = (11983 - 10605) 0,996 - 91 = 1281,5$ кДж/кг.

2. Средняя температура продуктов сгорания:

$$\theta_{\text{ср}} = (\theta' + \theta'')0,5 = (1060 + 950)0,5 = 1005 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$T_{\text{ср}} = \theta_{\text{ср}} + 273 = 1278 \text{ K};$$

3. Произведение $p_{\text{п}}s = p \gamma_{\text{п}} s = 0,1 \cdot 0,231 \cdot 0,84 = 0,0194$ м·МПа;

коэффициенты ослабления (см. рисунок 7.2а):

$$k_{\text{г}} = 10,56 \text{ м}^{-1} \cdot \text{МПа}^{-1};$$

$$k_{\text{зл}} = 74,76 \text{ м}^{-1} \cdot \text{МПа}^{-1}.$$

Оптическая толщина запыленного потока:

$$kps = (k_{\text{г}} \gamma_{\text{п}} + k_{\text{зл}} \mu_{\text{зл}})ps = (10,56 \cdot 0,231 + 74,76 \cdot 0,0227) 0,1 \cdot 0,84 = 0,347.$$

Коэффициент излучения запыленного потока

$$\varepsilon = 1 - \exp(-kps) = 1 - \exp(-0,347) = 0,293.$$

4. Определяем по формуле (7.6) теплоту поступающую через плоскость входного сечения ширм:

$$Q_{\text{л.вх}} = 69,7 \cdot 52 / 9,76 = 371,4 \text{ кДж/кг}.$$

5. По формуле (7.4) определяем теплоту в выходном сечении ширм:

$$Q_{\text{л.вых}} = 371,4 (1 - 0,293) 0,14 / 0,97 + 5,67 \cdot 10^{-11} \cdot 0,293 \cdot 45 \cdot 1274^4 \cdot 0,5 / 9,76 = 140,8 \text{ кДж/кг}$$

Здесь поправочный коэффициент $\beta = 0,97$ (при $\theta' = 1060$ °C).

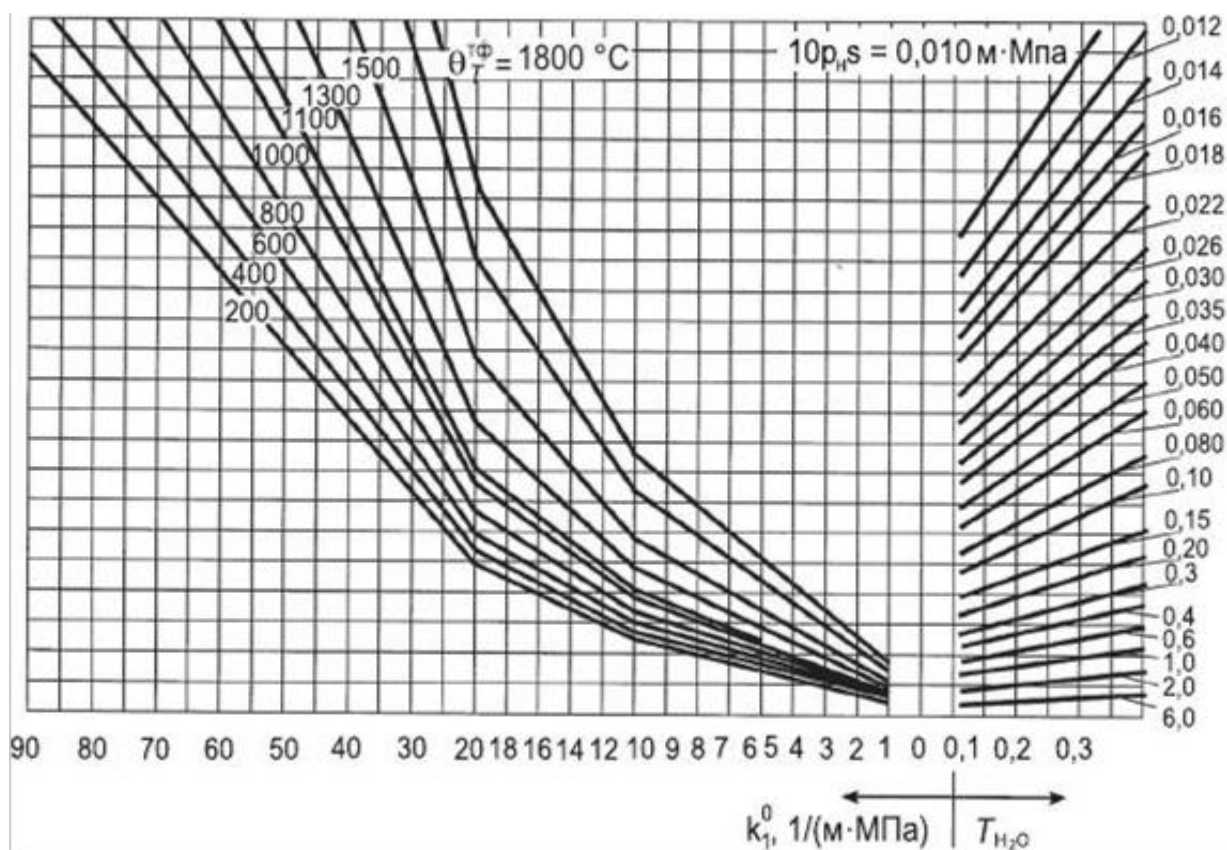


Рисунок 7.2а. Коэффициент поглощения лучей газовой фазой продуктов сгорания.

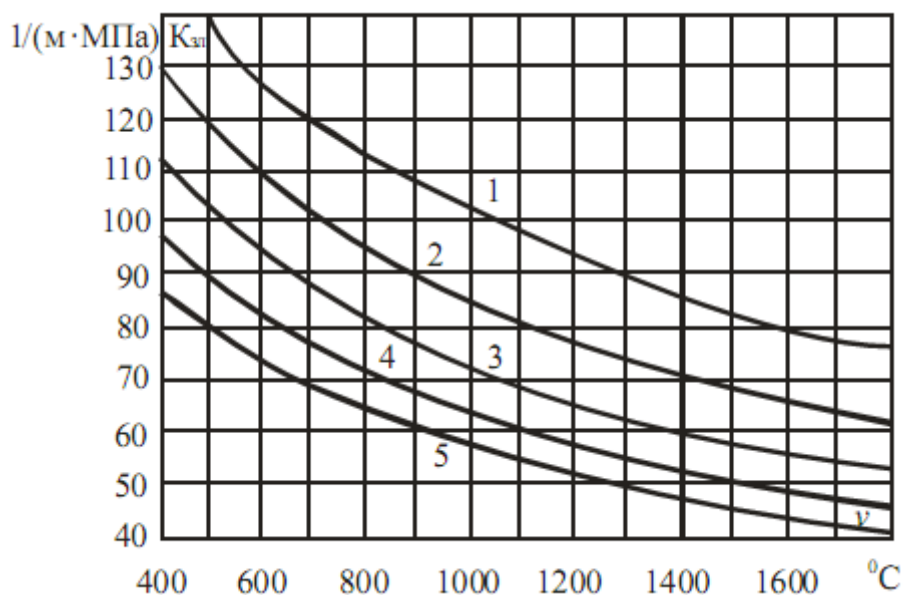


Рисунок 7.2б. Коэффициент ослабления лучей золовыми частицами: 1. при сжигании пыли в циклонных топках; 2. при сжигании углей, размолотых в ШБМ; 3. при сжигании углей в других мельницах; 4. для слоевых топок; 5. при сжигании торфа.

6. Радиационное тепловосприятие ширм из топки определяем по формуле (7.2):

$$Q_{л.ш} = 371,4 - 140,8 = 230,6 \text{ кДж/кг}$$

7. Приращение энтальпии пара в ширме определяем по формуле (7.8):

$$\Delta h''_{ш} = (1281,5 + 230,6)9,76 / 136,81 = 107,9 \text{ кДж/кг.}$$

8. Энтальпия пара на выходе из ширмы:

$$h''_{ш} = h' + \Delta h''_{ш} = 3043,9 + 107,9 = 3151,8 \text{ кДж/кг.}$$

9. Температура на выходе из ширмы [4, с. 219]

$$t''_{ш} = 446 \text{ °C.}$$

Пример 7.2.

Как изменятся коэффициент излучения в ширмовом пароперегревателе, угловой коэффициент и радиационное тепловосприятие из топки при изменении поперечного шага между секциями пароперегревателя с $S_1 = 600$ до $S_1 = 1200$ мм?

При расчете принять:

температура газов на входе $\theta' = 1212 \text{ °C}$;

температура газов на выходе $\theta'' = 1080 \text{ °C}$;

давление в газоходе $p = 0,1 \text{ МПа}$;

объемная доля водяного пара в продуктах сгорания $r_{H_2O} = 0,118$;

объемная доля трехатомных газов в продуктах сгорания $r_n = 0,257$.

Высота секций ширм $h_{ш} = 9 \text{ м}$;

глубина секций ширм $s = 2,8 \text{ м}$.

Решение.

1. Исходный вариант с $S_1 = 0,6 \text{ м}$.

Средняя температура продуктов сгорания

$$\theta_{ср} = (\theta' + \theta'') / 2 = (1212 + 1080) / 2 = 1146 \text{ °C,}$$

$$\text{или } T_{ср} = 1146 + 273 = 1419 \text{ К.}$$

Произведение $p_n s$:

$$p_n s = p r_n s = 0,1 \cdot 0,257 \cdot 0,843 = 0,0216 \text{ м} \cdot \text{МПа,}$$

где эффективная толщина излучающего слоя:

$$s = 1,8 / (1 / h_{ш} + 1 / S_1 + 1 / c) = 1,8 / (1 / 9 + 1 / 0,6 + 1 / 2,8) = 0,843 \text{ м.}$$

Коэффициент ослабления лучей [4, с. 242, 243] $k = 9,438 \text{ м}^{-1} \cdot \text{МПа}^{-1}$

и оптическая толщина газового потока:

$$k p s = k r_n s = 9,438 \cdot 0,1 \cdot 0,257 \cdot 0,843 = 0,204.$$

Коэффициент излучения:

$$\varepsilon = 1 - \exp(-k p s) = 1 - \exp(-0,204) = 0,185.$$

2. Вариант с $S_1 = 1,2 \text{ м}$.

Эффективная толщина излучающего слоя :

$$s = 1,8 / (1 / a + 1 / b + 1 / c) = 1,8 / (1 / 9 + 1 / 2,8 + 1 / 1,2) = 1,383 \text{ м.}$$

$$\text{Произведение } pps = pr_{пs} = 0,1 \cdot 0,257 \cdot 1,383 = 0,0355 \text{ м}^2 \cdot \text{МПа.}$$

$$\text{Коэффициент ослабления лучей [4, с. 242, 243] } k = 7,26 \text{ м}^{-1} \cdot \text{МПа}^{-1}.$$

Оптическая толщина излучающего слоя:

$$kr_{пs} = 7,26 \cdot 0,1 \cdot 0,257 \cdot 1,383 = 0,258.$$

Коэффициент излучения:

$$\varepsilon = 1 - \exp(-kr_{пs}) = 1 - \exp(-0,258) = 0,227.$$

Таким образом, в данном случае увеличение поперечного шага между секциями в 2 раза повысило коэффициент излучения газового объема примерно в $0,227/0,185=1,23$ раза.

Пример 7.3.

Определить тепловосприятие двухрядного фестона, расположенного на выходе из топочной камеры и являющегося отводящей системой заднего экрана топки. При выполнении расчетов принять:

отводящие трубы диаметром $d = 60$ мм, толщиной стенки 6 мм, с коридорным расположением, поперечным шагом $S_1 = 750$ мм, продольным шагом $S_2 = 150$ мм, размеры газохода: высота $a = 9200$ мм, ширина $b = 5000$ мм;

топливо – бурый уголь;

расход топлива в котле $V_p = 10,09$ кг/с;

температура газов на входе в фестон $\theta' = 1012$ °С;

температура газов на выходе из зоны фестона $\theta'' = 1003$ °С;

удельный лучистый поток в фестоне $q_{л.ф} = 96,3$ кВт/м²;

энтальпия продуктов сгорания на входе фестона $H' = 6785,9$ кДж/кг и на выходе $H'' = 6701,8$ кДж/кг.

Коэффициент сохранения тепла в котле $\varphi = 0,9935$.

Решение.

1. Угловой коэффициент (см. рис. 7.2) при $S_1/S_2 = 750/60 = 12,5$ для первого ряда труб фестона $x = 0,2$. С учетом второго ряда угловой коэффициент фестона $x_{ф} = x + (1 - x)x = 0,2 + (1 - 0,2)0,2 = 0,36$.

2. Площадь лучистой поверхности фестона:

$$F_{л.ф} = abx_{ф} = 9,2 \cdot 5 \cdot 0,36 = 16,56 \text{ м}^2.$$

3. Тепловосприятие фестона излучением из топки:

$$Q_{л.ф} = q_{л.ф} F_{л.ф} / V_p = 96,3 \cdot 16,56 / 10,09 = 158,05 \text{ кДж/кг.}$$

4. Тепловосприятие труб фестона (за счет теплообмена с газами $Q_{доп}=0$) определяем по формуле (7.1):

$$Q_6 = (6785,9 - 6701,8) 0,9935 = 83,6 \text{ кДж/кг.}$$

5. Полное тепловосприятие труб фестона:

$$Q_{\Phi} = Q_{\text{л.}\Phi} + Q_{\text{б}} = 158,05 + 83,6 = 241,65 \text{ кДж/кг.}$$

Как видно, в двухрядном фестоне количество теплоты, получаемой радиацией из топки, может превышать теплоту, полученную от продуктов сгорания конвекцией и межтрубным излучением.

ЗАДАЧИ

Задача 7.1.

Как изменится количество лучистой теплоты из топки, воспринятой радиационно-конвективным пароперегревателем при увеличении высоты ширм с 7 до 9 м? При решении задачи принять:

поперечный шаг между секциями $s_1 = 600 \text{ мм}$;

глубина секций $s = 2,8 \text{ м}$;

поверхность входного окна пароперегревателя 174 м^2 (высота 7 м) и $225,3 \text{ м}^2$ (высота 9 м);

поверхности выходного окна $88,8 \text{ м}^2$ (высота 7 м) и $114,2 \text{ м}^2$ (высота 9 м);

топливо – мазут; расход топлива в котле $B_p = 19,278 \text{ кг/с}$;

содержание водяного пара $r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,119$;

содержание трехатомных газов $r_{\text{п}} = 0,257$;

удельный лучистый поток $q_{\text{л.ш.}} = 19,5 \text{ кВт/м}^2$;

средняя температура газов в пароперегревателе $1160 \text{ }^\circ\text{C}$;

коэффициент взаимного теплообмена (топка-ширма) $\beta = 0,76$.

Задача 7.2.

Как изменится количество лучистой теплоты из топки в единицу времени, если вместо мазута будет сжигаться твердое топливо?

Произвести сопоставление при одинаковых геометрических размерах радиационно-конвективного перегревателя:

высота секций 9000 мм ;

глубина 2800 мм ;

шаг между ними 600 мм ;

поверхность входного окна $225,3 \text{ м}^2$;

поверхность выходного окна $114,2 \text{ м}^2$;

данные по мазуту принять по задаче 7.1;

расход твердого топлива в котле $B_p = 63,7 \text{ кг/с}$;

содержание водяного пара в продуктах сгорания $r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,168$;

содержание трехатомных газов в продуктах сгорания $r_{\text{п}} = 0,305$;

концентрация золы в продуктах сгорания $\mu_{\text{зл}} = 0,017 \text{ кг/кг}$;

мельницы-среднеходные;

удельный лучистый поток $q_{\text{л.ш.}} = 19,5 \text{ кВт/м}^2$.

Температуры газов в обоих случаях принять на выходе из топки 1150°C , за пароперегревателем 1050°C .

Задача 7.3.

Определить балансовое тепловосприятие радиационно-конвективного пароперегревателя, лучистую теплоту, которую он получает из топки и приращение энтальпии пара в нем.

При расчете принять:

топливо- мазут;

температура газов на входе конвективного пароперегревателя $\theta' = 1272^\circ\text{C}$;

температура газов на выходе из конвективного пароперегревателя $\theta'' = 1101^\circ\text{C}$;

энтальпия на входе конвективного пароперегревателя $H' = 24350 \text{ кДж/кг}$;

энтальпия на выходе из конвективного пароперегревателя $H'' = 20758 \text{ кДж/кг}$;

тепловосприятие дополнительных поверхностей $Q_{\text{доп}} = 420 \text{ кДж/кг}$;

температура пара на входе $t' = 365^\circ\text{C}$;

давление пара на входе $p' = 14,72 \text{ МПа}$;

давление пара на выходе $p'' = 14,32 \text{ МПа}$;

энтальпия пара на входе $h' = 2814,4 \text{ кДж/кг}$;

расход топлива в котле $B_p = 14,44 \text{ кг/с}$;

коэффициент сохранения тепла в котле $\phi = 0,997$;

расход пара в котле $D_{\text{ш}} = 175,75 \text{ кг/с}$;

удельный лучистый поток $q_{\text{л.ш}} = 57,9 \text{ кВт/м}^2$;

площадь поверхности радиационно-конвективного пароперегревателя на входе $F_{\text{л.вх}} = 171 \text{ м}^2$;

площадь поверхности радиационно-конвективного пароперегревателя на выходе $F_{\text{л.вых}} = 117 \text{ м}^2$;

эффективная толщина излучающего слоя $s = 0,872 \text{ м}$;

давление в газоходе $p = 0,1 \text{ МПа}$;

содержание водяного пара в продуктах сгорания $r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,187$;

содержание трехатомных газов в продуктах сгорания $r_{\text{п}} = 0,281$;

угловой коэффициент ширм $\phi_{\text{ш}} = 0,174$.

8. ПОВЫШЕНИЕ ЭКОНОМИЧНОСТИ КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Повышение экономичности котельных установок достигается путем применения комплекса пуско-наладочных и режимно-наладочных работ, повышающих экономическую эффективность технологических показателей котельного оборудования, и мероприятиями малой и капитальной модернизации.

К мероприятиям комплекса режимно-наладочных работ и к мероприятиям малой модернизации, проводимых с целью энергосбережения, относятся:

1. Систематические наладочные режимные испытания.
2. Повышение экономичности работы топочных устройств путем ликвидации потерь теплоты от химической неполноты горения.
3. Снижение потерь теплоты от механической неполноты горения.
4. Уменьшение коэффициента избытка воздуха в топке.

5. Систематический надзор за газовым и воздушным трактами.
6. Улучшение работы конвективных поверхностей нагрева.
7. Снижение сопротивлений газоздушного тракта.
8. Экономичное распределение нагрузки между работающими котлоагрегатами.
9. Изоляция горючих поверхностей.
10. Внедрение экономичных способов регулирования производительности тягодутьевых машин.

Малая модернизация оборудования не требует больших затрат и, как правило, может быть осуществлена собственными силами предприятия в короткий срок.

Практика показала, что за счет малой модернизации и повышения культуры эксплуатации в промышленных и отопительных котельных можно получить до 10–15 % экономии топлива.

К мероприятиям капитальной модернизации относятся:

1. Полная замена котельных агрегатов.
2. Замена топочных устройств.
3. Установка хвостовых поверхностей нагрева.
4. Экранирование топочной камеры.
5. Реконструкция или замена оборудования водоподготовки.
6. Установка теплофикационных экономайзеров.
7. Автоматизация процесса горения.
8. Автоматизация регулирования температуры перегрева пара.
9. Перевод паровых котлов на водогрейный режим.

В таблице 8.1. приведены данные, характеризующие удельный расход электроэнергии на единицу отпущенного тепла по различным маркам котлов. Режимная карта котлоагрегата составляется в результате режимно-наладочных испытаний. В ней указываются основные параметры, поддержание которых обеспечивает наиболее экономичный режим работы котлоагрегата. Поддержание заданного режима осуществляет оперативный персонал или система автоматического регулирования котлоагрегата.

Режимная карта должна быть составлена для всех промежуточных нагрузок котла от минимальной до максимальной.

Одной из основных задач эксплуатации котельных установок является экономия сжигаемого топлива. Для решения этой задачи необходимо систематически анализировать режим работы котельной установки и на базе показаний контрольно-измерительных приборов составлять эксплуатационный тепловой баланс котлоагрегатов.

Таблица 8.1 - Удельные расходы электроэнергии на единицу отпущенного тепла по маркам котлов, кВт·ч/ГД.

Марка котла	Расход электроэнергии, кВт·ч, на отпущенный 1 ГДж (1 Гкал) тепловой энергии
-------------	---

	Вид топлива	
	газ, мазут	уголь
БКЗ–75–35–39ФБ	-	4,06 – 4,77 (17,0 – 20,0)
БКЗ–75–39ГМА	2,15–2,62 (9,0–11,0)	-
К–50–40/14	-	4,56 – 5,0 (19,0 – 21,0)
ГМ–50–14	2,38–2,86 (10,0–12,0)	-
КВ–ГМ–50	1,31–1,91 (5,5–8,0)	-
ЭЧМ–60	-	4,56 – 5,0 (19,0 – 21,0)

Поэтому оперативный персонал должен вести суточную ведомость оборудования котельного цеха, снимать и обрабатывать показания регистрирующих приборов. Обычно запись показаний измерительных приборов производят через каждые 30 мин, а счетчиков, указывающих расход пара, воды газообразного или жидкого топлива, – через каждый час.

Инженерно-технический персонал, отвечающий за эксплуатацию оборудования (начальник цеха, старший мастер или мастер), ежедневно просматривает суточную ведомость работы и вахтенный журнал.

Это позволяет выявить отклонение отдельных параметров от оптимальных значений, проанализировать среднесменные показатели, характеризующие экономичность работы и качество обслуживания оборудования персоналом.

Основные показатели работы оборудования обрабатываются за декаду, а затем за месяц с составлением и анализом отдельных статей теплового баланса котлоагрегата.

Основными показателями, характеризующими экономичность работы котла на газообразном и жидком топливе, являются:

1. Давление и температура перегретого пара.
2. Расход пара и питательной воды.
3. Содержание трехатомных газов и кислорода в продуктах сгорания.
4. Температура питательной воды до экономайзера и после него (для некипящих экономайзеров).
5. Температура воздуха, забираемого вентилятором, и температура после воздухоподогревателя.
6. Температура уходящих газов.
7. Расход электроэнергии на привод агрегатов для собственных нужд.

При работе на твердом топливе дополнительно к указанным показателям добавляется определение содержания горючих в шлаке, а также низшая теплота сгорания рабочей массы топлива.

Улучшение работы конвективных поверхностей нагрева достигается соответствующим расположением перегородок, направляющих продукты сгорания, и их целостью, а также систематической очисткой наружной и внутренней поверхности труб.

При эксплуатации котельных с паровыми и водогрейными котлами при сжигании любого топлива недопустимо отклонение параметров пара и воды от

номинальных значений, так как это приводит к перерасходу топлива. Однако на практике поддержанию номинальных параметров в промышленных и отопительных котельных не уделяется должного внимания.

Работа паровых котлов с пониженным давлением приводит к уменьшению КПД вследствие двух причин:

1. Из-за необходимости снижения температуры воды после чугунного водяного экономайзера во избежание ее закипания.
2. Объем пара при снижении давления заметно возрастает, что приводит к увеличению скорости пара в барабане котла и в сепарационных устройствах, т.е. к повышению влажности пара и к росту его солевого содержания.

Существенное влияние на общий расход топлива котельным цехом оказывает распределение общей нагрузки между установленными котлами и выбор числа работающих котлов для покрытия заданного графика нагрузок.

Оптимальное распределение общей нагрузки между котельными агрегатами может производиться методами:

1. Методом поддержания наибольшего КПД.
2. Методом загрузки котлоагрегатов пропорционально их номинальной производительности и равенства относительных приростов расхода топлива при измерении производительности.

Метод поддержания наибольшего КПД котлоагрегатов заключается в том, что сначала загружаются наиболее экономичные котлы до их номинальной производительности, затем последовательно менее экономичные.

Метод загрузки котлоагрегатов пропорционально их номинальной производительности заключается в том, что общая нагрузка распределяется в отношении номинальной производительности котлов и равенства относительных приростов расхода топлива при изменении производительности.

ПРИМЕРЫ

Пример 8.1.

Определить экономию топлива в котле БКЗ–210–140ФЖШ за счет выполнения газоплотного стального кожуха снаружи обмуровки котла и газохода. Топливо-природный газ Оренбургского месторождения.

Решение. 1.

Определяем располагаемую теплоту топлива. Принимаем расчетную температуру топлива $t_{\text{тл}} = 0$ °С. В связи с отсутствием предварительной подготовки $Q_{\text{в.вн}} = 0$.

Теплота сгорания газа $Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 33369,2$ кДж/нм³ (таблица IV п.11[8] $Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 3680$ кДж/нм³).

Располагаемая теплота топлива $Q_{\text{р}}^{\text{р}} = Q_{\text{н}}^{\text{р}}$.

2. Определяем потерю тепла с уходящими газами (для данного природного

газа при $t_{yx} = 125\text{ }^{\circ}\text{C}$). Теоретические энтальпии воздуха и продуктов сгорания равны таблица XVI п.11[8]:

$$H_{в125}^0 = 125 \cdot H_{в200}^0 / 200 = 125 \cdot 2591 / 200 = 1583 \text{ кДж/м}^3$$

$$\text{и } H_{г125}^0 = 125 \cdot H_{г200}^0 / 200 = 125 \cdot 3045 / 200 = 1854 \text{ кДж/м}^3.$$

Теоретическая энтальпия воздуха при температуре $30\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$H_{в30}^0 = 30 \cdot H_{в100}^0 / 100 = 30 \cdot 1287 / 100 = 395,7 \text{ кДж/м}^3.$$

Избыток воздуха в уходящих газах [4]

$$\alpha_{yx} = \alpha_t + \Delta\alpha_{эк} + \Delta\alpha_{вп} = 1,05 + 0,04 + 0,06 = 1,15,$$

где α_t , $\Delta\alpha_{эк}$, $\Delta\alpha_{вп}$ – соответственно коэффициенты избытка воздуха в топке, присосы воздуха в экономайзере и воздухоподогревателе.

При избытке воздуха $\alpha_{yx} = 1,15$ энтальпия уходящих газов:

$$H_{yx} = H_{г}^0 + (\alpha_{yx} - 1) H_{в}^0 = 1854 + (1,15 - 1)1583 = 2091,5 \text{ кДж/м}^3.$$

Для газообразного топлива потери тепла с механическим недожогом $q_4 = 0$.

Потери тепла с уходящими газами [4]:

$$q_2 = (H_{yx} - \alpha_{yx} H_{в30}^0)(100 - q_4) / Q_p^p =$$

$$= (2091,5 - 1,15 \cdot 395,7)(100 - 0) / 33369,2 = 4,9 \text{ } \%$$

3. Принимаем для газообразного топлива потери тепла с химическим недожогом $q_3 = 0,5 \text{ } \%$ [4].

Определяем коэффициент полезного действия (брутто):

$$\eta_k = 100 - q_2 - q_3 - q_4 - q_5 - q_6 = 100 - 4,9 - 0,5 - 0 - 0,5 - 0 = 94,1 \text{ } \%,$$

где $q_3 = 0,5 \text{ } \%$; $q_4 = 0 \text{ } \%$; $q_5 = 0,5 \text{ } \%$; $q_6 = 0 \text{ } \%$ – соответственно потери тепла с химическим и механическим недожогом, на наружное охлаждение и с теплотой шлака (зола) [4].

4. Определяем полный расход топлива для котла с уплотненным газоходом [4]:

$$V_{упл} = Q_{п.к} \cdot 100 / (Q_p^p \eta_k) = 149862,3 \cdot 100 / (33369,2 \cdot 94,1) = 4,77 \text{ м}^3/\text{с},$$

где $Q_{п.к}$ – удельное количество теплоты, воспринятое рабочей средой в котле (при параметрах перегретого пара $t_{пе} = 570^{\circ}\text{C}$; $P_{пе} = 140 \text{ атм}$), вычисляемое по формуле:

$$Q_{п.к} = D_{п.к}(h_{пе} - h_{п.в}) + D_{пр}(h' - h_{п.в}) = (58,3(841,3 - 231,7) +$$

$$+ 0,58(623,6 - 231,7))4,19 = 149862,3 \text{ кДж/с}.$$

где $D_{п.к} = 210000 / 3600 = 58,3 \text{ кг/с}$ – паропроизводительность котла БКЗ–210–140ФЖШ;

$h_{пе}$ – энтальпия перегретого пара, кДж/кг;

$h_{п.в}$ – энтальпия пита–тельной воды, кДж/кг;

$D_{пр}$ – расход воды на продувку (1 % от $D_{п.к}$), кг/с;

h' – энтальпия продувочной (кипящей) воды, кДж/кг;

4,19 – переводной коэффициент ккал/кг в кДж/кг.

5. Определяем условный расход топлива при уплотненном газоходе котла БКЗ–210–140ФЖШ при теплоте сгорания условного топлива $Q_{y.t} = 7000$ ккал/кг = 29308 кДж/кг:

$$V_{y.t. \text{ упл}} = V_{y.t.} Q_p / Q_{y.t} = 4,77 \cdot 33369,2 / 29308 = 5,43 \text{ кг/с.}$$

6. Определяем энтальпию уходящих газов при их температуре 120 °С для котла БКЗ–210–140ФЖШ с обычной обмуровкой (без обшивки стальным листом).

Коэффициент избытка воздуха в газоходе за воздухоподогревателем $\alpha_{yx} = 1,5$ (берется по режимным картам котлов).

Энтальпия уходящих газов при $\alpha_{yx} = 1,5$

$$H_{yx} = H_{\text{г}}^0 + (\alpha_{yx} - 1) H_{\text{в}}^0 = 1854 + (1,5 - 1)1583 = 2645,5 \text{ кДж/м}^3.$$

Потери тепла с уходящими газами [4] (при $q_4 = 0$)

$$q_2 = (H_{yx} - \alpha_{yx} H_{\text{в30}}^0)(100 - q_4) / Q_p = \\ = (2645,5 - 1,5 \cdot 395,7)(100 - 0) / 33369,2 = 6,15 \text{ \%}.$$

7. Коэффициент полезного действия для котла БКЗ–210–140ФЖШ с обычной неуплотненной обмуровкой (брутто):

$$\eta_{\text{к.н}} = 100 - q_2 - q_3 - q_4 - q_5 - q_6 = 100 - 6,15 - 0,5 - 0 - 0,5 - 0 = 92,85 \text{ \%}.$$

8. Полный расход газообразного топлива в котле БКЗ–210–140ФЖШ с обычной неуплотненной обмуровкой:

$$V_{\text{н}} = Q_{\text{п.к}} \cdot 100 / (Q_p \eta_{\text{к.н}}) = 149862,3 \cdot 100 / (33369,2 \cdot 92,85) = 4,84 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Расход условного топлива:

$$V_{y.t. \text{ н}} = V_{\text{н}} Q_p / Q_{y.t} = 4,84 \cdot 33369,2 / 29308 = 5,51 \text{ кг/с}.$$

9. Превышение расхода условного топлива в котле БКЗ–210–140ФЖШ с неуплотненным газоходом:

$$\Delta V_{y.t. \text{ н}} = V_{y.t. \text{ упл}} - V_{y.t. \text{ н}} = 5,51 - 5,43 = 0,08 \text{ кг/с}.$$

В процентном выражении:

$$\Delta V_{\text{н}} = (V_{y.t. \text{ н}} - V_{y.t. \text{ упл}})100 / V_{y.t. \text{ упл}} = (5,51 - 5,43)100 / 5,43 = 1,47 \text{ \%}.$$

Пример 8.2.

Рассчитать экономический эффект от снижения потерь тепла с продувочной водой в газоплотном котле БКЗ–210–140ФЖШ.

Существующий расход воды на продувку составляет 1 % от производительности котла. Нормативный расход воды на продувку котлов БКЗ–210–140ФЖШ составляет 0,5 % от производительности котла.

Исходные данные для расчета взять из примера 8.1.

Решение. 1.

Определяем полезное удельное тепловосприятие котла с существующей продувкой в 1 % от производительности:

$$1 Q_{\text{пол}}^{\text{уд}} = Q_{\text{п.к}} / B_1 = D_{\text{п.к}}(h_{\text{пе}} - h_{\text{п.в}}) + D_{\text{пр1}}(h' - h_{\text{п.в}}) / B_1 =$$

$$= (58,3(841,3 - 231,7) + 0,58(623,6 - 231,7))4,19 / 5,43 = 27599 \text{ кДж/кг},$$
 где $Q_{п.к} = 58,3 \text{ кг/с}$ – производительность одного котла БКЗ–210–140ФЖШ;
 $h_{пе} = 841,3 \text{ ккал/кг}$ – энтальпия перегретого пара;
 $4,19$ – переводной коэффициент ккал в кДж;
 $h_{п.в} = 231,7 \text{ ккал/кг}$ – энтальпия питательной воды;
 $D_{пр1} = 0,58 \text{ кг/с}$ – расход воды на продувку;
 $h' = 623,6 \text{ ккал/кг}$ – энтальпия кипящей воды;
 $B_1 = 5,43 \text{ кг/с}$ – расход условного топлива для котла БКЗ–210–140ФЖШ в газоплотном исполнении.

2. Определяем тепловосприятие котла с продувкой в 0,5 % от паропроизводительности:

$$Q_{пол2} = D_{п.к}(h_{пе} - h_{п.в}) + D_{пр2}(h' - h_{п.в}) =$$

$$= (58,3(841,3 - 231,7) + 0,29(623,6 - 231,7) 4,19 = 149386 \text{ кДж/с},$$
 где $D_{пр2} = 0,29 \text{ кг/с}$ – расход воды на продувку по нормативу.

Расход топлива при продувке в 0,5 % от паропроизводительности

$$B_2 = Q_{пол2} / Q_{пол1}^{уд} = 149386 / 27599 = 5,41 \text{ кг/с}.$$

Экономия расхода топлива в котле при снижении расхода воды на продувку до 0,5 % от паропроизводительности составляет:

$$\Delta B_{у.т. прод} = B_1 - B_2 = 5,43 - 5,41 = 0,02 \text{ кг/с или } 0,37 \text{ \%}.$$

ЗАДАЧИ

Задача 8.1.

Рассчитать экономию топлива за счет снижения температуры уходящих газов в котле БКЗ–210–140ФЖШ со 170 °С до 125 °С. Расчет произвести при $\alpha_{yx} = 1,15$.

Энтальпия теоретически необходимого объема продуктов сгорания при 200 °С равна 3010 кДж/м³. Энтальпия теоретически необходимого объема воздуха при 200 °С равна 2566 кДж/м³.

Энтальпия холодного воздуха равна 395,7 кДж/м³. Располагаемая теплота топлива равна 33369,2 кДж/м³.

Задача 8.2.

Рассчитать экономию топлива за счет повышения температуры питательной воды в котле БКЗ–210–140ФЖШ с 200 °С до 225 °С. Расчет произвести при $\alpha_{yx} = 1,15$. Энтальпия питательной воды при 200 °С и давлении в барабане $p_6 = 110$ атм составляет 204,5 ккал/кг, а при 225 °С – 233 ккал/кг. Энтальпия перегретого пара при 510 °С и давлении в магистрали $p_m = 105$ атм составляет 811,2 ккал/кг.

9. РАСЧЕТЫ ОБРАЗОВАНИЯ ОКСИДОВ АЗОТА

В топках паровых котлов при горении топлива образуются оксиды азота двух типов – оксид NO и диоксид NO₂, причем на выходе из дымовых труб оксид NO составляет до 95 % суммы оксидов NO_x = NO + NO₂.

Доокисление NO до NO₂ происходит в атмосфере в процессе распространения дымового факела свободным кислородом (озоном) воздуха.

Поэтому массовый выброс оксидов азота из котлов рассчитывается по NO₂.

В газовых выбросах ТЭС их концентрация составляет 0,2–1,2 г/м³. Оксиды азота образуются при сгорании топлива в ядре факела тремя возможными путями:

- топливные – образуются при температуре газовой среды 800–2100 К (527–1827 °С) за счет азота, входящего в топливо (N^p);
- термические – образуются при высоких температурах факела (более 1600 К; 1527 °С) за счет окисления азота воздуха;
- быстрые – образуются при контакте промежуточных углеводородных соединений топлива (при сжигании газа и мазута) с азотом поступающего в горелки воздуха в начальной зоне горения факела при температурах выше 1000 К (627 °С).

9.1. Образование термических оксидов азота

Определяющими характеристиками при образовании термических оксидов являются максимальная температура факела T_м и температурный интервал реакции ΔT_р. Расчетное значение T_м зависит от условной адиабатной температуры в зоне горения T'_а:

$$T'_a =$$

где $Q'_T = Q^p_n \cdot 10^3 + Q_{г.в} + Q$ – тепловыделение в зоне горения, кДж/кг;

Q^p_n – теплота сгорания, МДж/кг;

c_T и c_v – теплоемкости газа и воздуха, полученные при ожидаемой адиабатной температуре, кДж/(м³·К);

$\alpha_{гор}$ – избыток воздуха в зоне горения, принимается при наличии присосов воздуха в топку $\Delta\alpha_T$ следующим: $\alpha_{гор} = \alpha_T - 0,5 \Delta\alpha_T$, для газоплотных котлов $\alpha_{гор} = \alpha_T$.

Эффект рециркуляции газов на температурный уровень учитывается при расчете максимальной температуры факела T_м.

Средняя теплоемкость продуктов сгорания и воздуха определяется по формулам:

– при сжигании твердого топлива:

$$c_T = (1,59 + 0,004W^H) + 0,14k_T; \quad (9.2a)$$

– при сжигании природного газа:

$$c_T = 1,57 + 0,134k_T; \quad (9.2б)$$

– при сжигании мазута

$$c_{\Gamma} = 1,58 + 0,122 k_t \quad (9.2в)$$

где $W^{\Pi} = W^p / Q^p_{\text{н}}$ – приведенная влажность топлива, %кг/МДж;

$k_t = (t_a - 1200)/1000$ – температурный коэффициент изменения теплоемкости;

t_a – ожидаемая адиабатная температура, °С.

Теплоемкость воздуха при высоких температурах:

$$c_{\text{в}} = 1,46 + 0,092 k_t. \quad (9.3)$$

Ожидаемую адиабатную температуру для расчета теплоемкостей находят по формулам:

– для твердого топлива:

$$t_a = (1800/\alpha_{\text{гор}})(1 + 10^{-5} Q'_{\text{т}}) \quad (9.4а)$$

– для мазута и природного газа:

$$t_a = (1950/\alpha_{\text{гор}})(1 + 0,36^{-5} Q'_{\text{т}}) \quad (9.4б)$$

Допустимое расхождение между предварительно принятой t_a и полученным по (9.1) значением $(T'_a - 273)$ не должно превышать 50 °С, иначе необходимо принять новое $t_a = T'_a - 273$ и уточнить значения c_{Γ} и $c_{\text{в}}$.

Максимальную температуру зоны горения находят по формуле с учетом отвода теплоты к экранам, степени выгорания топлива и влияния рециркуляции газов:

$$T_{\text{м}} = \beta_{\text{сг}} T'_a (1 - \Psi_{\text{з.г}})^{0,25} (1 - r^{(1 + \text{nr})}) m_{\Gamma}, \quad (9.5)$$

где $\beta_{\text{сг}}$ – доля сгоревшего топлива на участке от выхода из горелки до завершения интенсивного высокотемпературного горения; значения $\beta_{\text{сг}}$ принимать: для твердых топлив 0,95–0,97 (большие значения для реакционных топлив), для природного газа и мазута 0,97–0,99;

$\Psi_{\text{з.г}}$ – коэффициент тепловой эффективности экранов в зоне ядра факела (см. гл. 6), при необходимости усреднения тепловосприятия экранов принимать верхнюю границу зоны горения на 1,5 м выше верхнего яруса горелок;

r – доля рециркуляции газов в зону горения;

п – коэффициент, учитывающий способ ввода рециркулирующих газов в топку: $\text{п} = 6,5$ – при вводе через сопла под горелкам, $\text{п} = 5,0$ – при вводе через кольцевой канал вокруг горелки, $\text{п} = 3,0$ – при смешении газов с горячим воздухом до горелки либо вводе между центральным и периферийным каналами горелки;

$m_{\text{г}}$ – коэффициент, учитывающий тип горелки: $m_{\text{г}} = 1$ – для вихревых настенных горелок; $m_{\text{г}} = 0,95(25 / w_{\text{в}})^{0,2}$ – для прямоточных настенных горелок, где $w_{\text{в}}$ – скорость воздуха на выходе из горелки, м/с; $m_{\text{г}} = 0,985$ – для подовых горелок с прямоточно-вихревой подачей воздуха.

Теоретическое время достижения равновесной концентрации оксида азота NO при температуре реакции $T_{\text{м}}$ определяется по формуле:

$$\tau_0 = 0,024 \exp(54290 / T_m - 23). \quad (9.6)$$

Расчетное время реакции образования оксидов азота в топке:

$$\tau_p = [\Delta T_p / (T_a - T''_T)] (q_f \Pi / 300)^{0,5} \tau_{\text{преб}}, \quad (9.7)$$

где ΔT_p – температурный интервал активной реакции образования оксидов азота. К, зависит от значения T_m и определяется из выражения:

$$\Delta T_p = T_m^2 \cdot 10^{-5} / (0,614 + T_m \cdot 10^{-5}); \quad (9.8)$$

$q_f = B Q_p / (a b_T)$ – среднее тепловое напряжение сечения топочной камеры, МВт/м²;

$\Pi = 2a_T + 2b_T$ – расчетный периметр стен призматической топочной камеры, м (при наличии двусветного экрана добавляется его удвоенная ширина);

T''_T – абсолютная температура газов на выходе из топки. К, берется из теплового расчета котла;

$\tau_{\text{преб}}$ – время пребывания газов в топочной камере, с:

$$\tau_{\text{преб}} = T_m^2 \cdot 10^{-5} / [q_v T_T v_T^n \alpha_T (1 + \xi)], \quad (9.9)$$

где $q_v = B Q_p / V_T$ – тепловое напряжение топочного объема, МВт/м³;

$T_T = 0,84[(T_m)^4 + (T''_T)^4]^{0,25}$ – средняя расчетная температура газов в топочном объеме, К;

v_T^n – удельный приведенный объем газов при $\alpha = 1$, м³/МДж, в расчетах следует принимать для антрацита и полуантрацита $v_T^n = 0,273$ м³/МДж, для остальных твердых топлив $v_T^n = 0,278 + 0,001 W^{11}$, для мазута 0,281 м³/МДж, для природного газа 0,3 м³/МДж;

ξ – коэффициент заполнения сечения топки восходящим потоком газов, при встречных вихревых грелках $\xi = 0,8$, то же для однофронтального расположения – 0,75, для тангенциального расположения прямооточных горелок – 0,70, для подовых горелок – 0,90.

Концентрация оксидов азота, образующихся за счет термической реакции в зоне ядра факела, в пересчете на диоксид азота NO_2^{TP} , г/м³, определяется по формуле:

$$\text{NO}_2^{\text{TP}} = 7,03 \cdot 10^3 C_{\text{O}_2}^{0,5} \exp(-10860/T_m) (\tau_p / \tau_0), \quad (9.10)$$

где C_{O_2} – концентрация остаточного (избыточного) кислорода в зоне реакции, кг/м³, определяется по формуле:

$$C_{\text{O}_2} = \frac{0,21 V_B^0 [(\alpha_{\text{гор}} - 1) + r(\alpha_{\text{рц}} - \alpha_{\text{гор}})] \rho_{\text{O}_2}}{[V_T^0 + (\alpha_{\text{гор}} - 1) V_B^0] (1 + r)}, \quad (9.11)$$

где $\alpha_{\text{рц}}$ – избыток воздуха в газах рециркуляции;

$\rho_{\text{O}_2} = 1,428$ кг/м³ – плотность кислорода при атмосферном давлении. В случаях, когда значение $(\alpha_{\text{гор}} - 1)$ – окажется меньше 0,02, условно принимать его постоянным и равным 0,02.

9.2. Концентрации топливных и быстрых оксидов азота.

Суммарная концентрация оксидов в газах

Образование этого вида оксидов происходит в диапазоне температур 800–2100 К (527–1827°C) и наибольшую интенсивность - имеет в области 1850 К (1577°C). Выход топливных оксидов $\text{NO}_2^{\text{тл}}$ в этой зоне сильно зависит от избытка воздуха (в степени 2), слабо от температуры (степень 0,33) и содержания азота в топливе $N^{\text{п}}$.

Расчетные формулы для двух температурных зон имеют следующий вид:

– при значениях температуры $2100 > T_{\text{м}} > 1850$ К:

$$\text{NO}_2^{\text{тл}} = (0,40 - 0,1N^{\text{п}}) N^{\text{п}} \left(\frac{\alpha_{\text{гор}} + r}{1 + r} \right)^2 \left(\frac{2100 - T_{\text{м}}}{125} \right)^{0,33}; \quad (9.12)$$

– при значениях температуры $1850 > T_{\text{м}} > 800$ К

$$\text{NO}_2^{\text{тл}} = 1,25(0,40 - 0,1N^{\text{п}}) N^{\text{п}} \left(\frac{\alpha_{\text{гор}} + r}{1 + r} \right)^2 \left(\frac{T_{\text{м}} - 800}{1000} \right)^{0,33}. \quad (9.13)$$

Формулы (9.12) и (9.13) учитывают одновременно и образование быстрых оксидов азота.

В итоге максимальная суммарная концентрация оксидов азота при номинальной нагрузке котла составляет:

$$\text{NO}_2 = \text{NO}_2^{\text{тп}} + \text{NO}_2^{\text{тл}} \quad (9.14)$$

При любой сниженной нагрузке парового котла суммарный выход оксидов азота определяется по формуле:

$$\text{NO}_2 = \text{NO}_2^{\text{тп}} (D / D_{\text{ном}}) + \text{NO}_2^{\text{тл}} (D / D_{\text{ном}}). \quad (9.15)$$

Здесь $(D / D_{\text{ном}})$ – отношение расчетной нагрузки котла к номинальной.

При переходе на двухступенчатое (нестехиометрическое) сжигание топлива расчет максимальной температуры факела $T_{\text{м}}$ производится по формуле (9.5) для первой (нижней) зоны горения топлива. Избыток воздуха в горелках первой зоны определяется заданным распределением поступления воздуха по зонам и аналогичным распределением топлива и определяется по формуле:

$$\alpha_{\text{гор}}^{\text{I}} = (\alpha_{\text{т}} - 0,5\Delta - \beta_{\text{II}}) / B_1, \quad (9.16)$$

где β_{II} – доля воздуха, поступающего во вторую ступень горения:

$\beta_{\text{I}} = B_{\text{I}} / B$ – доля топлива, поступающего в первую зону. При наличии сбросных горелок с учетом КПД циклона $\beta_{\text{I}} = 0,88 \dots 0,94$.

Расчетный избыток воздуха в горелках второй зоны горения:

$$\alpha_{\text{гор}}^{\text{II}} = 0,5\Delta + \beta_{\text{II}}, \quad (9.17)$$

Доля топлива, сгоревшего в первой (нижней) зоне горения определяется относительным количеством воздуха в первой зоне с учетом неизбежной неполноты сгорания:

$$\beta_{\text{ср}}^{\text{I}} = 0,95 \alpha_{\text{гор}}^{\text{I}} \quad (9.18)$$

Расчет температуры T_m осуществляют по (9.5) для значения $\alpha_{гор}^{II}$.

Адиабатная температура горения определяется по (9.1) для полного избытка воздуха на выходе из верхней области горения, т.е. по $\alpha_{гор} = \alpha_T - 0,5\Delta\alpha_T$ независимо от ступенчатой организации сжигания. В остальном расчет совпадает с изложенным ранее.

9.3. Особенности расчета оксидов азота при сжигании природного газа

Сжигание природного газа характеризуется более быстрым протеканием реакций горения.

В результате сокращается зона активного горения и растет максимальная температура.

Поэтому в большинстве случаев (при других равных условиях) концентрация оксидов азота получается несколько выше, чем при сжигании мазута (приблизительно $NO_2^{газ} = 1,3 NO_2^{маз}$).

Ввиду отсутствия в природном газе топливного азота, входящего в радикалы, но при наличии углеводородных соединений при сгорании газа могут образовываться только быстрые оксиды азота NO_2^6 .

При расчете термических оксидов азота следует исходить из методики, изложенной в п. 9.1.

Расчет максимальной температуры производится по (9.5), но для учета повышенной скорости реакций горения вводится поправка и расчетная температура принимается:

$$T'_m = 1,01 T_m, \quad (9.19)$$

где T_m – максимальная температура по (9.5), К.

Расчет быстрых оксидов азота осуществляется по формуле:

$$NO_2^6 = 0,1 \left(\frac{\alpha_{гор} + r}{1 + r} \right)^2 \left(\frac{T'_m - 800}{1000} \right)^{0,33}. \quad (9.20)$$

Ввиду высокой реакционной способности газового топлива рециркуляция газов r не учитывается в формуле (9.5) при вводе газов через шлицы.

Суммарная концентрация оксидов азота составит:

$$NO_2^0 = NO_2^{тр} + NO_2^6 \quad (9.21)$$

ПРИМЕРЫ

Пример 9.1.

Определить ожидаемый выход оксидов азота из котла Пп–1000–25–545 К (ТПП–312А) при сжигании донецкого ГСШ с жидким шлакоудалением и природного газа. Температура плавления шлака $t_3^{шл} = 1230$ °С.

При расчете принять следующие исходные данные (таблица 9.1).

Решение.

По исходным данным из таблицы 1 и 2 [4. с. 152–169] находим: для твердого топлива $V_{\text{г}}^0 = 6,28 \text{ м}^3/\text{кг}$, $V^0 = 5,83 \text{ м}^3/\text{кг}$; для природного газа $V_{\text{г}}^0 = 11,16 \text{ м}^3/\text{м}^3$, $V^0 = 9,96 \text{ м}^3/\text{м}^3$;

1. Определяем энтальпии горячего воздуха.

Для твердого топлива $Q_{\text{г.в}} = 0,95 \cdot 3030,7 = 2879 \text{ кДж/кг}$, при этом принят присос холодного воздуха в пылесистеме $\Delta\alpha_{\text{пл}} = 0,1$, тогда избыток горячего воздуха составит $\alpha_{\text{г.в}} = 1,15 - 0,1 - 0,1 = 0,95$.

Таблица 9.1 - Исходные данные по параметрам продуктов сгорания для расчетов примера 9.1.

Параметр	Донецкий ГСШ	Природный газ
Природный газ	$Q_{\text{н}}^{\text{p}} = 20,47 \text{ МДж/кг}$	$Q_{\text{н}}^{\text{p}} = 37,3 \text{ МДж/м}^3$
Температура горячего воздуха	384 °С	370 °С
Доля рециркуляции газов	-	0,1
Избыток воздуха на выходе из топки	1,15	1,10
То же в газах рециркуляции	-	1,17
Температура газов на выходе из топки	1190 °С	1210 °С
Тепловое напряжение сечения	-	$q_{\text{f}} = 4,86 \text{ МВт/м}^2$
Периметр топочной камеры	-	$\Pi = 51,9 \text{ м}$
Присос холодного воздуха в топку	-	$\Delta\alpha_{\text{т}} = 0,1$

Для природного газа $Q_{\text{г.в}} = 1,0 \cdot 4992 = 4992 \text{ кДж/м}^3$; физическую теплоту топлива не учитываем из-за ее незначительности.

2. Рассчитываем содержание оксидов азота при сжигании донецкого ГСШ: тепловыделение:

$$Q'_{\text{т}} = Q_{\text{н}}^{\text{p}} + Q_{\text{г.в}} = 20,47 \cdot 10^3 + 2879 = 23349 \text{ кДж/кг};$$

ожидаемая адиабатная температура горения топлива по (9.4а):

$$t_{\text{а}} = (1800 / \alpha_{\text{гор}}) (1 + Q'_{\text{т}}) = (1800 / 1,1) (1 + 10^{-5} \cdot 2334) = 2018 \text{ °С};$$

теплоемкости газов и воздуха при

$$k_{\text{т}} = (t_{\text{а}} - 1200) / 1000 = (2018 - 1200) / 1000 = 0,818;$$

влажность топлива $W_p = 8 \%$;

приведенная влажность топлива $W^п = W_p / Q^p_n = 8/20,47 = 0,39$;

$$c_r = (1,59 + 0,004 \cdot W^п) + 0,14 \cdot k_t = \\ = (1,59 + 0,004 \cdot 0,39) + 0,14 \cdot 0,818 = 1,706 \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{K)};$$

$$c_b = 1,46 + 0,092 \cdot k_t = 1,46 + 0,092 \cdot 0,818 = 1,535 \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{K)};$$

расчетная адиабатная температура:

$$T'a = Q'_T / [V^0_r c_r + 1,016(\alpha_{гор} - 1) V^0_{св}] + 273 = \\ = 23349 / [6,28 \cdot 1,706 + 1,016(1,1 - 1) 5,83 \cdot 1,535] + 273 = 2263 \text{ K}.$$

Максимальная температура в зоне горения принимается при $\beta_{ст} = 0,965$, поскольку топка с жидким шлакоудалением, экраны топки в зоне горения на высоту 5,5 м футерованы карборундовой массой. поверхность фронтальной стены топки:

$$F_{ст} = \Pi + H = 51,9 + 5,5 \cdot 285,5 \text{ м}^2;$$

$$H_{в.я.} = H + 1,5 = 5,5 + 1,5 = 7 \text{ м};$$

$$F_{в.я.} = 0,5 (\Pi \cdot H_{в.я.}) = 0,5 (51,9 \cdot 7) = 142,7.$$

Условный коэффициент загрязнения футерованной части экранов:

$$\xi_{ф} = 0,53 - 0,25(t_3^{шл}/1000) = 0,53 - 0,25(1240/1000) = 0,22;$$

– расчетная эффективность зоны горения:

$$\Psi_{з.г} = [\xi_{ф} F_{ст} + F_{в.я.} (\xi_{ф} + \xi)] / (F_{ст} + F_{в.я.}) = \\ = [0,22 \cdot 285,5 + 142,7 (0,2 + 0,45)] / (285,5 + 2 \cdot 142,7) = 0,265;$$

– максимальная температура зоны горения:

$$T_m = \beta_{ст} \cdot T'a \cdot (1 - \Psi_{з.г})^{0,25} = 0,965 \cdot 2283 (1 - 0,265)^{0,25} = 2030 \text{ K};$$

температурный интервал реакции образования оксидов азота:

$$\Delta t_p = (T_m^2 \cdot 10^{-5}) / (0,614 + T_m \cdot 10^{-5}) = (2030^2 \cdot 10^{-5}) / (0,614 + 2030 \cdot 10^{-5}) = 64,9^\circ \text{C};$$

расчетное время реакции в топке:

$$\tau_{проб} = 273 \cdot \xi / (0,155 \cdot T_r \cdot 0,2784 \cdot 1,15) = \\ = 273 \cdot 0,8 / (0,155 \cdot 1810 \cdot 0,2784 \cdot 1,15) = 2,3 \text{ с}.$$

где 1,15 – избыток воздуха на выходе из топки для Донецкого ГСШ, из таблицы;

средняя температура газов в топке:

$$T_r = 0,84 (T_m^4 + 1463^4)^{0,25} = 0,84 (2030^4 + 1463^4)^{0,25} = 1810 \text{ K}.$$

Тогда расчетное время реакции образования оксидов азота в топке:

$$\tau_p = \frac{\Delta T_p}{T'_a - 1463} \left(\frac{q_f \cdot \Pi}{300} \right)^{0,5} \quad \tau_{\text{преб}} = \frac{64,9}{2283 - 1463} \left(\frac{4,86 \cdot 51,9}{300} \right)^{0,5} \cdot 2,3 = 0,164 \text{ с};$$

теоретическое время достижения равновесия:

$$\tau_0 = 0,024 \exp(54290 / T_m - \tau_{\text{преб}} \cdot 10) = 0,024 \exp(54290 / 2030 - 23) = 1,01 \text{ с};$$

концентрация термических оксидов азота при концентрации кислорода:

$$C_{O_2} = \frac{0,21 V_B^0 \left[(\alpha_{\text{гор}} - 1) + r(\alpha_{\text{рц}} - \alpha_{\text{гор}}) \right] \rho_{O_2}}{\left[V_{\Gamma}^0 + (\alpha_{\text{гор}} - 1) V_B^0 \right] (1 + r)} =$$

$$= \frac{0,21 \cdot 5,83 \cdot 0,1 \cdot 1,428}{6,28 + 0,1 \cdot 5,83} = 0,025 \text{ кг/м}^3;$$

$$NO_2^{\text{TP}} = 7030 \cdot C_{O_2}^{0,5} \exp(-10860 / T_m) \frac{\tau_p}{\tau_0} =$$

$$= 7030 \cdot 0,025^{0,5} \exp(-10860 / 2030) \frac{0,164}{1,01} = 0,84 \text{ г/м}^3;$$

Топливные и быстрые оксиды азота при содержание азота в топливе $N^p = 1\%$:

$$NO_2^{\text{TL}} = (0,40 - 0,1 \cdot N^p) N^p (1,1)^2 \left(\frac{2100}{T_m} \right)^{0,33} =$$

$$= (0,40 - 0,1 \cdot 1) 1 (1,1)^2 \left(\frac{2100 - 2030}{125} \right)^{0,33} = 0,30 \text{ г/м}^3;$$

где 1,1 – избыток воздуха на выходе из топки для природного газа, из таблицы;

суммарный выход оксидов азота при жидком шлакоудалении:

$$NO_2^0 = NO_2^{\text{TP}} + NO_2^{\text{TL}} = 0,84 + 0,30 = 1,14 \text{ г/м}^3.$$

3. Расчет выхода оксидов азота при сжигании природного газа:

- тепловыделение

$$Q'_T = Q_H \cdot 10^3 + Q_{\Gamma, \text{в}} = 37,3 \cdot 10^3 + 4992 = 42292 \text{ кДж/м}^3;$$

$$\alpha_{\text{гор}} = \alpha_T - 0,5 \Delta \alpha_T = 1,1 - 0,5 \cdot 0,1 = 1,05;$$

1,1 – избыток воздуха на выходе из топки для природного газа, из таблицы;

0,1 – доля рециркуляции газов для природного газа, из таблицы;

Ожидаемая адиабатная температура горения (без учета рециркуляции газов):

$$t_a = (1950 / \alpha_{\text{гор}}) (1 + 0,36 \cdot 10^{-5} \cdot Q'_T) = (1950 / 1,05) (1 + 0,36 \cdot 10^{-5} \cdot 42300) = 2135^\circ \text{C};$$

- температурный коэффициент изменения теплоемкости:

$$k_t = (t_a - 1200) / 1000 = (2135 - 1200) / 1000 = 0,935;$$

- теплоемкости газов и воздуха:

$$c_{\Gamma} = 1,57 + 0,134 \cdot k_t = 1,57 + 0,134 \cdot 0,935 = 1,695 \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{K)};$$

$$c_{\text{в}} = 1,46 + 0,092 \cdot k_t = 1,46 + 0,092 \cdot 0,935 = 1,546 \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{K)};$$

- расчетная адиабатная температура:

$$T'a = Q'_T / [V^0_{\Gamma} c_{\Gamma} + 1,016(\alpha_{\text{гор}} - 1) V^0 c_{\text{в}}] + 273 = \\ = 42292 / [11,16 \cdot 1,695 + 1,016(1,05 - 1) 9,96 \cdot 1,546] + 273 = 2420 \text{ K}.$$

$$\text{где } c_{\Gamma} = 1,57 + 0,134 \cdot k_t = 1,57 + 0,134 \cdot 0,935 = 1,695 \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{K)};$$

$$c_{\text{в}} = 1,46 + 0,092 \cdot k_t = 1,46 + 0,092 \cdot 0,935 = 1,546 \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{K)}.$$

Максимальная температура в зоне горения – по (9.5). При сжигании природного газа происходит некоторое выгорание футеровки стен.

Принимается тепловая эффективность стен в зоне футерования $\Psi_{\text{ст}} = 0,3$, тогда:

– расчетная эффективность зоны горения:

$$\Psi_{\text{з.г}} = [\xi_{\text{ф}} F_{\text{ст}} + F_{\text{в.я}} (\xi_{\text{ф}} + \xi)] / (F_{\text{ст}} + F_{\text{в.я}}) = \\ = [0,3 \cdot 285,5 + 149,6 (0,2 + 0,45)] / (285,5 + 2 \cdot 142,7) = 0,313;$$

– максимальная температура зоны горения:

$$T_{\text{м}} = 0,97 \cdot T'a \cdot (1 - \Psi_{\text{з.г}})^{0,25} (1 - 0,1^{(1+3,0 \cdot 0,1)}) = \\ = 0,97 \cdot 2420 (1 - 0,313)^{0,25} (1 - 0,1^{(1+3,0 \cdot 0,1)}) = 2030 \text{ K};$$

– расчетная температура:

$$T'_{\text{м}} = \tau_0 \cdot T_{\text{м}} = 1,01 \cdot 2030 = 2050 \text{ K};$$

– температурный интервал реакции образования оксидов азота:

$$\Delta t_{\text{р}} = (T'^2_{\text{м}} \cdot 10^{-5}) / (0,614 + T'_{\text{м}} \cdot 10^{-5}) = (2050^2 \cdot 10^{-5}) / (0,614 + 2050 \cdot 10^{-5}) = 66,3 \text{ K};$$

– средняя температура газов в топке;

$$T_{\Gamma} = N_2^{\text{тр}} (T'^4_{\text{м}} + 1463^4)^{0,25} = 0,84 (2050^4 + 1483^4)^{0,25} = 1814 \text{ K};$$

– расчетное время реакции в топке:

$$\tau_{\text{преб}} = 273 \cdot \xi / [0,155 \cdot T_{\Gamma} \Psi_{\text{ст}} \cdot 1,1(1 + 0,1)] = \\ = 273 \cdot 0,8 / [0,155 \cdot 1814 \cdot 0,3 \cdot 1,1(1 + 0,1)] = 2,15 \text{ с}.$$

– расчетное время реакции образования оксидов азота в топке:

$$\tau_{\text{р}} = \frac{\Delta T_{\text{р}}}{T'_{\text{а}} - 1483} \left(\frac{q_{\text{ф}} \cdot \Pi}{300} \right)^{0,5} \tau_{\text{преб}} = \frac{66,3}{2420 - 1483} \left(\frac{4,86 \cdot 51,9}{300} \right)^{0,5} 2,15 = 0,138 \text{ с};$$

– теоретическое время достижения равновесия:

$$\tau_0 = 0,024 \exp(54290 / T_{\text{м}} - \tau_{\text{преб}} \cdot 10) = 0,024 \exp(54290 / 2050 - 23) = 0,78 \text{ с};$$

концентрация термических оксидов азота при концентрации кислорода:

$$C_{O_2} = \frac{0,21 V_B^0 [(\alpha_{гор} - 1) + r(\alpha_{рц} - \alpha_{гор})] \rho_{O_2}}{[V_{г}^0 + (\alpha_{гор} - 1) V_B^0] (1 + r)} =$$

$$= \frac{0,21 \cdot 9,96 (0,05 + 0,1 \cdot 0,12) \cdot 1,428}{(11,16 + 0,05 \cdot 9,36) \cdot 1,1} = 0,0144 \text{ кг/м}^3;$$

– концентрация термических оксидов азота:

$$NO_2^{TP} = 7030 \cdot C_{O_2}^{0,5} \exp(-10860/T_M) \frac{\tau_p}{\tau_0} =$$

$$= 7030 \cdot 0,0144^{0,5} \exp(-10860/2050) \frac{0,138}{0,78} = 0,735 \text{ г/м}^3;$$

– быстрые оксиды азота:

$$NO_2^6 = 0,1 \left(\frac{\alpha_{гор} + r}{1 + r} \right)^2 \left(\frac{T'_M - 800}{1000} \right)^{0,33} =$$

$$= 0,1 \left(\frac{1,05 + 0,1}{1,1} \right)^2 \left(\frac{2050 - 800}{1000} \right)^{0,33} = 0,118 \text{ г/м}^3;$$

– суммарный выход оксидов азота при сжигании природного газа с рециркуляцией:

$$NO_2^0 = NO_2^{TP} + NO_2^6 = 0,735 + 0,118 = 0,853 \text{ г/м}^3.$$

ОТВЕТЫ К ЗАДАЧАМ

1.1. $A^p = 6,3 \%$; $P = 0,3 \%$; $P = 59,5 \%$; $H^p = 4 \%$; $N^p = 0,55 \%$; $O^p = 19,35 \%$; $W^p = 10 \%$.

1.2. $C^c = 41,12 \%$.

1.3. $S^r = 0,26 \%$; $C^r = 84,96 \%$; $H^r = 4,24 \%$; $N^r = 0,9 \%$; $O^r = 9,64 \%$.

1.4. $S^r = 1,6 \%$; $C^p = 22 \%$; $H^p = 3,1 \%$; $N^p = 0,1 \%$; $O^p = 3,7 \%$; $W^p = 13 \%$; $(CO_2)_{кр} = 16 \%$; $A^p = 40 \%$. 1.5. $A^c = 24 \%$ и сумма составляющих сухой массы равна 100 %.

1.6. $Q_{H_2}^p = 12362 \text{ кДж/кг}$.

1.7. $Q_H^p = 31066 \text{ кДж/кг}$.

1.8. $x = 15,72 \text{ м}^3/\text{кг}$;

$Q_H^p = 37175 \text{ кДж/кг}$.

2.1. V^0 изменилось с 3,62 до 5,34 $\text{м}^3/\text{кг}$.

2.2. V^0 изменилось с 5,8 до 5,4 $\text{м}^3/\text{кг}$.

2.3. $V^0 = 11,26 \text{ м}^3/\text{кг}$.

2.4. $\Delta V = 0,655 \text{ м}^3/\text{кг}$.

2.5. $V_{RO} = 0,9 \text{ м}^3/\text{кг}$;

$V_N^0 = 3,89 \text{ м}^3/\text{кг}$;

$V_{HO}^0 = 0,62 \text{ м}^3/\text{кг}$;

$V_{г}^0 = 5,41 \text{ м}^3/\text{кг}$;

- $V_{\Gamma} = 7,156 \text{ м}^3/\text{кг}$; $V_{\text{HO}} = 0,648 \text{ м}^3/\text{кг}$.
- 2.6. При $W^p = 18 \%$; $V_{\text{RO}} = 0,844 \text{ м}^3/\text{кг}$; $V_{\text{N}}^0 = 5,155 \text{ м}^3/\text{кг}$; $V_{\text{HO}}^0 = 0,653 \text{ м}^3/\text{кг}$; $V_{\Gamma}^0 = 5,155 \text{ м}^3/\text{кг}$; $V_{\Gamma} = 6,802 \text{ м}^3/\text{кг}$; $V_{\text{HO}} = 0,679 \text{ м}^3/\text{кг}$. При $W^p = 23\%$; $V_{\text{RO}} = 0,793 \text{ м}^3/\text{кг}$; $V_{\text{N}}^0 = 3,444 \text{ м}^3/\text{кг}$; $V_{\text{HO}}^0 = 0,628 \text{ м}^3/\text{кг}$; $V_{\Gamma}^0 = 4,864 \text{ м}^3/\text{кг}$; $V_{\Gamma} = 6,411 \text{ м}^3/\text{кг}$; $V_{\text{HO}} = 0,652 \text{ м}^3/\text{кг}$.
- 2.7. $V^0 = 5,046 \text{ м}^3/\text{кг}$; $V_{\Gamma}^0 = 5,637 \text{ м}^3/\text{кг}$.
- 2.8. Сечение канала $10,289 \text{ м}^2$. Для первого варианта $D = 3,62 \text{ м}$; Для второго варианта $A = 2,27 \text{ м}$, $b = 4,54 \text{ м}$.
- 2.9. $V^0 = 2,41 \text{ м}^3/\text{кг}$; $V_{\Gamma} = 3,585 \text{ м}^3/\text{кг}$.
- 2.10. При $\alpha = 1,2$ $V_{\text{RO}} = 0,68 \text{ м}^3/\text{кг}$; $\Gamma_{\text{RO}} = 0,142$; $V_{\text{HO}} = 0,571 \text{ м}^3/\text{кг}$; $\Gamma_{\text{HO}} = 0,119$. При $\alpha = 1,3$ $V_{\text{RO}} = 0,68 \text{ м}^3/\text{кг}$; $\Gamma_{\text{RO}} = 0,132$; $V_{\text{HO}} = 0,577 \text{ м}^3/\text{кг}$; $\Gamma_{\text{HO}} = 0,112$.
- 2.11. $1,868 \text{ м}^3/\text{кг}$.
- 2.12. $1,86 \text{ м}^3/\text{кг}$.
- 2.13. $8,89 \text{ м}^3/\text{кг}$.
- 2.14. $\rho = 0,714 \text{ кг/м}^3$, $v = 1,4 \text{ м}^3/\text{кг}$.
- 2.15. $19,2 \text{ кг}$.
- 2.16. 33981 кДж/м^3 или 8109 ккал/м^3 .
- 2.17. 28% .
- 2.18. $13,9 \text{ кг/кг}$ или $10,8 \text{ м}^3/\text{кг}$.
- 3.1. 2508 кДж/кг при сжигании АШ; 1713 кДж/кг при сжигании назаровского бурого угля.
- 3.2. Энтальпия уменьшится с 1314 до 1148 кДж/кг .
- 4.1. 19060 кДж/кг .
- 4.2. Увеличится с 13498 до 13730 кДж/кг .
- 4.3. Увеличится с $19557,4$ до $19959,5 \text{ кДж/кг}$.
- 4.4. При влажности 50% располагаемое тепло $Q_{\text{p}}^p = 8255 \text{ кДж/кг}$ и энтальпия уходящих газов $H_{\text{yx}} = 899 \text{ кДж/кг}$. При снижении влажности до 40% $Q_{\text{p}}^p = 10390 \text{ кДж/кг}$ и $H_{\text{yx}} = 1017,8 \text{ кДж/кг}$.
- 5.1. Переход на разомкнутую схему сушки повышает адиабатную температуру горения на $23 \text{ }^{\circ}\text{C}$.
- 5.2. Увеличение рециркуляции на 1% снижает адиабатную температуру на горения в среднем на $9,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$.
- 6.1. Значения составляют: $Q_2 = 1810,4 \text{ кДж/кг}$; $Q_3 = 1210,5 \text{ кДж/кг}$. В целом $Q_{\text{р.пп}} = 3020,9 \text{ кДж/кг}$.
- 6.2. При установке в топке ширм с общей площадью $1740,8 \text{ м}^2$ значение $F_{\text{л.т}} / V_{\text{т}}$ увеличится с $0,505$ до $0,633$.
- 7.1. $Q_{\text{л}}$ выросло с $55,2$ до $71,7 \text{ кДж/кг}$.
- 7.2. При переходе на сжигание твердого топлива $Q_{\text{л}}$ уменьшается с 1385 (на мазуте) до 635 кДж/с .
- 7.3. $Q_{\text{л.ш}} = 343 \text{ кДж/кг}$; $\Delta h_{\text{п}} = 288 \text{ кДж/кг}$.
- 8.1. Экономия топлива составляет $0,144 \text{ кг/с}$ или $2,94 \%$.
- 8.2. Экономия топлива составляет $0,26 \text{ кг/с}$ или $4,8 \%$.

Приложение Е

Таблица П1. Расчетные характеристики используемых твердых и жидких топлив

№ п/п	Бассейн, место- рождение	Марка топлива	Класс или вид топлива*	Состав рабочей массы топлива, %						Теплота сгорания $Q_{\text{р}}$, МДж/кг	Выход ле- гучих ве- ществ $V_{\text{г}}$, %
				W ^р	A ^р *	S ^р	C ^р	H ^р	N ^р	O ^р	
1	Донецкий	Д	Р	13,0	24,4	3,1	47,0	3,4	1,0	8,0	43,0
2	»	Г	О	11,0	28,5	3,5	47,2	3,3	0,9	5,5	41,0
3	»	Г	Кт	13,0	11,3	2,6	62,1	4,0	1,1	5,9	39,0
4	»	Т	Р	6,0	25,4	2,4	61,1	2,9	1,0	1,2	12,0
5	»	А	Ш	8,5	30,2	1,6	56,4	1,1	0,5	1,7	4,0
6	Кузнецкий	СС	Р, О	9,0	18,2	0,3	61,5	3,6	1,7	5,9	30,0
7	»	Г	ПП	12,0	23,8	0,5	51,4	3,8	1,9	6,6	41,0
8	Карагандинский	К	ПП	10,0	38,7	0,8	41,8	2,7	0,6	5,4	30,0
9	Экибастузский	СС	Р	6,5	36,9	0,7	44,8	3,0	0,8	7,3	24,0
10	Подмосковный	Б2	Р, О	32,0	28,6	2,7	26,0	2,1	0,4	8,2	48,0
11	Воркутинское	Ж	Р	5,5	28,4	0,9	55,5	3,6	1,7	4,4	33,0
12	Челябинский	Б3	Р	17,0	32,4	0,9	35,9	2,6	1,0	10,2	44,0
13	Ангренское	Б2	Р	34,5	14,4	1,3	39,1	1,9	0,2	8,6	33,5
14	Березовское	Б2	Р	33,0	4,7	0,2	44,2	3,1	0,4	14,4	48,0
15	Назаровское	Б2	Р	39,0	7,3	0,4	37,6	2,6	0,4	12,7	48,0
16	Нерюнгринское	СС	Р	10,0	19,8	0,2	60,0	3,1	0,6	6,3	20,0
17	Эстонсланец	—	—	12,0	44,4	1,4	19,9	2,6	0,1	2,9	90,0
					(16,7)**						
18	Росторф	—	Фр	50,0	6,3	0,1	24,7	2,6	1,1	15,2	70,0
19	Мазут	—	Сернистый	3,0	0,1	1,4	83,8	11,2	—	0,5	—
20	»	—	Высокосер- нистый	3,0	0,1	2,8	83,0	10,4	—	0,7	—

* Обозначения классов топлив: Р—рядовое (топливо всех размеров), Ш—штыб (мелкое топливо); обозначение видов топлива: О—отсевы; ПП—промежуточный продукт переработки; Кт—концентрат (повышенного качества); Фр—фрезерный.

** Процентное содержание карбонатов.

Таблица П2. Расчетные характеристики энергетических газообразных топлив

№ п/п	Газопровод	Объемный состав газа, %								Теплота сгорания $Q_{\text{н}}^{\text{с}}$ МДж/м ³
		CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂ и более тяже- лые	N ₂	CO ₂	H ₂ S	
1	Серпухов — Ленинград	89,7	5,2	1,7	0,5	0,1	2,7	0,1	—	37,43
2	Дашава — Киев	98,9	0,3	0,1	0,1	0,0	0,4	0,2	—	35,88
3	Шабелинка — Москва	94,1	3,1	0,6	0,2	0,8	1,2	—	—	37,87
4	Промысловка — Астрахань	97,1	0,3	0,1	0,0	0,0	2,4	0,1	—	35,04
5	Газли — Ташкент	94,0	2,8	0,4	0,3	0,1	2,0	0,4	—	36,26
6	Ставрополь — Грозный	98,2	0,4	0,1	0,1	0,0	1,0	0,2	—	35,63
7	Бухара — Урал	94,9	3,2	0,4	0,1	0,1	0,9	0,4	—	36,72
8	Средняя Азия — Центр	93,8	3,6	0,7	0,2	0,4	0,7	0,6	—	37,56
9	Кулешовка — Куйбышев (попутный газ)	58,0	17,2	7,4	2,0	0,5	13,6	0,8	0,5	41,74

Таблица П3. Объемы и энтальпии воздуха и продуктов сгорания энергетических твердых и жидких топлив (при $\alpha=1$)

№ п/п	Бассейн, месторождение	Марка топлива	Класс или вид топлива	Объемы, м ³ /кг, при 0° С и 0,1 МПа				Энтальпия	Энтальпия, кДж/кг (при 0,1 МПа)		
				V _н ⁰	V _{RO₂}	V _{N₂} ⁰	V _{H₂O} ⁰		Температура, °С		
									200	400	600
Твердое топливо											
1	Донецкий	Д	Р	4,91	0,90	3,89	0,62	H _г ⁰	1520	3128	4826
								H _ж ⁰	1309	2661	4076
2		Г	О	5,00	0,91	3,96	0,58	H _г ⁰	1530	3148	4856
								H _ж ⁰	1332	2709	4149
3		Г	Кг	6,47	1,18	5,12	0,71	H _г ⁰	1968	4049	6246
								H _ж ⁰	1724	3506	5369

Продолжение табл. ПЗ

№ п/п	Бассейн, месторождение	Марка топлива	Класс или вид топлива	Объемы, м ³ /кг, при 0° С и 0,1 МПа				Энтальпия	Энтальпия, кДж/кг (при 0,1 МПа)		
				V _г ⁰	V _{Ro₂}	V _{N₂} ⁰	V _{H₂O} ⁰		Температура, °С		
									200	400	600
Твердое топливо											
4	Кузнецкий	Т	Р	6,24	1,16	4,94	0,50	H _г ⁰	1848	3804	5869
								H _г ⁰	1662	3381	5178
5		А	Ш	5,30	1,06	4,19	0,31	H _г ⁰	1565	3224	4977
								H _г ⁰	1412	2873	4399
6		СС	Р, О	6,23	1,15	4,94	0,61	H _г ⁰	1881	3870	5971
								H _г ⁰	1661	3378	5173
7	Караган- динский	Г	ПП	5,37	0,96	4,26	0,66	H _г ⁰	1651	3398	5241
								H _г ⁰	1431	2911	4458
8		К	ПП	4,28	0,79	3,38	0,49	H _г ⁰	1311	2697	4161
								H _г ⁰	1140	2318	3550
9		СС	Р	4,56	0,84	3,61	0,49	H _г ⁰	1386	2853	4402
								H _г ⁰	1214	2469	3782
10	Подмос- ковский	Б2	Р	2,68	0,50	2,12	0,67	H _г ⁰	937	1929	2978
								H _г ⁰	715	1455	2228
11	Воркутин- ское	Ж	Р, О	5,77	1,04	4,57	0,56	H _г ⁰	1732	3563	5497
								H _г ⁰	1537	3127	4789
12	Челябин- ский	Б3	Р	3,57	0,68	2,83	0,56	H _г ⁰	1147	2360	3643
								H _г ⁰	951	1935	2963
13	Ангренское	Б2	Р	3,74	0,74	2,95	0,70	H _г ⁰	1244	2563	3957
								H _г ⁰	995	2024	3100
14	Березов- ское	Б2	Р	4,28	0,82	3,38	0,82	H _г ⁰	1421	2926	4517
								H _г ⁰	1140	2319	3557
15	Назаров- ское	Б2	Р	3,62	0,70	2,86	0,83	H _г ⁰	1249	2572	3971
								H _г ⁰	965	1962	3005
16	Нерюн- гинское	СС	Р	5,96	1,12	4,71	0,56	H _г ⁰	1796	3697	5704
								H _г ⁰	1585	3225	4939
17	Эстонсла- нец	—	—	2,41	0,47	1,90	0,48	H _г ⁰	806	1660	2563
								H _г ⁰	641	1305	1998
18	Росторф	—	Фр	2,38	0,46	1,89	0,95	H _г ⁰	945	1945	3003
								H _г ⁰	634	1290	1976
19	Мазут	Сернистый		10,45	1,57	8,25	1,45	H _г ⁰	3148	6469	9960
								H _г ⁰	2780	5656	8671
20	Мазут	Высокосер- нистый		10,20	1,57	8,06	1,36	H _г ⁰	3069	6305	9709
								H _г ⁰	2717	5527	8470

Продолжение табл. II:

№ п/п	Бассейн, месторождение	Энтальпия, кДж/кг (при 0,1 МПа)							
		Температура, °С							
		800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200
Твердое топливо									
1	Донецкий	6610	8457	10 359	12 304	14 282	16 287	18 310	20 352
		5547	7061	8615	10 200	11 805	13 421	15 061	16 712
2		6650	8508	10 420	12 375	14 362	16 377	18 410	20 713
		5646	7188	8769	10 383	12 016	13 661	15 330	17 011
3		8593	10 942	13 401	15 914	18 468	21 058	23 669	26 305
		7306	9301	11 346	13 435	15 549	17 678	19 837	22 011
4		8035	10 277	12 582	14 937	17 329	19 752	22 195	24 660
		7046	8969	10 942	12 956	14 995	17 048	19 130	21 227
5		6816	8718	10 672	12 668	14 694	16 745	18 812	20 897
		5987	7621	9297	11 008	12 741	14 485	16 254	18 036
6	Кузнецкий	8176	10 459	12 807	15 207	17 646	20 117	22 610	25 125
		7040	8961	10 932	12 945	14 982	17 033	19 114	21 209
7		7177	9182	11 246	13 357	15 503	17 679	19 874	22 090
		6067	7723	9422	11 156	12 912	14 679	16 473	18 278
8	Караган- динский	5698	7290	8929	10 604	12 307	14 033	15 775	17 532
		4831	6149	7502	8883	10 280	11 688	13 116	14 553
9	Экибасту- ский	6028	7712	9445	11 216	13 016	14 840	16 680	18 537
		5146	6551	7992	9463	10 962	12 452	13 973	15 504
10	Подмос- ковский	4081	5227	6410	7622	8858	10 113	11 383	12 298
		3032	3859	4708	5574	6451	7335	8231	9133
11	Воркутин- ское	7526	9626	11 787	13 996	16 240	18 514	20 808	23 122
		6517	8295	10 120	11 983	13 868	15 767	17 693	19 632
12	Челябин- ский	4990	6387	7826	9298	10 796	12 316	13 850	15 398
		4032	5132	6261	7414	8580	9755	10 947	12 147
13	Ангрен- ское	5422	6942	8509	10 114	11 747	13 405	15 079	16 769
		4219	5370	6552	7758	8978	10 207	11 454	12 710
14	Березов- ское	6189	7924	9713	11 544	13 409	15 302	17 213	19 144
		4833	6152	7505	8886	10 284	11 693	13 121	14 359
15	Назаров- ское	5442	6970	8546	10 161	11 807	13 478	15 166	16 872
		4090	5206	6351	7520	8703	9895	11 104	12 321
16	Нерюн- гинское	7811	9993	12 237	14 530	16 859	19 220	21 601	24 003
		6721	8555	10 437	12 358	14 303	16 261	18 248	20 248
17	Эстонсла- нец	3512	4496	5512	6552	7610	8685	9770	10 867
		2719	3461	4223	5000	5787	6579	7383	8192
18	Росторф	4118	5280	6482	7716	8977	10 260	11 559	12 873
		2690	3424	4177	4946	5724	6507	7302	8103
19	Мазут	13 636	17 472	21 357	25 389	29 458	33 587	37 777	42 015
		11 811	15 005	18 330	21 696	25 108	28 520	32 021	35 521
20	Мазут	13 293	17 032	20 821	24 652	28 713	32 737	36 819	40 947
		11 535	14 654	17 903	21 194	24 526	27 859	31 275	34 692

Таблица П4. Объемы и энтальпии воздуха и продуктов сгорания для энергетических газообразных топлив (при $\alpha=1$)

№ п/п	Газопровод	Объемы, м ³ /м ³ , при 0° С и 0,1 МПа				Энталь- пия	Энтальпия, кДж/м ³ (при 0,1 МПа)		
							Температура, °С		
		$V_{\text{в}}^0$	$V_{\text{CO}_2}^0$	$V_{\text{N}_2}^0$	$V_{\text{H}_2\text{O}}^0$		200	400	600
1	Серпухов — Ленинград	10,00	1,08	7,93	2,21	$H_{\text{г}}^0$	3119	6393	9831
						$H_{\text{в}}^0$	2663	5418	8302
2	Дашава — Киев	9,52	1,00	7,52	2,15	$H_{\text{г}}^0$	2968	6083	9353
						$H_{\text{в}}^0$	2533	5158	7901
3	Шабелинка — Москва	9,98	1,07	7,90	2,22	$H_{\text{г}}^0$	3111	6376	9801
						$H_{\text{в}}^0$	2659	5406	8286
4	Промысловка — Астрахань	9,32	0,98	7,38	2,11	$H_{\text{г}}^0$	2910	5966	9173
						$H_{\text{в}}^0$	2483	5049	7733
5	Газли — Ташкент	9,64	1,03	7,64	2,16	$H_{\text{г}}^0$	3010	6167	9483
						$H_{\text{в}}^0$	2566	5225	8001
6	Ставрополь — Грозный	9,47	1,00	7,49	2,14	$H_{\text{г}}^0$	2956	6054	9311
						$H_{\text{в}}^0$	2520	5129	7859
7	Бухара — Урал	9,73	1,04	7,70	2,19	$H_{\text{г}}^0$	3035	6217	9563
						$H_{\text{в}}^0$	2592	5217	8076
8	Средняя Азия — Центр	9,91	1,07	7,84	2,21	$H_{\text{г}}^0$	3090	6330	9734
						$H_{\text{в}}^0$	2638	5367	8223
9	Кулешовка — Куйбышев (попутный газ)	10,99	1,26	8,82	2,28	$H_{\text{г}}^0$	3442	7051	10844
						$H_{\text{в}}^0$	2927	5958	9123

№ п/п	Газопровод	Энтальпия, кДж/м ³ (при 0,1 МПа)							
		Температура, °С							
		800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200
1	Серпухов —	13 452	17 241	21 085	25 083	29 123	33 213	37 405	41 629
	Ленинград	11 309	14 365	17 547	20 775	24 041	27 306	30 656	34 009
2	Дашава —	12 803	16 408	20 067	23 873	27 721	31 635	35 609	39 632
	Киев	10 760	13 670	16 701	19 770	22 877	25 987	29 178	32 364
3	Шабелинка —	13 415	17 091	21 026	25 012	29 040	33 139	37 304	41 516
	Москва	11 288	14 340	17 513	20 733	23 995	27 256	30 597	33 942
4	Промысловка —	12 552	16 086	19 674	23 404	27 177	31 012	34 910	38 854
	Астрахань	10 534	13 381	16 345	19 351	22 391	25 435	28 558	31 677
5	Газли —	12 979	16 634	20 339	24 200	28 093	32 062	36 090	40 164
	Ташкент	10 898	13 846	16 915	20 021	23 170	26 318	29 546	32 778
6	Ставрополь —	12 745	16 333	19 971	23 760	27 587	31 485	35 441	39 440
	Грозный	10 706	13 599	16 613	19 665	22 759	25 849	29 023	32 196
7	Бухара — Урал	13 088	16 772	20 511	24 405	28 332	32 335	36 396	40 503
		11 003	13 976	17 074	20 210	23 387	26 565	29 794	33 084
8	Средняя	13 322	17 074	20 880	24 740	28 843	32 912	37 049	41 232
	Азия — Центр	11 204	14 231	17 384	20 582	23 819	27 055	30 371	33 691
9	Кулешовка —	14 842	19 021	23 258	27 666	32 117	36 643	41 240	45 887
	Куйбышев (попутный газ)	12 426	15 788	19 284	22 831	26 419	30 011	33 691	37 371

Таблица П5. Удельные энтальпии компонентов продуктов сгорания и воздуха при нормальных условиях (0°C и 760 мм рт. ст.), кДж/м^3 , и золы, кДж/кг

$t, ^\circ\text{C}$	$(c_p)_{\text{RO}_2}$	$(c_p)_{\text{N}_2}$	$(c_p)_{\text{O}_2}$	$(c_p)_{\text{H}_2\text{O}}$	$(c_p)_\text{в}$	$(c_p)_\text{зл}$
100	170,0	129,6	131,8	150,5	132,4	80,8
200	357,5	259,9	267,0	304,5	266,4	169,1
400	771,9	526,5	551,0	626,2	541,8	360,1
600	1224,6	804,1	850,1	968,9	829,7	560,2
800	1704,9	1093,6	1159,9	1334,4	1129,1	767,0
1000	2203,5	1391,7	1477,5	1722,9	1437,3	983,9
1200	2716,6	1697,2	1800,7	2132,3	1753,4	1205,8
1400	3239,1	2008,7	2128,3	2559,1	2076,2	1582,6
1600	3768,8	2324,5	2460,5	3001,8	2402,9	1875,7
1800	4304,7	2643,7	2797,5	3458,4	2731,9	2185,5
2000	4844,1	2965,1	3138,4	3925,5	3065,6	2512,1
2200	5386,6	3289,2	3482,7	4401,9	3401,6	—

Таблица П6. Теплоемкости топлив

Топливо	Температура, $^\circ\text{C}$			
	0	100	200	300

А. Сухая масса твердого топлива $c_{\text{тл}}^s$, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$

Антрацит и тощий уголь	0,921	0,963	1,047	1,130
Каменный уголь	0,963	1,089	1,256	1,424
Бурый уголь	1,089	1,256	1,456	—
Сланцы	1,047	1,130	1,298	—
Фрезерный торф	1,298	1,507	1,800	—

Б. Рабочая масса твердого топлива

$$c_{\text{тл}}^p = 4,1868 \frac{W^p}{100} + \frac{100 - W^p}{100}, \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$$

В. Жидкое топливо (мазут)

$$c_{\text{м}} = 1,7375 + 0,002512 t_{\text{тл}}, \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K}),$$

где $t_{\text{тл}}$ — температура топлива, $^\circ\text{C}$.

Г. Газообразное топливо

$$c_{\text{г}} = 0,01 [\text{CH}_4 c_{\text{CH}_4} + \text{C}_2\text{H}_6 c_{\text{C}_2\text{H}_6} + \text{C}_3\text{H}_8 c_{\text{C}_3\text{H}_8} + \text{C}_4\text{H}_{10} c_{\text{C}_4\text{H}_{10}} + \\ + \text{C}_5\text{H}_{12} c_{\text{C}_5\text{H}_{12}} + \text{N}_2 c_{\text{N}_2} + \text{CO}_2 c_{\text{CO}_2} + \text{H}_2\text{S} c_{\text{H}_2\text{S}}], \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{K}),$$

где CH_4 , C_2H_6 ... — содержание газовых компонент в природном газе, %;
 c_{CH_4} , $c_{\text{C}_2\text{H}_6}$... — теплоемкости горючих и негорючих составляющих природного газа, $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{K})$

Средняя теплоемкость газов, $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{K})$:

$t, ^\circ\text{C}$	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}	C_5H_{12}	N_2	CO_2	H_2S
0 ...	1,55	2,21	3,05	4,13	5,13	1,29	1,60	1,51
100 ...	1,64	2,49	3,51	4,71	5,84	1,30	1,70	1,53

Таблица П7. Расчетные характеристики однокамерных топок при паропроизводительности котла более 20,8 кг/с (75 т/ч)

Топливо	Коэффициент избытка воздуха на выходе из топки α_t	Допустимое тепловое напряжение объема топки по условию горения q_v , кВт/м ³	Потери теплоты от недожога $q_3 + q_4$, %
---------	---	---	--

А. При твердом шлакоудалении

Тощие угли	1,20—1,25	162,8	2
Каменные угли	1,20	174,5	1,0—1,5
Отходы углеобогащения	1,20	162,8	2,0—3,0
Бурые угли	1,20	186,1	0,5—1,0
Фрезерный торф	1,20	162,8	0,5—1,0
Сланцы	1,20	116,3	0,5—1,0

Б. При сжигании мазута и горючих газов

Мазут	1,02—1,10	291	0,1—0,5
Природный или попутный коксовый газ	1,05—1,10	349—465	0,1—0,5
Доменный газ	1,10	233	1,5

В. Потери теплоты в окружающую среду в зависимости от номинальной паропроизводительности котла:

Паропроизводительность D :

кг/с	20	40	80	120	160	200	250	и более
т/ч	72	144	288	432	576	720	900	и более
Потеря теплоты q_5 , %	0,8	0,65	0,45	0,35	0,28	0,24	0,2	

Примечания: 1. Потери теплоты от недожога на твердых топливах относят целиком к q_4 , при этом меньшие значения принимают при сжигании малозольных топлив с $A'' \leq 1,43\%$ кг/МДж. 2. При твердом шлакоудалении доля уноса летучей золы принимается для всех топлив $a_{y,л} = 0,95$. 3. При сжигании мазута избыток воздуха $\alpha_t = 1,02 \div 1,03$ принимается при газоплотном исполнении экранов топки и автоматическом регулировании горения, а также в обычных топках и присосах в нее не выше $\Delta\alpha_t = 0,05$. При сжигании газового топлива (кроме доменного газа) в газоплотных топках принимается $\alpha_t = 1,05$. 4. Потери теплоты от недожога при сжигании мазута и горючих газов относят в основном к q_3 . В топках котлов большой паропроизводительности (89 кг/с и более) при автоматическом регулировании горения принимают недожог топлива 0,1—0,2%.

Таблица П8. Расчетные характеристики открытых и полукрытых (с пережимом) топок с жидким шлакоудалением при паропроизводительности котла выше 20,8 кг/с (75 кг/с)

Топливо	Коэффициент избытка воздуха α_t	Допустимое тепловое напряжение объема топки q_v , кВт/м ³	
		Открытая топка	Топка с пережимом
Антрациты и полуантрациты	1,20—1,25	168,6 (145,4)	197,7 (168,6)
Каменные угли марок Т, 2СС	1,20—1,25	215,2 (186,1)	232,6 (197,7)

Продолжение табл. П8

Топливо	Коэффициент избытка воздуха α_t	Допустимое тепловое напряжение объема топки q_v , кВт/м ³	
		Открытая топка	Топка с пережимом
То же марок Г, Д ГСШ, ІСС Бурые угли	1,20	215,2 (186,1)	232,6 (197,7)
	1,2	244,2 (209,3)	267,5 (232,6)

Топливо	Потери теплоты от недожо- га q_4 , %		Доля шлакоулавливания $a_{шл}$	
	Открытая топка	Топка с пе- режимом	Открытая топка	Топка с пе- режимом
Антрациты и полуан- трациты	3—4	3—4	0,15	0,15
Каменные угли марок Т, 2СС	1,5	1,0	0,20	0,20
То же марок Г, Д ГСШ, ІСС	0,5	0,5	0,20	0,20—0,30
Бурые угли	0,5	0,5	0,1—0,35	0,1—0,35

Примечания: 1. Большее значение $\alpha_t=1,25$ принимается при транспорте пыли в топку горячим воздухом. 2. Меньшее значение $q_4=3\%$ принимается для полуантрацитов, меньшие значения $a_{шл}$ — для топок с вихревыми горелками.

Таблица П9. Физические характеристики воздуха и продуктов сгорания среднего состава

θ , °С	Воздух			Продукты сгорания среднего состава		
	$\lambda \cdot 10^5$, кВт/(м · К)	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	Pr	$\lambda \cdot 10^5$, кВт/(м · К)	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	Pr
0	2,43	13,2	0,70	2,28	11,9	0,74
100	3,19	23,2	0,69	3,13	20,8	0,70
300	4,48	48,2	0,69	4,84	43,9	0,65
500	5,62	79,3	0,70	6,56	73,0	0,62
700	6,66	115,0	0,71	8,27	107,0	0,60
900	7,61	155,0	0,72	10,01	146,0	0,58
1100	8,47	200,0	0,72	11,75	188,0	0,57
1300	9,27	247,0	0,73	13,49	234,0	0,55
1500	10,02	300,0	0,73	15,35	282,0	0,53
1700	10,75	355,0	0,74	17,33	333,0	0,51
1900	11,46	415,0	0,74	18,96	389,0	0,49
2100	12,09	478,0	0,75	20,70	450,0	0,48
2300	12,79	544,0	0,75	22,56	513,0	0,47

Таблица П10. Теплопроводность воды и водяного пара (опорные значения теплопроводности $\lambda \cdot 10^5$, кВт/(м·К))

$t, ^\circ\text{C}$	Давление, МПа						На линии насыщения		Давление насыщения, МПа
	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	Вода	Пар	
150	69,98	69,32	69,68	69,92	70,27	70,61	68,62	3,00	0,47
200	66,75	67,24	67,58	68,06	68,40	68,87	66,41	3,74	1,55
250	61,75	62,46	63,17	63,87	64,45	65,15	61,64	4,95	3,97
300	52,5	54,46	55,85	57,02	58,18	59,10	53,96	7,19	8,58
320	5,24	7,38	51,54	53,18	54,56	55,85	50,36	8,78	11,28
340	5,45	6,92	46,08	48,18	50,15	51,78	46,05	11,30	14,60
350	5,51	6,81	10,02	45,27	47,47	49,45	43,50	13,03	16,52
360	5,61	6,75	9,24	41,07	44,33	46,55	40,12	15,00	18,66
370	5,72	6,73	8,75	14,09	40,15	43,40	33,84	18,26	21,04
400	6,00	6,83	8,13	10,61	15,05	24,80			
430	6,35	7,04	8,01	9,45	11,88	15,49			
450	6,51	7,22	8,04	9,21	10,90	13,51			
500	7,15	7,75	8,40	9,20	10,18	11,43			
550	7,83	8,34	8,91	9,56	10,31	11,12			
600	8,49	8,97	9,49	10,10	10,68	11,35			

Пример расчета теплопроводности. Требуется найти значение λ при давлении 14 МПа и температуре пара 480° С. Найдем числовое значение λ' для давления 14 МПа при меньшем и большем ближайших опорных значениях температур (450 и 500° С):

$$\lambda'_1 = 7,22 + \frac{8,04 - 7,22}{15 - 10} (14 - 10) = 7,876;$$

$$\lambda'_2 = 7,75 + \frac{8,40 - 7,75}{15 - 10} (14 - 10) = 8,27.$$

Числовое значение λ' для заданных параметров (давления 14 МПа и температуре 480° С)

$$\lambda' = 7,876 + \frac{8,27 - 7,876}{500 - 450} (480 - 450) = 8,166.$$

В итоге окончательный ответ: $\lambda = 8,166 \cdot 10^{-5}$ кВт/(м·К). При расчете вблизи линии насыщения одно из опорных значений принимается по данным линии насыщения (вода или пар) при опорной температуре.

Таблица III. Кинематическая вязкость воды и водяного пара (опорные значения кинематической вязкости $\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$)

t, °C	Давление, МПа						На линии насыщения		Давление насыщения p, МПа
	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	На линии насыщения		
							Вода	Пар	
150	0,198	0,199	0,200	0,201	0,203	0,188	0,197	5,622	0,47
200	0,155	0,155	0,157	0,157	0,158	0,154	0,153	2,025	1,55
250	0,134	0,135	0,136	0,136	0,136	0,137	0,133	0,881	3,97
300	0,933	0,126	0,126	0,127	0,127	0,127	0,126	0,435	8,58
320	1,043	0,423 0,486	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124	0,337	11,28
340	1,154		0,127	0,123	0,122	0,122	0,121	0,264	14,60
350	1,207	0,525	0,227	0,122	0,121	0,122	0,120	0,233	16,52
360	1,261	0,563	0,329	0,121	0,120	0,120	0,119	0,206	18,66
370	1,316	0,602	0,357	0,182	0,121	0,119	0,119	0,179	21,04
400	1,468	0,695	0,431	0,296	0,201	0,131	0,131 0,198 0,230 0,297 0,344 0,417		
430	1,626	0,780	0,495	0,350	0,258	0,198			
450	1,735	0,838	0,538	0,385	0,290	0,230			
500	1,937	0,955	0,645	0,468	0,366	0,297			
550	—	1,145	0,742	0,551	0,437	0,344			
600	—	1,310	0,860	0,640	0,508	0,417			

Примечание. Расчет кинематической вязкости ν при заданной температуре и давлении производится по примеру, приведенному в табл. IIIO.

Таблица П12. Числа Правдтла Рг, физических свойств воды и водяного пара (опорные значения чисел)

t, °C	Давление, МПа						На линии насыщения		Давление насыщения, МПа
							Вода	Пар	
	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0			
150	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,12	1,14	1,08	0,47
200	0,90	0,90	0,90	0,89	0,89	0,89	0,91	1,20	1,55
250	0,84	0,83	0,83	0,82	0,81	0,81	0,85	1,34	3,97
300	1,23	0,95	0,90	0,87	0,84	0,82	0,96	1,69	8,58
320	1,16	1,62	1,02	0,94	0,91	0,87	1,09	1,96	11,28
340	1,12	1,56	1,34	1,10	1,03	0,96	1,34	2,51	14,60
350	1,10	1,39	2,06	1,31	1,13	1,02	1,62	3,14	16,52
360	1,08	1,33	1,82	1,90	1,30	1,12	2,41	5,04	18,66
370	1,06	1,29	1,64	2,97	1,77	1,29	2,96	5,66	21,04
400	1,03	1,16	1,35	1,66	2,55	5,04			
450	0,97	1,04	1,13	1,25	1,90	1,56			
500	0,94	0,98	1,03	1,09	1,16	1,23			
550	0,92	0,94	0,97	1,01	1,04	1,08			
600	0,90	0,91	0,92	0,95	0,97	1,00			

Примечание. Расчет чисел Рг при заданной температуре и давлении производится по примеру, приведенному в табл. П10.