

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

КОТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И ПАРОГЕНЕРАТОРЫ

Сборник учебно-методических материалов

Для направления подготовки 13.03.01 – Теплоэнергетика и теплотехника

Благовещенск, 2017

*Печатается по решению
Редакционно-издательского совета
Энергетического факультета
Амурского государственного
университета*

Составитель: Блейхман А.С., Хондошко Ю.В.

Котельные установки и парогенераторы: сборник учебно-методических материалов для направления подготовки 13.03.01. – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2017

©Амурский государственный университет, 2017

© Кафедра энергетики, 2017

© Блейхман А.С., Хондошко Ю.В., составители

Содержание

1. Краткий курс лекций		4
2. Методические рекомендации к практическим занятиям	20	
3. Методические рекомендации к курсовому проектированию	35	
4. Методические рекомендации для самостоятельной работы студентов	42	
5. Библиографический список		45

1. КРАТКИЙ КУРС ЛЕКЦИЙ

Энергетическое топливо и его классификация

Топливо есть вещество, доступное для массового применения и которое целесообразно использовать для получения энергии в больших количествах. Топливо по своему происхождению подразделяется на органическое и неорганическое.

В настоящее время основным источником для получения энергии во всем мире является органическое топливо, преимущественно ископаемое: каменные и бурые угли, торф, горючие сланцы, природный газ, а также продукты переработки нефти. В качестве неорганического используется ядерное топливо, в основном уран (U) и плутоний (Pu).

Все топлива, как органические, так и неорганические по своему происхождению могут быть естественными и искусственными. Последние получают после переработки естественного топлива с целью выделения из него ценных продуктов, к которым относятся смолы, бензины, бензолы, минеральные смазочные масла и т.д. По агрегатному состоянию топлива подразделяются на твердые, жидкие и газообразные.

По направлению использования различают технологические и энергетические топлива. Энергетическим топливом называют горючие вещества, которые экономически целесообразно использовать для получения в промышленных целях больших количеств тепла. Кроме того, существует понятие так называемого местного топлива. Местные топлива нецелесообразно транспортировать на дальние расстояния из-за высокой забалластированности (большое содержание влаги и минеральных примесей), т.е. их выгоднее использовать вблизи места добычи.

Все виды энергетических топлив помимо горючей части содержат негорючие компоненты - балласт. Негорючими компонентами твердого и жидкого топлива являются минеральные примеси, образующие при сгорании золу, и вода; балластом газообразного топлива являются негорючие газовые компоненты и пары воды.

Происхождение и химический состав топлив

Органическое топливо состоит из горючих веществ, негорючих минеральных примесей и влаги. Древесное топливо представляет собой в основном клетчатку, образующую стенки клеток, и межклеточное вещество со сложной молекулярной структурой - лигнин. Содержание в древесине клетчатки достигает 50-70%, лигнина 20-30%; несколько процентов составляют воски, смолы и жирные кислоты.

Ископаемые твердые топлива характеризуются общностью происхождения горючей части. Они произошли в основном из растительной массы, но могут содержать также большее или меньшее количество белковых и жировых веществ животного происхождения.

Процессы преобразования исходной органической массы протекали с постепенным обуглероживанием (углефикацией) топлива, т.е. повышением в нем содержания углерода и уменьшением количества кислорода и водорода. Чем выше степень углефикации топлива, тем больше в нем углерода.

Начальные стадии разложения в толще отмершей многоклеточной растительности, происходящие в заболоченных местах, где слой воды препятствует свободному доступу воздуха, называют оторфянением.

Оторфянение приводит к образованию темно-бурой массы – торфа, в составе которого остатки неразложившихся частей растений (листьев, стеблей). Степень разложения торфяной массы колеблется в очень широких пределах. Дальнейшие процессы преобразования торфяной массы приводят к образованию бурых углей. Продуктами последующих процессов преобразования бурых углей являются каменные углеантрациты.

Естественным жидким топливом является нефть - смесь жидких углеводородов с небольшим количеством жидких кислородсодержащих, сернистых и азотистых

соединений, растворенного парафина и смолы (в среднем около 87% углерода и до 13% водорода).

Химический состав природного газа представлен в основном метаном 95 - 98%, азотом и водяными парами 2 - 5%.

Попутные газы по своему составу мало отличаются от природных и состоят из метана и других углеводородов метанового ряда.

Природные газы образовались одновременно с нефтью. Наиболее легкие составляющие нефти скапливались над ней, легко мигрировали в пористых горных породах на большие расстояния от мест своего образования, накапливаясь, образовывали чисто газовые месторождения. Попутные газы, как правило, состоящие из тяжелых углеводородов, сосредоточены над нефтяными месторождениями.

В искусственных газообразных топливах метана немного. Основными, горючими элементами в них являются водород и оксид углерода. Содержание балластных примесей в искусственных газах достигает иногда 60-70%. Химический состав газообразных топлив определяется газовым анализом.

Элементный состав топлив не дает полного представления о свойствах топлива, так как не отражает химической природы входящих в него соединений. Однако он дает возможность выполнять ряд важных технических расчетов (например, определение количества воздуха, необходимого для полного сгорания топлива, объемов продуктов сгорания и т.д.)

Горючими элементами топлива являются углерод С, водород Н и сера S.

Кислород и азот топлива уменьшают содержание в нем горючих элементов углерода и водорода. Кроме того, кислород, находясь в соединении с водородом или углеродом топлива, снижает количество теплоты, выделяемой топливом. Азот при сжигании топлива не окисляется и переходит в продукты сгорания в свободном виде. При определенных условиях протекания топочных процессов азот может вступать в химическое взаимодействие с кислородом, образуя высокотоксичные соединения в составе дымовых газов.

Сера является вредной примесью топлива. В твердых топливах она встречается в трех видах: органическая S_o , колчеданная S_k и сульфатная S_s . Органическая сера входит в состав сложных высокомолекулярных органических соединений топлива. Органическая и колчеданная сера при горении топлива окисляются с выделением теплоты; они образуют горючую или летучую серу. Содержание серы в топливе вызывает интенсивную коррозию низкотемпературных поверхностей нагрева, так как продуктом окисления ее, наряду с сернистым газом SO_2 , является и серный ангидрид SO_3 , наличие которого повышает температуру конденсации водяных паров, содержащихся в продуктах сгорания топлива, примерно на 80-100°C. Кроме того, соединения серы, выбрасываемые в атмосферу через дымовую трубу, приводят к загрязнению окружающей среды.

Теплота сгорания топлива

Теплотой сгорания называется количество теплоты, выделившееся при полном сгорании топлива, кДж. Теплота, отнесенная к единице массы (1 кг) представляет собой массовую удельную теплоту сгорания, кДж/кг, а отнесенная к единице объема топлива (1 м^3) - объемную удельную теплоту сгорания, кДж/ м^3 . Различают высшую и низшую теплоту сгорания топлива. Высшей теплотой сгорания топлива (Q_{sa}) называется количество теплоты, выделившееся при полном сгорании единицы массы или объема горючего вещества с учетом теплоты конденсации водяных паров, которые содержатся в продуктах сгорания топлива.

Теплота сгорания низшая Q находится вычитанием из высшей теплоты сгорания теплоты парообразования воды, образующейся при сгорании водорода топлива.

В лабораторных условиях теплоту сгорания определяют калориметрическим способом, сжигая навеску топлива под давлением в кислородной среде в так называемой калориметрической бомбе.

Для практических расчетов при отсутствии калориметрических данных для определения теплоты сгорания того или иного топлива пользуются эмпирической формулой Менделеева, в которой коэффициенты несколько отличаются от теплоты сгорания отдельных элементов, входящих в состав топлива. Расхождение с калориметрическими значениями в этом случае не должно превышать 630 кДж/кг для топлив с зольностью менее 25% и 840 кДж/кг для топлив с зольностью более 25%. С возрастанием степени углекислотности теплота сгорания топлив повышается. Высокая теплота сгорания сланцев и мазута является следствием относительно большого содержания водорода. Теплота сгорания газообразного топлива достаточно точно определяется по данным химического анализа и значениям теплоты сгорания составляющих его горючих газов.

Количество и состав минеральных примесей

Негорючие минеральные примеси являются балластом топлива. Они уменьшают содержание горючей массы топлива и теплоту его сгорания. Вследствие этого увеличивается расход топлива, и возрастают затраты на его добычу и транспортировку.

Негорючими примесями газообразных топлив являются углекислый газ CO_2 , азот N_2 и водяные пары H_2O . Содержание их в природных газах невелико, в искусственных газах доходит до 50-60%.

В твердых топливах (за исключением сланцев) примеси состоят в основном из глинозема, свободного кремнезема и железного колчедана. В небольших количествах в них содержатся также закись железа, сульфаты, карбонаты, силикаты железа и щелочноземельных металлов (Ca, Mg), щелочи, хлориды и т.д.

Негорючие примеси нефти - это преимущественно различные соли и оксиды железа, попадающие из буровых вод, при ее добыче из труб, применяемых при бурении скважин, из цистерн и нефтехранилищ. Кроме того, в ней могут содержаться небольшие количества других веществ, например, соединения ванадия и щелочи.

Первичные минеральные примеси попадают в топливо из веществ - углеобразователей. Они характеризуются относительно равномерным распределением по массе топлива.

Вторичные примеси попадают в топливо в процессе преобразования исходной (материнской) массы вещества во время горообразования. Они распределены в топливе менее равномерно и встречаются в виде прослоек.

Первичные и вторичные примеси составляют внутренние минеральные примеси топлива.

Во время добычи, погрузки, транспортировки и хранения топлива в него попадают песок, глина, известняк - так называемые третичные примеси, которые распределяются неравномерно в топливе и сравнительно легко отделяются. Третичные примеси являются внешними примесями, их содержание в топливе может изменяться в широких пределах.

При горении топлива в условиях высоких температур минеральные примеси претерпевают значительные изменения: происходит разложение карбонатов, испарение щелочей и хлоридов, идут процессы окисления железного колчедана и закиси железа, несколько повышающие первоначальную массу негорючих веществ.

Все энергетические топлива по плавкостным характеристикам золы разделяют на три группы: с легкоплавкой золой (t_C не более 1350°C), с золой средней плавкости (t_C в пределах $1350-1450^\circ\text{C}$), с тугоплавкой золой (t_C более 1450°C). Большинство бурых углей имеют легкоплавкую золу.

Зола, прошедшая стадию расплавления и содержащая незначительные примеси обмуровки, образует шлак. Шлак представляет собой твердый раствор минералов, и его химический состав отличается от химического состава золы.

При удалении шлака в жидком состоянии большое значение имеет вязкость шлака или обратная ей величина - текучесть ($1/\eta$), а также зависимость текучести от температуры.

Вторым важным свойством золы является ее абразивность, т.е. способность истирать поверхности нагрева. Абразивность зависит от состава золы и ее физических свойств.

Влага топлива

Второй составляющей балласта топлива является влага. Влага в топливо попадает при его добыче, транспортировке и хранении. Некоторое количество влаги механически удерживается наружной поверхностью топлива. Содержание этой поверхностной влаги зависит от фракционного состава топлива. С уменьшением размеров кусков топлива их удельная поверхность возрастает, и количество влаги, механически удерживаемое наружной поверхностью топлива, увеличивается.

В твердых ископаемых топливах содержатся также коллоидная и гидратная влага. Содержание коллоидной влаги зависит от степени углефикации, химической природы и состава топлива, от содержания влаги в окружающем атмосферном воздухе. С ростом степени углефикации содержание коллоидной влаги уменьшается. Ее содержание больше в бурых углях и торфе и меньше - в каменных углях и антраците. Гидратная или кристаллизационная влага химически связана с минеральными примесями топлива, в основном с сернокислым кальцием и алюмосиликатом. Содержание ее в твердых топливах обычно невелико, за исключением высокозольных углей.

Классификация твердых топлив

В зависимости от технологических свойств все угли: бурые, каменные и антрациты объединяются в технологические марки, группы и подгруппы.

Бурые угли в зависимости от величины максимальной влажности на беззольное топливо, делятся на три группы. К группе 1Б относятся бурые угли с максимальной влагоемкостью 50% и более, к группе 2Б - угли с максимальной влагоемкостью от 30 до 50%, к группе 3Б - угли с максимальной влагоемкостью менее 30%.

Бурые угли характеризуются высоким (более 40%) выходом летучих веществ на сухую беззольную массу, несспекшимся коксовым остатком, высокой гигроскопичностью и в большинстве случаев, высокой общей влажностью, пониженным содержанием углерода и повышенным - кислорода. При сушке на воздухе бурые угли теряют механическую прочность и растрескиваются, обладают повышенной склонностью к самовозгоранию, взрывоопасны.

Каменные угли и антрациты в зависимости от выхода летучих веществ и толщины пластического слоя делятся на технологические марки, которые в свою очередь подразделяются на группы.

Классификация жидких топлив

В соответствии с ГОСТ в качестве жидкого котельного топлива применяется остаточный продукт нефтепереработки - мазут двух марок: 40 и 100. Марка топлива определяется предельной величиной вязкости при 80оС, составляющей:

для мазута 40 - 8,0 градусов условной вязкости;

для мазута 100 - 16,0 градусов условной вязкости.

Предельная зольность мазутов 40 и 100 установлена:

для малозольных мазутов - 0,04 и 0,05% соответственно;

для зольных мазутов - 0,012 и 0,014% соответственно.

По содержанию серы мазуты разделяются на низкосернистые (массовая доля серы <0,5%), малосернистые (<1,0%), сернистые (<2%) и высокосернистые (<3,5%).

Качество мазута оказывает сильное влияние на конструкцию и работу парогенераторной установки, а также на схему и компоновку электростанции в целом. Поэтому его свойства являются техническими характеристиками. Свойства мазута разделены на две группы:

управляемые, которые в процессе его подготовки можно существенно изменить и привести к требуемым значениям (вязкость, реологические свойства, плотность, содержание влаги);

неуправляемые, практически не изменяющиеся в процессе подготовки мазута (зольность, температуры застывания, вспышки и воспламенения).

Зольность. Особенностью золы мазута является наличие в ней ванадия, снижающего температуру размягчения золы и интенсифицирующего образование плотных отложений на поверхностях нагрева. Оксиды ванадия, кроме того, при определенной температуре вызывают коррозию этих поверхностей и «высокотемпературную» ванадиевую коррозию выходных ступеней пароперегревателя.

Температура застывания. При высокой температуре застывания возникают трудности слива из цистерн и перекачки по трубопроводам. Застывший мазут приходится подогревать, что увеличивает эксплуатационные расходы. Температура застывания для большинства марок мазутов колеблется от +10 до +36°C.

Температура вспышки характеризует величину температуры, при которой пары мазута в определенном соотношении с окружающим воздухом вспыхивают при соприкосновении с открытым пламенем.

Газообразное топливо

Искусственные доменный и коксовый газы перед поступлением к потребителю очищаются от пыли, смолы, бензола и других примесей. Доменный газ перед поступлением к потребителю подвергается охлаждению и очистке от пыли в скрубберах и дезинтеграторах. Потребителю подается газ, насыщенный водой и содержащий пыль в количестве 0,1-1,0 г/м при скрубберной очистке и 0,01-0,3 г/м при очистке в дезинтеграторах. Коксовый газ, как правило, направляется потребителю после очистки от смолы, бензола, нафталина и аммиака. Очищенный газ содержит следы смолы, пыли и бензола.

Природный газ является высококачественным экологически чистым топливом и обладает рядом преимуществ перед другими видами топлив. Газ сжигается без образования дыма, сажи, и золы. Природный газ сравнительно легко очищается от сернистых соединений, и потребитель обеспечивается бессернистым топливом, при сжигании которого не образуются оксиды серы.

Природный и большинство искусственных газов сгорают с образованием малосветящегося факела (отсутствие частиц кокса и золы), поэтому передача тепла излучением от факела горящего газа оказывается незначительной, гораздо меньшей, чем от факела, образующегося при сгорании жидкого или твердого топлива. Этим объясняется, например, более низкая температура газов на выходе из топки при сжигании газообразных топлив.

Визуально сложно установить неполноту сгорания газа, поэтому при отсутствии должного контроля сжигание газа может сопровождаться значительными потерями тепла вследствие химической неполноты сгорания.

Хранение газа в стальных газгольдерах требует существенных металлозатрат, так как эти хранилища строятся с расчетом обеспечения покрытия суточной неравномерности в потреблении газа. Это обуславливает применение резервного топлива.

Основными техническими характеристиками природного газа являются плотность, взрываемость и токсичность.

Взрываемость. Смесь горючего газа с воздухом в определенных соотношениях может быть взрывоопасна. Проникновение газа в неработающие топки и утечка газа из газопроводов могут привести к серьезным авариям. Опасные концентрации горючего газа в воздухе зависят от химического состава и свойств газа.

Токсичность. Под токсичностью понимают способность газового топлива вызвать отравление. Наиболее опасными в этом отношении компонентами являются оксид углерода CO и сероводород H₂S. В случае утечки их возможны тяжелые отравления обслуживающего персонала. Предельно допустимая концентрация CO в воздухе составляет 0,0024% об. Опасна для жизни концентрация оксида углерода около 0,4% об. при воздействии на человека в течение 5-6 мин. Заметное отравление вызывает даже незначительное содержание CO в воздухе (0,02% об.).

Сероводород содержится в основном в попутных газах (до 2,5%). Он также весьма токсичен. Почти все природные газы совсем не имеют запаха, поэтому в целях безопасности газ, перед поступлением его в газовую магистраль, одорируют, т.е. насыщают веществами с резким запахом - обычно органическими сернистыми соединениями (сульфиды, этилмеркаптан и др.).

Общая классификация топочных устройств

Все топочные устройства по способу сжигания топлива можно подразделить на два класса: слоевые (с неподвижным или кипящим слоем) и камерные (факельные и вихревые - по организации факела в топке).

Классификация слоевых топок.

Слоевые топки подразделяются:

- 1) по типу сжигаемого топлива;
- 2) по организации обслуживания (по степени механизации топочного процесса: подача топлива, шуровка слоя и удаление очаговых остатков);
- 3) по характеру состояния слоя на решетке: топливо неподвижно относительно неподвижной решетки; топливо подвижно относительно неподвижной решетки; подвижный слой топлива на покачивающихся колосниках; неподвижный слой топлива относительно подвижной решетки.
- 4) по расположению топки относительно поверхности нагрева (топки внешние и внутренние).

Все слоевые топки можно разделить на три группы.

В первую группу входят топки с неподвижным слоем топлива. В таких топках может сжигаться большая группа топлив: антрацит, каменные и бурые угли, торф, дрова. Это объясняется тем, что процесс подготовки его к воспламенению происходит за счет интенсивного подвода тепла одновременно от двух источников: снизу - от горящих летучих веществ и раскаленного кокса и сверху - лучистым теплом топочных газов и обмуровки. Экономичность таких топок невелика, суммарные потери тепла в них достигают 10-15%. Необходимость ручной шуровки и удаления шлака с решетки, а при отсутствии забрасывателей и ручная подача топлива приводят к тому, что эти топки используются только для котлов малой производительности (до 10 т/ч).

Во вторую группу объединены слоевые топки, в которых топливо перемещается по неподвижной решетке. Сюда относятся топки с наклонной, наклонно-переталкивающей решеткой и топки с шурящей планкой. Воздух, необходимый для горения, подается под решетку, очаговые остатки сбрасываются в конце решетки.

К третьей группе относятся слоевые топки, в которых топливо неподвижно относительно решетки и перемещается вместе с ней. Как правило, в таких топках механизированы все три стадии по обслуживанию топочных устройств: подача топлива, шуровка и удаление очаговых остатков: так называемые механические топки.

Воздух под решетку подается позонно: меньше - в зону зажигания и дожигания (в

начало и конец процесса горения) и в большей степени - в зону основного горения (середина решетки).

Топки с цепными решетками получили достаточно большое распространение из-за их универсальности: они пригодны для сжигания широкой гаммы топлив - от умеренно влажных и зольных, таких, как торф, бурый уголь и до маловлажных, низкорекреационных, таких, как антрацит. Кроме того, такие топки могут обеспечить производительность котельных агрегатов до 100-150 т/ч.

Основными достоинствами слоевых топок являются: надежность, простота обслуживания, компактность, отсутствие специальной подготовки топлива к сжиганию.

Недостатки: большие затраты физического труда при их эксплуатации; низкая эффективность использования топлива; большие потери тепла с механическим недожогом; потери тепла со шлаком, в окружающую среду и т.д.

Независимо от разнообразия топочных устройств, все они должны удовлетворять основным требованиям: обеспечивать возможно более полное сгорание топлива при минимальном коэффициенте избытка воздуха; обеспечивать необходимую передачу тепла поверхностям нагрева; быть надежными и простыми в эксплуатации; обеспечивать регулирование нагрузки; по возможности не допускать шлакование стен и поверхностей нагрева.

Способ сжигания, а следовательно, и соответствующая топочная конструкция, выбираются в зависимости от рода сжигаемого топлива, т.е. с учетом его основных свойств (выход летучих веществ, фракционный состав, зольность, влажность, спекаемость кокса и температурные характеристики золы), а также в зависимости от паропроизводительности (теплопроизводительности) котельного агрегата.

Классификация камерных топок. Более эффективными по использованию тепла топлива по сравнению со слоевыми топками являются топки камерного типа, которые имеют существенные преимущества:

- более высокую экономичность;
- возможность сжигания любого типа топлива;
- отсутствие ограничения по паропроизводительности котлоагрегата (неограниченный диапазон нагрузок);
- возможность полной автоматизации процессов горения топлива, питания котла и регулирования температуры перегретого пара.

Камерные топки являются основным видом топочных устройств промышленной теплоэнергетики.

По организации факела камерные топки подразделяются на факельные и вихревые; по типу сжигаемого топлива топки подразделяются на топки для сжигания газа и мазута - газомазутные топки и топки для сжигания твердого топлива в пылевидном состоянии. Газомазутные топки по конструктивному оформлению низа топочных камер более просты.

Классификация факельных топок для сжигания твердых топлив производится прежде всего по способу вывода шлака из топочной камеры. По этому принципу факельные топки делят на две группы:

- топки с сухим (гранулированным) шлакоудалением;
- топки с жидким шлакоудалением.

Топки с сухим шлакоудалением оснащаются, как правило, вихревыми или прямоточными пылеугольными горелками;

Шлакование топок и методы его предотвращения

Предотвращение шлакования в пылеугольных топках с твердым шлако- удалением является сложной комплексной проблемой. Шлакование поверхностей нагрева может уменьшить паропроизводительность котла до 60 – 70% от номинальной.

Для предотвращения шлакования необходим контроль за горением в топке. Факел не должен касаться стен топки и затягиваться в конвективные поверхности нагрева. Неправильное положение факела влечет за собой возрастание температуры газов у стен топки или труб ширм, фестона и способствует размягчению золы в опасных зонах.

Для разных топлив температура размягчения золы t_A меняется в широких пределах в зависимости от состава минеральных примесей топлива.

Кроме того, температура размягчения несколько изменяется в зависимости от свойств газов, с которыми движется зола, т.е. продукты химического недожога снижают t_A , поэтому процесс горения следует вести так, чтобы на выходе газов из топки недожог отсутствовал по всему сечению газохода.

Повышение нагрузки котла опасно в отношении шлакования по двум причинам: во-первых, растет температура газов перед фестомом, и, во-вторых, может возрасти химический недожог. У многих котлов имеется критическая нагрузка, при превышении которой шлакование топки резко усиливается. Эта нагрузка определяется при составлении режимных карт.

Существенное значение имеет состояние поверхности, с которой соприкасаются частицы размягченной золы. Зола хуже прилипает к металлической поверхности и лучше удерживается на незащищенных экранами стенах топочной камеры.

Обеспечение бесшлакового режима достигается в основном проведением следующих мероприятий: поддержанием требуемого избытка воздуха в топке; снижением температуры газов на выходе из топки путем обеспечения оптимального режима горения; регулированием подачи воздуха в топку и поддержанием необходимого соотношения скоростей первичного и вторичного воздуха. Скорость вторичного воздуха должна быть выше скорости первичного воздуха, иначе и процесс горения затягивается, и растет; регулированием положения ядра горения в расчетной зоне, т.е. необходимостью избегать смещения факела и наброса его на стены топки; уменьшением присосов в нижнюю часть топки; при этом факел может быть отеснен в верхнюю часть топки, процесс горения может затянуться и возрастет температура газов; поддержанием заданной (расчетной) температуры в ядре горения при помощи регулирования подачи воздуха или введением рециркуляции газов; своевременным применением обдувочных устройств.

Кроме того, необходимо уплотнять места прохода экранных труб через обмуровку, шиберы шлакового бункера, устанавливая газоплотные экраны, следить за реперами нижних точек. Опасность шлакования полностью отсутствует лишь при сжигании углей с тугоплавкой золой.

Горелочные устройства

В топочную камеру газ и окислитель подаются через горелки. Назначением горелок, кроме ввода в топку необходимых для достижения заданной производительности агрегата количества газа и окислителя, является организация смесеобразования и создание у ее устья устойчивого фонтана воспламенения для зажигания выходящей из горелки газовой смеси.

Для сжигания газов применяется большое число различных типов горелок, отличающихся как по принципу работы, так и по конструктивному оформлению. Существующий парк промышленных горелочных устройств насчитывает в настоящее время более 1,5 млн. единиц не менее 250 типов.

По способу организации перемешивания компонентов горения горелочные устройства подразделяются на:

- горелки без предварительного смешивания;
- горелки с полным предварительным смешиванием;
- горелки с неполным предварительным смешиванием;
- горелки с частичным предварительным смешиванием.

Горелки без предварительного смешивания и с частичным предварительным смешиванием, а также горелки с неполным предварительным смешиванием при сжигании газов, содержащих углеводороды, дают растянутый видимый светящийся факел. Более длинный факел характерен для горелок без предварительного смешивания. Горелки, дающие при работе видимый факел, называются факельными. Горелки с полным предварительным смешиванием газа и окислителя дают короткий невидимый факел. Такие горелки условно называются беспламенными.

Горелки иногда классифицируют и по другим признакам. Так, по способу подачи воздуха горелки делят на две группы: с принудительной подачей воздуха от вентилятора и с подачей воздуха путем эжектирования его газовой струей или за счет разрежения в топке. В свою очередь горелки с принудительной подачей воздуха от вентилятора (дутьевые горелки) по характеру истекающих потоков делятся на прямоточные и вихревые. В прямоточных горелках структура факела зависит от формы устья горелки, которая может быть прямоугольной, щелевой или круглой. Вихревые горелки конструктивно выполняются как с простым тангенциальным, так и с лопаточным тангенциальным или аксиальным подводом воздуха.

По способу регулирования крутки потока применяют горелки с изменением сечения входного патрубка или живого сечения лопаточных завихрителей, с изменением угла наклона лопаток, с перепуском части воздушного потока мимо завихрителей. Способ подвода воздуха в дутьевых горелках оказывает решающее влияние на форму факела и угол его раскрытия, размеры зон рециркуляции газов, интенсивность турбулентного перемешивания и т.п.

По давлению газа горелки можно разделить на горелки низкого давления (перепад давления в горелке до 500 Па), среднего давления (до критического перепада давлений) и высокого давления (сверхкритического перепада давлений).

По скорости истечения продуктов сгорания из горелки их можно разделить на горелки с низкой (около 5 м/с), средней (около 20 м/с) и высокой (около 100 м/с) скоростью истечения.

Различают горелки и по степени автоматизации их управления - горелки с ручным управлением, полуавтоматические, автоматические.

Для котлов малой производительности, а также для отопительных установок находят применение однопроводные инжекторные горелки (атмосферные горелки) частичного и полного смешения. Инжекционные горелки, работающие на газе среднего давления, обеспечивают полное перемешивание газа и воздуха в смесителе и сжигание газа при небольших избытках воздуха. Недостатками таких горелок являются значительные их размеры и шум при работе.

Наибольшее применение в котельных установках нашли рассматриваемые далее дутьевые горелки с принудительной подачей воздуха и газа.

Конструктивные особенности горелок зависят от характеристик сжигаемого газа (теплота сгорания, запыленность и др.) и располагаемых давлений газа и воздуха. Важным показателем, влияющим на предварительное смесеобразование и оформление горелки, является соотношение сжигаемого газа и необходимого для этого окислителя.

Мазутные

горелки

В топках котельных агрегатов электростанций в качестве жидкого топлива используется мазут. Поэтому камерные топки, предназначенные для сжигания жидкого топлива, называют мазутными топками. Мазут в такую топку поступает через специальные горелки, в которых происходит его смешение с воздухом, распыление и необходимое для лучшего перемешивания с воздухом закручивание потока.

Мазут подается в топку через специальный распылитель, называемый форсункой, которая располагается в центральной части горелки.

Число горелок стремятся выбрать достаточно большим, чтобы путем изменения их числа иметь возможность плавного регулирования нагрузки котлоагрегата. Такой способ предпочитают применять по той причине, что мазутные горелки резко ухудшают работу при сниженной подаче мазута.

Легкость воспламенения и устойчивость горения мазута позволяют даже при использовании сильно экранированных топок, в противоположность простым пылеугольным топкам, снижать нагрузку котлоагрегата до 20-30% от максимальной без обрыва факела.

По принципу действия различают: паровые (или воздушные), механические форсунки, кроме того, могут применяться ротационные форсунки. В паровых форсунках распыливание мазута осуществляется за счет кинетической энергии пара или сжатого воздуха. Эти форсунки просты по устройству, но требуют большого расхода пара и потому менее экономичны, чем механические. Лучшие конструкции таких форсунок расходуют около 0,3-0,5 кг пара на 1 кг мазута, что эквивалентно снижению КПД котлоагрегата на 2-3%. Поэтому такие форсунки используют на электростанциях только в качестве вспомогательных растопочных устройств, а для топок, постоянно работающих на мазуте, применяют исключительно механические форсунки.

В механических форсунках мазут подается под давлением 14-15 МПа, создаваемым специальными топливными насосами, и распыливание его происходит за счет превращения потенциальной энергии давления в кинетическую энергию струи мазута. Форсунка состоит из корпуса, трубы и распылителя. Распылители состоят из ряда шайб, закрепленных поперек потока и имеющих отверстия, расположенные в такой последовательности, которая обеспечивает не только раздробление мазута на капли, но и придание струе вращательного движения. Весь нужный для горения воздух подводят к корню факела через лопатки, способствующие закручиванию потока, который при выходе из горелки в топочную камеру подсасывается с ними, что повышает температуру у корня факела и облегчает воспламенение топлива.

Пылеугольные

горелки

Горелочное устройство должно обеспечивать хорошее перемешивание пыли и воздуха, возможно, более раннее воспламенение пылевоздушной смеси и способствовать практически полному выгоранию пыли. Для камерного (факельного) сжигания твердого топлива наибольшее распространение получили вихревые круглые, а также прямоточные щелевые и сопловые горелки.

Вихревыми называют горелки, у которых потоки подаваемого первичного и вторичного воздуха закручиваются специальными завихрителями.

Закручивание потоков достигается при помощи улиток, устанавливаемых на входе в горелку, или лопаток, устанавливаемых в горелке аксиально или тангенциально в потоке первичного или вторичного воздуха. Наименование горелки отражает способ ввода первичного (с пылью) и вторичного воздуха. Так, в прямоточно-улиточной горелке первичный воздух с пылью (пылевоздушная смесь или аэросмесь) подается через центральную трубу прямоточно, без закручивания. Вторичный воздух, подаваемый в топку через горелку, закручивается улиткой.

В прямоточных щелевых горелках подача в топку аэросмеси и вторичного воздуха осуществляется отдельно через узкие щели. Такие горелки выполняются с внешним и с внутренним вводом вторичного воздуха. В прямоточных сопловых горелках ввод аэросмеси и вторичного воздуха осуществляется отдельно через круглые сопла.

Примером прямоточной щелевой горелки является широко используемая поворотная горелка. В этой горелке аэросмесь поступает через центральный патрубок, откуда через поворотные сопла-щели она выходит в топку.

Вторичный воздух поступает в топку по наружному соплу. Сопла при помощи электродвигателя поворачиваются вверх и вниз от горизонтальной плоскости на 12-20°, что дает возможность изменять положение факела в топке.

Для вихревых и прямоточных горелок характерны различные схемы воспламенения, дальнобойность факела и сопротивление горелочного устройства.

Эффективность использования топлива

Эффективность использования топлива в котельном агрегате определяется рядом факторов, основные из которых - полнота процесса сгорания топлива и глубина охлаждения продуктов сгорания.

Большая часть теплоты, вносимой в котельный агрегат, воспринимается поверхностями нагрева и передается рабочему телу. За счет этой теплоты осуществляется подогрев воды до температуры кипения, ее испарение и перегрев пара. Это - полезно используемое тепло. Остальное тепло, составляющее в современном котельном агрегате примерно 6-12%, не используется для получения перегретого пара и составляет тепловые потери.

Свойства и характеристики угольной пыли

Пыль, образующаяся в результате измельчения топлива в размольных устройствах, представляет собой смесь частиц неправильной геометрической формы и различного размера: от близкого к нулю до 300-500-1000-1500 мкм, с преобладанием частиц размером 20-50 мкм.

Свежеприготовленная пыль в смеси с воздухом обладает текучестью и легко транспортируется по трубопроводам. Удельный вес пыли составляет 0,45-0,5 т/м³. По мере ее хранения пыль слеживается, ее удельный вес увеличивается до 0,8-0,9 т/м³.

Пыль высокорреакционных углей (бурых и ряда марок каменных: Г, Д, Ж) в определенной концентрации с воздухом становится взрывоопасной, поэтому при проектировании систем пылеприготовления избегают горизонтальных и слабонаклонных участков, т.к. именно там и в местах поворотов пылепроводов пыль отлагается, спрессовывается и самовозгорается.

Недостаточно подсушенная пыль плохо транспортируется по тракту из-за склонности к слипанию в комки, затрудняющие подачу ее к горелкам. Пыль с повышенной влажностью труднее воспламеняется, что ведет к ухудшению процесса горения. Наоборот, пересушенная пыль склонна к самовоспламенению.

Система подготовки топлива

В отличие от слоевого сжигания топлива в пылевидном состоянии имеет ряд преимуществ: большая экономичность сжигания; возможность сжигания любых сортов топлив; практически неограниченный диапазон нагрузок паровых котлов (отсутствие ограничения по производительности); возможность полной автоматизации всех процессов по обслуживанию котельных агрегатов: процесса горения, питания, регулирования температуры перегрева пара и т.д.

С другой стороны, несмотря на очевидные достоинства, сжигание пылевидного топлива имеет свои недостатки: значительный расход электроэнергии на помол; необходимость установки дополнительного оборудования (дробилки, мельницы, сепараторы, циклоны и т.д.), что удорожает установку, (увеличиваются затраты на это оборудование и на строительные-монтажные работы.

Размер кусков топлива после дробления существенно влияет на производительность системы пылеприготовления, эффективность сушки, износ мелющих элементов и расход электроэнергии на пылеприготовление.

Для дробления топлива используют валковые, диско-зубчатые и молотковые дробилки.

В валковой дробилке один валок вращается в неподвижных подшипниках, другой - в подвижных, сдвигающихся друг относительно друга. Валки могут быть гладкими, рифлеными или шиповыми. Диаметр валков - 450-1200 мм. Производительность дробилок от 40 до 300 т/ч.

Молотковая дробилка выполняется в виде ротора, состоящего из вала с жестко насаженными на него дисками и свободно качающимися билами (молотками). Ротор вращается в массивном корпусе, в верхней части которого установлена броневая плита. Под плитой находятся неподвижные колосники и решетка. Нормальный зазор между билами и решеткой составляет 510 мм. Дробление топлива происходит ударами бил о куски топлива, топлива о топливо и топлива о броневую плиту.

Диско-зубчатая дробилка имеет два вала с насаженными на них дисками. Диски вращаются навстречу друг другу с разными скоростями от двух самостоятельных электродвигателей. Эти устройства чувствительны к металлическим предметам, приводящим к поломкам зубьев. Производительность таких дробилок до 1200 т/ч.

Системы пылеприготовления

Все существующие системы пылеприготовления подразделяются на центральные и индивидуальные.

Центральные пылесистемы могут иметь полную или ограниченную задачу - сушку и размол топлива, либо только его подсушку; они не имеют связи с конкретным котлом (котлами) по сушильному агенту, а готовая пыль может быть подана на несколько котлов. При центральном пылеприготовлении пыль получают с помощью оборудования, размещенного в отдельно стоящем здании (центральном пылезаводе - ЦПЗ)

Полученную пыль пыленасосом подают в бункера пыли котлов одной или нескольких ТЭС.

Основные недостатки схем с центральным пылезаводом: большая длина пылепроводов (возможно отложение пыли по тракту); сушка топлива и его транспорт осуществляются различными сушильно-вентилирующими агентами; сброс запыленного сушильного агента осуществляется в атмосферу, что загрязняет окружающую среду, при этом растет и потеря q_4 (с механическим недожогом).

Размольное оборудование индивидуальных систем пылеприготовления размещается в котельном цехе, непосредственно у котлов.

Индивидуальные системы пылеприготовления могут быть: с прямым вдуванием; с промежуточным бункером пыли.

Оба этих типа систем пылеприготовления оснащаются оборудованием в зависимости от типа мельницы и вида сушильного агента. В качестве сушильного агента могут использоваться: горячий воздух с температурой 350-450 °С; дымовые газы с температурой 800-1000 °С; смесь горячего воздуха и дымовых газов с температурой 600-800 °С.

В зависимости от места ввода сушильного агента пылесистемы с промежуточным бункером пыли могут быть: замкнутыми - отработанный сушильный агент сбрасывается в топку вместе с пылью; разомкнутыми - отработанный сушильный агент после отделения из него пыли сбрасывается в атмосферу или газоход за котлом; полуразомкнутыми - пыль и сушильный агент вводятся в топку через различные горелки (каналы).

Встречаются схемы пылеприготовления, когда отделение отработанного сушильного агента от пыли осуществляется по отношению к части пылегазовой смеси. Такие схемы принято называть частично разомкнутыми.

Размыкание схемы может быть выполнено как после размола, так и после его сушки.

Индивидуальные схемы с прямым вдуванием имеют различные модификации применительно к виду сушильного агента, типу мельницы и вспомогательного оборудования и их конструктивного оформления.

Выбор схемы пылеприготовления определяется многими факторами, наиболее важными из которых являются: влажность топлива и пыли (количество влаги, которое необходимо испарить в системе пылеприготовления); реакционная способность топлива, предъявляющая требования к его воспламенению; шлакующие свойства топлива и способ шлакоудаления; взрывоопасность топлива; размолоспособность топлива; тип мельницы.

Сепараторы пыли

В сепараторах происходит разделение мелких и крупных фракций пыли, или, другими словами - выделение из кондиционной угольной пыли крупных фракций и направление их на домол в мельницу. Совершенство сепаратора определяется полнотой отделения наиболее крупных фракций без захвата мелких, поэтому при выборе оборудования пылеприготовления следует рассматривать мельницу и сепаратор как единое целое. На электростанциях применяют сепараторы следующих типов: гравитационные (шахтные), инерционные и центробежные.

Сепараторы инерционного типа широко применяются в сочетании с ММ и с МВ для размола бурых углей и сланцев.

В центробежный сепаратор пылевоздушная смесь подводится снизу в наружный конус, где происходит первичная гравитационная сепарация. В верхней части сепаратора пылевоздушная смесь закручивается на лопатках (створках) сепаратора, в результате чего возникают центробежные силы - вторая ступень сепарации, и во внутреннем конусе отделяются крупные фракции пыли, которые через рукав также возвращаются в мельницу.

Пригодная для эффективного сжигания пыль через патрубок выносится из сепаратора. Тонкость помола регулируется поворотом лопаток.

Центробежные сепараторы широко применяются в сочетании с мощными ММ при размоле бурых и каменных углей, а также в схемах с ШБМ независимо от сорта топлива.

Вспомогательное оборудование СПП

Пылевой циклон и клапан-мигалка. Из сепаратора пылевоздушная смесь поступает в циклон. Отделившаяся при движении в корпусе циклона и на входе в лопатки топливная пыль ссыпается в бункер; очищенный примерно на 85% воздух (содержащий около 15% наиболее тонкой пыли) проходит лопаточный аппарат, внутренний цилиндр циклона и через патрубок мельничным вентилятором направляется в горелки котла.

Работа циклона резко ухудшается при присосах в него атмосферного воздуха. Уплотнение циклона достигается применением клапана-мигалки. Известен ряд конструкций таких устройств. На рис. 8.20 показан клапан-мигалка ВТИ.

Достаточную плотность обеспечивает слой пыли, который постоянно находится в пылеподводящем патрубке. Необходимый зазор между патрубком и конусом для прохода пыли обеспечивает соответствующее положение противовеса определенной массы.

Пылеуловители устанавливаются в системах с промбункером, предназначены для выделения из сушильно-вентилирующего агента (после размола и сепаратора) максимально возможное количество пыли (до 90%), т.е. для максимального обеспыливания сушильного агента.

Пылеконцентраторы применяются при подготовке к сжиганию высоковлажных и низкокалорийных топлив, предназначены для пофракционного разделения пыли и сушильного агента по ярусам горелок с тем, чтобы большую часть пыли (до 80%) сбросить в основные горелки с меньшей долей сушильного агента (25-30%), а оставшиеся продукты - в сбросные горелки.

Классификация котельных агрегатов

Котлы как технические устройства для производства пара или горячей воды отличаются многообразием конструктивных форм, принципов действия, используемых

видов топлива и производственных показателей. Вместе с тем по способу организации движения воды и пароводяной смеси все котлы могут быть разделены на следующие две группы: котлы с естественной циркуляцией; котлы с принудительным движением теплоносителя (воды, пароводяной смеси), которое в свою очередь осуществляется многократной принудительной циркуляцией и по прямоточной схеме.

В современных отопительных и отопительно-производственных котельных для производства пара используются в основном котлы с естественной циркуляцией, а для производства горячей воды — котлы с принудительным движением теплоносителя, работающие по прямоточному принципу.

Движение теплоносителя в котлах с естественной циркуляцией осуществляется за счет движущего напора, создаваемого разностью весов столба воды в опускных и столба пароводяной смеси в подъемных трубах. Кратность циркуляции (отношение расхода воды, проходящего через циркуляционный контур, к расходу пара, производимого в нем) в таких котлах изменяется от 10 до 100.

В паровых котлах с многократной принудительной циркуляцией поверхности нагрева выполняются в виде змеевиков, образующих циркуляционные контуры. Движение воды и пароводяной смеси в таких контурах осуществляется с помощью циркуляционного насоса. Кратность циркуляции в этих котлах изменяется от 5 до 10.

В прямоточных паровых котлах кратность циркуляции составляет единицу, т.е. питательная вода, нагреваясь, последовательно превращается в пароводяную смесь, насыщенный и перегретый пар. В водогрейных котлах вода при движении по контуру циркуляции нагревается за один оборот от начальной до конечной температуры.

Основные элементы паровых и водогрейных котлов

Топки для сжигания газообразных, жидких и твердых топлив. При сжигании газа и мазута, а также твердого пылеугольного топлива используются, как правило, камерные топки. Топка ограничена фронтальной, задней, боковыми стенами, а также подом и сводом. Вдоль стен топки располагаются испарительные поверхности нагрева (кипяtilьные трубы) диаметром 50...80 мм, воспринимающие излучаемую теплоту от факела и продуктов сгорания. При сжигании газообразного или жидкого топлива под камерной топкой обычно не экранируют, а в случае угольной пыли в нижней части топочной камеры выполняют «холодную» воронку для удаления золы, выпадающей из горящего факела.

Верхние концы труб вальцованы в барабан, а нижние присоединены к коллекторам путем вальцовки или сварки. У ряда котлов кипяtilьные трубы заднего экрана перед присоединением их к барабану разводят в верхней части топки в несколько рядов, расположенных в шахматном порядке и образующих фестон.

Горелки в топке могут быть расположены фронтально, на боковых стенах и в ее углах. В местах установки горелок стены могут не экранироваться и кипяtilьные трубы разводят таким образом, чтобы избежать необходимости перекрывать амбразуры горелок. Для обслуживания топки и газоходов в котельном агрегате используется следующая гарнитура: лазы, закрываемые дверцы, гляделки, взрывные клапаны, шиберы, поворотные заслонки, обдувочные аппараты, дробеочистка. Закрывааемые дверцы, лазы в обмуровке предназначены для осмотра и производства ремонтных работ при останове котла. Для наблюдения за процессом горения топлива в топке и состоянием конвективных газоходов служат гляделки. Взрывные предохранительные клапаны используются для защиты обмуровки от разрушения при хлопках в топке и газоходах котла и устанавливаются в верхних частях топки, последнего газохода агрегата, экономайзера и в своде.

Размещение, число и размеры предохранительных клапанов выбираются проектной организацией из расчета 250 см² площади взрывного клапана на 1 м³ объема топки или газоходов котла.

Взрывные клапаны представляют собой рамки из углового железа круглой или квадратной формы, закрытые листовым асбестом толщиной 2...2,5 мм, плотно закрепленные в соответствующих проемах, сделанных в кладке топки и дымоходах котла. В случае взрыва давлением образовавшихся газов асбестовый картон прорывается, и газы получают выход наружу, благодаря чему давление их падает и снижается возможность опасного разрушения. В момент взрыва створка клапана после разрушения картона откроется, а после выхода газов наружу через газоотводящий короб под действием своего веса или специальных грузов закроется.

Для регулирования тяги и перекрытия борова служат чугунные дымовые шиберы или поворотные заслонки.

Каркас и обмуровка котла. Металлическая конструкция, опирающаяся на бетонный фундамент и поддерживающая барабан котла и трубную систему с водой, лестницы и помосты, а иногда и обмуровку, представляет собой каркас котельного агрегата. В настоящее время чаще всего применяют опорные (несущие) и обвязочные каркасы. Паровые и водогрейные котлы малой мощности обычно имеют обвязочные каркасы, служащие для укрепления обмуровки, гарнитуры и других деталей. Масса металлической части котлов через специальные стойки или рамы передается непосредственно на фундамент.

Котлы вертикальной ориентации большой мощности обычно имеют несущий каркас, который состоит из вертикальных колонн, горизонтальных балок, горизонтальных ферм, раскосов-связей и упрочненной конструкции из балок 6 потолочного перекрытия. Колонны крупных котлов изготавливаются из сварных профильных балок большого размера. Для уменьшения удельной нагрузки на фундамент под колонны устанавливаются опорные башмаки, состоящие из опорных плит и ребер жесткости. Раскосы-связи фермы выполняют из профильного проката (швеллера, двутавра), связывая их между собой (сваривая) накладками. Горизонтальные фермы, балки и раскосы-связи применяют для придания поперечной устойчивости колоннам и повышения жесткости каркаса.

Для уменьшения термических напряжений в каркасе основные несущие его элементы располагают за пределами газоходов и их обмуровки. Сочленения же оборудованных балок (например, опорных балок поверхностей нагрева конвективной шахты) с балками каркаса выполняются в виде скользящей опоры с одной стороны, при неподвижном креплении — с другой.

Лестницы и площадки, используемые для обслуживания и ремонта котла, часто размещают на горизонтальных фермах или опираются на них. Их выполняют из сортового проката, покрывая проходные площадки просечно-вытяжным или рифленным листом.

Обмуровка котла служит для ограждения топочной камеры и газоходов от окружающей среды и для направления движения потока дымовых газов в пределах котельного агрегата. Она работает при достаточно высоких температурах и резком их изменении и должна обеспечивать минимальные потери теплоты в окружающую среду, быть плотной, механически прочной, простой и доступной для ремонта.

Компоновка котла

Компоновка котла — взаимное расположение его радиационных и конвективных газоходов. Котлы имеют П-, Т-, U-, башенную и многоходовую компоновки. В отечественной энергетике наибольшее распространение получили П - и Т - образные компоновки. Топка в них занимает подъемный (радиационный) газоход. В соединительном (горизонтальном) и опускном (конвективном) газоходах расположены перегреватели, экономайзеры, выносные переходные зоны, трубчатые воздухоподогреватели. Для котлов типа Е возможна компоновка с совмещением стен радиационного и конвективного газоходов. Преимуществом П - и Т-образных компоновок является возможность размещения тяжелого тягодутьевого оборудования на нулевой отметке. В результате каркас котла или здания освобождается от вибрационных нагрузок, возникающих при работе дымососов и вентиляторов. Для очистки поверхностей нагрева,

расположенных в опускном газоходе, от загрязнений может быть применена дробеочистка.

П-образная компоновка, по сравнению с Т-образной, позволяет получить несколько меньшую в плане площадь котельной ячейки, металлоемкость каркаса и расход теплоизоляции на обмуровку, более простую схему трассировки паро- и водопроводов. Благодаря меньшей поверхности стен опускного конвективного газохода облегчается его газоплотное исполнение.

Основным недостатком П-образной компоновки является существенная неравномерность полей концентрации золы и скорости в конвективном газоходе при повороте потока газов. С увеличением высоты соединительного газохода эта неравномерность возрастает.

Т-образная компоновка при такой же, как у П-образной компоновки, средней скорости газов позволяет вдвое уменьшить высоту соединительного газохода и снизить тем самым неравномерность полей скорости и концентрации золы после поворота потока. При этом несколько сокращается высота котла и соответственно здания котельной. Облегчаются условия компоновки поверхностей нагрева перегревателей и экономайзера.

У-образная компоновка позволяет создать условия хорошего заполнения топki факелом. Вследствие низкого расположения перегревателей протяженность паропроводов до турбины минимальна. К недостаткам такой компоновки следует отнести то, что дымососы, вентиляторы крепятся к каркасу котла, топливо необходимо подавать на большую высоту.

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ

Практическое занятие – это один из предусмотренных учебным планом видов учебной работы, где отрабатываются и закрепляются навыки и знания, полученные студентами на лекционных занятиях, а также умение самостоятельно работать с литературой. Поэтому работа над выполнением практического задания должна быть результатом тщательного изучения рекомендованной по данной теме научной и учебной литературы

План проведения практического занятия:

1. Вводная часть включает формулировку темы и цели занятия; повторение теоретических сведений по теме;

2. Основная часть предполагает самостоятельное выполнение заданий студентами. Сопровождается дополнительными разъяснениями по ходу работы (при необходимости), текущим контролем и оценкой результатов работы;

3. Заключительная часть содержит: подведение общих итогов занятия; оценку результатов работы студентов; ответы на вопросы студентов; выдачу рекомендаций по устранению пробелов в системе знаний и умений студентов, по улучшению результатов работы; задание на дом для закрепления пройденного материала и по подготовке к следующему практическому занятию.

Практическое занятие 1. Объемы и энтальпии воздуха и продуктов сгорания

Расчет объемов воздуха и продуктов сгорания.

Теоретическое количество сухого воздуха, необходимого для полного сгорания топлива (коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1$) определяется
 $V_0 = 0,0889 (C_p + 0,375 S_{p+к}) + 0,265 H_p - 0,0333 O_p$, м³/кг

Теоретические объёмы продуктов сгорания, полученные при полном сгорании топлива с теоретически необходимым количеством воздуха ($\alpha = 1$) определяются по следующим формулам:

$$V_{N_2}^o = 0,79 V_0 + 0,8 \frac{N^p}{100}, \text{ м}^3/\text{кг};$$

Объём трёхатомных газов

$$V_{RO_2} = 0,01866 (C_p + 0,375 S_{p+к}^p), \text{ м}^3/\text{кг};$$

Теоретический объём водяных паров

$$V_{H_2O}^o = 0,111 H_p + 0,0124 W_p + 0,0161 V_0, \text{ м}^3/\text{кг}.$$

При наличии парового дутья или парового распыливания мазута при расходе пара G в величину $V_{H_2O}^o$ дополнительно включается член $1,24 G$, где $G = 0,05 \dots 0,1$ кг пара/кг мазута.

При сжигании газообразных топлив. Теоретические объёмы продуктов сгорания, полученные при полном сгорании топлива с теоретически необходимым количеством воздуха ($\alpha = 1$) определяются по следующим формулам:

Теоретический объём азота

$$V_{N_2}^o = 0,79 V_0 + N_2 / 100, \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

Объём трёхатомных газов

$$V_{RO_2} = 0,01 (CO_2 + CO + H_2S + \sum m C_m H_n), \text{ м}^3/\text{м}^3 ;$$

Теоретический объём водяных паров

$$V_{H_2O}^o = 0,01 (H_2S + H_2 + \sum n / 2 C_m H_n + 0,124d) + 0,0161 V, \text{ м}^3/\text{м}^3,$$

где d - влагосодержание газообразного топлива, отнесённое к 1 м³ сухого воздуха, г/м³.

Расчёт объёмов продуктов сгорания для всех видов топлив рекомендуется вести согласно табл. 3, составленной применительно к котлу с четырьмя газоходами (топка, первый и второй котельные пучки, водяной экономайзер). Аналогично составляется данная таблица для котлов с иной структурой газоходов.

Определение энтальпии воздуха и продуктов сгорания.

Энтальпии дымовых газов на 1 кг (1 м³) топлива подсчитываются по формуле

$$H_{\Gamma} = H_{\Gamma}^{\circ} + (\alpha - 1)H_{\text{в}}^{\circ}, \text{ кДж/кг},$$

где H_{Γ}° - энтальпия газов при коэффициенте избытка воздуха $\alpha=1$ и температуре газов ν , 0С; кДж/кг (кДж/м³);

$H_{\text{в}}^{\circ}$ - энтальпия теоретически необходимого воздуха при нормальных условиях, кДж/кг (кДж/м³).

Рассчитанные значения H_{Γ}° и $H_{\text{в}}^{\circ}$ для твердых, жидких и газообразных топлив приведены в табл. 6.

К энтальпии дымовых газов следует добавлять энтальпию золы, подсчитываемую по формуле

$$H_{\text{зл}} = (c \nu)_{\text{зл}} \frac{A^{\text{p}}}{100} \alpha_{\text{ун}}, \text{ кДж/кг},$$

где $(c \nu)_{\text{зл}}$ - энтальпия 1 кг золы, найденная по табл. 7;

$\alpha_{\text{ун}}$ - доля золы топлива, уносимой газами, принимается по табл.6, %.

При приведенной величине уноса золы из топки

$$\frac{10^3 A^{\text{p}} \alpha_{\text{ун}}}{Q_{\text{н}}^{\text{p}} 100} \leq 6$$

значением энтальпии золы можно пренебречь.

При составлении Н- ν таблицы рекомендуется для каждого значения коэффициента избытка воздуха определять величину Н в пределах, немного превышающих реально возможные температуры в газоходах. Около величины Н целесообразно помещать величину ΔH - разность двух соседних по вертикали значений Н при одном значении α .

Для удобства проведения расчетов на миллиметровой бумаге строится Н- ν диаграмма.

Практическое занятие 2. Тепловой баланс котла

На основании теплового баланса вычисляются КПД котла и необходимый расход топлива.

Располагаемое тепло на 1 кг твердого, жидкого или на 1 м³ газообразного топлива Q_p^{p} определяется соответственно по формулам:

$$Q_p^{\text{p}} = Q_{\text{н}}^{\text{p}} + Q_{\text{в.вн}} + h_{\text{мл}} + Q_{\text{ф}} - Q_{\text{к}}, \text{ кДж/кг},$$

$$Q_p^{\text{p}} = Q_{\text{н}}^{\text{c}} + Q_{\text{в.вн}} + h_{\text{мл}}, \text{ кДж/м}^3,$$

где $Q_{\text{н}}^{\text{p}}$ и $Q_{\text{н}}^{\text{c}}$ - низшая теплота сгорания рабочей массы твердого, жидкого и, соответственно, сухой массы газообразного топлив, кДж/кг и кДж/м³;

$Q_{\text{в.вн}}$ - тепло, внесенное поступающим в котельный агрегат воздухом, при подогреве последнего вне агрегата отборным паром, отработанным теплом и т.п. подсчитывается по формуле:

$$Q_{в.вн} = \beta' [(H_{xв}^o)' - H_в^o], \text{ кДж/кг или кДж/м}^3,$$

где β' - отношение количества воздуха на входе в котел (в воздухоподогреватель) к теоретически необходимому; $(H_{xв}^o)'$ и $H_в^o$ - энтальпии теоретически необходимого количества воздуха на входе в котельный агрегат и холодного воздуха, которые определяются по Н-υ таблице, кДж/кг или кДж/м³.

При отсутствии специальных указаний температура воздуха поступающего в котел, принимается равной 30 °С.

Физическое тепло топлива $h_{мл}$ подсчитывается по формуле:

$$h_{мл} = c_{мл} t_{мл}, \text{ кДж/кг или кДж/м}^3,$$

где $c_{мл}$ - теплоемкость рабочего топлива, кДж/(кг °С) или кДж/(м³ °С);

$t_{мл}$ - температура топлива, °С.

Для мазута теплоемкость составляет

$$C_{мл} = 1,74 + 0,0025 t_{мл}, \text{ кДж/(кг °С)},$$

Тепло, вносимое в агрегат паровым дутьем ("форсуночным" паром), Q_ϕ определяется по формуле

$$Q_\phi = G_\phi (h_\phi - 2520), \text{ кДж/кг},$$

где G_ϕ и h_ϕ - расход и энтальпия пара, идущего на распыливание топлива, кг/кг и кДж/кг.

Тепло, затраченное на разложение карбонатов при сжигании сланцев, Q_κ подсчитывается по формуле:

$$Q_\kappa = 40,7 k(CO_2)_\kappa^p, \text{ кДж/кг}.$$

Обычно для котлов низкого давления при сжигании твердого топлива принимают $Q_p^p = Q_n^p$,

кДж/кг; при сжигании мазута $Q_p^p = Q_n^p + h_{мл}$, кДж/кг;

при сжигании газообразного топлива $Q_p^p = Q_n^c$, кДж/м³.

Потеря тепла с уходящими газами определяется

$$q_2 = \frac{(H_{yx} - \alpha_{yx} H_{xв}^o)(100 - q_4)}{Q_p^p}, \%$$

где H_{yx} - энтальпия уходящих газов при соответствующем избытке воздуха α_{yx} и температуре ν_{yx} определяется по Н-υ диаграмме, кДж/кг или кДж/м³;

$H_{xв}^o$ - энтальпия теоретически необходимого количества холодного воздуха, кДж/кг или кДж/м³, определяемая по формуле:

$$H_{xв}^o = c_{xв} t_{xв} V_o,$$

где $c_{xв}$ - теплоемкость воздуха, кДж/кг·°С;

$t_{xв}$ - температура воздуха, °С;

V_o - теоретический объем воздуха, необходимый для полного сгорания 1 кг твердого или жидкого и 1 м³ газообразного топлива при $\alpha=1$, определяемые в разделе 1 данного пособия.

q_4 - потеря от механической неполноты сгорания, %. При сжигании газообразного и жидкого топлив $q_4 = 0$.

Потеря тепла от химической неполноты сгорания q_3 при слоевом и камерном сжигании твердых топлив определяется по табл.5. При сжигании жидких и газообразных топлив в котлах низкого давления q_3 принимается равной 0,5 %.

Потери с физическим теплом шлака $q_{6шл}$ определяется

$$q_{6шл} = \frac{\alpha_{шл}(c\nu)_{шл} A^P}{100 Q_n^P}, \%$$

где $\alpha_{шл} = 1 - \alpha_{ун}$; $\alpha_{ун}$ находится по справочным данным; $(c\nu)_{шл}$ - энтальпия золы, кДж/кг, определяется по справочным данным в зависимости от температуры.

Температура золы (шлака) при твердом шлакоудалении принимается равной 600 °С.

Коэффициент полезного действия котла (брутто) определяется

$$\eta_{к.а.}^{бp} = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_{6шл}), \%$$

Коэффициент сохранения тепла находится по формуле

$$\varphi = 1 - \frac{q_5}{q_5 + \eta_{к.а.}^{бp}}$$

Тепло, полезно отданное в котле, определяется в общем случае из выражения:

$$Q_{к.а.} = D_{не}(h_{не} - h_{нв}) + D_{нп}(h_{нп} - h_{нв}) + D_{np}(h_{кип} - h_{нв}), \text{ кВт},$$

где $D_{не}$ - количество выработанного перегретого пара, кг/с;

$h_{не}$ - энтальпия перегретого пара, кДж/кг, определяемая по $P_{не}$ и $t_{не}$ согласно заданию;

$h_{нв}$ - энтальпия питательной воды, кДж/кг, определяемая по рпв и tпв;

$D_{нп}$ - количество выработанного насыщенного пара, кг/с, отданного помимо пароперегревателя с энтальпией $h_{нп}$;

$h_{нп}$ - энтальпия насыщенного пара, кДж/кг, определяемая по давлению в барабане котла;

D_{np} - расход воды на продувку котла, кг/с, с энтальпией при ее кипении $h_{кип}$, кДж/кг, определяемой по давлению в барабане котла;

Расход топлива, подаваемого в топку, определяется по формуле

$$B = \frac{Q_{к.а.}}{Q_p^P \eta_{к.а.}} 100, \quad (\text{м}^3/\text{с}), (\text{кг}/\text{с}),$$

Для подсчета суммарных объемов продуктов сгорания, воздуха и теплоты, отданной газами в поверхностях нагрева, вводится расчетный расход топлива, вычисляемый с учетом механической неполноты сгорания q_4 по формуле

$$B_p = B \left(1 - \frac{q_4}{100}\right), \quad (\text{м}^3/\text{с}), (\text{кг}/\text{с})$$

При сжигании газообразного и жидкого топлив $q_4 = 0$ и значение $B_p = B$ (м³/с), (кг/с)

Практическое занятие 3. Тепловой расчет топки.

Температура газов на выходе из топки определяется по формуле:

$$g_T'' = \frac{T_a}{M \left(\frac{5,67 \Psi_{cp} F_{cm} a_m T_a^3}{10^{11} \varphi B_p V_{c_{cp}}} \right)^{0,6} + 1} - 273, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Ниже приводятся зависимости и пояснения для определения величин, входящих в формулу. Определение адиабатической температуры горения T_a . Предварительно определяется полезное тепловыделение в топке для котлов низкого давления

$$Q_T = Q_p \frac{100 - q_3 - q_4 - q_6}{100 - q_4} + Q_6, \text{ кДж/кг,}$$

где Q_6 - теплота, вносимая в топку воздухом, кДж/кг, рассчитывается по формуле:

$$Q_6 = \alpha_T H_{x6}^o, \text{ кДж/кг.}$$

По известному значению Q_T по построенной ранее H - ϑ -диаграмме при принятом α_T находят g_a .

В итоге адиабатическая температура горения определится

$$T_a = g_a + 273, \text{ K.}$$

Определение средней суммарной теплоемкости продуктов сгорания 1 кг топлива $V_{c_{cp}}$ производится по формуле

$$V_{c_{cp}}' = \frac{Q_T - H_T''}{g_a - g_T''}, \text{ кДж / (кг}^\circ\text{C)}, \text{ (кДж/кг}\cdot\text{K)},$$

где g_T'' - предварительно принятая температура газов на выходе из топки, $^\circ\text{C}$, с учетом условий возможного шлакования последующих поверхностей нагрева при сжигании твердых топлив (зола должна быть в твердом, а не в расплавленном состоянии); H_T'' - энтальпия продуктов сгорания на выходе из топки, соответствующая g_T'' , кДж/кг, определяемая по H - ϑ диаграмме при принятом α_T .

Определение ограждающей поверхности стен топочной камеры F_{cm}

Определение параметра M .

Параметр M определяется в зависимости от относительного положения максимума температуры пламени по высоте топки.

При сжигании мазута и газа

$$M = 0,54 - 0,2 X_T,$$

где $X_T = X_{\Gamma} = \frac{h_{\Gamma}}{H_T}$ - отношение высоты расположения осей горелок.

h_{Γ} (от пода топки) к общей высоте топки H_T (от пода топки до середины выходного окна из топки).

При слоевом сжигании всех видов топлив

$$M = 0,59 - 0,5 X_T$$

Примечания:

– для слоевых топок при сжигании топлива в тонком слое (топки с пневмомеханическими забрасывателями) принимают $x_T=0$;

– при сжигании топлива в толстом слое на подвижном или неподвижном колосниковом полотне $x_T=0,14$.

Определение среднего коэффициента тепловой эффективности

экранов Ψ_{cp} .

Расчет ведут по формуле

$$\Psi_{cp} = \frac{\sum \Psi_i F_{cm}^i}{F_{cm}},$$

где $\Psi_i = X_i \xi_i$, в котором X_i – угловой коэффициент.

Коэффициент ξ_i , учитывающий снижение тепловосприятия вследствие загрязнения или закрытия изоляцией поверхности, принимается по справочным данным.

Для неэкранированных участков стен топочной камеры (если имеется и камеры догорания) принимается $\Psi = 0$.

Определение степени черноты топки a_T .

Степень черноты экранированных слоевых топок определяется по формуле

$$a_T = \frac{a_\phi (1 - a_\phi)}{1 - (1 - a_\phi)(1 - \Psi_{cp})(1 - \rho)},$$

где ρ – соотношение между площадью зеркала горения и полной поверхностью стен топки

$$\rho = \frac{R}{F_{cm}},$$

где R – площадь зеркала горения слоя топлива, расположенного на колосниковой решетке, m^2
Эффективная степень черноты факела a_ϕ определяется по формуле:

$$a_\phi = 1 - e^{-k p s},$$

где k – коэффициент ослабления лучей топочной средой рассчитывается по формуле:

$$k = k_r r_{п} + k_{зл} \mu_{зл} + k_{ккк} \chi_1 \chi_2, \text{ 1/(м}\cdot\text{МПа)}.$$

Коэффициент ослабления лучей для трехатомных газов определяется по формуле:

$$k_r r_{п} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \sqrt{P_{п} S}} - 0,1 \right) \left(1 - 0,37 \frac{T_{г}''}{1000} \right) r_{п},$$

в которой $T_{г}''$ – температура газов на выходе из топки, К;

$r_{п} = r_{RO_2} + r_{H_2O}$ – суммарная объемная доля трехатомных газов для топок, работающих без наддува.

Коэффициент ослабления лучей золовыми частицами определяется по формуле

$$k_{зл} \mu_{зл} = \frac{4300 \rho_r \mu_{зл}}{\sqrt[3]{T_{г}''^2 d_{зл}^2}},$$

где ρ_r – плотность дымовых газов, принимаемая равной $1,3 \text{ кг/м}^3$;

$\mu_{зл}$ – безразмерная концентрация золы в дымовых газах;

$d_{зл}$ – средний диаметр золовых частиц, принимаемый для слоевых топок равным 20 мкм , для камерных $13 \dots 24 \text{ мкм}$.

Эффективный коэффициент ослабления лучей коксовыми частицами определяется по выражению $k_{ккк} \cdot \chi_1 \chi_2$, где $k_{ккк} = 1$; χ_1 и χ_2 – безразмерные величины, учитывающие

влияние концентрации коксовых частиц в факеле, зависят от рода топлива (χ_1) и способа его сжигания (χ_2). Для низкорреакционных топлив (АШ, ПА, Т) $\chi_1 = 1$; для высокорреакционных (КУ, БУ, торф, сланцы) $\chi_1 = 0,5$.

При камерном сжигании топлив $\chi_2 = 0,1$; при слоевом $\chi_2 = 0,03$.

Эффективная толщина излучающего слоя в топке вычисляется по формуле

$$S = 3,6 \frac{V_T}{F_{CT}},$$

где V_T и F_{CT} - объем и поверхность стен топочной камеры (м³ и м²).

Степень черноты экранированных камерных топков определяется по формуле

$$a_T = \frac{a_\phi}{a_\phi + (1 - a_\phi)\psi_{cp}}$$

При сжигании газообразного или жидкого топлив эффективная степень черноты факела определяется

$$a_\phi = m \cdot a_{cv} + (1 - m)a_r,$$

где a_{cv} и a_r - степень черноты, какой обладал бы факел при заполнении всей топки, соответственно только светящимся пламенем или только несветящимися трехатомными газами; величины a_{cv} и a_r определяются по формулам

$$a_{cv} = 1 - e^{-(k_r r_n + k_c)PS}$$

$$a_r = 1 - e^{-k_r r_n PS}$$

m - коэффициент усреднения, зависящий от теплонапряжения топочного объема.

Коэффициент ослабления лучей сажистыми частицами

$$k_c = 0,03(2 - a_T) \left(1,6 \frac{T_T''}{1000} - 0,5 \right) \frac{C^p}{H^p} \frac{1}{\text{м} \cdot \text{МПа}},$$

где C^p/H^p - углеводородное число, являющееся соотношением содержания углерода и водорода в рабочей массе топлива. Для газообразного топлива

$$\frac{C^p}{H^p} = 0,12 \sum \frac{m}{n} c_m H_n,$$

где m и n - количество атомов углерода и водорода в соединении. При $\alpha_T > 2$ принимается $k_c = 0$.

Если в результате расчетов значение \mathcal{Q}_T'' отличается от принятого на $\pm 5\%$, то расчет повторяют, скорректировав принимаемое значение \mathcal{Q}_T'' .

Практическое занятие 4. Поверочный тепловой расчет конвективных поверхностей нагрева котла.

Основными уравнениями при расчете конвективного теплообмена являются:

уравнение теплопередачи

$$Q_T = kH\Delta t_{cp}, \text{ кВт};$$

уравнение теплового баланса

$$Q_6 = V\varphi(H' - H'' + \Delta\alpha \cdot H_{x6}^o), \text{ кВт}$$

Расчет считается завершенным при выполнении равенства

$$Q_T = Q_6 \text{ или } k \cdot H \cdot \Delta t_{cp} = V\varphi(H' - H'' + \Delta\alpha H_{x6}^o),$$

где H – расчетная поверхность нагрева газохода, м². Для водотрубных котлов $H = n \cdot \pi \cdot d \cdot l$, м.

Здесь n - число труб наружным диаметром d (м) в газоходе; l - длина труб, соответствующая высоте газохода, м; H' и H'' - энтальпия газов до и после газохода, определяемая по H - g - диаграмме при данном α ; $\Delta\alpha$ - величина присоса холодного воздуха в газоход; B и φ - принимается из теплового баланса котла; Δt_{cp} - температурный напор, определяемый как $\Delta t_{cp} = g_{cp} - t_H$, °C,

где $g_{cp} = \frac{g' + g''}{2}$ - средняя температура газов в газоходе (при условии охлаждения газов не более чем на 300 °C); t_H - температура охлаждающей среды. Для парового котла t_H принимается равной температуре кипения воды при давлении в котле, а для водогрейного – равной полусумме температур воды на входе в поверхность нагрева и на выходе из нее, °C.

k - коэффициент теплопередачи от газов к нагреваемой среде, подсчитывается из выражения $k = \psi \alpha_1$,

где α_1 - коэффициент теплопередачи от газов к стенке, Вт/(м²·°C). В этом выражении $\alpha_1 = \xi(\alpha_K + \alpha_L)$; ξ - коэффициент использования, учитывающий уменьшение тепловосприятия поверхности нагрева, вследствие неравномерного омывания ее газами. Для поперечно омываемых пучков $\xi = 1,0$;

ψ - коэффициент тепловой эффективности, определяется по таблицам из справочных материалов.

α_K - коэффициент теплоотдачи конвекций от газов к стенке, зависящий от скорости и температуры потока, диаметра и расположения труб, характера их омывания, Вт/(м²·°C); α_L - коэффициент теплоотдачи излучением, зависящий от температуры газов, толщины излучающего слоя и парциальных давлений трехатомных сухих газов и водяных паров.

Коэффициент теплоотдачи излучением α_L , (Вт/(м²·°C)) определяется:

- для запыленного потока (при сжигании твердого топлива)

$$\alpha_L = \alpha_{L.a}$$

- для незапыленного потока (при сжигании газа и мазута)

$$\alpha_L = \alpha_{L.a} \cdot c_g$$

где $\alpha_{L.a}$ - коэффициент теплоотдачи, определяется по номограмме; a - степень черноты поток; c_g – коэффициент, определяемый по справочным данным.

Для определения $\alpha_{L.a}$ и коэффициента c_g вычисляется температура загрязненной стенки t_3 , °C по выражению

$$t_3 = t_H + \Delta t,$$

где t_H - средняя температура охлаждающей среды .

Δt при сжигании твердых и жидких топлив принимается равным 60 °C, при сжигании газа – 25 °C.

Чтобы воспользоваться номограммами, необходимо предварительно найти:

Среднюю температуру газов по формуле:

$$g_{cp} = \frac{g' + g''}{2}, \text{ °C}$$

2. Объемную долю r_{H_2O} для данного газохода по справочным данным.

3. Число рядов труб вдоль и поперек газового потока, поперечный (S1) и продольный (S2) шаги труб с наружным диаметром d (коридорное расположение); диагональный шаг S2/ (шахматное расположение).

4. Площадь живого сечения газохода F (м²) подсчитывается:

а) для продольного омывания потоком газов труб снаружи

$$F = a \cdot b - \frac{n \cdot \pi \cdot d^2}{4}, \text{ м}^2$$

б) для поперечного омывания потоком трубного пучка

$$F = a \cdot b - n \cdot d \cdot l, \text{ м}^2,$$

где a и b - поперечные размеры газохода в свету, м; n - число труб в газоходе; l - средняя длина труб в газоходе, м.

5. Среднюю скорость газов в газоходе, определяемую по формуле:

$$W_{cp} = \frac{B_p \cdot V_r (273 + \vartheta_{cp})}{273 \cdot F}, \text{ м/с},$$

где V_r - объем дымовых газов в газоходе, м³/кг.

6. Эффективную толщину излучающего слоя для гладкотрубных пучков, определяемую по формулам:

$$\text{при } \frac{S_1 + S_2}{d} \leq 7 \quad S = \left(1,87 \frac{S_1 + S_2}{d} - 4,1 \right) d, \text{ м};$$

$$\text{при } 13 > \frac{S_1 + S_2}{d} > 7 \quad S = \left(2,82 \frac{S_1 + S_2}{d} - 10,6 \right) d, \text{ м}.$$

Практическое занятие 5. Расчет пароперегревателя.

При определении необходимой величины поверхности нагрева пароперегревателя количество тепла, которое необходимо сообщить пароперегревателю, определяют из уравнения

$$Q_{пер} = D(h_2 - h_1), \text{ кВт},$$

где D - расход перегретого пара, кг/с; h_2 и h_1 - конечная и начальная энтальпии пара, кДж/кг.

По найденному значению $Q_{пер}$ в соответствии с уравнением (4.57) находят энтальпию газов после пароперегревателя согласно уравнения теплового баланса, а затем по H - ϑ - диаграмме определяют температуру газов на выходе из пароперегревателя

$$Q_{пер} = B_p \varphi (H'_{пер} - H''_{пер} + \Delta H_B), \text{ кВт},$$

где B_p - расчетный расход топлива, кг/с; φ - коэффициент сохранения теплоты; $H'_{пер}$, $H''_{пер}$ - энтальпии газов на входе и выходе из пароперегревателя, кДж/кг; ΔH_B - энтальпия присасываемого в пароперегреватель воздуха, кДж/кг.

Значение расчетного коэффициента теплопередачи для пароперегревателя определяют по формуле

$$k_{пер} = \frac{\psi \cdot \alpha_1}{1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_2}}, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{оС)},$$

где α_1 и α_2 определяются по тем же выражениям и номограммам, что и для конвективных газоходов котла.

ψ - коэффициент тепловой эффективности, при коридорном расположении труб и сжигании твердых топлив определяется по табличным данным; при сжигании газа ψ принимается равным 0,85; при сжигании мазута с $\alpha > 1,05$ ψ определяется по табличным данным.

Коэффициент теплоотдачи от продуктов сгорания к стенке трубы пароперегревателя определяют по формуле

$$\alpha_1 = \xi (\alpha_k + \alpha_l), \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{оС)},$$

где ξ - коэффициент использования. Принимается $\xi = 1$.

α_2 - коэффициент теплоотдачи от стенки к перегретому пару, определяется

$$\alpha_2 = \alpha_H \cdot C_d$$

Температура стенки труб пароперегревателя, принимаемая при сжигании твердого и жидкого топлива равной температуре наружного слоя золовых отложений на трубах (оС), определяется

$$t_3 = t + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_2} \right) \frac{B_p}{H} Q_6$$

где t - среднеарифметическое значение температуры пара в перегревателе, оС; ε - коэффициент загрязнения, м²·оС/Вт (при сжигании жидких топлив $\varepsilon = 0,00257$; при сжигании твердых топлив $\varepsilon = 0,0043$);

При сжигании газообразного топлива

$$t_3 = t + 25, \text{ оС.}$$

Температурный напор определяют по среднеарифметической разности температур

$$\Delta t_{cp} = \frac{g'_{nep} + g''_{nep}}{2} \cdot \frac{t_{nep} + t_H}{2},$$

где g'_{nep} , g''_{nep} - температура газов до и после пароперегревателя оС;

t_H , t_{nep} - температура насыщенного и перегретого пара, оС.

Далее находят расчетную поверхность нагрева пароперегревателя

$$H_{nep} = \frac{Q_{nep}}{k_{nep} \cdot \Delta t_{cp}}, \text{ м}^2$$

Элементы пароперегревателя, составляющие расчетную поверхность нагрева, должны быть скомпонованы так, чтобы была обеспечена ранее принятая скорость движения пара (не ниже 25 м/с).

Практическое занятие 6. Расчет водяного экономайзера.

Скорость газов в экономайзере принимают в пределах 6...9 м/с, но не менее 3 м/с. Скорость воды в трубах может изменяться в пределах 0,3...1,5 м/с. Водяные экономайзеры рассчитывают следующим образом. Сначала по известным энтальпиям газов на входе в экономайзер ($H'_{вэ}$) и на выходе из него (H_{yx}) определяют тепловосприятие экономайзера по уравнению теплового баланса:

$$Q_{вэ} = \varphi B_p (H'_{вэ} - H_{yx} + \Delta H_{вэ}), \text{ кВт.}$$

Температуру воды на выходе из экономайзера $t''_э$ определяют из выражения

$$t''_э = t'_э + \frac{Q_{вэ}}{c_{вэ} \cdot D_{вэ}}, \text{ кВт,}$$

где $t'_э$ - температура воды на входе в экономайзер;

$c_{вэ}$ - теплоемкость воды, кДж/кг·оС;

$D_{вэ}$ - количество воды, проходящей через экономайзер, кг/с.

$D_{вэ} = D_{нп} + D_{пр}$, где $D_{нп}$ - расход насыщенного пара кг/с; $D_{пр}$ - расход продувочной воды,

кг/с. Для чугунного экономайзера $t''_э$ должна быть не менее чем на двадцать градусов ниже температуры насыщения для избежания кавитации.

Среднюю разность температур с достаточной степенью точности можно определить как среднеарифметическую величину

$$\Delta t_{cp} = \frac{g'_3 + g''_3}{2} - \frac{t'_3 + t''_3}{2}, \text{ оС.}$$

Среднюю скорость газов в экономайзере подсчитывают по выражению

$$W_{cp} = \frac{B_p V_r (g_3^{cp} + 273)}{273 \cdot F_3}, \text{ м/с}$$

При этом живое сечение экономайзера $F_3 = f_3 \cdot m$ выбирают таким образом (набирая различное количество труб в горизонтальном ряду), чтобы W_{cp} была в пределах 6...9 м/с. Здесь m – число труб в горизонтальном ряду.

k_3 - коэффициент теплопередачи.

После этого определяют расчетную поверхность нагрева экономайзера

$$H_{в3} = \frac{Q_{в3} \cdot 10^3}{k_3 \Delta t_{cp}}, \text{ м}^2. \text{ Здесь } k \text{ выражен в Вт/м}^2 \cdot \text{оС}$$

Число горизонтальных рядов определяется как

$$n = H_{в3} / h_3 \cdot m,$$

где h_3 - поверхность нагрева одной трубы, м².

Практическое занятие 7. Конструктивный тепловой расчет трубчатого воздухоподогревателя.

Порядок расчета воздухоподогревателя следующий:

Тепловосприятие воздухоподогревателя определяют из выражения

$$Q_{вн} = \left(\beta_{вн}'' + \frac{\Delta \alpha_{вн}}{2} \right) \left(H_{вн}^{0''} - H_{вн}^{0'} \right), \text{ кДж/кг,}$$

где $\beta_{вн}''$ - отношение количества воздуха за воздухоподогревателем к теоретически необходимому

$$\beta_{вн}'' = \alpha_T'' - \Delta \alpha_T + 0,5 \Delta \alpha_{вн},$$

$\Delta_{вн}$ - присосы воздуха в воздухоподогревателе; $H_{вн}^{0''}$, $H_{вн}^{0'}$ - энтальпия теоретически необходимого количества на выходе и входе в воздухоподогреватель;

Коэффициент теплопередачи в воздухоподогревателе k определяют по формуле

$$k = \xi \frac{\alpha_1 \cdot \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{оС),}$$

где ξ - коэффициент использования воздухоподогревателя (для мазута и дров – $\xi = 0,85$; для остальных топлив - 0,9);

α_1 , α_2 - коэффициент теплоотдачи от газов к стенке и от стенки к воздуху, Вт/м²·оС.

3. Температурный напор Δt определяется как среднеарифметическая разность температур по формуле:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_m}{2,31 \lg \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_m}}, \text{ оС,}$$

где Δt_{δ} - разность температур сред в том конце, где она больше, оС;

Δt_m - разность температур на другом конце поверхности, оС.

4. Определяют необходимую теплообменную поверхность воздухоподогревателя

$$H_{en} = \frac{Q_{en} B_p}{k \cdot \Delta t}, \text{ м2.}$$

Практическое занятие 8. Расчет газоходов водогрейных котлов.

Количество тепла, воспринимаемое водой в каждом отдельном газоходе, определяется по формуле

$$Q = D_{св}(t'' - t') \cdot c, \text{ Вт}$$

где $D_{св}$ - расход сетевой воды через поверхность, кг/с;

t'' , t' - температура воды при выходе и входе в данный газоход (обычно одна из них предварительно определяется, а другая задана), °С;

c - теплоемкость воды, кДж/кг·°С.

Если нет необходимости определять температуру воды по отдельным газоходам в соответствии с уравнением (4.77) можно вести расчет по тем же уравнениям, что и для расчета газоходов паровых котлов. Разница заключается лишь в определении температурного напора, который определяется как:

$$\Delta t_{cp} = \frac{g' - g''}{\ln \frac{g' - t_{cp}}{g'' - t_{cp}}}, \text{ °С,}$$

где t_{cp} - средняя температура воды в котле; g' , g'' - температура газов на входе и выходе из котла, °С.

Практическое занятие 9.

Определение КПД брутто котлоагрегата методом прямого баланса.

Определение к.п.д. брутто по методу прямого баланса основано на измерениях количества подведённого и использованного тепла путём непосредственных замеров расхода топлива, пара и его параметров. КПД брутто по методу прямого баланса вычисляется по формуле:

$$\eta_k^{бp} = q_1 = \frac{Q_1}{Q_p^p} \cdot 100\% = \frac{D_{не} \cdot (h_{не} - h_{нс})}{B \cdot Q_p^p} \cdot 100, \%$$

где Q_1 - полезно использованное тепло, кДж/кг; Q_p^p - располагаемая теплота, поступающая в котлоагрегат на 1 кг или на 1 м³ топлива, кДж/кг; q_1 - полезно использованное тепло, отнесенное к располагаемому теплу топлива и представляющее собой к.п.д. брутто, %; $D_{не}$ - производительность котлоагрегата, кг/с; B - расход топлива в котле, кг/с (м³/с); $h_{не}$, $h_{нс}$ - соответственно энтальпии перегретого пара и питательной воды, кг/с.

Если при работе котлоагрегата на электростанции во время испытаний имеет место непрерывная продувка и отбор насыщенного пара из барабана котла на собственные нужды, то

$$\eta_k^{бp} = q_1 = \frac{D_{не} \cdot (h_{не} - h_{нс}) + D_{np} \cdot (h' - h_{нс}) + D_{сн} \cdot (h'' - h_{нс})}{B \cdot Q_p^p} \cdot 100, \%$$

где D_{np} - расход воды на непрерывную продувку, кг/с; $D_{сн}$ - расход насыщенного пара на собственные нужды, кг/с; h' , h'' - соответственно энтальпии кипящей воды и насыщенного пара при давлении в барабане котла, кДж/кг.

Для водогрейного котла к.п.д. определяется по формуле:

$$\eta_{\text{обр}}^{\text{np}} = \frac{Q_1}{Q_p} \cdot 100\% = \frac{D_6 \cdot (h_{\text{np}} - h_{\text{обр}})}{B \cdot Q_p} \cdot 100, \%$$

где D_6 - расход сетевой воды через котел, кг/с; h_{np} , $h_{\text{обр}}$ - соответственно энтальпии прямой и обратной сетевой воды, кДж/кг.

Состав топлива и величина Q_u^p должна определяться в химической лаборатории, а для известной марки топлива может быть принята по справочным данным.

Физическое тепло топлива может быть найдено по формуле:

$$Q_{\text{тл}} = c_{\text{тл}} \cdot t_{\text{тл}},$$

где $t_{\text{тл}}$ - температура рабочего топлива, оС; $c_{\text{тл}}$ - теплоёмкость топлива, кДж/(кг оС).

Физическое тепло топлива учитывается в тех случаях, когда оно предварительно нагрето посторонним источником тепла (паровой нагрев мазута и т.д.)

Тепло, затраченное на нагрев воздуха, поступающего в котлоагрегат, кДж/кг или кДж/м³.

$$Q_{\text{в.вн}} = \beta' \cdot \left[(H_{\text{в}}^{\circ})'' \cdot (H_{\text{в}}^{\circ})' \right],$$

где β' - отношение количества воздуха на входе в воздухоподогреватель к теоретически необходимому расходу воздуха; $(H_{\text{в}}^{\circ})''$ и $(H_{\text{в}}^{\circ})'$ - энтальпия теоретически необходимого количества воздуха на выходе из калорифера и на входе в него (холодного воздуха), кДж/кг или кДж/м³.

Тепло, вносимое в котёл паровым дутьём, определяется по формуле:

$$Q_{\text{ф}} = G_{\text{ф}}(h_{\text{ф}} - 2510),$$

где $G_{\text{ф}}$ - выход пара, идущего на дутьё или распыливание топлива, кг/кг; $h_{\text{ф}}$ - энтальпия этого пара кДж/кг.

Для определения энтальпии пара и питательной воды по таблицам перегретого пара и воды необходимо знать их давление и температуру.

Давление пара и питательной воды, замеряется по приборам на щите управления котла. Температура перегретого пара и питательной воды замеряется термомпарами, установленными на паропроводе и входном коллекторе водяного экономайзера. Вторичные показывающие или самопишущие приборы расположены на тепловом щите.

Практическое занятие 10. Определение к.п.д. нетто котлоагрегата.

Для определения к.п.д. нетто котлоагрегата необходимо подсчитать расход электроэнергии (привод дымососов, дутьевых и мельничных вентиляторов, мельниц, вентиляторов рециркуляции дымовых газов, питателей пыли и сырого угля) и тепла (на обдувку, распыливание мазута, с продувочной водой и на собственные нужды).

Мощность, потребляемая электродвигателем, подсчитывается по замерам силы тока и напряжения, с учётом косинуса φ

$$N_{\text{сн}}^{\text{эл}} = \sqrt{3} \cdot I \cdot V \cdot \cos\varphi \cdot 10^{-3}$$

где I - сила тока, а; V - напряжение, в; $\cos\varphi$ - принимают равным 0,85. Суммарная мощность $N_{\text{сн}}^{\text{общ}}$, расходуемая электродвигателями всех вспомогательных агрегатов на собственные нужды равна:

$$N_{\text{сн}}^{\text{общ}} = N_{\text{д}} + N_{\text{дв}} + N_{\text{врдг}}, \text{ кВт}$$

где N - мощность, затрачиваемая на привод соответственно дымососов, дутьевых вентиляторов и вентиляторов рециркуляции дымовых газов соответственно.

Расход тепла на собственные нужды самого котла могут быть незначительными, тогда общий расход энергии на собственные нужды в % от располагаемого тепла топлива будет составлять:

$$\Delta \eta_{сн} = \frac{N_{сн}^{общ}}{B \cdot Q_p^p} \cdot 100, \%$$

Таким образом, КПД нетто котла равен:

$$\eta_{нетто} = \eta_{бр} - \Delta \eta_{сн}, \%$$

Практическое занятие 11. Определение КПД брутто котла методом обратного баланса.

Определение КПД брутто методом обратного баланса производится косвенным путем и основывается на измерении тепловых потерь парового или водогрейного котла. При этом составление теплового баланса котла заключается в установлении равенства между располагаемым теплом топлива Q_p^p и полезно использованным теплом Q_1 плюс сумма тепловых потерь.

Уравнение теплового баланса, отнесенное к единице количества топлива, имеет вид

$$Q_p^p = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6,$$

если располагаемое тепло принято за 100%, то

$$q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 = 100\%$$

Отсюда к.п.д. котла по методу обратного баланса находится как разность

$$q_1 = \eta_{бр}^{обр} = 100 - q_2 - q_3 - q_4 - q_5 - q_6, \%$$

где q_1 – полезно использованное тепло, отнесенное к располагаемому теплу и представляющее собой к.п.д. брутто, %; q_2 – потери тепла с уходящими газами, %; q_3 – потери тепла с химической неполнотой сгорания топлива, %; q_4 – потери тепла с механическим недожогом, %; q_5 – потери тепла в окружающую среду с ограждающей поверхности котла, %; q_6 – потери тепла с физическим теплом шлаков, %.

При одинаковой точности замеров, метод обратного баланса обеспечит большую точность в определении к.п.д. по сравнению с методом прямого баланса. По этому метод обратного баланса используется как основной при балансовых испытаниях как паровых, так и водогрейных котлов.

При этом требуются следующие дополнительные измерения: температуры уходящих газов ($t_{ух}$, °C); газового анализа уходящих газов ($RO_2 = CO_2 + SO_2$; O_2 , %).

Так как эти величины были определены ранее и занесены в таблицу, то можно продолжать обработку результатов испытания для определения к.п.д. котла методом обратного баланса.

Практическое занятие 12. Определение коэффициента избытка воздуха по газовому анализу продуктов сгорания.

Коэффициент избытка воздуха α - есть отношение действительного количества воздуха V_d поданного в топочную камеру котла к теоретически необходимому для горения V_0

$$\alpha = \frac{V_d}{V_0}$$

Величина α зависит от состава и вида топлива, топочного режима, степени совершенства смешения топлива с воздухом и т.п. Если известен химический состав газов, получаемых при сгорании топлива, коэффициент избытка воздуха может быть определён по "азотной" формуле, которая для случая полного горения топлива записывается следующим образом:

$$\alpha = \frac{N_2}{N_2 - 3,76O_2}$$

где N_2 – содержание азота в сухих продуктах горения, %.

При наличии химической неполноты горения формула приобретает следующий вид:

$$\alpha = \frac{N_2}{N_2 - 3,76 [O_2 - 0,5(CO + H_2) - 2CH_4 - 3C_nH_m]}$$

Если замерено содержание кислорода O_2 в дымовых газах по кислородомеру, то величина α может быть определена приближённо по "кислородной" формуле:

$$\alpha \approx \frac{21}{21 - O_2}$$

Количество азота в продуктах сгорания может быть подсчитано по формуле:

$$N_2 = 100 - (RO_2 + O_2 + CO + H_2 + CH_4 + 2C_nH_m), \%$$

В таком виде "азотная" формула справедлива для топлив, в которых содержится азота меньше 3%.

Практическое занятие 13. Определение тепловых потерь котла.

1) Потери тепла с уходящими газами определяются разницей энтальпий газов на выходе из последней поверхности нагрева котла ($N_{ух}$) и холодного воздуха, поступающего в котёл ($N_{хво}$).

Величины энтальпий $N_{ух}$ и $N_{хво}$ могут быть определены в соответствии с рекомендациями нормативного расчета котельных агрегатов.

2) Потери тепла от химической неполноты сгорания определяются суммарной теплотой сгорания продуктов неполного горения, остающихся в уходящих газах.

При наличии в продуктах сгорания H , CO , CH_4 , C_nH_m потери тепла с химической неполнотой сгорания находят по формуле:

$$Q_3 = V_{сг} (108H_2 + 126CO + 358CH_4 + 590C_nH_m), \text{кДж/кг}$$

где $V_{сг}$ - объем сухих газов, м³/кг (м³/м³)

Эта потеря может быть выражена в % от располагаемого тепла.

Величина $V_{сг}$ может быть рассчитана по формуле:

Для жидкого топлива:

$$V_{сг} = \frac{C^p + 0,375S_{op+k}^p}{0,54 \cdot (CO_2 + CO + SO_2)}, \text{м}^3/\text{кг}$$

Процентное содержание H_2 , CO , CH_4 определяется на хроматографе.

3) Потери тепла в окружающую среду за счет естественной конвекции и излучения наружными поверхностями агрегата изменяются в зависимости от тепловой нагрузки котла.

Экспериментальное определение потерь тепла от наружного охлаждения представляет значительные трудности. При нагрузках, отличающихся от номинальной более чем на 25 %, величина q_5 уточняется по формуле:

$$q_5 = q_5^{ном} \cdot \frac{D_{ном}}{D}, \%$$

При испытании котлов на твердом топливе необходимо производить дополнительные замеры для определения потерь теплоты от механического недожога q_4 и физического тепла шлаков q_6 .

Балансовые испытания на различных нагрузках проводятся после выхода котлоагрегата из ремонта для выявления оптимальных эксплуатационных характеристик. Кроме того, по данным таких испытаний можно судить о качестве ремонта. Результаты измерений этих испытаний заносятся в специальную режимную карту.

3. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ К КУРСОВОМУ ПРОЕКТИРОВАНИЮ

При выполнении курсового проекта на тему «Тепловой расчет парового котла» ставятся следующие цели:

1. Закрепление и углубление знаний, полученных при изучении теоретического курса.
2. Привитие навыков пользования справочной литературой, таблицами, h-s - диаграммой, расчетными номограммами и чертежами.
3. Приобретение навыков практического применения теоретических знаний при выполнении конкретной инженерной задачи.

В задании на курсовой проект указывается название населенного пункта, численность населения и основные потребители тепловой энергии. Далее, по известным данным, необходимо определить климатическую характеристику района проектирования и выполнить все необходимые расчеты.

Курсовой проект должен состоять из двух частей:

1. Расчетно-пояснительной записки, включающей в себя описание района проектирования, характеристику объектов теплоснабжения, тепловой расчет нагрузок на отопление, горячее водоснабжение, вентиляцию и кондиционирование (при необходимости), предварительный гидравлический расчет, уточненный гидравлический расчет, расчет тепловых потерь, выбор оборудования котельной. Расчетно-пояснительная записка оформляется в машинописном варианте в соответствии с требованиями, предъявляемыми образовательной организацией.

2. Графической части, включающей построение системы теплоснабжения (формат А1)

Структура курсового проекта:

1. Титульный лист.
2. Содержание.
3. Введение.
4. Основная часть (разделы, подразделы, пункты).
5. Заключение.
6. Библиографический список.

Курсовой проект следует выполнять используя лекционный материал, расчетные задания, выполняемые в ходе практических занятий, а так же рекомендуемую в рабочей программе дисциплины литературу.

Пример расчета парового котла Е-75-3,9-440.

1. Топочная камера

Объем топки $V_T = 454 \text{ м}^3$.

Радиационная поверхность стен топки:

$H_{\text{д}} = 296 \text{ м}^2$ – для бурых углей;

$H_{\text{д}} = 326 \text{ м}^2$ – для каменных углей.

Расчетное теплонапряжение топочного объема: $q_v = 112 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^3}$

2. Фестон (четырёхрядный)

Диаметр труб $d = 60 \times 5 \text{ мм}$.

Шагитруб $S_1 / S_2 = 300 / 250 \text{ мм}$.

Средняя длина труб $l_{\text{ср}} = 5125 \text{ мм}$.

Радиационная поверхность нагрева $H_{\text{д}} = H_{\text{полн}} \cdot \chi_{\text{ф}} = 88,8 \cdot 0,72 = 64 \text{ м}^2$.

Количество труб в ряду поперек хода газов $Z_1 = 23$.

Всего труб: $23 \times 4 = 92$.

Полная поверхность нагрева $H_{\text{полн}} = \pi d l n = 3,14 \cdot 0,06 \cdot 5,125 \cdot 92 = 88,8 \text{ м}^2$.

Живое сечение для прохода газа $F_T = 5,125 \cdot 6,6 - 0,06 \cdot 23 \cdot 5,125 = 26,75 \text{ м}^2$.

3. Пароперегреватель

3.1. Пароперегреватель I ступени

Диаметр труб $d = 38 \times 3$ мм.

Шаги труб $S_1/S_2 = 180/100$ мм (фестонированная часть).

$S_1/S_2 = 90/100$ мм (коридорное расположение).

Расположение труб - смешанное.

Глубина пакета $\hat{a} = 1000$ мм.

Количество труб в ряду поперек хода газов:

$$Z_{1 \text{ фест.}} = 36; Z_{1 \text{ кор.}} = 72$$

$$\text{Общее количество труб: } n_1 = n_{\text{фест.}} + n_{\text{кор.}} = 36 \cdot 4 + 72 \cdot 6 = 144 + 432 = 576.$$

$$\text{Поверхность нагрева расчетная } H_p = H_{\text{фест.}} + H_{\text{кор.}}$$

Живое сечение для прохода газа (усредняется по поверхностям).

Поверхность фестонированной части, м^2

$$H_{\text{фест.}} = \pi d l n_{\text{фест.}} = 3,14 \cdot 0,038 \cdot 3,2 \cdot 144 = 55$$

Поверхность с коридорным расположением, м^2

$$H_{\text{кор.}} = \pi d l n_{\text{кор.}} = 3,14 \cdot 0,038 \cdot 3,2 \cdot 432 = 165$$

Суммарная поверхность нагрева КПП, м^2

$$H_p = 55 + 165 = 220$$

Живое сечение фестонированной части, м^2

$$F_{\Gamma, \text{ фест.}} = 3,2 \cdot 6,6 - 36 \cdot 0,038 \cdot 3,2 = 16,74$$

Живое сечение коридорной части, м^2

$$F_{\Gamma, \text{ кор.}} = 3,2 \cdot 6,6 - 72 \cdot 0,038 \cdot 3,2 = 12,36$$

Усредненное живое сечение для прохода газов, м^2

$$F_{\Gamma \text{ ср}} = \frac{H_{\text{фест.}} + H_{\text{кор.}}}{\frac{H_{\text{фест.}}}{F_{\text{фест.}}} + \frac{H_{\text{кор.}}}{F_{\text{кор.}}}} = \frac{220}{\frac{55}{16,74} + \frac{165}{12,36}} = 13,2$$

Живое сечение для прохода пара, м^2

$$f_{\Pi} = \frac{\pi \cdot d_{\text{вн}}^2}{4} \cdot Z_1 = \frac{3,14 \cdot 0,032^2}{4} \cdot 72 = 0,0578$$

3.2. Пароперегреватель II ступени

Диаметр труб $d = 38 \times 3$ мм - крайние пакеты.

Диаметр труб $d = 42 \times 3,5$ мм - средний пакет.

Шаги труб $S_1/S_2 = 90/156$ мм, $Z_1 = 72$ трубы поперек хода газов;

по 24 змеевика по краям и 24 – в середине.

Змеевики сдвоенные, четырехрядные, $n_2 = 72 \cdot 2 \cdot 4 = 576$ (по 192 трубы - в крайних пакетах и 192 трубы в середине потока).

Поверхность нагрева крайних пакетов (по среднему диаметру), м^2

$$H_{\text{II}}^{\text{кр}} = \pi d l n = 3,14 \cdot 0,035 \cdot 3,0 \cdot 192 \cdot 2 = 126,6$$

Поверхность нагрева среднего пакета, м^2

$$H_{\text{II}}^{\text{ср. пак}} = \pi d l n = 3,14 \cdot 0,0385 \cdot 3,0 \cdot 192 = 69,6$$

Суммарная поверхность нагрева пароперегревателя II ступени, м^2

$$\sum H_{\text{pII}} = 126,6 + 69,6 = 196,2$$

Живое сечение для прохода пара, м^2

$$f_{\Pi}^{\text{кр.п}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{вн}}^2}{4} \cdot n = \frac{3,14 \cdot 0,035^2}{4} \cdot 96 = 0,0923$$

$$f_{\text{п}}^{\text{ср.п}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{вн}}^2}{4} \cdot n = \frac{3,14 \cdot 0,0385^2}{4} \cdot 48 = 0,056$$

Среднее живое сечение для прохода пара, м²

$$f_{\text{п}}^{\text{ср}} = \frac{196,2}{126,6 + \frac{69,6}{0,0923 + \frac{69,6}{0,056}}} = 0,075$$

Живое сечение для прохода газа, м²

$$F_{\text{г}}^{\text{кр}} = 3,0 \cdot 6,6 - 72 \cdot 0,0385 \cdot 3,0 = 11,6$$

$$F_{\text{г}}^{\text{середина}} = 3,0 \cdot 6,6 - 72 \cdot 0,042 \cdot 3,0 = 10,73$$

$$F_{\text{г}}^{\text{ср}} = \frac{\frac{N_{\text{кр.}} + N_{\text{середина}}}{\frac{N_{\text{кр.}}}{F_{\text{кр.}}} + \frac{N_{\text{середина}}}{F_{\text{середина}}}}}{\frac{196,2}{\frac{126,6}{11,6} + \frac{69,6}{10,73}}} = 11,27$$

4. Водяной экономайзер второй ступени.

Диаметр труб $d = 32 \times 3$ мм; $d_{\text{ср.}} = 0,029$ мм

Шаги $S_1 / S_2 = 100 / 114$ мм;

$$S_{\text{эф.}} = 0,9 \cdot d_{\text{ср.}} \cdot \left(\frac{S_1 \cdot S_2}{d_{\text{ср.}}^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,029 \cdot \left(\frac{0,1 \cdot 0,114}{0,029^2} - 1 \right) = 0,327$$

Количество змеевиков (шт.) $Z_1 = 20$

Количество труб в змеевике $Z_2 = 13$ – в одном ряду

Змеевики двухзаходные, однопоточные по газу и воде.

Общее количество труб (шт.): $n = Z_1 \cdot Z_2 \cdot \text{заходность} \cdot \text{поточность} = 20 \cdot 13 \cdot 2 \cdot 1 = 520$

Поверхность нагрева, м², $N_{\text{п}} = \pi d_{\text{вн.}} \ln = 3,14 \cdot 0,029 \cdot 6,45 \cdot 520 = 305,4$

Живое сечение для прохода воды, м²

$$f_{\text{а}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{вн.}}^2}{4} \cdot n = \frac{3,14 \cdot 0,026^2}{4} \cdot 40 = 0,0212$$

Живое сечение для прохода газа, м²

$$F_{\text{г}} = a \cdot b - z_1 \cdot d_{\text{н}} \cdot l = 2,0 \cdot 6,6 - 120 \cdot 0,032 \cdot 6,45 = 9,1$$

5. Воздухоподогреватель второй ступени

Высота пакета $l_{\text{м}} = 2500$ мм.

Диаметр труб $d = 40 \times 1,5$ мм.

Шагитруб $S_1 / S_2 = 60 / 42$ мм.

Количество труб $n = (27 \cdot 24 + 26 \cdot 23) \cdot 4 = 4984$.

Поверхность нагрева, м²

$$N_{\text{п}} = \pi d \ln = 3,14 \cdot 0,0385 \cdot 2,50 \cdot 4984 = 1506$$

Живое сечение для прохода газов, м²

$$F_{\text{г}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{вн.}}^2}{4} \cdot n = \frac{3,14 \cdot 0,037^2}{4} \cdot 4984 = 5,36$$

Живое сечение для прохода воздуха, м²,

$$f_{\text{в}} = a \cdot b - Z_1 \cdot d_{\text{н}} \cdot l;$$

$$f_{\text{в}} = 6,6 \cdot 2,50 - 27 \cdot 0,04 \cdot 4 \cdot 2,50 = 5,7$$

6. Водяной экономайзер первой ступени

Диаметр труб $d = 32 \times 3$ мм.

Шагитруб $S_1/S_2 = 80/112$ мм.

$$S_{эф.} = 0,9 \cdot d_{cp.} \cdot \left(\frac{S_1 \cdot S_2}{d_{cp.}^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,029 \cdot \left(\frac{0,08 \cdot 0,12}{0,029^2} - 1 \right) = 0,25$$

Количество змеевиков $Z_1 = 20$

Количество труб $n = (21 \cdot 13) \cdot 2 \cdot 1 = 546$ труб $\times 2 = 1092$

Змеевики двухзаходные, однопоточные по газу и воде.

Поверхность нагрева, m^2

$$N_p = \pi \cdot d \cdot l \cdot n = 3,14 \cdot 0,032 \cdot 6,45 \cdot 546 = 640 \text{ (353,8 мой подсчет), } m^2$$

Живое сечение для прохода воды, m^2

$$f_a = \frac{\pi \cdot d_{ai}^2}{4} \cdot n = \frac{3,14 \cdot 0,02^2}{4} \cdot 2 = 0,0111$$

Живое сечение для прохода газов, m^2

$$F_r = 6,6 \cdot 1,7 - 0,032 \cdot 21 \cdot 6,54 = 6,87$$

7. Воздухоподогреватель первой ступени

Диаметр труб $d = 40 \times 1,5$ мм.

Шагитруб $S_1/S_2 = 70/45$ мм.

$$Z_1^{HK} = 23; Z_1^{BK} = 23,5; Z_2^{HK} = 39$$

Количество труб $n_k = (23 \cdot 20 + 22 \cdot 19) \cdot 4 = 3512$;

$$n_{BK} = (23,5 \cdot 20 + 22,5 \cdot 19) \cdot 4 = 3950.$$

Поверхность нагрева нижнего куба, m^2

$$N_{HK} = \pi d_{cp} l_n = 3,14 \cdot 0,0385 \cdot 1,5 \cdot 3312 = 637$$

Поверхность нагрева верхних кубов, m^2

$$N_{HK} = \pi d_{cp} l_n = 3,14 \cdot 0,0385 \cdot 4,3 \cdot 33,90 = 1866$$

Суммарная поверхность нагрева, m^2

$$N_p = 637 + 1866 = 2503$$

Живое сечение для прохода воздуха, m^2

$$f_B^{HK} = (6,6 \cdot 1,5 - 92 \cdot 0,04) \cdot 1,5 = 4,38,$$

$$f_B^{BK} = (6,6 \cdot 2,15 - 94 \cdot 0,04) \cdot 2,15 = 6,1$$

Усредненное живое сечение для прохода воздуха, m^2

$$f_n^{cp} = \frac{2503}{\frac{637}{4,38} + \frac{1866}{6,1}} = 5,45$$

Живое сечение для прохода газов, m^2

$$F_r^{HK} = \frac{\pi \cdot d_{BH}^2}{4} \cdot n_{HK} = \frac{3,14 \cdot 0,037^2}{4} \cdot 3312 = 3,78$$

$$F_r^{BK} = \frac{\pi \cdot d_{BH}^2}{4} \cdot n_{BK} = \frac{3,14 \cdot 0,037^2}{4} \cdot 3590 = 3,86$$

Усредненное живое сечение для прохода газов, m^2

$$f_g = (1,16 \cdot 2,25 - 23 \cdot 0,04 \cdot 2,25) \cdot 4 = 5,76$$

$$F_{r\text{cp}} = \frac{\frac{H_{\text{HK}} + H_{\text{BK}}}{F_{\text{HK}} + F_{\text{BK}}}}{\frac{H_{\text{HK}}}{F_{\text{HK}}} + \frac{H_{\text{BK}}}{F_{\text{BK}}}} = \frac{2503}{\frac{637}{3,78} + \frac{1866}{3,86}} = 3,84$$

8. Исходные данные для расчета

8.1. Топливо

В качестве расчетного принят уголь Азейского месторождения, марка ЗБР.

Расчетные характеристики топлива и золы, %:

$C^r = 42,7$	$A^k = 16,5$	$t_1 = 1200 \text{ } ^\circ\text{C}$	$\text{SiO}_2 = 52,6$
$H^r = 3,1$	$W^k = 25,0$	$t_1 = 1340 \text{ } ^\circ\text{C}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 = 28,7$
$S^p = 0,5$	$V^{\text{daf}} = 45$	$t_1 = 1420 \text{ } ^\circ\text{C}$	$\text{TiO}_2 = 0,4$
$O^r = 11,3$	$Q_i^r = 15,99 \text{ МДж/кг}$	$t_{\text{ж}} = 1550 \text{ } ^\circ\text{C}$	$\text{Fe}_2\text{O}_3 = 7,3$
$N^r = 0,9$	$K_{\text{ло}} = 1,1$	$t_{\text{шл}} = 1000 \text{ } ^\circ\text{C}$	$\text{CaO} = 8,0$
$A_{\text{пр}}^r = 4,31$			$\text{MgO} = 2,2$
			$\text{K}_2\text{O} = 0,6$
			$\text{Na}_2\text{O} = 0,2$

8.2. Теоретические объемы воздуха и продуктов сгорания ($\text{м}^3/\text{кг}$):

$$V_0^H = 4,26; \quad V_{0, \text{H}_2\text{O}}^H = 0,72; \quad V_{0, \text{N}_2}^H = 3,37; \quad V_{\text{RO}_2}^H = 0,8; \quad V_{\text{O}_2, \text{ср.}}^H = 4,89$$

8.3. Расчетные характеристики топки котла Е-75-3,9-440

$$\alpha_T = 1,2; \quad q_3 = 0 \text{ } \%; \quad q_4 = 1,2 \text{ } \%; \quad a_{\text{ун}} = 0,95; \quad q_v = 180 \text{ кВт/м}^3$$

$$A_{\text{пр}}^r \cdot a_{\text{ун}} = 4,31 \cdot 0,95 = 4,095 > 1,4 \frac{\% \cdot \text{кг}}{\text{МДж}}, \text{ поэтому } J_{\text{зл}} \text{ в расчетах необходимо}$$

учитывать.

Далее следует произвести расчет всех показателей согласно таблицам 2 – 14 и после выполнить проверку расчета.

Проверка расчета:

$$Q_p^p \eta_{\text{ка}}^{\text{УТ}} = (Q_{\text{л}}^r + Q_{\text{б}}^{\text{ф}} + Q_{\text{б}}^{\text{пп1}} + Q_{\text{б}}^{\text{пп2}} + Q_{\text{б}}^{\text{вэ2}} + Q_{\text{б}}^{\text{вэ1}})(1 - q_4/100)$$

Ошибка должна быть меньше допустимого расхождения $\Delta_{\text{max}} = \pm 0,05 \text{ } \%$.

Примерный перечень вопросов для защиты курсового проекта:

1. Виды топлива и его состав.
2. Технические характеристики твердых топлив, мазута и природных газов.
3. Способы сжигания твердого топлива.
4. Системы пылеприготовления.
5. Характеристики угольной пыли.
6. Оборудование систем пылеприготовления.
7. Подготовка к сжиганию мазута и природного газа.
8. Состав продуктов сгорания.
9. Классификация топок для сжигания топлив.
10. Сжигание твердого топлива в слое.
11. Особенности сжигания твердого топлива в пылевидном состоянии.

12. Организация сжигания природного газа.
13. Теплообмен в топке.
14. Теплообмен в конвективных поверхностях нагрева.
15. Системы подготовки топлива: центральные и индивидуальные; с прямым вдуванием и с промбункером для различных типов мельниц.
16. Сушка топлива горячим воздухом.
17. Схемы пылеприготовления замкнутые и разомкнутые.
18. Газовая сушка топлива.
19. Достоинства и недостатки, перспективы использования.
20. Особенности схем пылеприготовления для взрывоопасных углей.
21. Элементы систем пылеприготовления.
22. Типы котлов.
23. Каркас котла.
24. Назначение обмуровки и требования к ней.
25. Конструкция обмуровки.
26. Условия работы металла.
27. Металл элементов котла.
28. Абразивный износ.
29. Высокотемпературная и низкотемпературная коррозия наружных поверхностей нагрева.
30. Коррозия металла внутренних поверхностей нагрева.
31. Загрязнение и очистка поверхностей нагрева.
32. Пароводяной и газоздушный тракты барабанного парогенератора, конструктивное оформление, достоинства и недостатки.
33. Пароводяной и газоздушный тракты прямоточного парогенератора, конструктивное оформление, достоинства и недостатки.
34. Котлы с многократной принудительной циркуляцией достоинства и недостатки их, конструктивное оформление.
35. Температуры греющей и нагреваемой среды по газоходам котла, назначение отдельных элементов котла, их конструкция, крепление, расчет (экраны и др. поверхности нагрева).
36. Компоновка котлов; влияние состава минеральной части топлива на выбор компоновки.
37. Материальный баланс процесса горения в котле. Определение теоретических объемов воздуха и продуктов сгорания.
38. Энтальпия воздуха, золы и газов.
39. Классификация топочных устройств.
40. Типы и классификация слоевых топок, принципиальные схемы, достоинства и недостатки.
41. Типы и классификация камерных топок, принципиальные схемы, достоинства и недостатки.
42. Типы компоновок котлов: П и Т-образные компоновки, достоинства и недостатки.
43. Г-образная, башенная и другие компоновки котлов (N-образная, сомкнутая, многоходовая) их достоинства и недостатки.
44. Топки с жидким шлакоудалением, достоинства и недостатки.
45. Шлакование топок и методы его предотвращения. Мероприятия по организации бесшлаковочного режима.
46. Механизм образования шлаковых отложений (первичных и вторичных). Мероприятия по снижению температуры в зоне горения.
47. КПД котла нетто и брутто. Определение полного и расчетного расхода топлива.
48. Анализ потерь тепла в котле. Мероприятия по их снижению.

49. Особенности теплообмена в топке. Понятие теоретической температуры горения топлива в топке; лучистой поверхности нагрева; максимальной температуры газов и температуры на выходе из топки.
50. Задачи, методы и последовательность конструктивного и поверочного расчетов. Проверка расчета котла.

4. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

Студент в процессе обучения должен не только освоить учебную программу, но и приобрести навыки самостоятельной работы. Студенту предоставляется возможность работать во время учебы более самостоятельно, чем учащимся в средней школе. Студент должен уметь планировать и выполнять свою работу.

Целью самостоятельной работы студентов является овладение фундаментальными знаниями, профессиональными умениями и навыками деятельности по профилю, опытом творческой, исследовательской деятельности.

Самостоятельная работа студентов способствует развитию самостоятельности, ответственности и организованности, творческого подхода к решению проблем учебного и профессионального уровня.

Этапы самостоятельной работы:

- осознание учебной задачи, которая решается с помощью данной самостоятельной работы;

- ознакомление с инструкцией о её выполнении;

- осуществление процесса выполнения работы;

- самоанализ, самоконтроль;

- проверка работ студента, выделение и разбор типичных преимуществ и ошибок.

Самостоятельная работа студентов является обязательным компонентом учебного процесса для каждого студента и определяется учебным планом.

Методические рекомендации по изучению теоретических основ

Изучение теоретической части дисциплины призвано не только углубить и закрепить знания, полученные на аудиторных занятиях, но и способствовать развитию у студентов творческих навыков, инициативы и организовать свое время.

Самостоятельная работа при изучении дисциплины включает:

- чтение студентами рекомендованной литературы и усвоение теоретического материала дисциплины;

- знакомство с Интернет-источниками;

- подготовку к различным формам контроля (тесты, коллоквиумы);

- выполнение домашних заданий.

Планирование времени, необходимого на изучение дисциплин, студентам лучше всего осуществлять весь семестр, предусматривая при этом регулярное повторение материала.

Материал, законспектированный на лекциях, необходимо регулярно прорабатывать и дополнять сведениями из других источников литературы, представленных не только в программе дисциплины, но и в периодических изданиях.

При изучении дисциплины сначала необходимо по каждой теме прочитать рекомендованную литературу и составить краткий конспект основных положений, терминов, сведений, требующих запоминания и являющихся основополагающими в этой теме для освоения последующих тем курса. Для расширения знания по дисциплине рекомендуется использовать Интернет-ресурсы; проводить поиски в различных системах и использовать материалы сайтов, рекомендованных преподавателем.

Методические указания к курсовому проектированию

В ходе выполнения курсового проекта осваивается методика научного исследования, изучается передовой опыт, углубляются и систематизируются полученные теоретические знания. Велика роль курсового проекта в формировании умений подбора и анализа источников литературы, использования теоретических знаний в решении практических задач, самостоятельности в суждениях.

Студенты в ходе выполнения курсового проекта учатся проектировать процессы, овладевают методикой расчетов, учатся пользоваться нормативной и справочной

литературой, технологической и конструкторской документацией, чертить чертежи, схемы и т.д. Студенты должны быть поставлены перед необходимостью анализировать, сравнивать, оценивать данные и варианты своих решений поставленных задач, систематизировать имеющийся материал, делать обобщения, выводы.

Курсовые проекты отличаются большой трудоемкостью и индивидуальным своеобразием и преподаватель организует поэтапную работу студентов над ними, разрабатывая четкие задания на каждый этап.

Организация курсового проектирования предусматривает:

- выдачу тем курсовых проектов;
- изложение требований к содержанию курсового проекта;
- сообщение исходных данных для проекта;
- рекомендации по выбору учебной, научной и справочной литературы;
- установление объемов курсового проекта;
- порядок оформления пояснительной записи.

Завершается курсовое проектирование защитой курсовых проектов. В ходе защиты студенты демонстрируют увлеченность, профессиональную заинтересованность в изучаемых проблемах. Многие студенты грамотно, аргументировано, творчески представляют свои работы, выражая желание и уверенность в необходимости продолжения исследования в процессе дальнейшего обучения.

Методические рекомендации по подготовке и сдаче экзамена.

Экзамен - это завершающий этап подготовки студента, механизм выявления и оценки результатов учебного процесса и установления соответствия уровня профессиональной подготовки. Подготовка к экзамену способствует закреплению, углублению и обобщению знаний, получаемых, в процессе обучения, а также применению их к решению практических задач. Готовясь к экзамену, студент должен ликвидировать имеющиеся пробелы в знаниях, систематизировать и упорядочить свои знания.

При подготовке к экзамену студентам целесообразно использовать материалы лекций, учебно-методические комплексы, основную и дополнительную литературу.

Формулировка вопросов экзаменационного билета совпадает с формулировкой перечня рекомендованных для подготовки вопросов экзамена, доведенного до сведения студентов накануне экзаменационной сессии.

При проработке той или иной темы курса сначала следует уделить внимание конспектам лекций, а уж затем учебникам, и другой печатной продукции. При подготовке необходимо тезисно записать ответы на наиболее трудные, с точки зрения студента, вопросы. Запись включает дополнительные (моторные) ресурсы памяти.

Представляется крайне важным посещение студентами проводимой перед экзаменом консультации. Здесь есть возможность задать вопросы преподавателю по тем разделам и темам, которые недостаточно или противоречиво освещены в учебной, научной литературе или вызывают затруднение в восприятии.

Важно, чтобы студент грамотно распределил время, отведенное для подготовки к экзамену. В этой связи целесообразно составить календарный план подготовки к экзамену, в котором в определенной последовательности отражается изучение или повторение всех экзаменационных вопросов. Подготовку к экзамену студент должен вести ритмично и систематично.

Рекомендации по работе с литературой.

Работа с литературой является основным методом самостоятельного овладения знаниями. Это сложный процесс, требующий выработки определенных навыков, поэтому студенту нужно обязательно научиться работать с книгой. После просмотра книги целиком или отдельной главы, которая была необходима для изучения определенной темы курса, нужно сделать записи в виде краткого резюме источника. В таком резюме следует отразить

основную мысль изученного материала, приведенные в ее подтверждение автором аргументы, ценность данных аргументов и т.п. Данные аргументы помогут сформировать собственную оценку изучаемого вопроса. Во время изучения литературы необходимо конспектировать и составлять рабочие записи прочитанного. Такие записи удлиняют процесс проработки, изучения книги, но способствуют ее лучшему осмыслению и усвоению, выработке навыков кратко и точно излагать материал. В идеале каждая подобная запись должна быть сделана в виде самостоятельных ответов на вопросы, которые задаются в конце параграфов и глав изучаемой книги. Однако такие записи могут быть сделаны и в виде простого и развернутого плана, цитирования, тезисов, резюме, аннотации, конспекта. Наиболее надежный способ собрать нужный материал – составить конспект. Конспект – это краткое изложение своими словами содержания книги. Он включает запись основных положений и выводов основных аргументов, сути полемики автора с оппонентами с сохранением последовательности изложения материала. При

Методические указания по использованию информационных технологий.

Обучение сегодня предполагает активное использование информационных технологий при организации своей познавательной деятельности. Интернет удобное средство для общения и получения информации. Наличие огромного количества материалов в Сети и специализированных поисковых машин делает Интернет незаменимым средством при поиске информации в процессе обучения, участия в конференциях онлайн, создании собственных сайтов, получения нормативных документов, публикация своих работ и сообщение о своих разработках. Информационные технологии в процессе изучения дисциплины используются для осуществления контроля знаний, для оценки уровня подготовки студентов (интернет-экзамен в сфере профессионального образования (ФЭПО), интернет тренажеры). Необходимо помнить, что к информации, получаемой с помощью ресурсов Интернет надо относиться критично, она должна оцениваться трезво, с большой долей реализма. Кроме того, ответственные пользователи Интернета должны выполнять закон об авторском праве.

5. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Основы современной энергетики. Том 1. Современная теплоэнергетика [Электронный ресурс] : учеб. / Трухний А.Д. [и др.]. — Электрон. дан. — Москва : Издательский дом МЭИ, 2010. — 472 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/72255>. — Загл. с экрана.
2. Теплофикация и тепловые сети [Текст] : учеб.: рек. Мин. обр. РФ / Е. Я. Соколов. - 8-е изд., стер. - М. : Изд-во Моск. энергет. ин-та, 2006. - 472 с. : рис., табл. - Библиогр.: с. 465. - ISBN 5-903072-15-9 (в пер.)
3. Теплоснабжение города [Электронный ресурс] : учебное пособие / . — Электрон. текстовые данные. — Воронеж: Воронежский государственный архитектурно-строительный университет, ЭБС АСВ, 2015. — 58 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/55062.html>
4. Шарапов В.И. Регулирование нагрузки систем теплоснабжения [Электронный ресурс] : монография / В.И. Шарапов, П.В. Ротов. — Электрон. текстовые данные. — М. : Новости теплоснабжения, 2007. — 165 с. — 978-5-94296-017-9. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/4488.html>
5. Подпоринов Б.Ф. Теплоснабжение [Электронный ресурс] : учебное пособие / Б.Ф. Подпоринов. — Электрон. текстовые данные. — Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, ЭБС АСВ, 2011. — 267 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/28404.html>
6. Стерлигов В.А. Централизованное теплоснабжение предприятий, поселений и городских округов. Курсовое и дипломное проектирование [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.А. Стерлигов, Т.Г. Мануковская, Е.М. Крамченков. — Электрон. текстовые данные. — Липецк: Липецкий государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2013. — 105 с. — 978-5-88247-616-7. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/55175.html>
7. Фатнева, Ю.В. Теплоснабжение жилого района. Уч–мет пособие. – Благовещенск: Амурский гос. ун–т. 2003. – 35 с.
8. Теплофизические свойства воды и водяного пара: С.Л. Ривкин. А.А. Александров. – М: Энергия. 2004. – 424с.
9. Губарев А.В. Паротеплогенерирующие установки промышленных предприятий [Электронный ресурс] : учебное пособие для вузов / А.В. Губарев. — Электрон. текстовые данные. — Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, ЭБС АСВ, 2013. — 240 с. — 978-5-361-00193-4. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/28379.html>
10. Липов, Юрий Михайлович. Компонровка и тепловой расчёт парового котла [Текст] : учеб. пособие: доп. Мин. высш. и сред. спец. обр. СССР / Ю. М. Липов, Ю. Ф. Самойлов, Т. В. Виленский . - М. : Энергоатомиздат, 1988. - 208 с.
11. Котельные установки промышленных предприятий [Текст] : учеб. / Л. Н. Сидельковский, В. Н. Юренев. - 4 изд., репр. - М. : БАСТЕТ, 2009. - 528 с. : ил. - Библиогр. : с. 520. - Предм. указ. : с. 521. - ISBN 978-5-903178-13-1 (в пер.)