

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНИЗАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

С.В. Щитов, Н.В. Спириданчук, Е.В. Панова, О.А. Колесникова

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДИСЦИПЛИНЫ

Учебное пособие

*Рекомендовано
Дальневосточным региональным
учебно-методическим центром (ДВ РУМЦ) в качестве учебного пособия
для студентов направления подготовки
бакалавров 35.03.06 «Агроинженерия» вузов региона
(Протокол №12 от 16.02.2015 г.)*

Благовещенск
Издательство ДальГАУ
2015

УДК 631.1

Щитов, С.В. Теплоэнергетические установки. Теоретические и практические основы дисциплины: учебное пособие / С.В. Щитов, Н.В. Спириданчук, Е.В. Панова, О.А. Колесникова. – Благовещенск: ДальГАУ, 2015. – 265 с.

Учебное пособие включает в себя краткие лекционные курсы по дисциплинам «Теплотехника» и «Топливо и эксплуатационные материалы», изучение которых позволяет глубже освоить курс дисциплины «Эксплуатация теплоэнергетических установок». В кратком лекционном курсе дисциплины «Эксплуатация теплоэнергетических установок» представлены основные положения эксплуатации теплоэнергетических установок и систем. Последовательно рассматриваются классификация, состав, функциональное назначение и взаимодействие отдельных частей энергетических систем. В учебном пособии представлены: практические задачи, пример оформления контрольной работы для студентов заочной формы обучения и пример выполнения индивидуального задания для студентов очной формы обучения.

Предназначено для студентов всех форм обучения направления 35.03.06 «Агроинженерия».

Рецензенты:

В.Г. Евдокимов,

д-р техн.наук, профессор кафедры общетехнических дисциплин ДВВКУ имени Маршала Советского Союза К.К. Рокоссовского (ДВВКУ);

А.Н. Шишлов,

канд.техн.наук, профессор кафедры проектирования и механизации технологических процессов ФГБОУ ВПО Приморская ГСХА

ISBN 978-5-9642-0270-7

Издательство ДальГАУ, 2015

ВВЕДЕНИЕ

Совершенствование систем теплоснабжения и рациональное использование тепловой энергии в различных отраслях сельскохозяйственного производства – одна из важнейших задач инженерной службы АПК.

Строительство новых котельных установок, модернизация и замена устаревшего оборудования в существующих котельных, применение более экономичных способов сжигания и использование химической теплоты различных топлив, обязательное использование утилизации вторичных ресурсов – все эти вопросы требуют рассмотрения в теоретическом и практическом плане. Внедрение современных конструкций паровых и водогрейных котлов небольшой мощности осуществляется с одновременным максимальным использованием ТЭЦ. В современных условиях повышаются требования к уровню технико-экономических и экологических показателей котельных установок. В последние годы разработан и освоен целый ряд высокоэкономичных котлов малой мощности.

Рассматривая методологическую взаимосвязь теоретических основ дисциплины «Теплотехника» с лабораторно-практическими занятиями, необходимо отметить отсутствие еще одного звена – индивидуальной самостоятельной работы студентов, связанной с производственной деятельностью предприятий АПК. Для восполнения этого пробела введена дисциплина «Эксплуатация теплоэнергетических установок», которая дает возможность расширения и углубления знаний, умений, навыков и компетенций, определяемых содержанием дисциплины «Теплотехника». Дисциплина относится к вариативной части профессионального цикла Б.3 основной образовательной программы подготовки бакалавров по направлению 110800.62 (35.03.06).

Наличие укрупненной взаимосвязи позволит выявить индивидуальные способности каждого студента и определить дальнейшую работу с ним на последующих курсах, при изучении многих инженерных дисциплин, базовой для которых является «Теплотехника».

Цель работы – овладение будущим специалистом практических навыков по анализу эффективности применения теплоты в хозяйстве, определению рациональных способов использования теплоты, эффективному использованию оборудования.

В результате изучения материала студент должен знать и уметь практически использовать в своей дальнейшей производственной деятельности:

- конструкцию и основы эксплуатации теплотехнического оборудования, применяемого в сельском хозяйстве;
- теорию и расчеты отдельных процессов применения теплоты в сельском хозяйстве;
- средства и методы экономии теплоты и топлива, использования в сельском хозяйстве вторичных ресурсов и природных ресурсов;
- самостоятельно принимать решения в области теплоснабжения сельского хозяйства;
- разрабатывать и правильно оформлять техническую документацию;
- использовать при решении технических задач современную вычислительную технику.

Первые два раздела пособия содержат необходимые теоретические сведения по дисциплинам профессионального блока «Теплотехника», «Топливо и эксплуатационные материалы».

Третий раздел «Эксплуатация теплоэнергетических установок» представлен кратким лекционным материалом о производственных и производственно-отопительных котельных и вспомогательном оборудовании, используемом в котельных.

В четвертом разделе представлены индивидуальные задания в виде задач и порядок их выполнения, дано краткое описание теоретических вопросов и справочный материал. Блок задач предназначен для закрепления важнейших разделов лекционного курса по дисциплине "Эксплуатация теплоэнергетических установок".

Контрольная работа для студентов по направлению 110800.62 «Агроинженерия» заочной формы обучения должна выполняться на основе собранных материалов на предприятии. При этом необходимо ознакомиться с производственными процессами, для ведения которых нужна тепловая энергия, и теплоснабжением бытовых объектов. Студент отвечает на вопросы по представленным пяти темам, где должны найти отражения индивидуальные особенности теплотехнических сооружений сельскохозяйственных предприятий. Ответы должны носить принципиальный схематический характер с указанием назначения, технической характеристики котельной, теплоагрегата, топливного хозяйства. В пособии представлен пример оформления контрольной работы.

Выбор индивидуального задания для студентов осуществляется по двум последним цифрам зачетной книжки. В каждом задании дается ссылка на литературный источник, по которому можно составить мнение как отвечать на поставленное задание. Не исключается использование другой литературы, авторских свидетельств, собственных рацпредложений. Пример оформления индивидуального задания представлен в пособии разделом 6.2.

ЧАСТЬ 1
Теоретические и методологические основы
взаимодействия дисциплины
«Эксплуатация теплоэнергетических установок»
с дисциплинами профессионального цикла

Глава 1 Теоретические и методологические основы
взаимодействия с дисциплиной «Теплотехника»

При изучении дисциплины «Эксплуатация теплоэнергетических установок» необходимо знать следующие разделы дисциплины «Теплотехника»: свойства реальных газов, второй закон термодинамики, водяные пары, термодинамика потока и истечение водяного пара, теория теплообмена, паросиловые установки. Знание данных разделов теплотехники позволит наиболее глубоко изучить дисциплину «Эксплуатация теплоэнергетических установок», правильно производить подбор теплотехнического оборудования, что в конечном итоге даст возможность определить пути экономии энергоресурсов. Ниже приведены краткие теоретические выкладки по дисциплине «Теплотехника».

1.1 Свойства реальных газов

Реальные газы отличаются от идеальных газов тем, что молекулы этих газов имеют объемы и связаны между собой силами взаимодействия, которые уменьшаются с увеличением расстояния между молекулами. Чем выше температура и чем ниже давление пара, тем более он по своим свойствам приближается к идеальным газам.

При практических расчетах реальных газов применяется отношение, которое называется коэффициентом сжимаемости

$$\frac{Pv}{RT} = Z, \quad (1)$$

где P – абсолютное давление реального газа, Па; v – удельный объем реального газа, м³/кг; R – газовая постоянная реального газа, кДж/кг·К, T – абсолютная температура, К.

Так как для идеальных газов при любых условиях $Pv = RT$, для них $Z=1$, то коэффициент сжимаемости выражает отклонение свойств реального газа от свойств идеального. Для реальных газов данный коэффициент принимает значения больше или меньше единицы.

Ян Дидерик Ван-дер-Ваальс в 1873 году наиболее точно описал свойства реальных газов зависимостью

$$(P + a/v^2)(v - b) = RT, \quad (2)$$

где a, b – постоянные величины, первая учитывает влияние сил взаимодействия молекул (число притягиваемых и притягивающих молекул), вторая учитывает конечность объема молекул (наименьший объем, до которого можно сжимать газ); a/v^2 – характеризует добавочное давление, под которым находится реальный газ вследствие сил сцепления между молекулами и называется внутренним давлением; $(v-b)$ – свободный объем, в котором движутся молекулы.

Уравнение Ван-дер-Ваальса качественно верно отображает поведение жидких и газообразных веществ, для двухфазных состояний оно неприменимо. Уравнение Ван-дер-Ваальса при больших плотностях газа дает значительные ошибки. Кроме этого, экспериментальным путем доказано, что коэффициенты a и b зависят от температуры и давления, причем эта зависимость очень сложная.

М.П.Вукалович и И.И.Новиков в 1939 г. предложили новое универсальное уравнение состояния реальных газов с учетом ассоциации (объединения) их молекул в двойные и тройные комплексы, которое имеет следующий вид:

$$(P + a/v^2)(v - b) = RT \left(1 - C / (vT^{0,5(3+2m)}) \right), \quad (3)$$

где a, b – постоянные уравнения Ван-дер-Ваальса; C, m – постоянные, определяемые на основании опытных данных.

В настоящее время наиболее точным считается уравнение Редлиха-Квонча-Соава

$$\left[p + \frac{a}{v(v+b)} \right] (v - b) = RT. \quad (4)$$

1.2 Второй закон термодинамики

В основе современных представлений о превращении тепла в работу лежат два важнейших положения: невозможность создания вечного двигателя (Perpetuum mobile) 1-го рода, в котором механическая работа получалась бы без затраты какой-либо энергии, и невозможность создания вечного двигателя 2-го рода, где получаемое тепло полностью превращалось бы в работу. Если первое положение достаточно очевидно и представляет собой закон сохранения энергии («энергия не возникает из ничего и не может обратиться в ничто»), то второе требует некоторых пояснений.

С точки зрения термодинамики все тепловые двигатели представляют собой взаимодействие между собой рабочего тела, источника теплоты и охладителя.

С.Карно в 1824 году экспериментально обнаружил, что полезная работа получается путем использования теплоты при разных обстоятельствах только при наличии температурного перепада, то есть при наличии источника тепла и холодильника. Продолжая исследования Карно, Р.Клаузиус (1850 г.) отметил, что для тепловых процессов естественным является то, что теплота стремится перейти от более теплых тел к более холодным, то есть самопроизвольный обратный переход теплоты от холодного к теплему телу невозможен без компенсации.

Все виды энергии легко переходят в тепло, обратный переход ограничен определенными условиями. *Второй закон термодинамики* устанавливает, возможен или невозможен тот или иной процесс, в каком направлении протекает процесс, когда достигается термодинамическое равновесие и при каких условиях можно получить максимальную работу.

Считают, что все тепловые машины (тепловые двигатели и холодильные машины) работают по *круговому процессу (циклу)*, то есть по замкнутому процессу (рис.1.1), представляющему собой последовательное изменение всей системы в целом, в результате которого она возвращается в свое исходное состояние. Если система возвращается к исходному состоянию в обратном направлении через все те же состояния через которые она проходила в прямом, процесс называется *обратимым*.

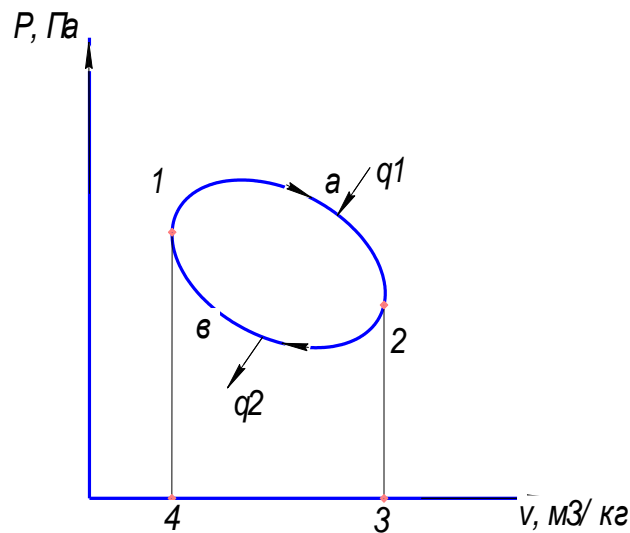


Рис. 1.1. Прямой круговой процесс

Поскольку после совершения цикла рабочее тело возвращается в исходное состояние, оно может повторять такие циклы сколь угодно долго. В процессе расширения рабочего тела от теплоисточника подводится тепло q_1 и совершается работа l_1 , при сжатии внешняя среда совершает над газом работу l_2 и тепло q_2 отводится в теплоприемник.

В том случае, если в цикле полученная извне теплота превращается в полезную работу, он является *прямым круговым процессом*. Полезная работа данного цикла равна

$$l_0 = q_1 - q_2. \quad (5)$$

По прямым циклам работают тепловые двигатели (паровые и газовые турбины, паросиловые установки, ДВС и др.) В данных циклах изменение внутренней энергии равно нулю. Чем больше доля теплоты в данном цикле переводится в работу, тем цикл выгоднее с точки зрения использования подведенной теплоты.

Экономичность прямого цикла оценивается *термическим коэффициентом полезного действия* η_t

$$\eta_t = \frac{|q_1| - |q_2|}{|q_1|} = \frac{|l_0|}{|q_1|}, \quad (6)$$

где $|q_1|$ и $|q_2|$ – абсолютные значения удельных подведенной и отведенной теплоты, Дж/кг; $|l_0|$ – абсолютное значение полученной удельной работы, Дж/кг.

Отношение подводимой или отводимой теплоты, при соответствующей температуре называется *приведенной теплотой*.

Для заданных условий подвода и отвода тепла максимально возможный КПД тепловой двигатель может иметь только в том случае, если он будет работать по так называемому циклу Карно, КПД которого

$$\eta_t = 1 - \frac{T_1}{T_2},$$

где T_1 и T_2 — абсолютные температуры нагревателя и холодильника.

Алгебраическая сумма приведенных теплот для обратимых циклов равна

$$\oint \frac{\delta q}{T} = 0. \quad (7)$$

Уравнение (7) - обобщенное выражение интеграла Клаузиуса является *математическим выражением второго закона термодинамики* для круговых обратимых процессов.

Отношение $\delta q/T$ представляет собой полный дифференциал некоторой функции, которая зависит только от данного состояния тела. Она обозначается S и называется *энтропией*, Дж/К. Тогда получим аналитическое выражение второго закона термодинамики в следующем виде:

$$dS = \frac{\delta q}{T} \quad (8)$$

Энтропия есть однозначная функция состояния тела, принимающая для каждого состояния вполне определенное значение. Она является экстенсивным (зависит от массы вещества) параметром состояния и в любом термодинамическом процессе полностью определяется начальным и конечным состояниями тела и не зависит от пути протекания процесса.

Энтропия - функция основных параметров состояния

$$S = f_1(P, V); \quad S = f_2(P, T); \quad S = f_3(V, T) \quad (9)$$

Необратимые термодинамические процессы – это процессы, не допускающие возможности возвращения системы в исходное состоя-

ние без изменений в окружающей системе. Для необратимого цикла термический КПД будет меньше соответствующего КПД обратимого цикла при одинаковых температурах теплоотдатчика и теплоприемника, так как совершаемая работа в необратимом цикле меньше

$$\eta_{t \text{ необр}} < \eta_{t \text{ обр}}, \quad (10)$$

или

$$\left(\frac{\Delta q_1 - \Delta q_2}{\Delta q_1}\right)_{\text{необр}} < \left(\frac{\Delta q_1 - \Delta q_2}{\Delta q_1}\right)_{\text{обр}}, \quad \left(-\frac{\Delta q_2}{\Delta q_1}\right)_{\text{необр}} < \left(-\frac{\Delta q_2}{\Delta q_1}\right)_{\text{обр}},$$

так как для обратимого цикла Карно

$$\frac{\Delta q_2}{\Delta q_1} = \frac{T_2}{T_1},$$

отсюда

$$\left(-\frac{\Delta q_2}{\Delta q_1}\right)_{\text{необр}} < \left(-\frac{T_2}{T_1}\right),$$

или

$$\frac{\Delta q_1}{T_1} - \frac{\Delta q_1}{T_1} < 0,$$

$$\sum \frac{\Delta q}{T} < 0. \quad (11)$$

В пределе

$$\oint \frac{\Delta q}{T} < 0, \quad (12)$$

$$dS > \frac{dq}{T}. \quad (13)$$

Таким образом, самопроизвольные (необратимые) процессы в изолированной системе приводят к увеличению энтропии.

1.3 Водяной пар

Водяной пар является одним из основных рабочих тел в паровых турбинах и машинах, в атомных установках, теплоносителем в теплообменниках.

Пар - это реальный газ со сравнительно высокой критической температурой и близкий к состоянию насыщения, то есть превращению в жидкость.

Парообразование – процесс превращения вещества из жидкого состояния в газообразное. Парообразование происходит двумя способами.

Испарение – парообразование, происходящее всегда при любой температуре с поверхности жидкости или твердого тела.

Кипение – процесс, происходящий при определенной температуре, зависящей от природы жидкости и давления, под которым она находится, происходит парообразование во всей массе жидкости.

Обратный процесс парообразования - *конденсация*. Она протекает при постоянной температуре. Процесс перехода твердого вещества непосредственно в пар называется *сублимацией* или *возгонкой*. Обратный процесс перехода пара в твердое состояние называется *десублимацией*.

Тело может находиться в трех фазах, состояниях (твердом, жидком, газообразном). Переход из одного состояния в другой называется *фазовым переходом*. На рисунке 1.2 представлена фазовая PT -диаграмма вещества.

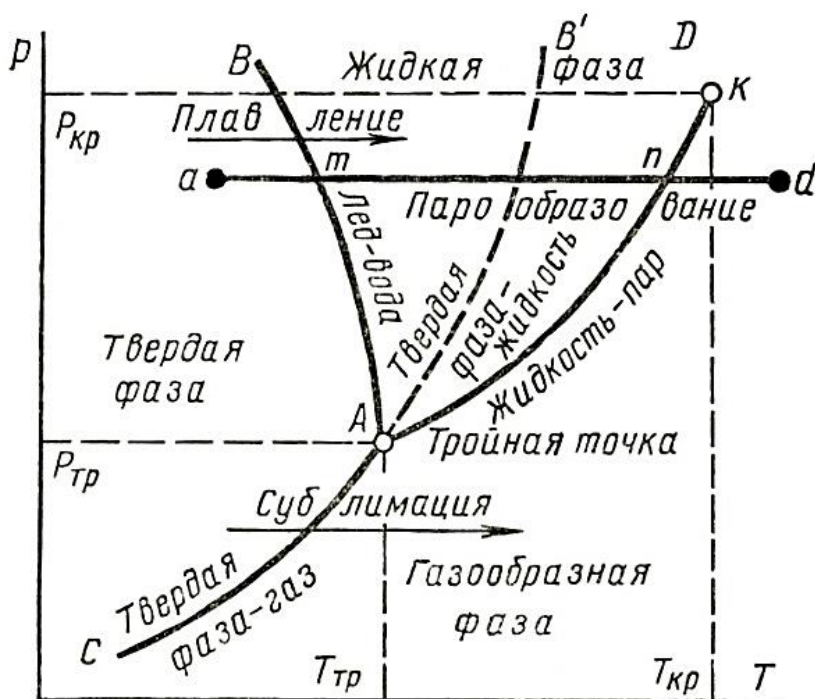


Рис. 1.2. Фазовая PT - диаграмма вещества

При испарении жидкости в ограниченном пространстве (в паровых котлах) одновременно происходит обратное явление – *конденсация* пара. Если скорость конденсации станет равной скорости испарения, то наступает *динамическое равновесие*. Пар в этом случае имеет максимальную плотность и называется *насыщенным паром*. В момент испарения последней капли жидкости в ограниченном пространстве

без изменения температуры и давления образуется *сухой насыщенный пар*. Состояние такого пара определяется одним параметром - давлением. Механическая смесь сухого пара и мельчайших капелек жидкости называется *влажным паром* (влажным насыщенным).

Массовая доля сухого пара во влажном паре называется *степенью сухости*

$$x = M_{cn} / M_{en} , \quad (14)$$

где M_{cn} – масса сухого пара во влажном; M_{en} – масса влажного пара.

Массовая доля $(1-x)$ жидкости во влажном паре называется *степенью влажности*. Для кипящей жидкости при температуре насыщения $x=0$, для сухого насыщенного пара $x=1$.

Если температура пара выше температуры насыщенного пара того же давления, то такой пар называется *перегретым*. Его объем больше удельного объема сухого насыщенного пара.

Разность между температурой перегретого пара и температурой насыщенного пара того же давления называется *степенью перегрева*. По своим физическим свойствам перегретый пар тем ближе к газам, чем выше степень его перегрева. Так как удельный объем перегретого пара больше удельного объема насыщенного пара, то плотность перегретого пара меньше плотности насыщенного пара. Поэтому перегретый пар является ненасыщенным паром.

Количество тепла, необходимое для нагревания воды от 0°C до температуры насыщения (кипения), называемое *теплотой* или *энтальпией жидкости* равно

$$q = h' - h_0 = c_p(T_n - 0) = c_p T_n = h' , \quad (15)$$

где h' - энтальпия жидкости при температуре кипения, кДж/кг; h_0 – энтальпия жидкости в тройной точке воды, кДж/кг, c_p – теплоемкость жидкости (пара) при $p=const$, T_n – температура насыщения (кипения) жидкости, К.

Внутренняя энергия жидкости

$$u' = h' . \quad (16)$$

Энтропия жидкости определяется по уравнению

$$s' = 4,19 \int_{273}^{T_H} \frac{dT}{T} = 4,19 \ln \frac{T_H}{273}. \quad (17)$$

Если жидкость подогревается не до температуры кипения, а до произвольной температуры, то под T_H в уравнении (17), следует понимать эту произвольную температуру.

Теплота, расходуемая на превращение одного килограмма жидкости, нагретой до температуры кипения, в один килограмм сухого насыщенного пара, называется *теплотой парообразования* r (кДж/кг), она равна изменению внутренней энергии, направленной на преодоление сил сцепления между молекулами жидкости, и работе расширения

$$r = d + \varphi, \quad (18)$$

$$\varphi = P(v'' - v'), \quad (19)$$

где d - внутренняя теплота парообразования, кДж/кг; φ - внешняя теплота парообразования, кДж/кг, v' - удельный объем жидкости при температуре кипения, м³/кг, v'' - удельный объем сухого насыщенного пара, м³/кг.

Энтальпия сухого насыщенного пара равна

$$h'' = h' + r. \quad (20)$$

Внутренняя энергия сухого насыщенного пара определяется

$$u'' = h'' - Pv''. \quad (21)$$

По заданному давлению или температуре по таблицам можно определить остальные параметры.

Состояние влажного насыщенного пара определяется его давлением или температурой и степенью сухости.

Энтропия сухого насыщенного пара равна

$$s'' = s' + \frac{r}{T_H}. \quad (22)$$

Удельный объем влажного насыщенного пара зависит от давления и степени сухости и определяется

$$v_x = v''x. \quad (23)$$

Энтальпия влажного пара равна

$$h_x = h' + xr. \quad (24)$$

Внутренняя энергия влажного насыщенного пара

$$u_x = h_x - Pv_x. \quad (25)$$

Энтропия влажного насыщенного пара определяется по уравнениям

$$s_x = s' + \frac{xr}{T_H}, \quad (26)$$

$$s_x = s' + (s'' - s')x.$$

Количество теплоты, необходимое для перевода одного килограмма сухого насыщенного пара в перегретый при постоянном давлении, называется *теплотой перегрева* и определяется по уравнению

$$q_n = \int_{T_H}^T c_p dT = c_p (T_{nn} - T_H), \quad (27)$$

где T_{nn} - температура перегретого пара, К.

Так как в таблицах перегретого пара приводятся значения его энтальпии, теплота перегрева может быть найдена из выражения

$$q_n = h - h''. \quad (28)$$

Энтропия перегретого пара равна

$$s = s'' + c_p \ln \frac{T_{nn}}{T_H}. \quad (29)$$

1.4 Термодинамика потока. Истечение водяного пара

На практике при рассмотрении рабочих процессов машин, к которым относятся теплоэнергетические установки, в которых работа производится за счет внешней кинетической энергии рабочего тела, встречаются задачи на изучение закономерностей движения рабочих тел и при их решении принимаются следующие допущения:

- движение потока газа по каналу установившееся и неразрывное;
- скорости по сечению перпендикулярному оси канала постоянны;
- пренебрегается трение частичек газа между собой и о стенки канала;
- изменение параметров по сечению канала мало по сравнению с их абсолютными значениями.

Уравнение первого закона имеет вид

$$q = \Delta u + \Delta e + l_{\text{ПРОТ.}} + l_{\text{ТЕХН.}}, \quad (30)$$

где $\Delta e = (w_2^2 - w_1^2)/2 + g(z_2 - z_1)$ – изменение энергии системы, состоящей из изменения кинетической и потенциальной энергий; w_1, w_2 – скорости потока в начале и в конце канала; z_1, z_2 – высота положения начала и конца канала; $l_{\text{ПРОТ.}} = P_2 v_2 - P_1 v_1$ – работа проталкивания, затрачиваемая против внешних сил на преодоление внешнего давления; $l_{\text{ТЕХН.}}$ – техническая (полезная) работа турбины.

Уравнение первого закона в развернутом виде

$$q = (u_2 - u_1) + (w_2^2 - w_1^2)/2 + g(z_2 - z_1) + (P_2 v_2 - P_1 v_1) + l_{\text{ТЕХН.}} \quad (31)$$

Энтальпия равна $h = u + Pv$, тогда уравнение первого закона термодинамики для потока газа будет иметь вид

$$q = (h_2 - h_1) + (w_2^2 - w_1^2)/2 + g(z_2 - z_1) + l_{ТЕХН}. \quad (32)$$

Если при перемещении газа по каналу происходит его расширение с уменьшением давления и увеличением скорости, то такой канал называется *соплом*. Если в канале происходит сжатие рабочего тела с увеличением его давления и уменьшением скорости, то такой канал называют *диффузором*.

В каналах при небольшой разности давлений газа и внешней среды скорость течения рабочего тела достаточно большая. В большинстве случаев длина канала небольшая и процесс теплообмена между стенкой и газом незначителен, поэтому процесс истечения газа можно считать адиабатным.

Скорость истечения (на выходе канала) определяется из уравнения

$$w_2 = \sqrt{2(h_1 - h_2) + w_1^2} \quad \text{или} \quad w_2 = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} P_1 \nu_1 \left[1 - (P_2/P_1)^{(k-1)/k} \right]}. \quad (33)$$

Для практических расчетов принимают $w_1 = 0$, тогда

$$w_2 = \sqrt{2(h_1 - h_2)} \quad (34)$$

(в дальнейшем индекс у скорости тела на выходе из сопла опускаем).

Если энтальпия выражается в кДж/кг, то уравнение (34) принимает вид

$$w = 44,72 \sqrt{h_1 - h_2}. \quad (35)$$

Массовый секундный расход газа, кг/с

$$m = wf / \nu_2, \quad (36)$$

где f – площадь сечения канала на выходе.

Так как процесс истечения адиабатный ($P_1 \nu_1^k = P_2 \nu_2^k$), то

$$m = f \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{P_1}{\nu_1} \left[(P_2/P_1)^{2/k} - (P_2/P_1)^{(k+1)/k} \right]}. \quad (37)$$

Массовый секундный расход идеального газа зависит от площади выходного канала, начального состояния газа и степени его расширения.

Критическим давлением называется такое давление на выходном сечении канала, при котором достигается максимальный расход газа и определяется следующим выражением:

$$P_{кр} = P_2 = \beta_{кр} P_1,$$

для одноатомных газов $\beta_{кр} = 0,49$; для двухатомных газов $\beta_{кр} = 0,528$; для трехатомных газов $\beta_{кр} = 0,546$.

Критической скоростью называется скорость газа в выходном сечении канала, при давлении равном или меньшем критического $P_{кр}$

$$w_{кр} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} P_1 v_1} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} RT_1}. \quad (38)$$

для одноатомных газов $k = 1,66$; для двухатомных газов $k = 1,4$; для трехатомных газов $k = 1,3$.

Критическая скорость зависит при истечении идеального газа только от начальных параметров, его природы и равна скорости звука (a) при критических параметрах

$$w_{кр} = a = \sqrt{k P_{кр} v_{кр}}. \quad (39)$$

При истечении из суживающего сопла, если давление внешней среды больше критического давления $P_{кр}$, то есть $\beta_{кр} < P_2 / P_1 < 1$, тогда скорость газа при истечении меньше скорости звука. Давление газа в выходном сечении равно давлению внешней среды.

Если давление внешней среды меньше критического $P_{кр}$, то есть $0 < P_2 / P_1 < \beta_{кр}$, то газ расширяется не полностью, скорость газа в выходном сечении равна критической скорости или скорости звука.

Комбинированное сопло Лаваля предназначено для использования больших перепадов давления и для получения скоростей истечения, превышающих критическую или скорость звука. Сопло Лаваля

состоит из короткого суживающегося участка и расширяющейся конической насадки (рис.1.3).

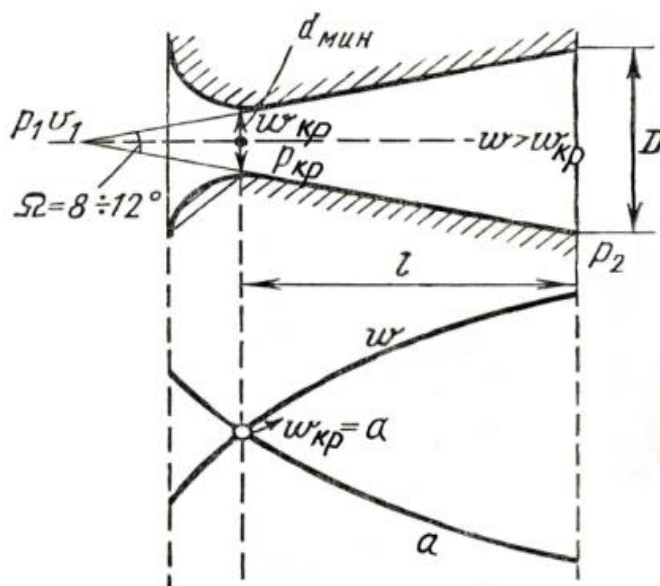


Рис.1.3. Сопло Лавалья

Опыты показывают, что угол конусности расширяющейся части должен быть равен $\Omega = 8 \div 12^\circ$. При больших углах наблюдается отрыв струи от стенок канала. При истечении газа из комбинированного сопла в окружающую среду с давлением меньше критического в самом узком сечении сопла устанавливаются критическое давление и критическая скорость. В расширяющейся насадке сопла происходит дальнейшее увеличение скорости газа и падения давления до давления внешней среды.

Скорость истечения и массовый расход идеального газа (при заданной площади выходного сечения сопла) определяются по формулам (33) и (37).

Длину расширяющейся части сопла можно определить по уравнению

$$l = (D - d) / 2 \operatorname{tg}(\Omega / 2), \quad (40)$$

где Ω - угол конусности сопла; D - диаметр выходного отверстия; d - диаметр сопла в минимальном сечении.

Если учитывать силы трения рабочего тела о стенки канала и внутреннее трение между струйками потока из-за различия скоростей по сечению канала, очевидно, что скорость газа (пара) в любом канале будет меньше скорости обратимого процесса (теоретической скорости). Наличие сил трения делает адиабатный процесс необратимым, потеря кинетической энергии в процессе составляет

$$w^2 - \frac{w_d^2}{2} = \phi \left(\frac{w^2}{2} \right), \quad (41)$$

где w_d – действительная скорость газа (пара); $\phi = 1 - \varphi_{ск}^2$ – коэффициент потери энергии; $\varphi_{ск} = \frac{w_d}{w}$ – коэффициент скорости.

В случае истечения водяного пара для расчетов можно применять формулы (33) и (37), в случае если пар перегретый $k=1,3$, сухой насыщенный $k=1,135$. Расчет скорости истечения и массового расхода пара можно производить используя *is*-диаграмму водяного пара или по таблицам, применяя начальные параметры h_1 , h_2 и конечное давление. Расчеты необходимо производить используя формулу (35).

1.5 Дросселирование газов

Дросселированием (мятием) называется необратимый процесс, при котором пар или газ переходит с высокого давления на низкое, без совершения внешней работы и без подвода или отвода теплоты. Такое явление происходит в трубопроводе, где имеется место сужения проходного канала (рис.1.4). При таком сужении, вследствие сопротивлений, давление за местом сужения P_2 всегда меньше давления перед ним P_1 .

Любой кран, вентиль, задвижка, клапан и прочие местные сопротивления, уменьшающие проходное сечение трубопровода, вызывают дросселирование газа или пара, следовательно, падение давления. В большинстве случаев это явление приносит безусловный вред, но иногда его создают искусственно при регулировании паровых двигателей.

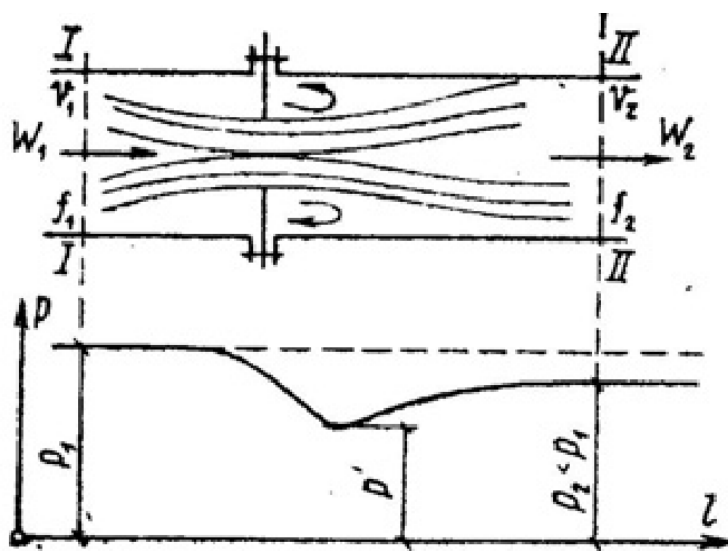


Рис. 1.4 Дросселирование газа

При прохождении газа через отверстие кинетическая энергия газа и его скорость в узком сечении возрастают, что сопровождается падением температуры и давления. За отверстием газ опять течет по полному сечению, и скорость его вновь понижается, а давление увеличивается, но до начального значения оно не поднимается, некоторое изменение скорости произойдет в связи с увеличением удельного объема газа от уменьшения давления.

Газ, протекая через отверстие, приходит в вихревое движение. Часть его кинетической энергии затрачивается на образование этих вихрей и превращается в теплоту. Кроме того, в теплоту превращается и работа, затраченная на преодоление сопротивлений (трение). Вся эта теплота воспринимается газом, в результате чего температура его изменяется (уменьшается или увеличивается).

При дросселировании происходит увеличение энтропии и уменьшение работоспособности рабочего тела.

Уравнение процесса дросселирования

$$h_1 = h_2. \quad (42)$$

Это равенство показывает, что энтальпия в результате дросселирования не изменяется и справедливо только для сечений достаточно удаленных от сужения.

Для идеальных газов энтальпия газа является однозначной функцией температуры. Отсюда следует, что при дросселировании идеального газа его температура не изменяется ($T_1 = T_2$).

При дросселировании реальных газов энтальпия газа остается постоянной, энтропия и объем увеличиваются, давление падает, а температура изменяется (увеличивается, уменьшается или остается неизменной).

Изменение температуры жидкостей и реальных газов при дросселировании называется эффектом *Джоуля-Томсона*. Для идеального газа эффект Джоуля-Томсона равен нулю.

Различают *дифференциальный температурный эффект*, когда давление и температура изменяются на бесконечно малую величину, и *интегральный температурный эффект*, при котором давление и температура изменяются на конечную величину.

Дифференциальный температурный эффект обозначается α

$$\alpha_n = (\partial T / \partial P)_n. \quad (43)$$

Если $\alpha > 0$, то рабочее тело охлаждается $dT < 0$, это явление называется положительным эффектом *Джоуля-Томсона*. При $\alpha < 0$, $dT > 0$ рабочее тело нагревается – это отрицательный эффект *Джоуля-Томсона*. При $\alpha = 0$, $dT = 0$ происходит изотермическое дросселирование.

Дросселирование при конечных перепадах давлений называют *интегральным эффектом дросселирования Джоуля-Томсона* и определяется уравнением

$$T_2 - T_1 = \int_{P_1}^{P_2} \left\{ \left[T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p - v \right] / c_p \right\} dP. \quad (44)$$

Состояние реального газа при адиабатном дросселировании, при котором температурный эффект меняет свой знак, называется *точкой инверсии*, а температура, соответствующая этой точке, называется температурой инверсии $T_{инв.}$

$$T_{инв.} = v \left(\frac{\partial T}{\partial v} \right)_p. \quad (45)$$

Это выражение называется *уравнением кривой инверсии*.

Для каждого реального газа

$$T_{\text{ин}} = 6,75T_{\text{к}}.$$

Процесс дросселирования рабочего тела всегда связан с потерей располагаемой работы. Вся работа расширения газа от p_1 до p_2 и работа окружающей среды $p_1 v_1 - p_2 v_2$, которую она производит для проталкивания газа (пара) через дроссель, затрачивается на преодоление сил трения и переходит в теплоту трения

$$q_{\text{тр}} = \int_1^2 p dv + p_1 v_1 - p_2 v_2 = - \int_{p_1}^{p_2} v dp. \quad (46)$$

Работа трения, которая переходит в теплоту трения, вызывает увеличение энтропии реального газа

$$s_1 - s_2 = - \int_{p_1}^{p_2} \frac{v}{T} dp. \quad (47)$$

С ростом энтропии работоспособность пара понижается.

При дросселировании (мятии) водяного пара (рис.1.5):

- если он перегретый (процесс ab) – давление и температура уменьшаются, объем, энтропия и степень перегрева увеличиваются;
- если пар высокого давления и небольшого перегрева (процесс cd) – он переходит в сухой насыщенный, потом во влажный, затем в сухой насыщенный, возвращаясь в перегретый;
- если кипящая жидкость (процесс ef)– происходит частичное испарение с увеличением степени сухости;
- если влажный (процесс gk) – происходит увеличение его степени сухости.

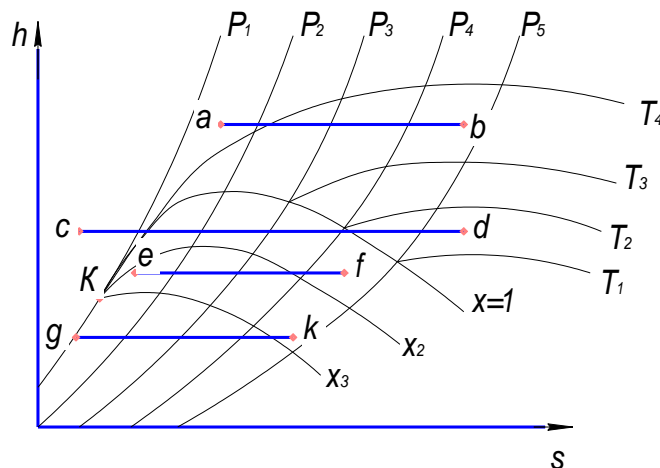


Рис. 1.5. Дросселирование (мятие) водяного пара

1.6 Теория теплообмена

Перенос теплоты может передаваться тремя способами: *теплопроводностью, конвекцией, излучением (радиацией)*. В котельных установках данные явления действуют совместно: от продуктов сгорания топлива, получаемых с помощью горения факела, к внешней поверхности труб в паровом котле посредством конвекции и теплового излучения, от наружной стенки трубы к внутренней - теплопроводностью, от внутренней стенки трубы к нагреваемой жидкости – с помощью конвекции. В целом такой процесс называют *теплопередачей*.

Теплопроводность - процесс передачи теплоты при непосредственном контакте тел или частицами тел с различными температурами и представляет собой молекулярный процесс передачи теплоты.

Конвекция – это перенос теплоты при перемещении и перемешивании всей массы неравномерно нагретых частиц жидкости или газа.

Конвективный теплообмен - одновременный перенос теплоты конвекцией и теплопроводностью.

Конвективная теплоотдача - теплообмен между потоками жидкости или газа и поверхностью твердого тела.

Излучение (радиация) - передача теплоты тела в виде электромагнитных волн.

Совместный теплообмен излучением и теплопроводностью называют *радиационно-кондуктивным* теплообменом.

Совокупность трех видов теплообмена называется *сложным теплообменом*.

Температурное поле - совокупность значений температуры в данный момент времени для всех точек изучаемого пространства

$$t = f(x, y, z, \tau), \quad (48)$$

где t – температура тела, °C; x, y, z -координаты точки, м;
 τ - время, с .

Изотермическая поверхность - поверхность тела с одинаковой температурой.

Температурный градиент - это вектор (рис. 1.6), направленный по нормали к изотермической поверхности в сторону возрастания

температуры и численно равной производной температуры t по нормали n

$$\text{grad}t = n_0 \partial t / \partial n, \quad (49)$$

где n_0 – единичный вектор.

Количество теплоты, проходящее через изотермическую поверхность F в единицу времени, называется *тепловым потоком* Q , $\text{Вт} = \text{Дж}/\text{с}$.

Тепловой поток, проходящий через единицу площади, называют *плотностью теплового потока*, $\text{Вт}/\text{м}^2$

$$q = Q / F. \quad (50)$$

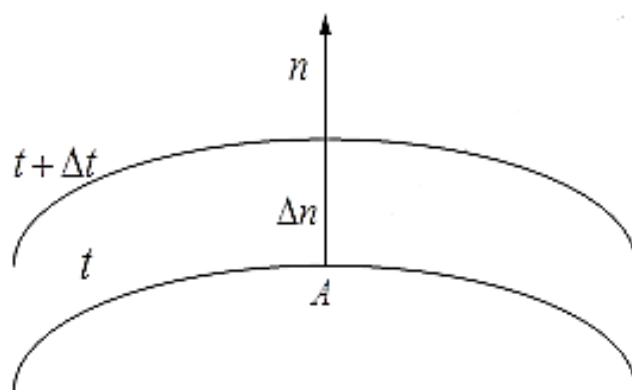


Рис. 1.6. Определение температурного градиента

При передаче теплоты путем теплопроводности количество теплоты будет зависеть от вида используемого материала и разности температур на границах тела. Для твердого тела уравнение теплопроводности подчиняется *закону Фурье*: тепловой поток, передаваемый теплопроводностью, прямо пропорционален градиенту температуры и площади сечения, перпендикулярного направлению теплового потока

$$Q = -\lambda F \partial t / \partial n \quad \text{или} \quad q = -\lambda \partial t / \partial n = -\lambda \text{grad}t, \quad (51)$$

где q – вектор плотности теплового потока, $\text{Вт}/\text{м}^2$ направлен по нормали к изотермической поверхности в сторону убывания температур; λ – коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·К) - физический параметр вещества, характеризующий способность тела проводить теплоту, зависящий от рода вещества, давления, температуры и величины влажности вещества. Числовое значение теплопроводности определяет количество теплоты, проходящей через единицу изотермической поверхности в единицу времени, при условии, что градиент температуры равен единице ($gradt = 1$).

Дифференциальное уравнение теплопроводности (или уравнение Фурье) описывает явления передачи теплоты теплопроводностью в самом общем виде для трехмерного нестационарного температурного поля при отсутствии внутренних источников теплоты

$$\partial t / \partial \tau = \lambda / (c \cdot \rho) (\partial^2 t / \partial^2 x + \partial^2 t / \partial^2 y + \partial^2 t / \partial^2 z) = a \nabla^2 t, \quad (52)$$

где $\partial t / \partial \tau$ - изменение температуры во времени, град/с; $a = \lambda / (c \cdot \rho)$ - температуропроводность, $Вт/(м^2 \cdot К)$, $м^2/с$; λ - теплопроводность, $Вт/(м \cdot К)$; c - массовая теплоёмкость, $Дж/(кг \cdot К)$; ρ - плотность, $кг/м^3$; $\nabla^2 = (\partial^2 t / \partial^2 x + \partial^2 t / \partial^2 y + \partial^2 t / \partial^2 z)$ - оператор Лапласа.

В инженерных расчетах часто определяют конвективный теплообмен между потоками жидкости или газа и поверхностью твердого тела. Этот процесс конвективного теплообмена называют *конвективной теплоотдачей* или просто *теплоотдачей*.

Факторы, влияющие на процесс теплоотдачи:

1) *природа возникновения движения жидкости вдоль поверхности стенки*

Самопроизвольное движение жидкости (газа) в поле тяжести, обусловленное разностью плотностей её горячих и холодных слоев, называется *свободным движением* (естественная конвекция). Движение, создаваемое вследствие разности давлений, которые создаются насосом, вентилятором и другими устройствами, - *вынужденным* (вынужденная конвекция).

2) *режим движения жидкости*

Упорядоченное, слоистое, спокойное, без пульсаций движение называется *ламинарным*. Беспорядочное, хаотическое, вихревое движение называется *турбулентным*.

3) физические свойства жидкостей и газов

Физические свойства, влияющие на конвективный теплообмен: коэффициент теплопроводности (λ), плотность (ρ), удельная теплоемкость (c), коэффициент динамической вязкости (μ) или кинематической вязкости

($\nu = \mu / \rho$), коэффициент температуропроводности ($a = \lambda / (\rho c)$), температурный коэффициент объемного расширения ($\beta = 1/T$).

4) форма (плоская, цилиндрическая), размеры и положение поверхности (горизонтальная, вертикальная).

Закон *Ньютона-Рихмана* гласит, что количество теплоты, передаваемое конвективным теплообменом прямо пропорционально разности температур поверхности тела (t'_{cm}) и окружающей среды ($t'_{жс}$)

$$Q = \alpha F (t'_{cm} - t'_{жс}) \quad \text{или} \quad q = \alpha (t'_{cm} - t'_{жс}), \quad (53)$$

где α - коэффициент теплоотдачи характеризует интенсивность теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой, $Вт/(м^2К)$.

Общее уравнение подобия для конвективного теплообмена имеет вид (рекомендует академик М.А. Михеев)

$$Nu = c Re^n Gr^b Pr^m (Pr_{жс} / Pr_{cm})^{0,25}, \quad (54)$$

где c, n, b, m - числа, соответствующие конкретному виду теплообмена.

Числа подобия (критерии подобия):

$Nu = \alpha l / \lambda$ - критерий Нуссельта (безразмерный коэффициент теплоотдачи), характеризует теплообмен между поверхностью стенки и жидкостью (газом);

$Re = \omega l / \nu$ - критерий Рейнольдса, характеризует соотношение сил инерции и вязкости и определяет характер течения жидкости (газа);

$Gr = g \beta \Delta t d^3 / \nu^2$ - критерий Грасгофа, характеризует подъемную силу, возникающую в жидкости (газе) вследствие разности плотностей;

$Pr = \nu / \alpha$ - критерий Прандтля, характеризует физические свойства жидкости; где l – определяющий размер (длина, высота, диаметр).

Лучистая энергия возникает за счет энергии других видов в результате сложных молекулярных и внутриатомных процессов (распространяющиеся в пространстве электромагнитные волны). Источником теплового излучения является внутренняя энергия нагретого тела. Количество лучистой энергии, в основном, зависит от физических свойств и температуры излучающего тела.

Электромагнитные волны различаются между собой длиной волны. В зависимости от длины волны λ лучи обладают различными свойствами. Газы испускают лучи не всех длин волн - излучение называется *селективным* (избирательным). Излучение газов носит объемный характер.

Суммарное излучение с поверхности тела по всем направлениям полусферического пространства и по всем длинам волн спектра называется *интегральным или полным лучистым потоком*, Q . Интегральный лучистый поток, излучаемый единицей поверхности по всем направлениям, называется *излучательной способностью тела* и обозначается E , $Вт/м^2$

$$E = dQ/dF, \quad (55)$$

где dQ - элементарный лучистый поток; dF - элемент поверхности.

Количество лучистой энергии, падающей на тело, Q

$$Q = Q_A + Q_R + Q_D, \quad A + R + D = 1, \quad (56)$$

где A - коэффициент поглощения; R - коэффициент отражения; D - коэффициент проницаемости.

$A=1, R=0, D=0$ - поверхность *абсолютно черная*.

$R=1, A=0, D=0$ - поверхность *абсолютно белая*.

Тело *абсолютно проницаемо* - $D=1, R=0, A=0$.

Зеркальная поверхность отражает лучи под тем же углом, под которым они падают на нее. Если падающий луч при отражении расщепляется на множество лучей, идущих по всевозможным направлениям, то такое отражение – *диффузное*.

Интенсивность излучения или *спектральная* (монохроматическая) *интенсивность* представляет собой плотность лучистого потока тела для длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$, отнесенная к рассматриваемому интервалу длин волн $d\lambda$

$$I_{0\lambda} = dE_{s\lambda} / d\lambda, \quad (57)$$

где $I_{0\lambda}$ - спектральная интенсивность излучения абсолютно черного тела.

Закон Планка. Интенсивности излучения абсолютно черного тела $I_{0\lambda}$ и любого реального тела I_{λ} зависят от температуры и длины волны.

$$I_{0\lambda} = C_1 \lambda^{-5} / (e^{C_2/(\lambda T)} - 1), \quad (58)$$

где e - основание натуральных логарифмов; $C_1 = 3,74 \cdot 10^{-6} \text{ Вт} \cdot \text{м}^2$; $C_2 = 1,439 \cdot 10^{-2} \text{ мК}$ - постоянные излучения; λ - длина волны, м; T - температура излучающего тела, К.

Закон смещения Вина. Длина волны λ_{max} , отвечающая максимальному значению $I_{0\lambda}$, определяется законом смещения Вина

$$\lambda_{\text{max}} = 2,9 / T. \quad (59)$$

С увеличением температуры λ_{max} уменьшается, что и следует из закона.

Закон Стефана-Больцмана. В технических расчетах закон Стефана-Больцмана имеет вид

$$E_0 = C_0 (T/100)^4, \quad (60)$$

где $C_0 = 5,67 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \text{К}^4)$ - коэффициент излучения абсолютно черного тела.

Для серых тел интенсивность излучения меньше, чем для абсолютно черного тела, и, следовательно, $E < E_0$.

Отношение поверхностной плотности потока собственного интегрального излучения E данного тела к поверхностной плотности потока собственного интегрального излучения E_0 абсолютно черного тела при той же температуре называют *степенью черноты тела*

$$\varepsilon = E / E_0 < 1. \quad (61)$$

Плотность потока излучения серого тела равна

$$E = \varepsilon E_0 = \varepsilon C_0 (T/100)^4 = C (T/100)^4, \quad (62)$$

где $C = \varepsilon C_0$ - коэффициент излучения серого тела.

Закон Кирхгофа. Для всякого тела излучательная и поглощательная способности зависят от температуры и длины волны. Различные тела имеют различные значения E и A .

Зависимость между ними устанавливается законом Кирхгофа

$$A = E / E_0 = \varepsilon \text{ и } E / A = E_0. \quad (63)$$

Отношение лучеиспускательной способности тела (E) к его поглощательной способности (A) одинаково для всех серых тел, находящихся при одинаковых температурах и равно лучеиспускательной способности (E_0) абсолютно черного тела при той же температуре.

Закон Ламберта. Закон, устанавливающий зависимость интенсивности излучения от направления (рис.23), называется законом Ламберта

$$d^2 Q_n = dQ_n d\omega \cos\varphi. \quad (64)$$

Следовательно, наибольшее количество лучистой энергии излучается в перпендикулярном направлении к поверхности излучения, то есть при ($\varphi = 0$). С увеличением φ количество лучистой энергии уменьшается и при $\varphi = 90^\circ$ равно нулю.

Закон Ламберта полностью справедлив для абсолютно черного тела и для тел, обладающих диффузным излучением при $\varphi = 0-60^\circ$. Для полированных поверхностей закон Ламберта не применим. Для них лучеиспускание при угле φ будет большим, чем в направлении нормальном к поверхности.

Теплопередачей называется передача теплоты от горячего теплоносителя к холодному теплоносителю через стенку, разделяющую эти теплоносители. В котельных установках теплопередача осуществляется через многослойную стенку. Количественной характери-

стикой процесса теплопередачи является *коэффициент теплопередачи* K , который равен

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_n}{\lambda_n} + \frac{\delta_m}{\lambda_m} + \frac{\delta_{вн}}{\lambda_{вн}} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (65)$$

где $\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_{\text{п}}$ – суммарный коэффициент теплоотдачи (путем конвекции и излучения) от продуктов сгорания к стенке кипятильной трубы, Вт/(м²К); δ_n , δ_m , $\delta_{вн}$ – толщина слоев наружного загрязнения, металлической стенки и слоя внутренних отложений, м; λ_n , λ_m , $\lambda_{вн}$ – коэффициенты теплопроводности слоя наружного загрязнения, металлической стенки и слоя внутренних отложений, Вт/(м·К); α_2 – коэффициент теплоотдачи конвекцией от внутреннего слоя загрязнений к воде, Вт/м²·К.

Количество теплоты, передаваемое в единицу времени через единицу площади от одного теплоносителя к другому теплоносителю при разности температур между ними в один градус называется *тепловым потоком* и определяется по уравнению

$$Q = KF\Delta T, \quad (66)$$

где F – площадь поверхности нагрева, м²; ΔT – усреднённая по поверхности нагрева разность температур продуктов сгорания и нагреваемой воды (температурный напор), К.

1.7 Паросиловые установки

Паросиловая (паротурбинная) установка (ПТУ) – это тепловой агрегат, который используется для преобразования потенциальной энергии перегретого пара, получаемого в котлоагрегате в механическую энергию вращения ротора турбины. Паротурбинная установка состоит из турбоагрегата (паровой турбины), котла и вспомогательного оборудования. ПТУ устанавливают на конденсационных электростанциях (КЭС), электро- и теплоцентралях, они вырабатывают электро- и теплоэнергию, а также они включаются в какой-либо производственный цикл с целью полезного использования пара.

1.7.1 Устройство и классификация паровых турбин

Турбина - двигатель, у которого рабочие элементы вращаются с высокой скоростью под действием струи газа или пара. Кинетическая энергия струи является результатом преобразования потенциальной энергии рабочего тела — энергии сгоревшего топлива. Паровые турбины классифицируют по следующим признакам.

1. Назначению:

- главные турбины, предназначены для вращения винта;
- вспомогательные турбины, предназначены для привода насосов и электрогенераторов.

2. Числу корпусов:

- многокорпусные турбины, в которых проточная часть размещается в нескольких корпусах;
- однокорпусные турбины.

3. Расположению корпусов:

- горизонтальные;
- вертикальные.

4. Направлению вращения:

- реверсивные турбины, оборудованные турбиной заднего хода;
- нереверсивные.

5. Способу передачи мощности:

- прямодействующие турбины, у которых мощность передаётся непосредственно приводному механизму;
- турбины с передачей, у которых мощность передаётся через зубчатую или электропередачу.

6. Выпуску отработавшего пара:

- конденсационные турбины, у которых отработавший пар выпускается в конденсатор и превращается в нем в воду;
- турбины с противодавлением, у которых отработавший пар используется для подогрева.

7. Характеру рабочего процесса:

- чисто активные;
- активные со степенью реактивности;
- реактивные.

В *активных* турбинах рабочие лопатки выполнены такой формы, чтобы между ними образовались каналы постоянного сечения. Пар с большой скоростью поступает в межлопаточные каналы рабочего колеса и встречает на своем пути изогнутую лопатку (рис. 1.7),

которая отклоняет, поворачивает на некоторый угол струю, что вызывает возникновение центробежной силы, которая давит на вогнутую сторону лопатки, заставляя ротор вращаться. Далее пар, отклоненный лопатками турбины в сторону, противоположную первоначальному направлению, покидает рабочее колесо. Скорость пара на выходе из каналов рабочего колеса значительно меньше, чем скорость, с которой он подошел к ним, так как часть своей кинетической энергии газ отдал на работу вращения колеса. В активных турбинах не происходит расширения потока, давление его остается практически постоянным; поток только поворачивается, совершая работу.

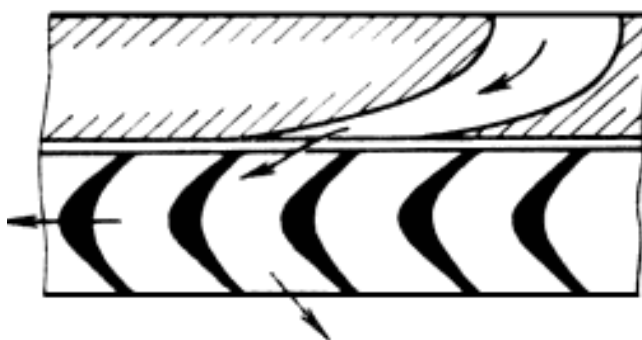


Рис. 1.7. Течение газа в активной турбине

В реактивных турбинах рабочие лопатки выполнены так, чтобы между ними образовались каналы, суживающиеся к выходу (рис. 1.8). Пар, проходя по этим каналам, будет продолжать расширяться, его скорость движения в каналах возрастает, и помимо центробежного давления от поворота потока лопатки испытывают еще и реактивное давление в направлении, обратном направлению истекающей из межлопаточных каналов струи газов.

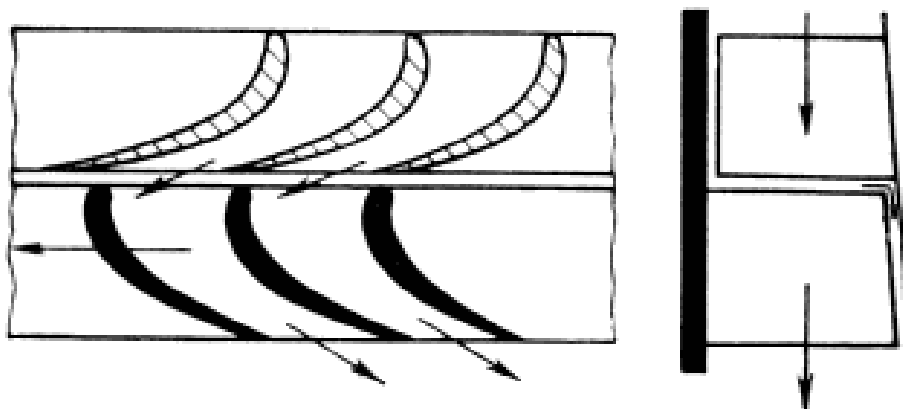


Рис.1.8. Течение газа в реактивной турбине

В паросиловых установках предпочтение отдается активным турбинам. Турбины, имеющие одно сопло и один диск, называют одноступенчатыми. Они имеют одну ступень давления. Схема простейшей одноступенчатой активной турбины показана на рисунке 1.9.

Свежий пар поступает в неподвижную насадку (сопло) 1 и в результате расширения преобразует свою потенциальную энергию в кинетическую, приобретая большую скорость. Далее пар поступает в каналы рабочих лопаток 2 и в результате поворота струи возникает динамическое давление на лопатки, под действием которого вращается диск 3 и вал 4 турбины.

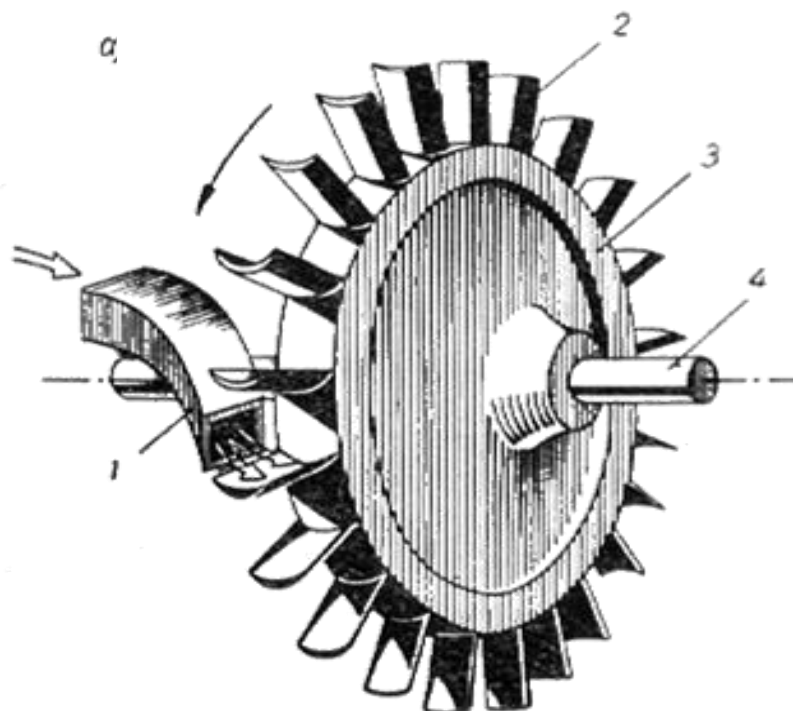


Рис. 1.9. Одноступенчатая паровая турбина

Одноступенчатые турбины просты по устройству, имеют малые размеры и массу, недороги в изготовлении. Однако из-за невозможности использования больших перепадов энтальпий (иначе будут получены большая скорость пара и недопустимо большая частота вращения вала ротора), следовательно, низкой экономичности и малой мощности. Одноступенчатые активные паровые турбины сегодня практически не изготавливают.

Большей экономичности турбины добиваются, используя несколько ступеней давления для срабатывания больших перепадов давления. Активная турбина с несколькими ступенями давления представляет собой последовательно расположенные одноступенча-

тые турбины, которые размещены в одном корпусе и работающие на общем валу. Корпус турбины разделён на ступени неподвижными диафрагмами, в которых установлены промежуточные сопла, обеспечивающие работу лопаток своей ступени. В местах прохода вала ротора сквозь диафрагмы, предусмотрены специальные уплотнения. Сопла первой ступени устанавливаются в корпусе. В таких турбинах перепад энтальпий срабатывается последовательно по ступеням, что обеспечивает большую мощность и высокую экономичность, при этом в соплах каждой ступени прирост скорости пара будет сравнительно небольшим.

Наряду с использованием турбин со ступенями давления применяют турбины со ступенями скорости.

Активная турбина со ступенями скорости, состоит из корпуса с установленными в нем соплами и ротора в виде вала и диска, на ободе которого расположены две линии рабочих лопаток (венцов). Между рабочими венцами неподвижно в корпусе закреплены направляющие лопатки, служащие для изменения направленности потока пара, поступающего на второй венец. Работа на направляющих лопатках не совершается. За счёт большого однократного расширения в соплах, пар поступает на первый рабочий венец на высокой скорости. В результате срабатывания скоростей пара в два приёма частота вращения ротора уменьшится примерно в два раза. Небольшое падение скорости пара на направляющем венце связано с потерями из-за изменения направленности потока пара и вредных сопротивлений.

Реактивные турбины изготавливаются в виде многоступенчатых турбин. Их проточная часть состоит из рядов рабочих и направляющих лопаток, каналы между которыми имеют суживающуюся форму. Расширение пара в неподвижных направляющих лопатках (как и в соплах) приводит к возрастанию его скорости и возникновению активной силы, направленной по ходу движения струи. Поступая в каналы рабочих лопаток такой же формы, пар всё равно в них расширяется, что приводит к образованию реактивной силы, направление которой противоположно направлению движения струи. Реактивная турбина имеет сравнительно несложную конструкцию и относительно малые скорости пара, что повышает КПД ступеней. Однако у неё наблюдаются существенные протечки пара, сквозь радиальный зазор на конце лопаток, особенно в ступенях высокого давления. В связи с

этим реактивные турбины строят реже, чем активные, и если строят, то чаще для работы в области невысоких давлений пара.

Комбинированные турбины широко используются в турбинах заднего хода, в приводах грузовых и питательных насосов, а также в качестве первой (регулирующей) ступени турбин турбогенераторов. Турбина, у которой в проточной части вначале имеются активные ступени, а далее реактивные, называется смешанной. В таких турбинах можно осуществить более экономичное сопловое регулирование и уменьшить относительную величину протечек сквозь радиальные зазоры у реактивных лопаток, поскольку пар, выходящий из активной части, поступает в реактивную часть с пониженным давлением. Смешанные турбины встречаются в главных агрегатах и в приводах к турбогенераторам.

1.7.2 Принцип действия паросиловых установок

В паросиловых установках процесс получения работы происходит следующим образом. Химическая энергия топлива при его сжигании превращается во внутреннюю энергию продуктов сгорания, которая затем в виде теплоты передается воде и пару в котле I и пароперегревателе II (рис.1.10).

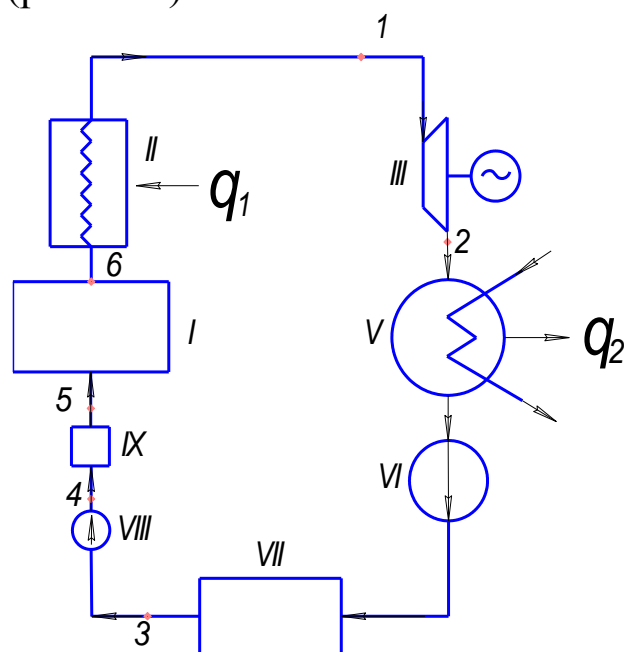


Рис. 1.10. Схема паросиловой установки

- 1 – котел; 2 – пароперегреватель; 3 – турбина; 4 – электрогенератор;
 5 – конденсатор; 6 – конденсационный насос; 7 – питательный блок;
 8 – питательный насос; 9 – подогреватель

Полученный пар направляется в паровую турбину III, где и происходит преобразование теплоты в механическую работу, а затем в электрическую энергию в электрогенераторе IV. Отработанный пар поступает в конденсатор V, где отдает теплоту охлаждающей воде. Полученный конденсат конденсационным насосом VI направляется в питательный блок VII, откуда питательная вода забирается питательным насосом VIII, сжимается до давления равного давлению в котле и подается через подогреватель IX в паровой котел.

1.7.3 Цикл Ренкина

Теоретическим циклом современной паросиловой установки является цикл Ренкина. В этом цикле осуществляется полная конденсация рабочего тела в конденсаторе, вследствие чего вместо громоздкого малоэффективного компрессора для подачи воды в котле применяют питательный водяной насос, который имеет малые габариты и высокий КПД. В цикле Ренкина возможно применение перегретого пара, что позволяет повысить среднеинтегральную температуру подвода теплоты и тем самым увеличить термический КПД цикла.

Характерные точки цикла (1, 2, 3, 4, 5, 6) показанные на рисунке 1.11, изображают состояние пара на $p\nu$ - и Ts -диаграммах. При изображении цикла принято, что вода является абсолютно несжимаемой жидкостью, что позволяет процесс сжатия воды в насосе считать происходящей по изохоре 3-4 в $p\nu$ -диаграмме, а на Ts -диаграмме рассматривать в виде точки 3,4, лежащей на пограничной кривой.

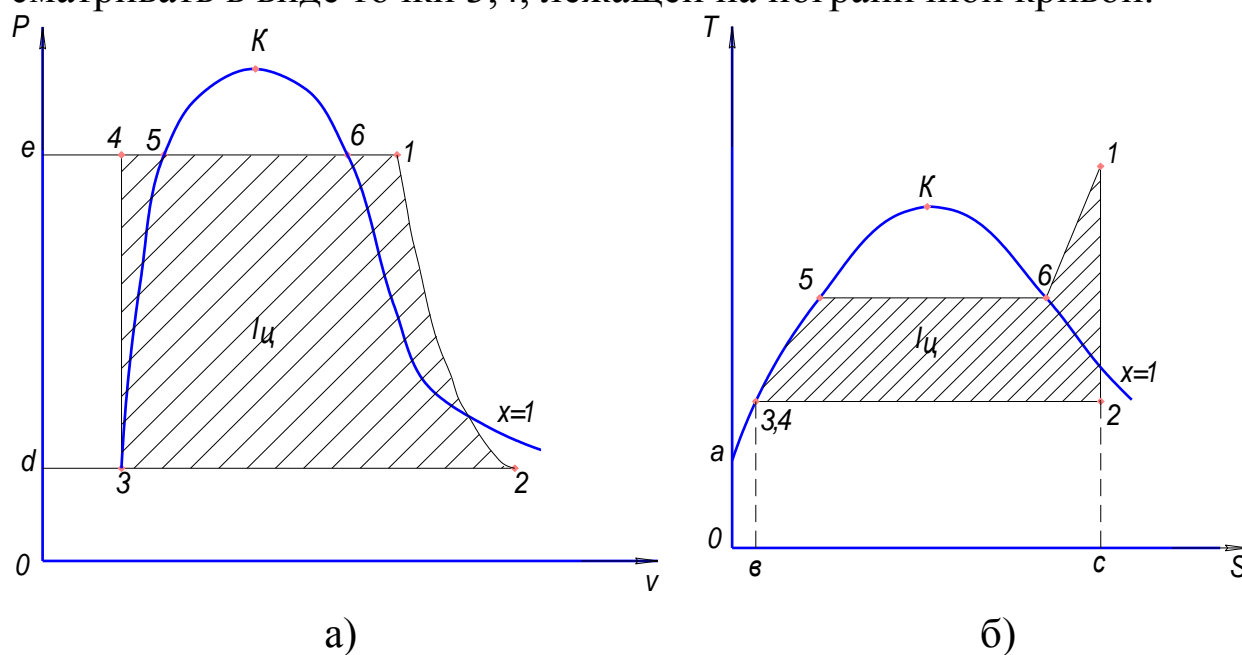


Рис.1.11. Цикл Ренкина: а) $p\nu$ -диаграмма; б) Ts -диаграмма

Процесс 4-5-6-1 является процессом получения перегретого пара в котлоагрегате, процесс 1-2 представляет собой адиабатное расширение пара в паровой турбине, а 2-3 – процесс конденсации. На основании свойств циклов и $p\nu$ - и Ts -диаграмм, заштрихованные площади на обеих диаграммах представляют собой работу, совершенную 1 кг пара. Эта работа может быть определена по Ts -диаграмме как разность площадей

$$l_{ц} = \text{пл. } 0a5612c0 - \text{пл. } 0a32c0.$$

Площадь $0a561c0$ является энтальпией h_1 точки 1, а площадь $0a32c0$ – энтальпией h_2 точки 2, поэтому

$$l_{ц} = h_2 - h_1 \quad (67)$$

Термический КПД кругового цикла

$$\eta_t = \frac{l_{ц}}{q_1}, \quad (68)$$

где q_1 – подводимая теплота, изображенная на Ts -диаграмме площадь $b3561cb$.

Так как $\text{пл. } b356cb = \text{пл. } 0a5612c0 - \text{пл. } 0a32c0 = h_2 - h_3$, где h_3 – энтальпия конденсатора при входе в котлоагрегат, то есть

$$\eta_t = \frac{h_2 - h_1}{h_2 - h_3}. \quad (69)$$

$$h_3 = 4,1868 \cdot t_k, \quad (70)$$

где t_k – температура конденсата; $4,1868$ кДж/кг·К – теплоемкость воды.

Для высоких начальных давлений пара (100 бар и выше) пренебрежение работой, затрачиваемой на питательный насос, может привести к ошибке η_t до $0,3 \div 0,5\%$. Работа насоса

$$l_n = v_3(P_4 - P_3) = h_4 - h_3 = h_4 - 4,1868 \cdot t_k, \quad (71)$$

где h_4 – энтальпия воды на выходе из насоса (или при входе в котлоагрегат).

Поэтому термический КПД цикла с учетом работы насоса определится

$$\eta_t = \frac{l_{ц}}{g_1} = \frac{h_1 - h_2 - l_H}{h_1 - h_4} = \frac{h_1 - h_2 - l_H}{h_1 - 4,1868 \cdot t_K - l_H}. \quad (72)$$

1.7.4 Влияние основных параметров на термический КПД цикла Ренкина

а) влияние начального давления пара

При увеличении начального давления пара при одном и том же конечном давлении в конденсаторе, термический КПД паротурбинной установки значительно увеличивается, а удельный расход пара уменьшается. Увеличение начального давления с P_1 до P_2 связано с повышением температуры насыщенного пара, то есть с повышением средней температуры подвода теплоты, что ясно видно из Ts -диаграммы (рис.1.12). Возрастание средней температуры подвода теплоты и отвода теплоты в конденсаторе при $P=const$ приводит к увеличению КПД цикла.

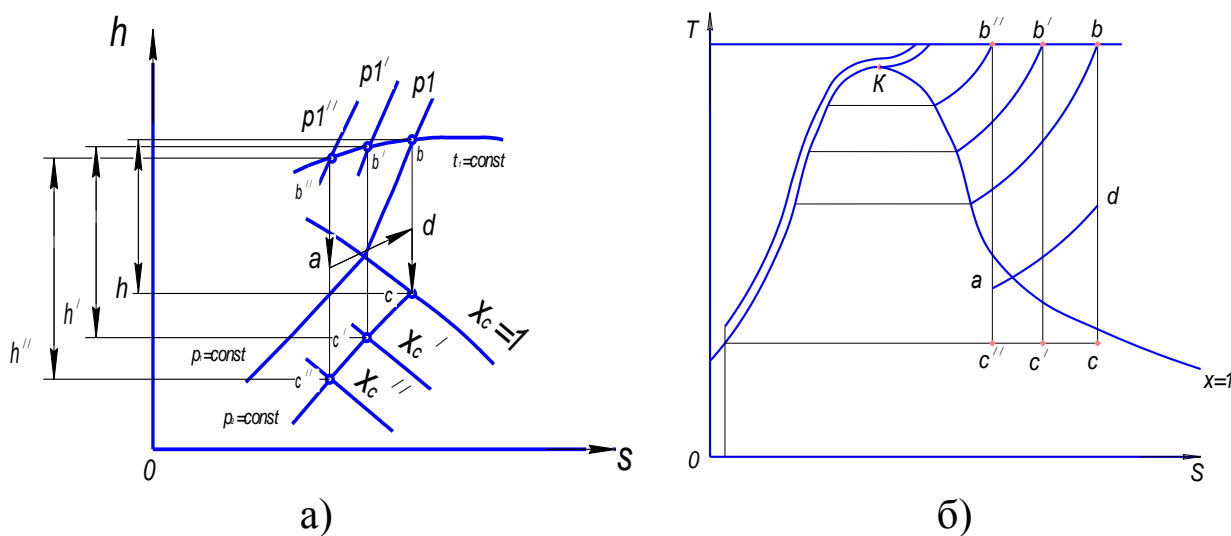


Рис. 1.12. Влияние повышения начального давления на экономичность цикла Ренкина: а) $p-v$ - диаграмма цикла Ренкина; б) Ts - диаграмма цикла Ренкина

Из $h-s$ диаграммы также можно установить, что с увеличением начального давления пара увеличивается адиабатное теплопадение $h'_{1'}$, но повышается конечная влажность пара и капли воды разрушают лопат-

ки последних ступеней турбины. Конечная влажность пара составляет свыше 13-14%.

б) влияние начальной температуры пара

При повышении начальной температуры пара происходит увеличение КПД цикла, так как увеличивается среднеинтегральная температура подвода теплоты и при этом растет адиабатное теплопадение h (рис.1.13). Увеличение КПД цикла будет более значительным, если с увеличением температуры будет возрастать и начальное давление пара. Повышение температуры перегрева пара ограничивается способностью металла, из которого сделаны трубы, выдерживать большие давления при высоких температурах, то есть конечные параметры пара определяются наличием относительно дешевых жаропрочных металлов.

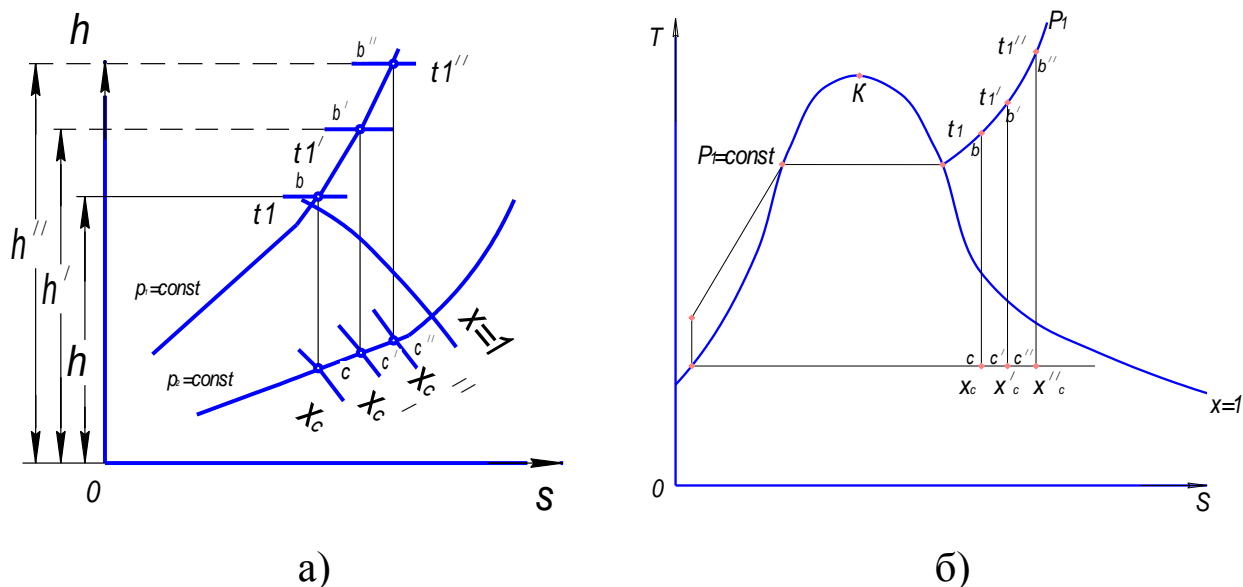


Рис. 1.13. Влияние повышения начальной температуры на экономичность цикла Ренкина: а) p - v -диаграмма цикла Ренкина; б) T - s -диаграмма цикла Ренкина

в) влияние конечного давления в конденсаторе

Понижение давления в конденсаторе является особенно эффективным средством для повышения термического КПД установки. Из диаграммы h - s видно, что понижение давления в конденсаторе значительно уменьшает среднеинтегральную температуру отвода теплоты и увеличивает адиабатное теплопадение h , и следовательно КПД цикла (рис. 1.14).

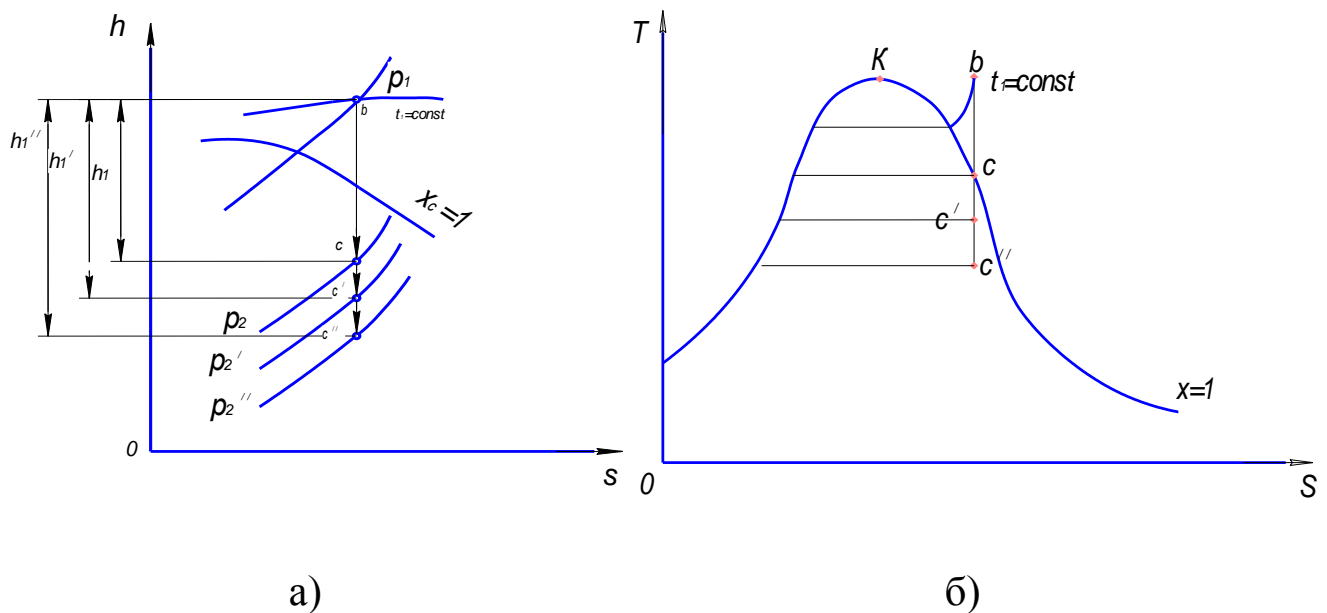


Рис. 1.14. Влияние понижения конечного давления в конденсаторе на влажность пара в конце расширения цикла Ренкина:
 а) p - v -диаграмма цикла Ренкина; б) T - s -диаграмма цикла Ренкина

Однако выбор конечного давления в конденсаторе определяется температурой охлаждения воды, так как для интенсивного теплообмена $t_{\text{пара}} - t_{\text{воды}} = 10 \div 15\text{C}^0$.

1.7.5 Пути повышения экономичности теплосиловых установок

а) Регенеративный цикл

Регенеративным циклом называется цикл, в котором питательная вода, поступающая в котлоагрегат, нагревается паром, частично отбираемым при его расширении из турбины.

Пар (1 кг), полученный в котлоагрегате 1, направляется в турбину 2, где происходит его расширение до давления в конденсаторе 3 (рис.1.15). Однако не весь пар, вступивший в турбину, доходит до конденсатора, некоторое его количество g_m и g_n , отводятся после частичного совершения ими работы из турбины, и направляется в подогреватели 5 и 6, где в результате их конденсации происходит подогрев питательной воды, поступившей в котлоагрегат.

Конденсат этих потоков пара направляется во всасывающую линию насоса IV, там он смешивается с конденсатом части пара, прошедшим через всю турбину в количестве $(1 - g_{жс} - g_n)$. В котлоагрегат, таким образом, поступает такое же количество питательной воды, какое выходит из него в виде пара. Работа 1 кг пара, вступающего в турбину, определяется по участкам, так

на участке 1-*m* $l_1 = i_1 - i_m$,
 на участке *m*-*n* $l_2 = (i_m - i_n)(1 - g_m)$,
 на участке *n*-2 $l_3 = (i_n - i_2)(1 - g_{ж} - g_n)$,
 суммирование дает

$$l'_{ц} = l_1 + l_2 + l_3 = (i_1 - i_2) - (i_{ж} - i_2)g_{ж} - (i_n - i_2)g_n. \quad (73)$$

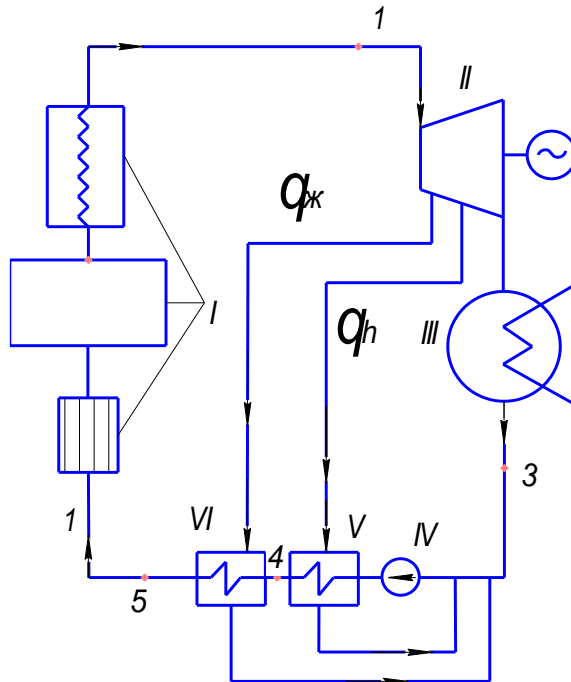


Рис. 1.15. Схема установки:

1 – котлоагрегат, 2 – турбина, 3 – конденсатор, 4 – насос,
 5, 6 – подогреватели

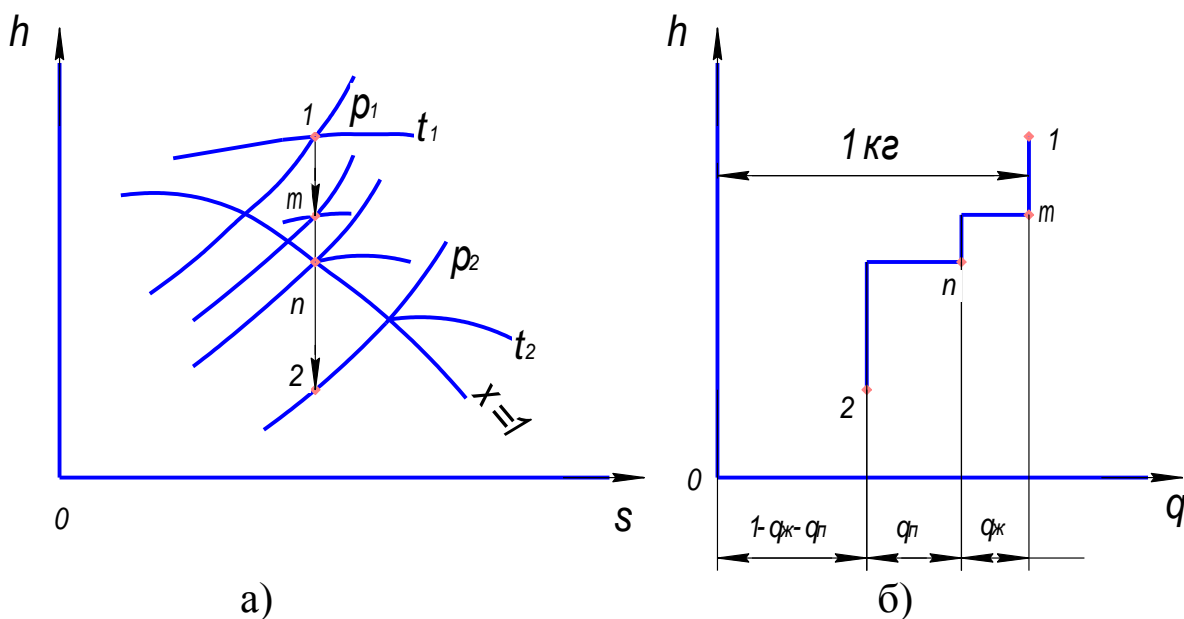


Рис.1.16. Регенеративный цикл: а) p v -диаграмма регенеративного цикла;
 б) T s -диаграмма регенеративного цикла

Температура воды в точке 5 перед входом в котлоагрегат в регенеративном цикле выше, чем в цикле Ренкина (точка 3) (рис.1.16), т.е. $t_5 < t_3$, поэтому распад теплоты на получение 1 кг пара в регенеративном цикле отказывается меньшим и составляет

$$q_1' = (h_1 - 4,1868 \cdot t_5) < (h_1 - 4,1868 \cdot t_3). \quad (74)$$

Следовательно

$$\eta_t' = \frac{l_{ц}'}{q_1'} > \eta_t = \frac{l_{ц}}{q_1}. \quad (75)$$

Термический КПД регенеративного цикла больше термического КПД цикла Ренкина.

б) Цикл с вторичным перегревом пара

Исследование работы паросиловой установки показывает, что повышение начального давления и уменьшение конечного давления ведет к увеличению КПД цикла. Однако одно повышение начального давления увеличивает конечную влажность пара. Одним из способов повышения степени сухости пара на выходе из турбины является вторичный его перегрев. Этот способ состоит в том, что перегретый пар из котла с начальным давлением и температурой поступает в первую ступень турбины, в которой расширяется до состояния 2 (процесс 1-2), после чего выводится из турбины и направляется во вторичный перегреватель, где при $P=const$ вновь перегревается (процесс 2-3) и возвращается во вторую ступень турбины с состоянием точки 3 (рис. 1.17).

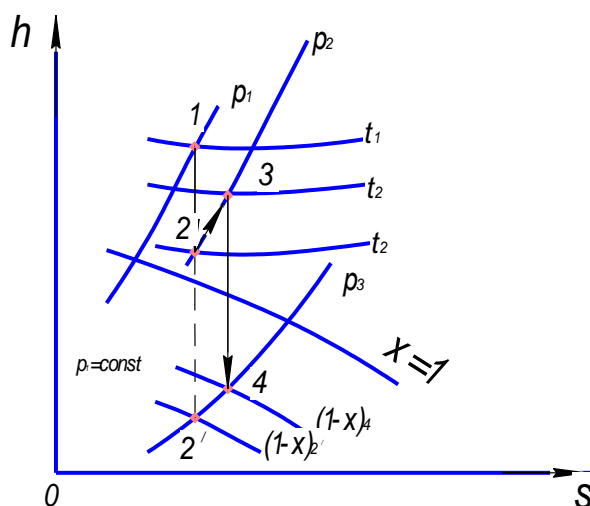


Рис. 1.17. Цикл с вторичным перегревом пара

Во второй ступени пар расширяется до конечного давления в конденсаторе (процесс 3-4). При отсутствии вторичного перегрева пара процесс расширения заканчивался бы в точке 2'. В точке 2' недопустимо большое значение конечной влажности $(1-x)_{2'}$.

в) Бинарный цикл

Вода, как рабочее тело обладает существенным недостатком, заключающемся в том, что при сравнительно невысокой критической температуре ($t_{кр}=374,13^{\circ}\text{C}$) она имеет высокие критические давления ($22,129\text{ МПа}$). В результате для увеличения термического КПД цикла надо повышать начальную температуру пара в сочетании с высоким начальным давлением, что ограничивается имеющимися жаропрочными металлами.

КПД цикла Ренкина можно было бы увеличить, если бы удалось найти рабочее тело со значительно более высокой температурой, чем у воды, при умеренном критическом давлении. При этом в области низких температур, давление насыщения рабочего тела не должно быть слишком малым. Однако такого рабочего тела до сих пор найти не удалось. Поэтому возникла идея сложного цикла с двумя рабочими телами – так называемые бинарные циклы. В таком цикле одно рабочее тело должно иметь высокую критическую температуру при сравнительно низком давлении. Это рабочее тело используется в цикле, осуществляемом в области высоких температур. Другое рабочее тело должно иметь сравнительно высокое давление насыщения при температуре окружающей среды. Второе рабочее тело используется в цикле, осуществляемом в области низких температур. Соединение этих двух циклов дает возможность значительно расширить общий теплоперепад температур и тем самым увеличить общий термический КПД по сравнению с пароводяным циклом (рис. 1.18). В качестве первого рабочего тела используют ртуть ($t_{кр}=1420^{\circ}\text{C}$). В области низких температур на нижней изобаре цикла более подходящим рабочим телом является вода. Об экономичности бинарного цикла можно судить по TS -диаграмме.

Коэффициент заполняемости бинарного цикла определяется отношением, в котором в результате перегрева пара была бы достигнута та же предельно высокая начальная температура (точка 1), что и для бинарного цикла

$$\alpha_{\text{бин}} = \frac{\text{пл.12341} + \text{пл.1/2/3/4/5/1/}}{\text{пл.1/2/3/61/}},$$

$$\alpha_{\text{бин}} \geq \alpha_{\text{Ренкина}}. \quad (76)$$

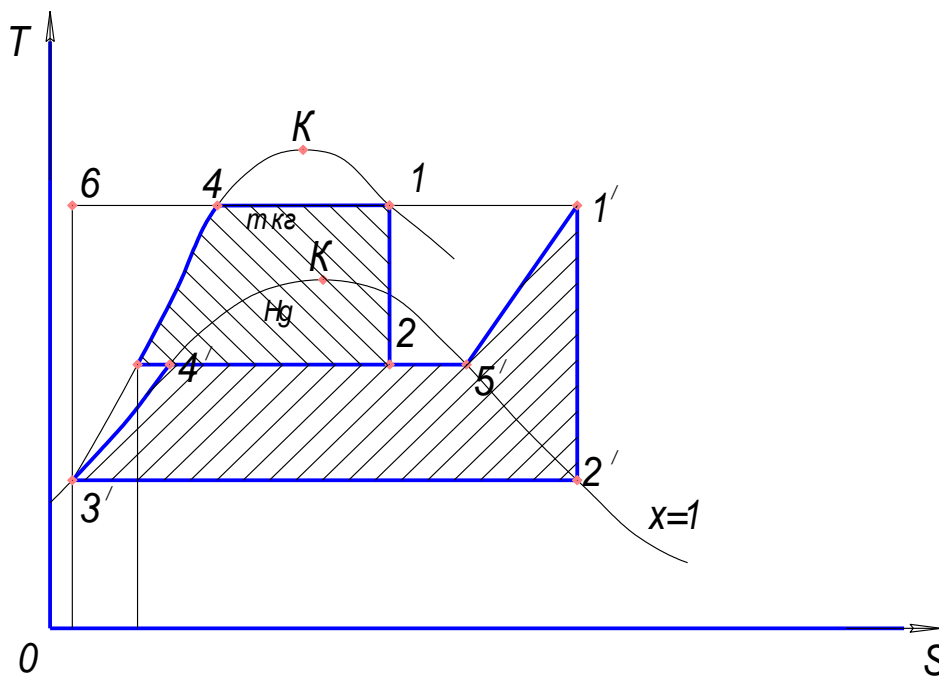


Рис.1.18. Ts -диаграмма бинарного цикла

Химическая энергия топлива, сжигаемого в ртутном котле, расходуется на получение m кг ртутного пара и перегрев 1 кг водяного пара в пароперегревателе, расположенного в газоподогревателе ртутного котла.

Затраченная на это теплота составляет

$$Q_{\text{бин}} = m(i_1 - i_3) + (i_{1'} - i_{5'}). \quad (77)$$

Работа в бинарном цикле растет значительно быстрее, чем работа, затрачиваемая на получение ртутного пара и перегрев водяного пара по сравнению с самостоятельным циклом Ренкина и поэтому всегда $\eta_t^{\text{бин}} > \eta_t$, что подтверждается практикой.

г) Основы теплофикации

Термический КПД цикла Ренкина при самых благоприятных условиях не превышает 50%, и если учесть все потери, то эффективный КПД не будет превышать 30-35%. Наибольшая потеря теплоты

происходит в конденсаторе. Применяющаяся для конденсации пара вода, имеет невысокую конечную температуру, при которой ее практически использовать нельзя. Если же повысить конечное давление P_2 до 0,1-0,2 МПа, то отработавший пар в турбине можно использовать для коммунально-бытовых нужд населения. Если конечное давление повысить до 0,15-0,5 МПа, то отработавший пар может быть использован для производственных нужд фабрик и заводов. В обоих случаях теплота сжигаемого топлива используется сначала для выработки электроэнергии, а затем в нагревательных приборах самого различного назначения (рис.1.19).

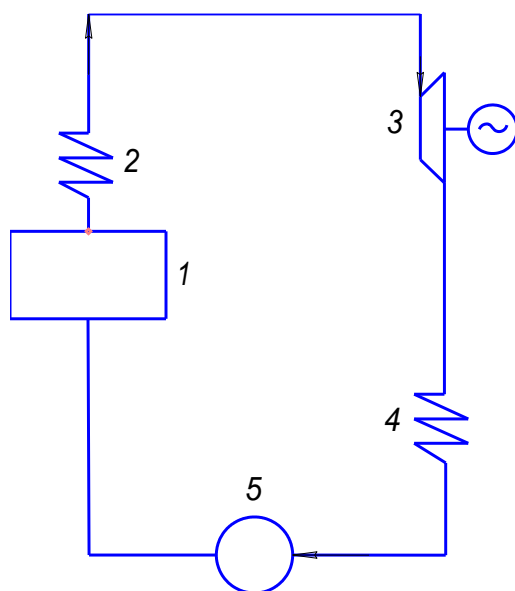


Рис. 1.19. Схема ТЭЦ

1 – паровой котел, 2 – пароперегреватель, 3 – паровая турбина с противодавлением P_2 , 4 – тепловые потребители, 5 – насос нагнетательный

Но степень использования теплоты в установке при этом возрастает. Такие электростанции называются теплоэлектроцентралями (ТЭЦ). Конденсатор в этой установке отсутствует. Чем выше P_2 , тем меньше выработка механической работы, тем меньше η_t цикла

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{l}{q_1} \quad (78)$$

$$k = \frac{l + q_2}{q_1}, \quad (79)$$

где l – теплота, превращенная в работу, q_2 – теплота, использованная потребителями.

Контрольные вопросы

1. Чем отличаются идеальные газы от реальных?
2. Какими уравнениями описываются свойства реальных газов?
3. Уравнение Ван-дер-Ваальса для 1 кг реального газа.
4. Что называется обратимым процессом?
5. Получите уравнение 2-го закона термодинамики для необратимого процесса.
6. От чего зависит КПД необратимого цикла Карно?
7. Что называется водяным паром?
8. Что такое степень сухости и степень влажности водяного пара?
9. Напишите уравнение 1-го закона термодинамики для потока.
10. Что такое сопло и диффузор?
11. Какие формулы используются при расчете массового расхода и скорости реального газа?
12. Какой процесс называется дросселированием?
13. Что называется эффектом Джоуля-Томсона? Напишите уравнение.
14. Как осуществляется перенос теплоты в котельных установках?
15. Что такое теплопроводность, конвекция, излучение?
16. От чего зависит количество теплоты, передающееся путем теплопроводности, конвекции, излучения?
17. Что характеризует коэффициент теплопроводности?
18. Перечислите факторы, влияющие на процесс теплоотдачи.
19. Формулировки законов Планка, Кирхгофа, Ламберта.
20. Что такое теплопередача?
21. Классификация паровых турбин.
22. Принцип действия паросиловых установок.
23. Опишите влияние основных параметров на термический КПД цикла Ренкина.
24. Укажите пути повышения КПД паросиловых установок.
25. Что такое теплофикация? Выполните анализ данного цикла, пользуясь TS-диаграммой.

ЧАСТЬ 2

Теоретические и методологические основы взаимодействия с дисциплиной «Топливо и смазочные материалы»

В котельных установках происходит процесс преобразования химической энергии топлива в тепловую энергию рабочего тела, поэтому очень важно знать состав и характеристику различных видов топлива, а также законы процессов горения. Ниже приведены основные необходимые разделы дисциплины «Топливо и смазочные материалы», в дальнейшем позволяющие улучшить изучение дисциплины «Эксплуатация теплоэнергетических установок».

2.1 Состав и характеристика топлива

Топливом называется горючее вещество, используемое в качестве источника получения теплоты в теплоэнергетических установках. Выделившаяся в результате сгорания топлива тепловая энергия используется для получения рабочего тела – водяного пара или горячей воды, затем используемых в технологических и отопительных установках и для производства электроэнергии.

По агрегатному состоянию топливо разделяют на *твердое, жидкое и газообразное*, по происхождению – *естественное и искусственное*. В зависимости от типа реакций, в результате которых выделяется теплота из топлива, различают *органическое и ядерное топливо*.

В *органических топливах* теплота выделяется в результате химической реакции окисления его горючих частей при участии кислорода, а в *ядерных топливах* – в результате распада деления ядер тяжелых элементов (урана, плутония и так далее). Для теплоснабжения сельскохозяйственного производства используется в основном органическое топливо (рис.2.1).

Элементарный состав твердого и жидкого топлива дается в процентах к массе 1 кг топлива. При этом различают *рабочую, сухую, горючую и органическую массы топлива*.

Рабочая масса – это масса и состав топлива, которое поступает к потребителю и подвергается сжиганию. *Сухая масса* – состав топлива, высушенного при $t=105-110^{\circ}\text{C}$, то есть обезвоженная масса. *Го-*

рючая масса – состав топлива, используемый как горючий материал (обезвоженная и обеззоленная масса).

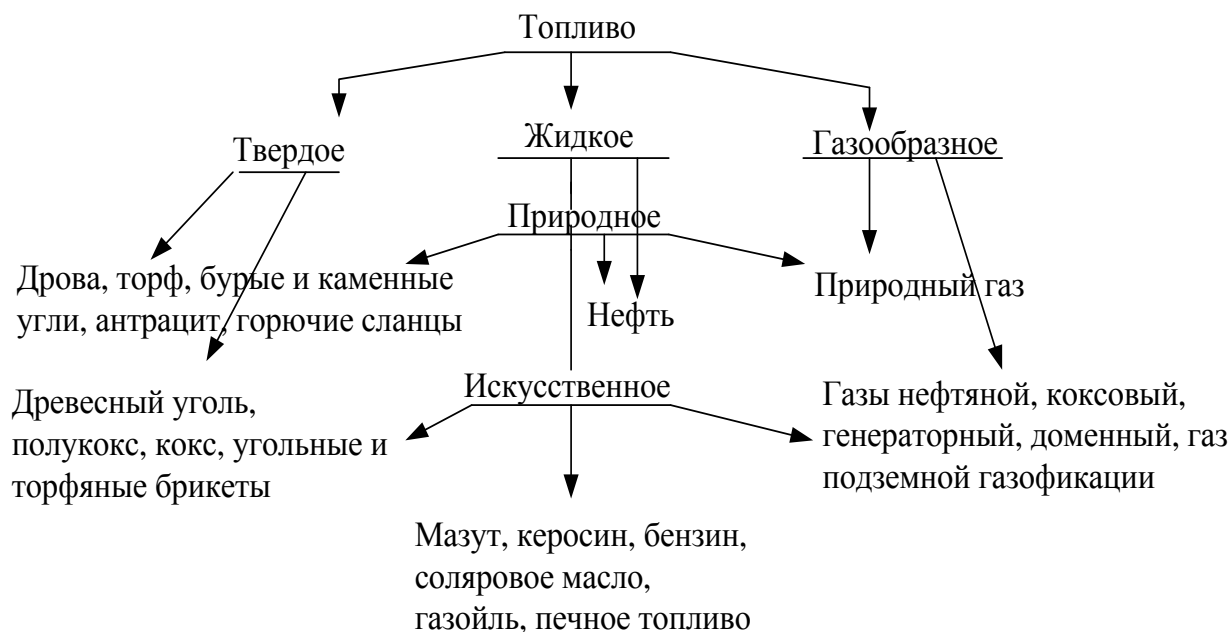


Рис. 2.1. Классификация органических топлив

Состав рабочей, горючей, сухой и органической масс обозначается соответственно индексами "р", "с", "з" и "о", и выражается следующими равенствами соответственно

$$C^p + H^p + S_{л}^p + N^p + O^p + A^p + W^p = 100\% , \quad (80)$$

$$C^c + H^c + S_{л}^c + N^c + O^c + A^c = 100\% , \quad (81)$$

$$C^z + H^z + S_{л}^z + N^z + O^z = 100\% , \quad (82)$$

$$C^o + H^o + S_{орг}^o + N^o + O^o = 100\% . \quad (83)$$

Органическая масса топлива в отличие от горючей массы содержит только органическую серу и не включает колчеданную:

$$S_{орг}^o = S_{л}^o - S_{к}^o .$$

Твердые и жидкие топлива состоят из *горючих* (углерода, водорода, летучей серы; органические и колчеданные соединения) и *негорючих* (азота и кислорода) элементов и *балласта* (золы, влаги).

Основным горючим компонентом горючей массы твердого и жидкого топлива является углерод (от 40% в древесине, до 93% в антраците). Углерод обеспечивает наибольшую теплоту сгорания – 32,8 МДж/кг.

Водород – составная часть любого топлива. При сгорании водорода выделяется 143,64 МДж/кг, его содержание варьирует от 2% в антраците до 10,5% в мазуте.

Содержание серы в горючей массе твердых и жидких топлив составляет 0,5-9%, при сгорании серы выделяется 10,92 МДж/кг. При сгорании серы образуется сернистый газ, который является токсичным и коррозионно-активным.

Негорючие элементы – азот и кислород являются внутренним балластом топлива, снижая в нем содержание углерода и водорода. В твердых топливах содержание азота не превышает 2% в антраците, в торфе содержится более 35%. Азот является вредным компонентом, так как при его сжигании образуются вредные оксиды.

Зная состав рабочей массы топлива, можно получить составы расчетных масс. Приведение элементного состава топлива от одной массы к другой производится с помощью пропорции или соответствующих коэффициентов.

Газообразное топливо представляет собой смесь разных горючих (CO , H_2 , CH_4 , C) и негорючих (O_2 , N_2 , CO_2) и малого количества водяного пара. Состав газового топлива определяется процентным содержанием соответствующих газов. Для сухого топлива данный состав определяется

$$CO + H_2 + \sum C_m H_n + H_2S + CO_2 + N_2 + O_2 = 100,$$

где CO , H_2 , $\sum C_m H_n$, H_2S - горючая смесь газообразного топлива, %;

$CO_2 + N_2 + O_2$ – негорючая часть газообразного топлива, %;

$\sum C_m H_n$ – суммарное содержание углеводородов, %.

Влажность топлива. Общую влажность топлива разделяют на внешнюю и гидратную. Внешняя – это влага атмосферного воздуха, поверхностные и грунтовые воды, проникшие в поры топлива, удаля-

ется подсушкой топлива. Гидратная – это коллоидная влага топлива и влага, входящая в гидратную структуру химических соединений минеральной части топлива. С увеличением возраста топлива количество коллоидной влаги существенно снижается, но для ее удаления требуется нагревание топлива при очень высоких температурах.

Средняя влажность топлива в рабочем состоянии составляет в процентах: для торфа - 50; сланцев - 13-17; каменного угля - 5-14 и антрацита - 5-8. Бурые угли в зависимости от влажности делят на 3 группы: группа Б1 – более 40% влажности; группа Б2 – 30-40%; группа Б3 – менее 30%.

Зола топлива. В состав золы входят преимущественно соли щелочных и щелочно-земельных металлов, окислы железа, алюминия, а также сульфатная сера. Минеральные остатки, образующиеся после сгорания топлива, имеют вид либо сыпучей массы (зола), либо сплавленных кусков (шлак). При высоких температурах зола размягчается, а затем плавится. Размягченная зола и шлак прилипают к стенкам обмуровки топki, уменьшая сечение газоходов, откладываются на поверхностях нагрева, увеличивая тем самым термическое сопротивление в процессе теплопередачи газов к нагреваемой среде, забивают отверстия для прохода воздуха в колосниковой решетке, обволакивают частицы топлива, затрудняя их сжигание.

Различные виды топлива содержат разное количество золы. Например, в процентах: древесина–1; торф–10; кузнецкий уголь–10-20; подмосковный бурый уголь–30; сланцы–60. Жидкое топливо (мазут) содержит 0,2-1% минеральных примесей.

Истинная зольность рабочей массы определяется по формуле

$$A_u^p = A^p - \left[2,5(S_a^p - S_c^p) + 0,375S_k^p \right] \left[(100 - W^p) / 100 \right], \quad (84)$$

где S_a^p - содержание серы в лабораторной золе в процентах к массе топлива; S_c^p - содержание сульфатной серы в топливе, %.

Летучие вещества. При нагревании твердого топлива до 870-1100 К без доступа окислителя выделяются парогазообразные вещества, которые называются летучими. Они являются продуктами распада сложных органических веществ, содержащихся в органической массе топлива. В состав летучих веществ входят азот, кислород, во-

дород, окись углерода, углеводородные газы - метан, этан и так далее, а также водяные пары.

Кокс - твердый остаток, который получается после нагревания топлива (без доступа окислителя) и выхода летучих веществ. В состав кокса входят остаточный углерод и зола. При низких температурах в твердом остатке кроме золы может оказаться часть элементов (C , H , N , $S_{л}$). Тогда твердый остаток называется полукоксом. По своим механическим свойствам кокс может быть порошкообразным, слабоспекшимся и спекшимся.

В зависимости от выхода летучих веществ и характеристики кокса каменные угли разделяются на 10 марок: длиннопламенный - Д, газовый - Г, газовый жирный - ГЖ, жирный - Ж, коксовый жирный - КЖ, коксовый - К, коксовый второй - К2, отощенный спекающийся - ОС, слабоспекающийся -СС, тощий - Т.

Теплота сгорания. Одной из основных характеристик любого вида топлива является теплота сгорания, то есть то количество теплоты, которое может быть получено при полном сгорании единицы массы или объема топлива. Полным сгоранием называется такое, при котором горючие компоненты топлива C , H и $S_{л}$ полностью окисляются кислородом. Теплоту сгорания твердого и жидкого топлива относят к 1 кг , а газового – к 1 м^3 при нормальных условиях.

Различают *низшую и высшую* теплоту сгорания. В высшую теплоту сгорания входит количество теплоты, которое может быть выделено при конденсации водяных паров, находящихся в продуктах сгорания топлива.

При известном элементарном составе твердого и жидкого топлива теплоту их сгорания (кДж/кг) определяют по эмпирическим формулам, предложенным Д.И.Менделеевым

$$Q_{н}^p = 340C^p + 1035H^p - 109(O^p - S_n^p) - 25W^p, \quad (85)$$

$$Q^s = 340C^p + 1260H^p - 109(O^p - S_n^p). \quad (86)$$

Низшую теплоту сгорания сухого газа (кДж/м³) определяют по объемному составу, в процентах, и известной теплоте сгорания компонентов

$$Q_n^p = 358CH_4 + 640C_2H_6 + 915C_3H_8 + 1190C_4H_{10} + \\ + 1465C_5H_{12} + 126,5CO + 107,5H_2 + 234H_2S. \quad (87)$$

Если в состав газа входят неизвестные углеводородные компоненты (при условии, что содержание метана известно), то сумму углеводородов условно принимают как содержание этана и теплоту сгорания рассчитывают по формуле, аналогичной уравнению (87).

2.2 Горение топлива. Физический процесс горения топлива

Горение топлива – химическая реакция соединения горючих элементов топлива с окислителем (кислород воздуха) при высокой температуре, сопровождающейся интенсивным выделением теплоты.

Процессы горения разделяют на 2 группы: *гомогенное горение* – горение газообразных горючих (характеризуется системой "газ+газ"); *гетерогенное горение* – горение твердых и жидких горючих (характеризуется системой "твердое тело+газ" или "жидкость+газ").

Процесс горения может протекать с разной скоростью – от медленного до мгновенного.

Медленное горение – самовозгорание твердого топлива при его хранении на складах.

Мгновенное горение представляет собой взрыв. В теплоэнергетических установках практическое значение имеет такая скорость реакции, при которой происходит устойчивое горение, то есть при постоянной подаче в зону горения топлива и окислителя. При этом соотношение концентрации топлива и окислителя должно быть определенным. При нарушении этого соотношения (богатая смесь, бедная смесь) скорость реакции снижается и уменьшается тепловыделение на единицу объема.

Горение – это, в основном, химический процесс, так как в результате его протекания происходят качественные изменения состава реагирующих масс. Одновременно химическая реакция горения сопровождается и физическими явлениями: перенос теплоты, диффузионный перенос реагирующих масс и другие. Время горения $t_{гор}$ определяется скоростью наиболее медленного процесса, оно складывается из времени протекания физических $t_{физ}$ и химических процессов $t_{хим}$

$$t_{гор} = t_{физ} + t_{хим} . \quad (88)$$

Время протекания физических процессов состоит из времени, необходимого для смешивания топлива с окислителем $t_{см}$ и времени, в течение которого топливо – воздушная смесь – подогревается до температуры воспламенения $t_в$

$$t_{физ} = t_{см} + t_в. \quad (89)$$

Горение газообразного топлива. Минимальная температура, при которой происходит воспламенение смеси, называется *температурой воспламенения*. Значение этой температуры для различных газов неодинаково и зависит от теплофизических свойств горючих газов, содержания горючего в смеси, условий зажигания, условий отвода теплоты в каждом конкретном устройстве и так далее. Горючий газ в смеси с окислителем сгорает в факеле.

Различают два метода сжигания газа в факеле – *кинетический и диффузионный*. При *кинетическом сжигании* до начала горения газ предварительно смешивается с окислителем. Газ и окислитель подаются сначала в смешивающее устройство горелки. Горение смеси осуществляется вне пределов смесителя. При этом скорость горения не должна превышать скорости химических реакций горения $t_{гор} = t_{хим}$.

Диффузионное горение происходит в процессе смешивания горючего газа с воздухом. Газ поступает в рабочий объем отдельно от воздуха. Скорость процесса будет ограничена скоростью смешивания газа с воздухом $t_{гор} = t_{физ}$.

Кроме этого существует *смешанное* (диффузионно-кинетическое) горение. При этом газ предварительно смешивается с некоторым количеством воздуха, затем полученная смесь поступает в рабочий объем, где отдельно подается остальная часть воздуха.

В топках котельных агрегатов в основном используют кинетический и смешанный способы сжигания топлива.

Горение твердого топлива. Процесс горения состоит из следующих стадий, иногда частично накладывающихся одна на другую: подсушка топлива и нагревание до температуры начала выхода летучих веществ; воспламенение летучих веществ и их выгорание; нагревание кокса до воспламенения; выгорание горючих веществ из кокса.

Выход летучих веществ у различных топлив начинается при различных температурах: у торфа при 550-660К, у бурых углей при 690-710К, у тощих углей и антрацита при 1050-1070К.

Горение жидкого топлива. Основным жидким топливом, используемым в теплоэнергетике и промышленной теплотехнике, является мазут. В установках небольшой мощности используют смесь технического керосина со смолами.

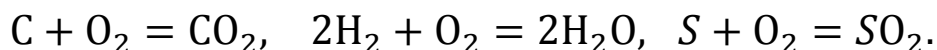
Наибольшее применение получил метод сжигания в *распыленном состоянии*. Этот метод позволяет значительно ускорить его сгорание и получить высокие тепловые напряжения объемов топочных камер вследствие увеличения площади поверхности контакта топлива с окислителем.

Процесс горения жидкого топлива делится на следующие стадии: нагревание и испарение топлива; образование горючей смеси; воспламенение горючей смеси от постороннего источника (искры, раскаленной спирали и тому подобное); собственно горение смеси.

2.3 Расчеты процессов горения топлива

2.3.1 Расход воздуха, необходимого для горения

В процессе горения топлива происходят следующие реакции



При расчете теоретического расхода воздуха для сжигания 1 кг твердого или газообразного топлива m^3/kg , учитывается, что плотность кислорода и его содержание в сухом воздухе при нормальных условиях равны соответственно $1,43 \text{ кг/м}^3$ и 21% и рассчитывается по уравнению

$$V^0 = 0,0889 \left(C^P + 0,375 S_l^P \right) + 0,265 H^P - 0,033 O^P. \quad (90)$$

Для сухого газообразного топлива, m^3/m^3

$$V^0 = 0,0476 \left[2CH_4 + \sum_{i=1}^n \left(m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n \right]. \quad (91)$$

При горении топлива количество воздуха, подаваемого в топку несколько больше теоретически необходимого для его лучшего смешивания с топливом. Отсюда действительный объем воздуха, подаваемого в топку равен

$$V_B = \alpha_n V^0, \quad (92)$$

где $\alpha_n > 1$ – коэффициент избытка воздуха в зависимости от вида топлива и способа его сжигания равный 1,05-1,5.

2.3.2 Состав и объем продуктов сгорания

При горении топлива стремятся добиться его полного сгорания, поэтому газообразные продукты не содержат кислород и состоят из CO_2 , SO_2 , N_2 и H_2O .

Теоретический объем азота, приведенный к нормальным условиям, для жидкого, твердого и газообразного топлива рассчитывается по уравнению

$$V_{N_2}^0 = 0,79V^0 + 0,8 \frac{N^P}{100}. \quad (93)$$

Теоретический объем трехатомных газов для твердого и жидкого топлива

$$V_{RO_2}^0 = V_{CO_2}^0 + V_{SO_2}^0 = 1,87 \frac{C^P + 0,375S_{\text{л}}^P}{100}. \quad (94)$$

Для газообразного топлива

$$V_{RO_2}^0 = 0,01(CO_2 + \sum m C_m H_n). \quad (95)$$

Теоретический объем водяных паров для жидкого и твердого топлива

$$V_{H_2O}^0 = 0,111H^P + 0,0124W^P + 0,0161V^0. \quad (96)$$

Для газообразного топлива

$$V_{H_2O}^0 = 0,01 \left(2CH_4 + 0,12\alpha + \sum \frac{n}{2} C_m H_n \right), \quad (97)$$

где α – абсолютная влажность газа. При отсутствии данных принимается, равной 12-15 г/м³.

Суммарный объем продуктов сгорания, приведенный к нормальным условиям для твердого и жидкого топлива и для газообразного (при $\alpha > 1$)

$$V_r = V_{RO_2}^o + V_{N_2}^o + V_{H_2O}^o + 1,061V^o(\alpha - 1). \quad (98)$$

2.3.3 Энтальпия продуктов сгорания и воздуха

Количество теплоты, которое содержится в воздухе или продуктах сгорания, называют энтальпией воздуха или продуктов сгорания. Данное количество теплоты, отдаваемое потоком газов, принимается поверхностями нагрева и численно равно разности энтальпии газов до и после теплообменника. Энтальпия продуктов сгорания 1 кг или 1 м³ газообразного или твердого топлива рассчитывается по формуле

$$H_r = V_r c_r t_r, \quad (99)$$

где V_r – объем продуктов сгорания, м³/кг; c_r – средняя объемная теплоемкость продуктов сгорания при $p = \text{const}$, кДж/кгК; t_r – температура газа, °С.

Энтальпия избыточного количества воздуха

$$H_r = H_r^o + (\alpha_n - 1)H_n^o, \quad (100)$$

где H_r^o – объем продуктов полного сгорания при $\alpha_n = 1$; $H_n^o = V^o(ct)_n$ – энтальпия теоретически необходимо воздуха; $(ct)_n$ – энтальпия 1 м³ влажного воздуха.

Расчет количества теплоты, принимаемого поверхностями нагрева теплообменников котельного агрегата от продуктов сгорания, как правило, выполняется путем использования Нt-диаграммы как разность энтальпии газов до (H_r') и после теплообменника H_r''

$$Q_r = H_r' - H_r''. \quad (101)$$

Контрольные вопросы

1. Что называется топливом?
2. Что называется высшей удельной теплотой сгорания?
3. Как различаются виды топлив по агрегатному состоянию?
4. Назовите состав элементарного топлива по составу.
5. Какова теплота сгорания условного топлива?
6. Назовите стадии процесса горения твердого топлива.
7. Что входит в состав золы топлива?
8. Назовите 2 группы процессов горения.
9. С какой скоростью может протекать горение?
10. Какие реакции происходят в процессе горения?
11. Чему равен действительный объем воздуха, подаваемого в топку?
12. Содержат ли продукты сгорания кислород?
13. Что называется энтальпией?
14. Чему равна энтальпия избыточного количества воздуха?
15. Расскажите о гомогенном и гетерогенном процессах горения.

ЧАСТЬ 3

Краткий лекционный курс дисциплины «Эксплуатация теплоэнергетических установок»

3.1 Принципиальные схемы энергетических установок

Преобразование различных видов энергии – химической энергии органического топлива, электрической энергии, солнечного излучения, энергии получаемой при расщеплении ядерного топлива и других в тепловую энергию, происходит в различных технологических устройствах. При этом процессе образуется рабочее тело – теплоноситель, как правило, жидкость или пар, который служит для переноса тепловой энергии к потребителю.

Существуют две основных схемы получения тепловой энергии из органического топлива путем его сжигания:

- схема производства только тепловой энергии, по данной схеме работают котельные установки;
- схема совместного производства тепловой и электрической энергии – применяется на теплоэлектроцентралях (ТЭЦ).

Производство тепловой энергии из ядерного топлива для систем централизованного теплоснабжения производится способами:

- путем нерегулируемого отбора пара от паровых турбин атомных тепловых станций (АЭС);
- получением тепловой энергии в комбинированных схемах на атомных теплоцентралях (АТЭЦ);
- получением тепловой энергии на атомных станциях теплоснабжения (АСТ).

3.1.1 Принципиальная схема котельной установки

Котельная установка включает пять основных трактов: топливный, пароводяной, воздушный, газовый и тракт золошлакоудаления (рис.3.1).

Топливный тракт – совокупность оборудования для подачи топлива в топку и подготовки его к сжиганию – включает: конвейер, бункер, питатели топлива, мельницу, короб подачи первичного воздуха.

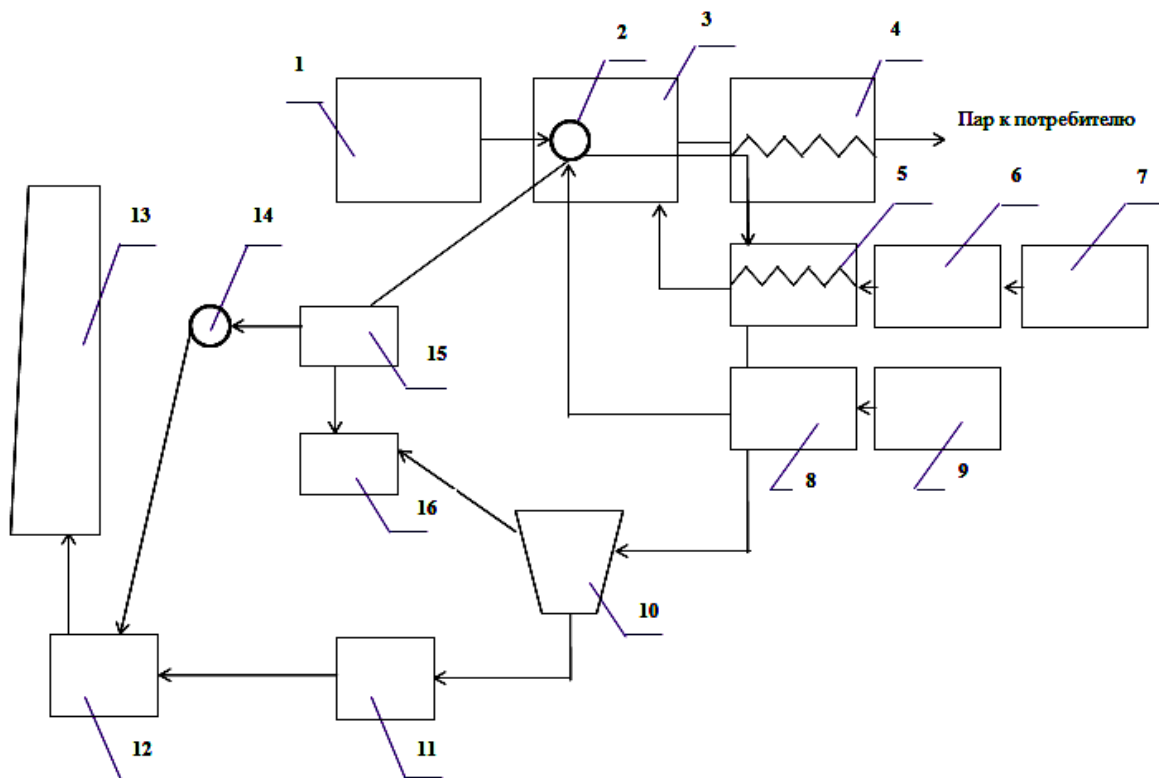


Рис. 3.1. Схема котельной установки:

- 1 - комплекс устройств для хранения, подготовки и подачи топлива; 2- топка;
 3- котел; 4 – пароперегреватель; 5 – водоподогреватель (водяной экономайзер);
 6 - очистка воды; 7 - водяной насос; 8 – вентилятор;
 9 - воздухоподогреватель; 10 – золоуловитель; 11 – дымосос; 12 - устройство для очистки дымовых газов; 13 - дымовая труба; 14 - паровой эжектор;
 15 – циклон; 16 - зольный бункер (яма)

Пароводяной тракт – совокупность последовательно расположенных по ходу рабочего тела поверхностей нагрева, соединяющих их трубопроводов и установленных дополнительных устройств: экономайзер, барабан, опускные трубы, нижний распределительный коллектор, экраны, ширмовый пароперегреватель, первая и вторая ступени конвективного перегревателя, промежуточный пароперегреватель.

Воздушный тракт включает в себя дутьевой вентилятор, воздухоподогреватель, короба первичного и вторичного воздуха.

Тракт золошлакоудаления включает: золоуловители, шлакоудаляющие механизмы и устройства, каналы.

Другие элементы котла: горелки, обмуровка – система огнеупорных и теплоизоляционных ограждений или конструкций, предназначенная для уменьшения тепловых потерь и обеспечения плотности; каркас – несущая металлическая конструкция, воспринимающая

нагрузку от массы котла с находящимся в нем рабочим телом и все другие возможные нагрузки и обеспечивающая требуемое взаимное расположение элементов котла.

3.1.2 Тепловой баланс теплоэнергетической установки

Тепловой баланс котельного агрегата устанавливает равенство между поступающим в агрегат количеством теплоты и его расходом. На основании теплового баланса определяют расход топлива и вычисляют коэффициент полезного действия, эффективность работы котельного агрегата.

В котельном агрегате химически связанная энергия топлива в процессе горения преобразуется в физическую теплоту горючих продуктов сгорания. Эта теплота расходуется на выработку и перегрев пара или нагревания воды.

Вследствие неизбежных потерь при передаче теплоты и преобразования энергии вырабатываемый продукт (пар, вода и так далее) воспринимает только часть теплоты. Другую часть составляют потери, которые зависят от эффективности организации процессов преобразования энергии (сжигания топлива) и передачи теплоты вырабатываемому продукту.

Уравнение теплового баланса для установившегося теплового состояния агрегата записывают в следующем виде:

$$Q_p^p = Q_1 + Q_{II} \text{ или } Q_p^p = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6, \quad (102)$$

где Q_p^p – теплота, которой располагают; Q_1 – полезно использованная теплота; Q_{II} – общие потери; Q_2 – потери теплоты с уходящими газами; Q_3 – потери теплоты от химического недожога; Q_4 – потери теплоты от механической неполноты сгорания; Q_5 – потери теплоты в окружающую среду; Q_6 – потери теплоты с физической теплотой шлаков.

Левая приходная часть уравнения теплового баланса является суммой следующих величин:

$$Q_p^p = Q_n^p + Q_{в.вн} + Q_{нар} + Q_{физ.т.}, \quad (103)$$

где Q_n^p – низшая теплота сгорания топлива в расчете на рабочую массу топлива; $Q_{в.вн}$ – теплота, вносимая в котлоагрегат с воздухом на 1 кг

топлива, учитывается тогда, когда воздух нагревается вне котельного агрегата (например, в паровых или электрических калориферах, устанавливаемых до воздухоподогревателя); если воздух нагревается только в воздухонагревателе, то теплота не учитывается, так как она возвращается в топку агрегата; $Q_{нар}$ - теплота, вносимая с дутьевым (форсуночным) паром на 1 кг топлива; $Q_{физ.т.}$ - физическая теплота 1 кг или $1 м^3$ топлива.

Коэффициент полезного действия котла брутто η_k равен отношению полезно используемой теплоты Q_1 к располагаемой теплоте Q_p

$$\eta_k = \frac{Q_1}{Q_p} \cdot 100.$$

Расход топлива в топке котла (кг/ч или $м^3/ч$) определяют из отношения количества теплоты, необходимого на получение перегретого пара $Q_{пер}$, продувочной воды $Q_{пр}$ и насыщенного пара Q_H к получаемой полезной теплоте от 1 кг ли $1 м^3$ топлива

$$B = \frac{Q_{пер} + Q_{пр} + Q_H}{Q_1} = \frac{D_{пер}(h_{пер} - h_{п.в}) + D_{пр}(h' - h_{п.в}) + D_H(h'' - h_{п.в})}{Q_p \eta_{к.бр}}, \quad (104)$$

где $Q_{пер} = D_{пер}(h_{пер} - h_{п.в})$, $Q_{пр} = D_{пр}(h' - h_{п.в})$, $Q_H = D_H(h'' - h_{п.в})$ - затраты теплоты соответственно на получение перегретого пара, продувочной воды, насыщенного пара, кДж/ч; $D_{пер}$, $D_{пр}$, D_H - расход соответственно перегретого пара, продувочной воды, насыщенного пара кг/ч; $h_{пер}$, h' , h'' , $h_{п.в}$ - энтальпия соответственно перегретого пара, продувочной воды, насыщенного пара, питательной воды, кДж/кг.

Теплоэнергетические установки работают на разных топливах, что затрудняет их сравнение, поэтому введено понятие условного топлива, низшая теплота сгорания которого равна 29308 кДж/кг. Его расход равен

$$B_y = \frac{D_{пер}(h_{пер} - h_{п.в}) + D_{пр}(h' - h_{п.в}) + D_H(h'' - h_{п.в})}{29308 \eta_k}. \quad (105)$$

3.1.3 Принципиальная схема ТЭЦ

Для комбинированного производства тепловой и электрической энергии применяют теплоэлектроцентрали (ТЭЦ), работающие на органическом топливе, с различными схемами использования паровой турбины. На рисунке 3.2 приведена принципиальная тепловая схема ТЭЦ.

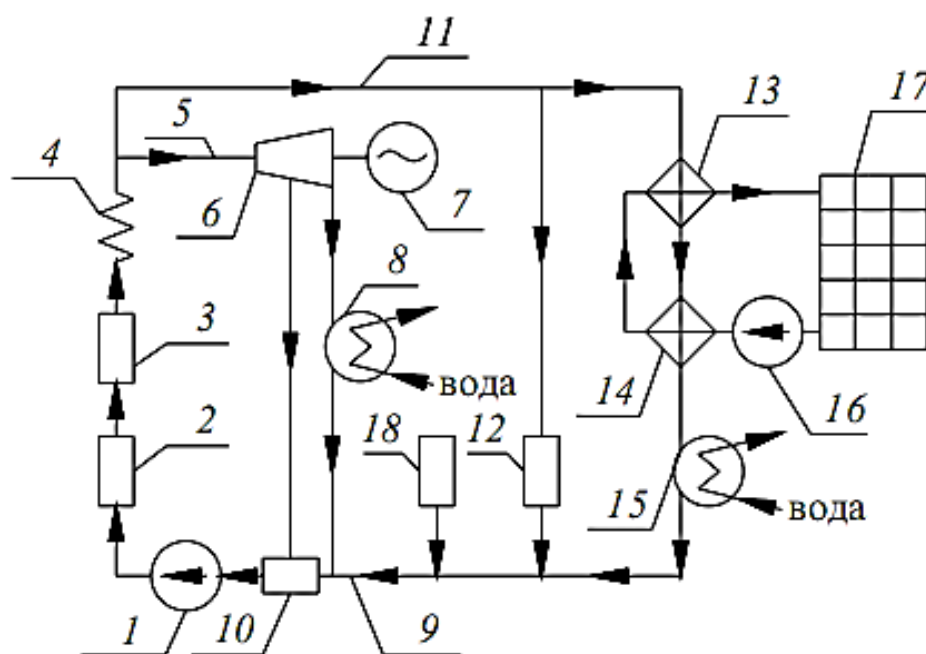


Рис 3.2. Принципиальная тепловая схема ТЭЦ

- 1 – питательный насос; 2 – водяной экономайзер; 3 – паровой котел;
4 – пароперегреватель; 5,11 – паропровод; 6 – паровая турбина;
7 – электрогенератор; 8,15 – конденсатор; 9 – обратная магистраль;
10 – регенеративный подогреватель; 12 – технологическое производство; 13,14 – паровые подогреватели; 16 – сетевой насос;
17 – потребитель теплоты; 18 – система подготовки воды

После умягчения, деаэрации 18 питательная вода питательным насосом 1 подается в водяной экономайзер 2. В экономайзере вода нагревается за счет теплоты уходящих топочных газов, затем поступает в паровой котел 3, где вырабатывается сухой насыщенный пар, который проходит через пароперегреватель 4 и разделяется на два потока. Одна часть пара ($\approx 60\%$) по паропроводу 5 идет в паровую турбину 6, где энергия пара вначале переходит в механическую энергию вращения турбины, а затем в электрическую энергию в электрогенераторе 7. Остаточный пар из паровой турбины проходит через

конденсатор 8, где происходит его охлаждение до состояния жидкости (конденсата), в дальнейшем подается в обратную магистраль 9. Другая часть пара ($\approx 40\%$) по паропроводу 11 подводится к технологическому производству 12 и к паровым сетевым водонагревателям 13, 14. Конденсат от технологического производства и конденсатора 15 также возвращается в обратную магистраль 9.

Работа теплосети. Обратная сетевая вода насосом 16 через паровые сетевые подогреватели воды 14 и 13 подается к потребителю 17 на отопление, вентиляцию и горячее водоснабжение. Для того чтобы повысить КПД паросиловой установки применяется регенеративный подогреватель 10.

В нем посредством отбора пара из отдельных ступеней паровой турбины 6 производится нагрев конденсата.

3.1.4 Принципиальная схема АТЭЦ

На рисунке 3.3 приведена принципиальная трехконтурная тепловая схема АТЭЦ.

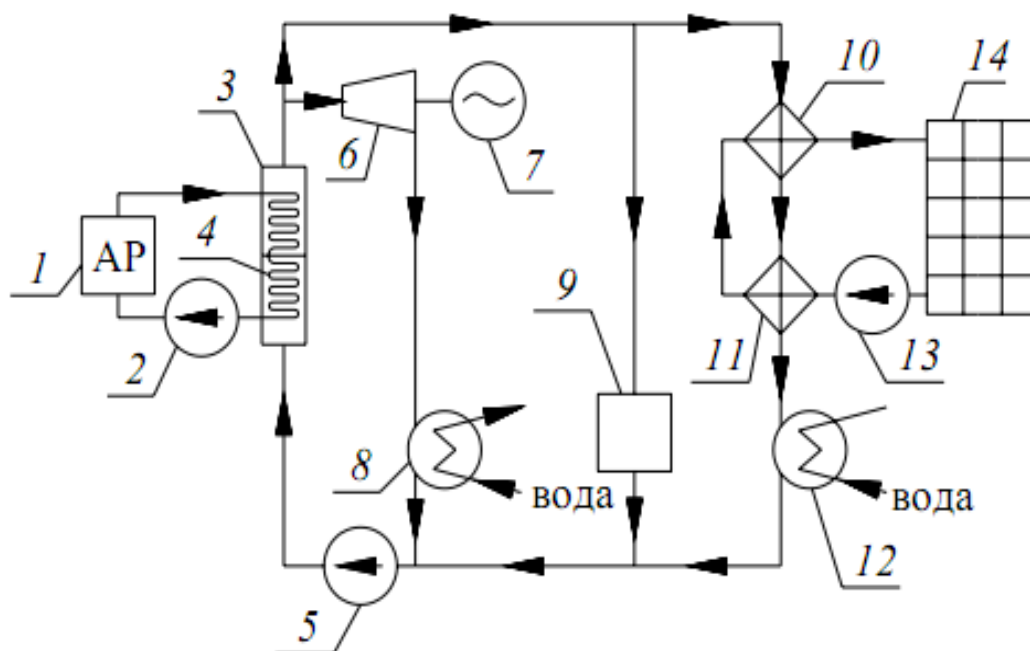


Рис. 3.3. Принципиальная тепловая схема АТЭЦ

- 1 – атомный реактор; 2 – циркуляционный насос; 3 – парогенератор;
 4 – змеевики парогенератора; 5 – питательный насос; 6 – паровая турбина;
 7 – электрогенератор; 8,12 – конденсатор; 9 – технологическое производство;
 10,11 – паровые подогреватели; 12 – конденсатор; 13 – сетевой насос;
 14 – потребитель

Ядерное (расщепляющееся) топливо – вещество, способное выделить значительное количество тепловой энергии за счет торможения продуктов деления тяжелых ядер химических элементов при взаимодействии их с нейтронами. В качестве ядерного топлива используют природный изотоп уран-235 (^{235}U), искусственные изотопы уран-233 (^{233}U) и плутоний-239 (^{239}Pu). Ядерное топливо применяют для комбинированного производства тепловой и электрической энергии на атомных теплоэлектроцентралях (АТЭЦ) с различными контурами циркуляции.

Контур 1. В атомном реакторе *1* образуется тепловая энергия, нагревающая теплоноситель до $t \approx 450$ °С. Из атомного реактора теплоноситель циркуляционным насосом *2* подается в атомный парогенератор *3*. Поверхность нагрева парогенератора состоит из змеевиков *4*, внутри которых при высоком давлении течет теплоноситель. Поверхность нагрева помещена в корпус, в который с помощью питательного насоса *5* подводится кипящая вода, в результате чего в парогенераторе образуется водяной пар.

Контур 2. Из парогенератора одна часть сухого насыщенного пара по паропроводу идет в паровую турбину *6*, где потенциальная энергия пара вначале переходит в механическую энергию вращения турбины, а затем в электрическую энергию в электрогенераторе *7*, который соединен с турбиной на одной оси. Остаточный пар из паровой турбины проходит через конденсатор *8*, где охлаждается до состояния жидкости (конденсата), и идет в обратную магистраль к питательному насосу *5*. Другая часть пара из парогенератора по паропроводу подводится к технологическому производству *9* и к паровым сетевым водонагревателям *10* и *11*. Конденсат от технологического производства и конденсатора *12* также возвращается в обратную магистраль, затем нагнетается в парогенератор *3*.

Контур 3. Насос *13* прокачивает через паровые сетевые подогреватели воды *11* и *10* обратную сетевую воду, и по подающему трубопроводу направляет ее к потребителю *14* на отопление, вентиляцию и горячее водоснабжение.

3.2 План размещения топливного хозяйства

Топливоподача при доставке топлива автомобильным транспортом (рис.3.4)

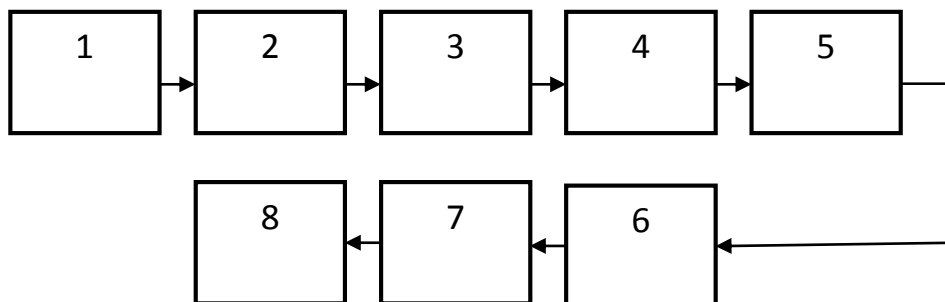


Рис. 3.4. Схема доставки топлива автомобильным транспортом
1- автомобиль; 2 - разгрузочный склад с дробильным устройством;
3 -погрузчик бульдозер; 4 - приемный бункер с решеткой; 5 - галерея ленточных транспортеров; 6 - бункера котлов; 7 - устройство для подачи топлива в топку; 8 - топка

Топливоподача с приемным бункером при доставке топлива ж.-д. транспортом (рис.3.5)

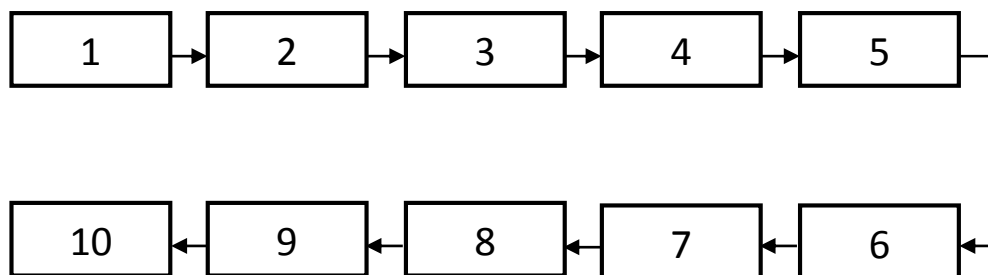


Рис. 3.5. Схема доставки топлива ж.-д. транспортом
1 – железнодорожный бункер; 2 – разгрузочный склад; 3 – погрузчик бульдозер; 4 – бункер с решеткой; 5 – галерея ленточных транспортеров первого подъема; 6 – дробильное устройство; 7 – галерея ленточных транспортеров второго подъема; 8 – бункера котлов; 9 – устройство для подачи топлива в топку; 10 – топка

Технологическая схема подачи мазута к сжиганию (рис.3.6)

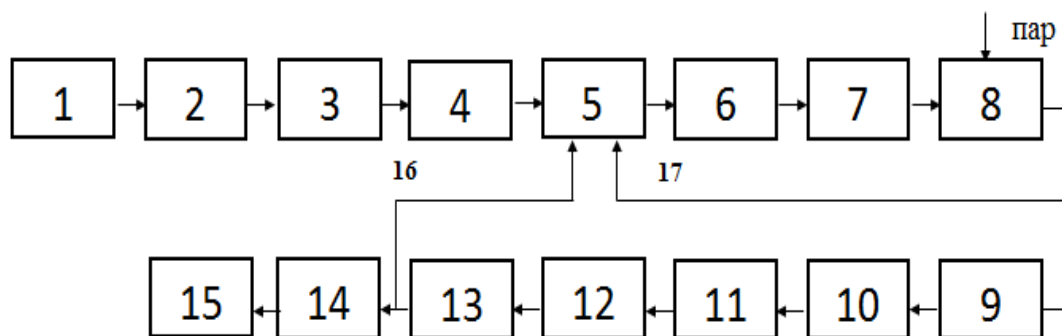


Рис. 3.6. Схема подачи мазута к сжиганию

1 – цитерна; 2 - фильтр грубой очистки; 3 – сливной резервуар с подогревом; 4 – перекачивающий насос; 5 – основной резервуар; 6 – насос первого подъема; 7 – обратный клапан; 8 – подогреватель мазута; 10 – насос второго подъема; 11 – запорная арматура; 12 – регулятор расхода; 13 – расходомер; 14 – задвижка; 15 – форсунка; 16,17 – линии рециркуляции

3.3 Подготовка топлива к сжиганию

При снабжении котельной углем, требующим дробления, на тракте топливоподачи от приемных разгрузочных устройств до бункеров котлов или на складе уголь подвергается дроблению в установках, состоящих из грохотов и дробилки. Для извлечения из топлива случайно попавших металлических предметов на тракте топливоподачи предусматривается установка магнитных сепараторов. Как правило, они устанавливаются перед дробилками во избежание поломок или повреждений последних. При камерном сжигании твердого топлива необходима его дополнительная подготовка, для чего в котельных используется система пылеприготовления.

Система пылеприготовления представляет собой совокупность оборудования, необходимого для размола топлива, его сушки и подачи готовой пыли в горелки топочной камеры. Системы пылеприготовления разделяют на замкнутые с прямым вдуванием пыли в топочную камеру, замкнутые с промежуточным бункером пыли и разомкнутые с подачей пыли горячим воздухом. Разделение пылесистем на замкнутые и разомкнутые определяется характером использования сушильного агента после завершения сушки топлива. Основной установкой любой пылесистемы является углеразмольная мельница. Наиболее широкое распространение получили шаровые барабанные (ШБМ) и молотковые (ММ) мельницы, причем в ШБМ

размалывают преимущественно топливо с относительно малым выходом летучих веществ, а ММ используются при размоле молодых каменных и бурых углей, торфа и сланцев. На долю этих видов мельниц приходится около 98% размалываемых твердых топлив. Размол некоторых видов каменных углей более экономично происходит с применением валковых среднеходных мельниц. В отдельных случаях при размоле «мягких» сильно влажных бурых углей используется мельница-вентилятор. К основным элементам системы пылеприготовления относятся также сепараторы, циклоны, питатели сырого угля и пыли, бункера.

3.4 Котельные установки

3.4.1 Классификация и назначение топок

Топочные устройства (топки) подразделяются на:

- **слоевые** – в которых твердое топливо сжигается в слое на решетке;
- **камерные (факельные)** – в которых газообразное и жидкое топливо в смеси с воздухом сгорает во взвешенном состоянии;
- **факельно-слоевые** – в которых используется твердое топливо и одна его часть (мелкие фракции) горит во взвешенном состоянии, другая (крупные фракции) – в слое на решетке.

По расположению поверхности нагрева различают:

- **внутренние** топки, устанавливаемые внутри котла;
- **нижние** топки, размещаемые под котлом;
- **выносные** топки, устанавливаемые за пределом обогреваемой поверхности котла.

3.4.2 Характеристика топок

3.4.2.1 Слоевые топки

Слоевые топки в зависимости от степени механизации топочных операций подразделяются на ручные, полумеханические и механические (рис.3.7).

В **ручных топках** все топочные операции выполняются вручную. Топки с ручным обслуживанием применяются в котлоагрегатах производительностью до 0,3 кг/с.

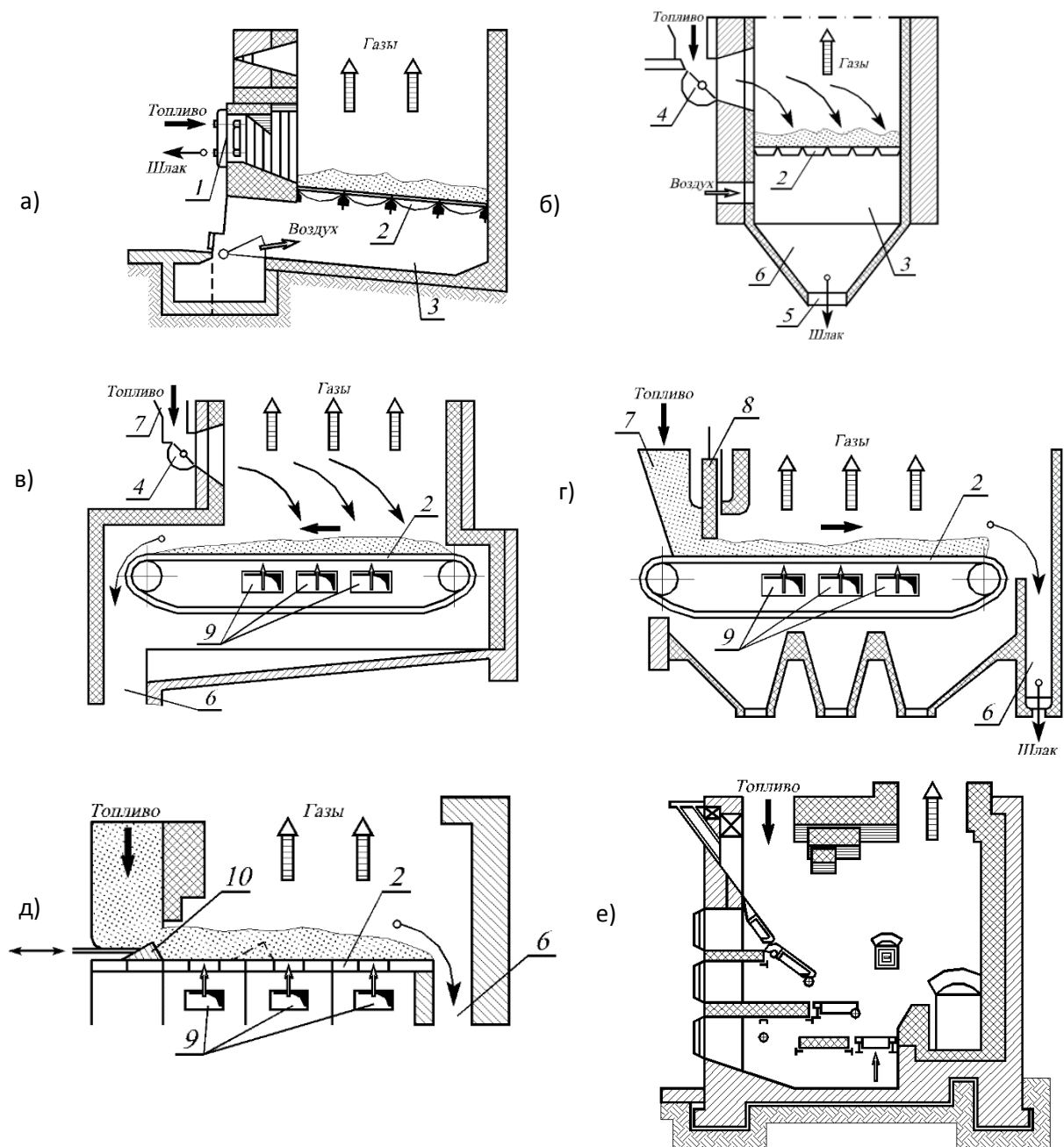


Рис. 3.7. Схемы слоевых топок [4]:

а) топка с ручным обслуживанием операций загрузки топлива, шурования и удаления шлака б) полумеханическая топка в) механическая топка с движущейся цепной решеткой в) топка с забрасывателями обратного хода; г) топка с шурующей планкой;

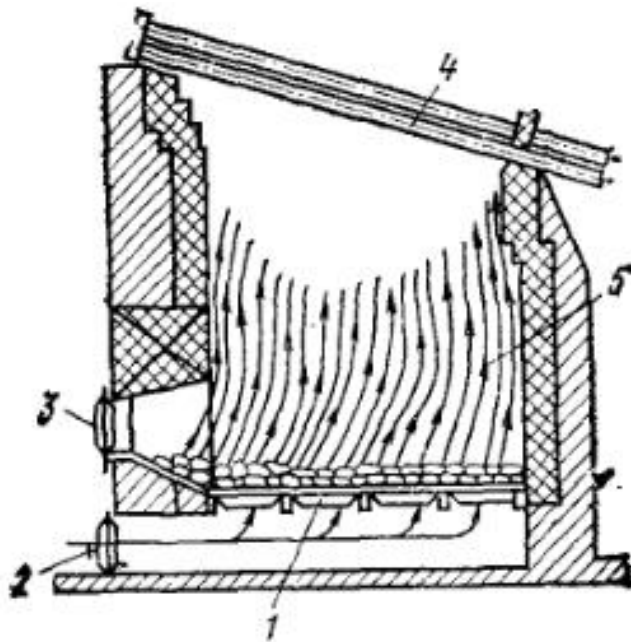
1 – загрузочное отверстие; 2 – колосниковая решетка; 3 – поддувальное пространство;

4 – забрасыватель; 5 – отверстие для удаления шлака; 6 – шлаковый бункер;

7 – угольный ящик; 8 – регулятор толщины слоя; 9 – зоны для подачи воздуха;

10 – шурующая планка

Топка с неподвижной колосниковой решеткой (рис.3.8) работает следующим образом: полотно колосниковой решетки 1, состоящее из колосников балочной или плиточной формы, снабженных ребрами жесткости, поддерживает слой сжигаемого топлива. Колосники уложены на специальные опорные балки, закрепленные на стенках топки, число колосников зависит от размеров топки и способа



загрузки топлива. Колосники балочной формы имеют утолщения – посередине и на концах, поэтому при их укладке между ними образуются зазоры, через которые воздух беспрепятственно проходит в слой топлива. В колосниках плиточной формы для прохода воздуха делают отверстия, суммарная величина отверстий и зазоров в решетке определяет живое сечение решетки. Топливо подаётся на решетку вручную или через забрасыватель.

Схема слоевой топки с неподвижной колосниковой решеткой: 1 – колосниковая решетка; 2 – дверка зольника; 3 – загрузочная дверка; 4 – поверхность нагрева; 5 – топочная камера

Также для сжигания других видов твердого топлива применяются топки с поворотными колосниками, колосниковая решетка которой выполнена из поворотных колосников РПК. Иногда в топках с ручным приводом применяются качающиеся колосники, которые покачиваются и поворачиваются на определенный угол для взрыхления слоя топлива и разрушения его спекшейся корки.

В полумеханических топках механизированными являются одна или две операции. К данным топкам относятся *топки с механической или пневматической подачей топлива* и *шахтные топки*.

Топки с механической или пневматической подачей топлива

Для подачи топлива в топку применяются забрасыватели различных типов, что способствует облегчению труда кочегаров и улучшению условий горения топлива в слое. Применяют механические (рис.3.9 а

и б), пневматические (рис.3.9 в) и пневмомеханические (рис.3.9 г) забрасыватели.

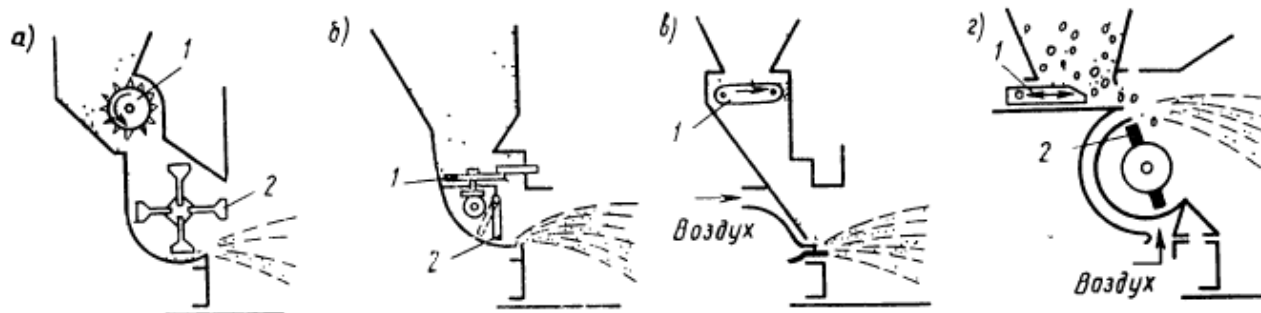


Рис. 3.9. Забрасыватели топлива [14,18]:

а и б- механические; в – пневматический; г - пневмомеханический
1 – питатель, 2 – метатель

При использовании механического забрасывателя подача топлива осуществляется лопастным метателем 2, вращающимся со скоростью 550-800 мин⁻¹. Топливо к нему поступает с помощью дозирующего устройства 1. При применении пневматических забрасывателей, топливо подается в топку струями воздуха, выходящего из сопел круглой или щелевидной формы со скоростью 30-80 м/с. В пневмомеханических забрасывателях соединяются принципы работы механических и пневматических забрасывателей, в результате чего обеспечивается более равномерное распределение топлива разных фракций по длине решетки.

Топка с пневмомеханическим забрасывателем (рис.3.10) состоит из колосниковой решетки 4 с чугунными колосниками, которые с помощью тяг, приводящимися в движение ручным приводом 2, производят шуровку слоя топлива и удаляют золу и шлак в зольник 5. Топливо подается в топку при помощи пневмомеханического забрасывателя 3, воздух – при помощи вентилятора по воздуховоду 1. В случае выхода из строя пневмомеханического забрасывателя, топливо подается вручную.

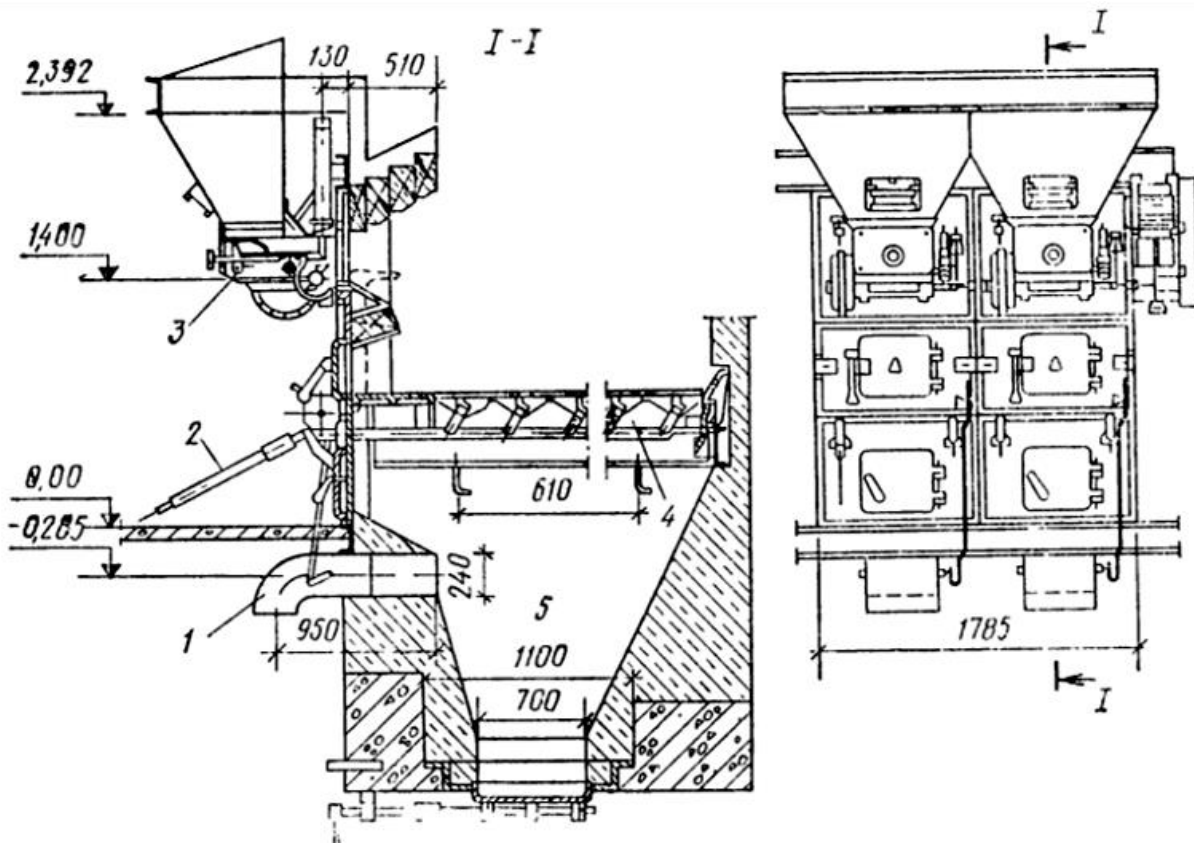


Рис. 3.10. Топка с пневмомеханическим забрасывателем типа ПМЗ-РПК:
 1- воздуховод; 2 – ручной привод; 3 – забрасыватель;
 4 – колосниковая решетка; 5 - зольник

Шахтные топки предназначены для сжигания кускового торфа, дров и древесных отходов. В данных топках применяется наклонная решетка с продольным или ступенчатым расположением колосников, внизу у которой расположена горизонтальная решетка из плиточных колосников. Топливо из бункера в шахту перемещается по колосниковой решетке под действием собственного веса посредством выгорания нижележащих слоев. В шахте оно хорошо подсушивается и затем полностью догорает на горизонтальных колосниках. Зола через нижнюю дверцу удаляется вручную.

Топка для сжигания древесных отходов имени В.В. Померанцева (рис.3.11) работает следующим образом: топливо из бункера 3 поступает в шахту, которая ограничена со стороны фронта наклонной стенкой с пережимом 2, со стороны котла – решеткой 6. Решетка состоит из экранных труб, в нижней части которых установлены шипы 7, предназначенные для снижения потерь топлива. Воздух в топку поступает через воздуховод 1 и через сопла 5,8. Для выпуска горючих газов в шахте установлено окно 4.

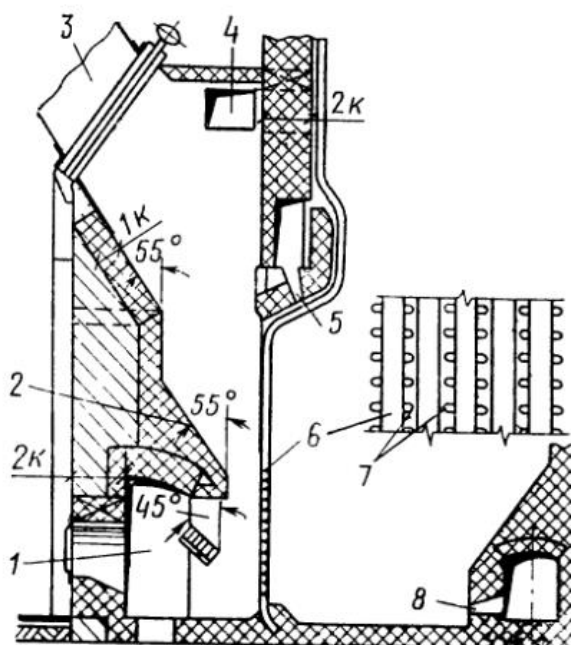


Рис. 3.11. Топка для сжигания древесных отходов имени В.В. Померанцева:

1 – воздуховод; 2 – пережим; 3 – бункер; 4 – окно для выпуска горючих газов; 5, 8 – сопло; 6 – решетка; 7 – шипы

В *механических топках* процесс сгорания топлива полностью механизирован. Они устанавливаются под котлами повышенной производительности, так как имеют большую мощность. Широко применяются топки с *цепной решеткой*, с *наклонно-переталкивающей решеткой*, с *шурующей планкой*.

Топки с цепной решеткой применяют для сжигания сортированных неспекающихся каменных углей, бурых углей с влажностью до 25%, кускового торфа и антрацита, их особенность - непрерывное перемещение топлива вместе с колосниковой решеткой, которая выполнена в виде транспортера.

Цепная решётка – это полотно из колосников, которые крепятся к цепям, надетым на зубчатые колеса, одни из которых являются ведущими, другие – ведомыми. В движение решетки приводятся электродвигателем, при этом скорость движения решетки от 2 до 30 м/ч. Топливо при этом проходит все стадии горения: в начале оно поступает на холодную часть решетки, подогреваясь и подсушиваясь, загораясь сверху; далее происходит активное выделение летучих веществ, их горение; затем - горение кокса; в конце решетки топливо догорает

и происходит выжиг шлака. Воздух для горения подается между полотнами снизу по воздуховоду.

Принцип работы данной топки следующий (рис.3.12) из бункера 1 топливо поступает на движущуюся решетку 4, и по мере ее движения проходит все стадии горения до полного сгорания. Воздух для горения топлива подается по воздуховоду 5, при горении толщина слоя топлива регулируется шибером 2. В конце решетки установлен шлакосниматель 3.

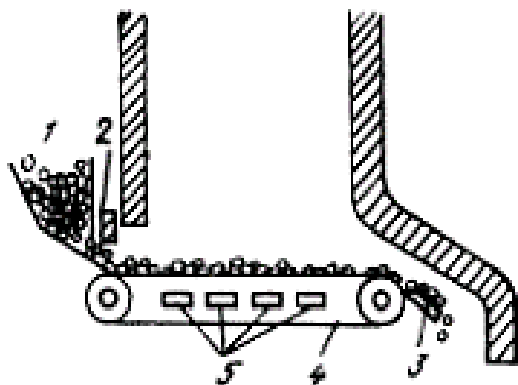


Рис. 3.12. Топка с цепной решеткой: 1 – бункер; 2 – шибер; 3 – шлакосниматель; 4 – колосниковая решетка; 5 – воздуховод

Топки с наклонно-переталкивающей решеткой (рис.3.13) применяют для сжигания многозольных и влажных видов топлива. Топливо подсушивается в шахте, а уже затем поступает на колосниковую решетку, где горит и перемешивается посредством возвратно-поступательного движения колосников решетки. Решетка выполнена из чередующихся подвижных и неподвижных колосников. Поступая в конце решетки на горизонтальные колосники, топливо выжигается и сбрасывается в зольный бункер.

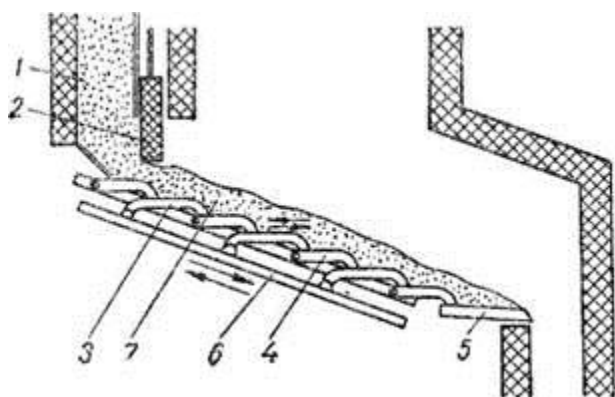


Рис. 3.13. Схема топки с наклонно-переталкивающей решеткой: 1 – шахта; 2 – шибер для регулирования толщины слоя топлива; 3 – подвижные колосники; 4 – неподвижные колосники; 5 – шлаковый колосник; 6 – подвижная рама; 7 – топливо

Топки с шурующей планкой применяются для сжигания бурых и каменных углей под котлами производительностью до 20 т/ч. Шуру-

ющая планка представляет собой чугунную или стальную трехгранную призму, при движении которой вперед топливо захватывается из бункера и перемещается на решетку, при движении назад – осуществляет шуровку топлива.

Разновидность топок данного типа отличается конструкцией привода для перемещения планок и их количеством.

Топка с шурующей планкой состоит из неподвижной колосниковой решетки 3, по которой может перемещаться шурующая планка 4 (рис. 3.14).

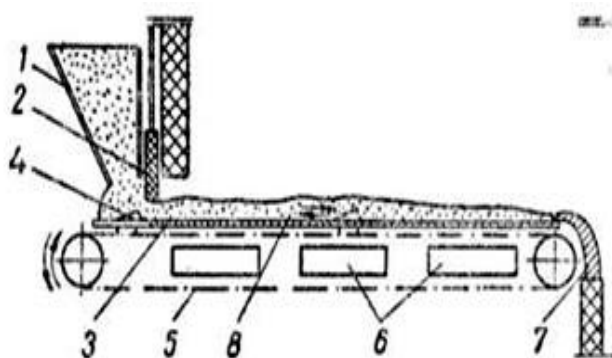


Рис. 3.14. Схема топки с шурующей планкой: 1 – загрузочный бункер; 2 – шибер для регулирования толщины слоя топлива; 3 – неподвижная колосниковая решетка; 4 – шурующая планка; 5 – цепь привода шурующей планки; 6 – дутьевые зоны; 7 – шлакоосниматель

Шурующая планка при помощи привода совершает возвратно-поступательное движение по решетке от угольного бункера 1 до конца решетки. При ходе вперед планка забирает топливо из бункера, продвигает его по решетке, перемешивая с горящим топливом. В течение перемешивания топлива идет его шуровка. Доходя до заднего края решетки, планка скидывает шлак в бункер. Возвращаясь, планка опять шурует слой, не смещая его относительно решетки.

3.4.2.2 Факельно-слоевые топки

Факельно-слоевые топки предназначены для сжигания фрезерного торфа, повышенная влажность которого и его состав в виде торфяной крошки препятствуют эффективному сжиганию в слоевых топках. Для котлов большой производительности данные топки выполняются камерными, малой – камерно-слоевыми. В камерно-слоевых топках мелкие частицы топлива горят во взвешенном состоянии, крупные – на дополнительных колосниковых решетках. Данные топки бывают или однокамерными (с одной дожигательной решеткой и вертикальным перемещением газового потока) или двухкамерными (с двумя дожигательными решетками и горизонтальным перемещением газового потока).

Двухкамерная топка системы А.А. Шерстнева (рис. 3.15) работает следующим образом: через отверстие 2 с помощью питателя 3 топливо подается в первую топочную камеру на горку 1, в которой подхватывается потоком воздуха, создаваемым дутьевым воздухом.

В первой камере мелкие фракции топлива, находясь во взвешенном состоянии, сгорают на лету, часть крупных фракций сгорают, выпадая на первую решетку 6 топки, остальная их часть горит в объеме второй камеры или на колосниковой решетке 4. Воздух, поступающий в объеме 70-80% для горения топлива, проходит через щель 5 со скоростью 30-40 м/с, остальная его часть поступает под колосниковые дожигательные решетки.

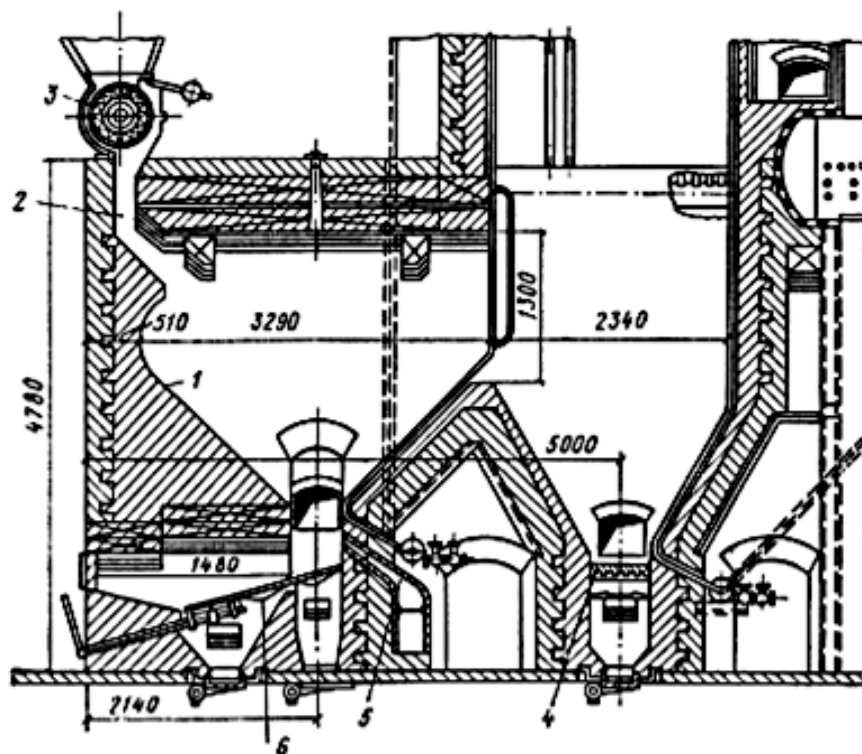


Рис. 3.15. Двухкамерная топка системы А.А. Шерстнева:
1 – горка; 2 – отверстие; 3 – питатель; 4 – колосниковая решетка;
5 – щель для прохода воздуха; 6 – колосниковая решетка

3.4.2.3 Камерные топки

Камерные топки – это топки, в которых топливо горит в объеме камеры в виде факела, при отсутствии какого-либо слоя топлива. Применяют *пылеугольные топки* и *топки для сжигания жидкого и газообразного топлива*.

В пылеугольных топках все топочные процессы полностью механизированы. Но нужно отметить, что приготовление топлива для

данного типа топок очень затратное, так как топливо проходит процессы дробления, сушки и размола в порошок.

Чем тоньше помол топлива, тем интенсивнее процесс его горения, так как топливо лучше перемешивается с воздухом, температура которого 300-400°C. Немаловажную роль в работе данных топок играет форма горелок, которая может быть круглой или щелевой и их расположение в топочной камере.

В камерной топке (рис.3.16) к горелке 1 подается аэропыль 2 и вторичный воздух 3.

Частицы пыли, поступив в топочный объем 5, горят во взвешенном состоянии и образуют горящий факел. Образующаяся зола попадает в шлаковый бункер, ее остаток по дымовой трубе поступает в атмосферу. Для снижения покрытия стенок топки шлаковыми отложениями, их поверхность оборудована экранными трубами 4.

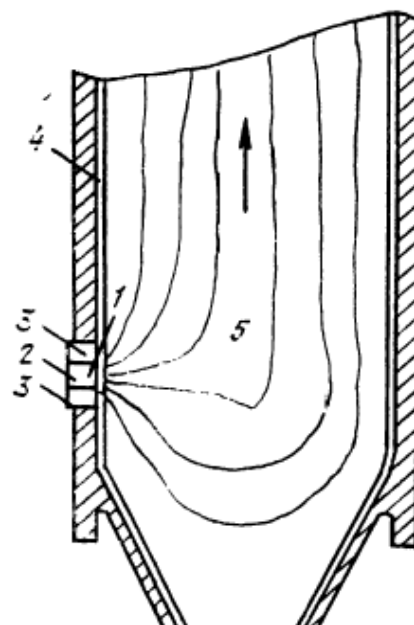


Рис. 3.16. Схема камерной топки: 1 – горелка; 2 – аэропыль (смесь пыли и первичного воздуха); 3 – вторичный воздух; 4 – экранные трубы; 5 – топочный объем

Типы горелок, применяемые в камерных топках – круглые турбулентные и прямоточные щелевые, обеспечивают отличное перемешивание топлива с воздухом. Размещение горелок в топках имеет очень важное значение. Чаще всего используется фронтальное и встречное расположение горелок (рис.3.17).

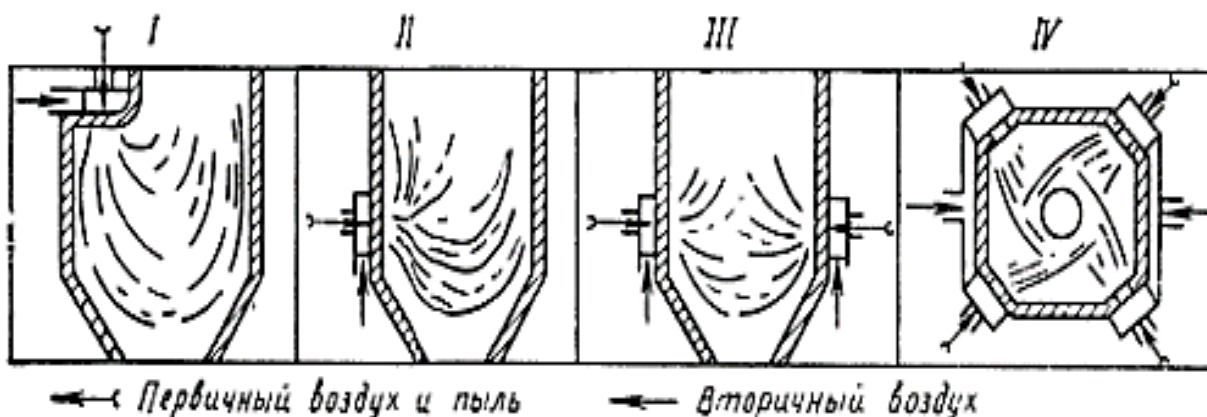


Рис. 3.17. Схемы расположения горелок в топочных камерах: I – потолочные; II – фронтальные; III – встречные; IV – угловые

Топки для сжигания жидкого топлива

В топках для сжигания жидкого топлива в качестве топлива используется мазут, который сжигается во взвешенном (капельном) состоянии. Мазут распыливается при помощи форсунок, по принципу действия форсунки делятся на механические, паровые и воздушные.

В механических форсунках (рис. 3.18) подогретый мазут распыляется под давлением 2-3 МПа через мелкие отверстия. Преимущество данных форсунок заключается в том, что не требуется воздух (пар) для распыливания топлива, они компактны и бесшумно работают. Недостаток – требуется частая их чистка, при работе на режимах, отклоняющихся от расчетных, происходит ухудшение распыливания.

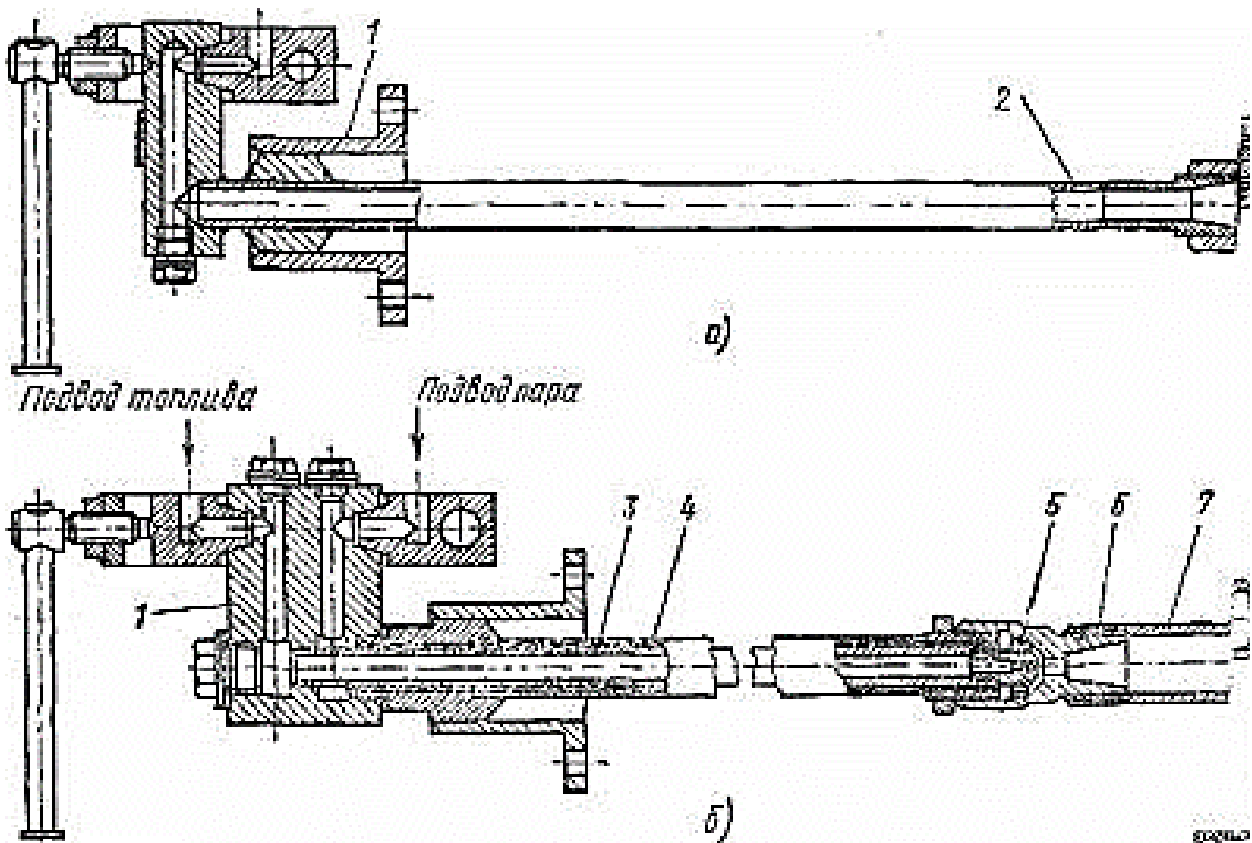


Рис. 3.18. Схема механической форсунки:

а) с механическим распыливанием б) с паровым распыливанием

1 – корпус; 2 – ствол с распределительными дисками;

3, 4 – наружная и внутренняя труба; 5 – сопло; 6 – диффузор; 7 – насадка

В отличие от механических форсунок, в паровых и воздушных распыление происходит под давлением 0,4-1,6 МПа паром или сжатым воздухом.

В паровых форсунках (рис. 3.19) пар, поступающий во внутреннюю трубу 3, выходит через сопло 4 с большой скоростью, распыливая топливо, поступающее через щель между соплом и гайкой 5.

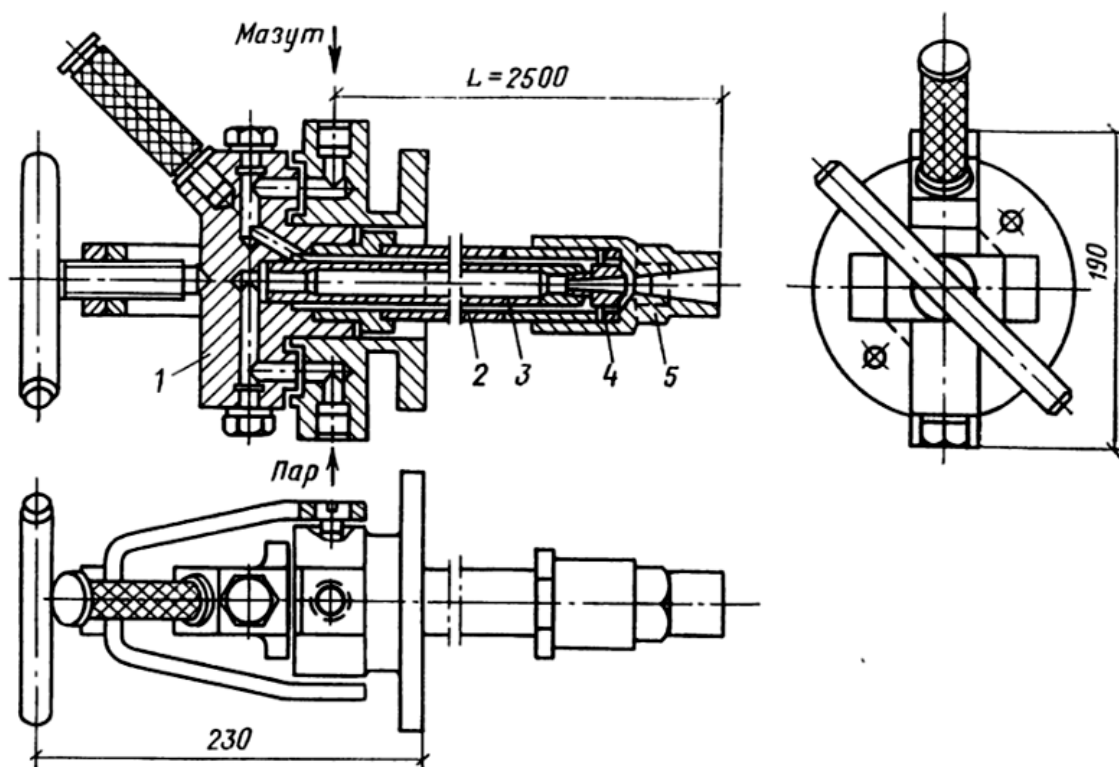


Рис. 3.19. Схема паровой форсунки

1 – корпус; 2, 3 – концентрические трубы; 4 – сопло; 5 – гайка

Данные типы форсунок не получили широкого применения в виду значительного расхода пара на распыливание и из-за малой скорости движения воздуха, подаваемого вентиляторами. Более совершенными горелками являются ротационные форсунки, в которых топливо распыливается под действием центробежной силы, возникающей при вращении конической чаши, в которую подается топливо.

Топки для сжигания газа

Сжигание газа происходит в камерных топках, подобных топкам для сжигания жидкого топлива. Для образования газозвушной смеси используются газовые горелки, из которых наиболее чаще используются смесительные и инжекционные горелки. В смесительных горелках (рис.3.20) воздух для горения поступает с помощью вентиляторов, в инжекционных – за счет инжекции (подсоса) из помещения, при помощи создаваемого горелками давления 2,5-30 кПа.

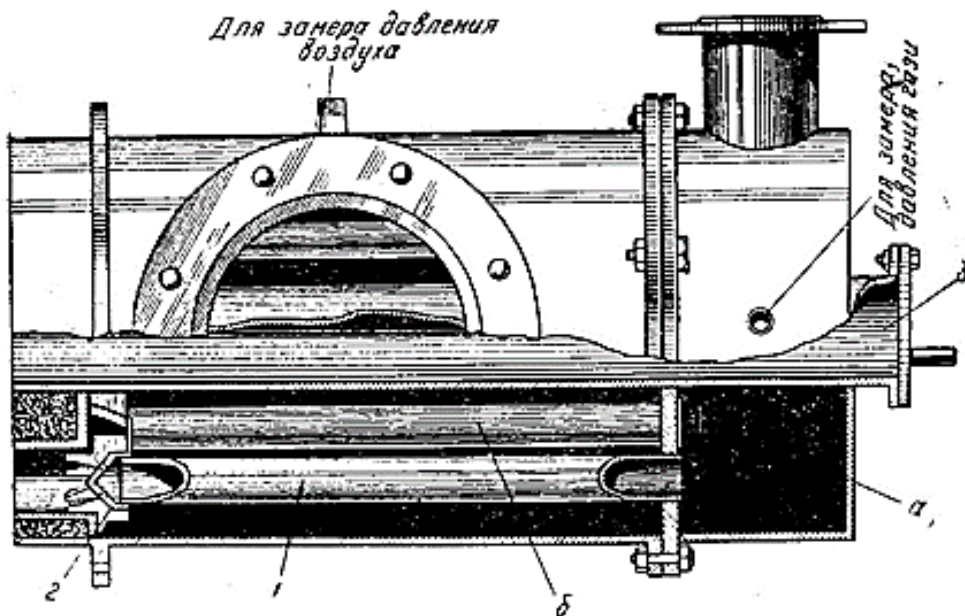


Рис. 3.20. Смесительная горелка:

а – газовая камера; б – воздушная камера;

1 — газовая трубка; 2 — наконечник газовой трубки; 3 — продольная трубка;

Инжекционные горелки (рис.3.21) выполняются прямыми или угловыми нескольких типоразмеров теплопроизводительностью 140-2500кВт. Основные достоинства данных горелок – простота конструкции и экономичность, недостатки – высокий уровень шума и конструктивная громоздкость. Горючий газ поступает в горелку и выходит из сопла 2 с большой скоростью, подсасывая в смеситель 1 наружный воздух. В смесителе происходит полное смешение газа с воздухом, данная смесь загорается по выходе из горелки. Шайба 3 предназначена для регулирования сечения для подвода воздуха и таким образом изменения его количества.

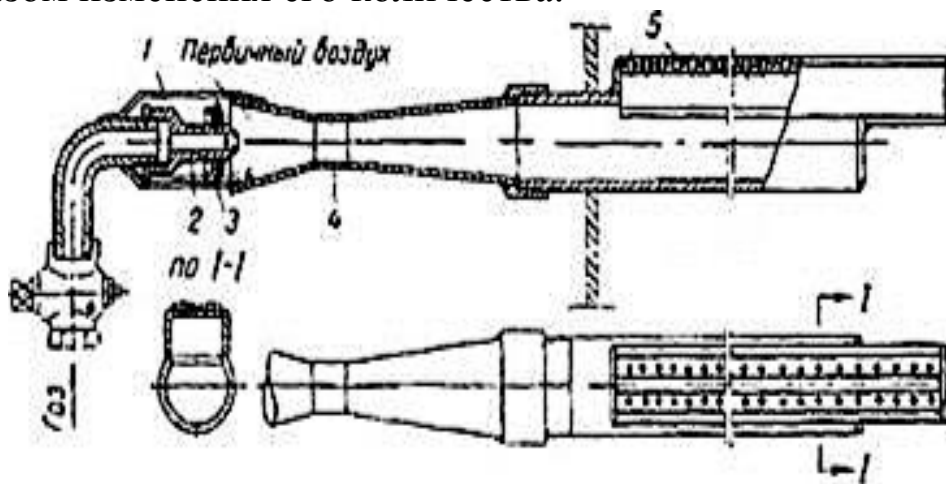


Рис. 3.21. Инжекционная горелка:

1 – корпус, 2 – сопло, 3 – шайба, 4 – диффузор, 5 – насадка

Таблица 3.1

Расчетные характеристики топок

Тип топки	Топливо	Тепловое напряжение		Коэфф. избытка воздуха	Потери тепла от недожога, %		Давление под решеткой, кПа
		зеркала горения, кВт/м ²	топочного объема, кВт/м ³		химического, q ³	механического q ⁴	
1	2	3	4	5	6	7	8
Топки с неподвижной решеткой и ручным обслуживанием	бурые угли	520	350	1,45	2	7	0,5
	антрацит сортированный	580	350	1,4	2	7	0,5
под чугунными и цилиндрическими котлами	антрацит несортированный	520	350	1,45	2,5	9,5	0,5
ПМЗ-РПК	бурые угли	930-1050	230-290	1,4	1	10	0,6
	каменные угли	1050	230-290	1,4	1	7	0,6
	антрациты	930-1050	230-290	1,6	0,5	12-18	0,6
Шахтная система Померанцева	торф	1280	290	1,4	2	2	0,6
	древесные отходы	2300-4600	350-450	1,3	5	5	0,8
Шахтная система Шершнева	фрезерный торф	-	175-350	1,25-1,3	0,5	3	0,4
С шурующей планкой	бурые угли	800-930	230-290	1,4	1	7-9	1
	каменные угли	990-1050	230-290	1,4	1	7	1
ЧЦР	бурые угли типа Челябинского	1050	230-290	1,3	1	5	0,8
	неспекающиеся каменные угли	1160	230-290	1,3	1	6	0,8
	слабоспекающиеся угли	1050	230-290	1,3	1	5	0,8
	антрациты	800-1160	250-350	1,5-1,6	0,5	7-14	1
ПМЗ-ЛЦР	бурые угли типа подмосковных	1050-1280	230-290	1,3	0,5	9	0,8
	бурые угли типа Челябинского	1050-1400	230-290	1,3	0,5	6	0,8
	каменные угли	1050-1600	230-290	1,3	0,5	6	0,8
Камерная	антрацитовый штыб	-	145	1,25	0	4-5	-
	каменные угли	-	185	1,2	0,5	1,5-3	-
	бурые угли	-	230	0,5	0,5	0,5-1	-
	мазут и природные газы	-	290	1,15	1,5	-	-

В приложении 1 представлены схемы наиболее часто используемых топок.

3.4.3 Котлы

3.4.3.1 Основные элементы котлоагрегата

К основными элементами котлоагрегата относятся: топка, испарительные (в паровых котлах) или водонагревательные (в водогрейных котлах) поверхности нагрева, пароперегреватель, экономайзер, воздухоподогреватель, каркас, обмуровка, тепловая изоляция и обшивка.

Поверхности нагрева (радиационная и конвективная) – элементы котла, в которых происходит передача тепла от поверхности горения и продуктов сгорания теплоносителю.

Пароперегреватель (радиационные, полурadiационные, конвективные, ширмовые – устройство, предназначенное для повышения температуры пара выше температуры насыщения, соответствующей давлению в котле

Экономайзер (некипящие и кипящие) – устройство, предназначенное для подогрева или частичного испарения питательной воды, перед ее поступлением в испарительную часть котла за счет использования тепла уходящих газов.

Воздухоподогреватель (рекуперативные (трубчатые) или регенеративные вращающиеся) – устройство, предназначенное для подогрева воздуха, поступающего в топку на горение за счет использования тепла уходящих газов.

Каркас – металлическая конструкция из колонн, балок и связей, которые установлены на фундаменте и предназначены для соединения и крепления элементов котла.

Обмуровка – внешнее изоляционное защитное ограждение котла.

3.4.3.2 Классификация котлов

По виду вырабатываемого теплоносителя котельные установки делятся на *паровые* и *водогрейные*.

В зависимости от назначения они разделяются на *энергетические, производственные, производственно-отопительные и отопительные*.

Энергетические котельные установки вырабатывают пар для паровых турбин на тепловых электростанциях.

Производственные и производственно-отопительные котельные установки (обычно паровые) вырабатывают насыщенный или слабо перегретый пар (до 4 МПа и 450 °С), который используется в технологических процессах различных отраслей (сушка, варка, ректификация, концентрирование растворов и др.), а также для обеспечения теплотой систем отопления, вентиляции и горячего водоснабжения.

Отопительные котельные установки предназначены для обслуживания систем отопления, горячего водоснабжения и вентиляции производственных и жилых помещений.

По перемещению продуктов сгорания и воды котлы подразделяют на *газотрубные* (*жаротрубные и с дымогарными трубами*), в которых газы движутся внутри труб, *водотрубные*, в которых вода или пароводяная смесь движутся внутри труб, и *водотрубно-газотрубные*.

По конструктивным особенностям различают котлы *цилиндрические, горизонтально-водотрубные, вертикально-водотрубные*.

В зависимости от паропроизводительности различают котлы *малой* (до 20 – 25 т/ч), *средней* (от 35 – 50 до 160 – 220 т/ч) и *большой* паропроизводительности (от 220 – 250 т/ч и выше). По уровню давления перегретого пара различают котлы *с низким* (ниже 4 МПа), *средним* (от 4 до 11 МПа), *высоким* (более 11 МПа) и *сверхкритическим* давлением (выше 25 МПа). По уровню давления в газовом тракте различают котлы *с естественной, уравновешенной тягой и под наддувом*. Возможна также классификация по виду сжигаемого топлива, способу шлакоудаления и т.п. По характеру движения воды, пароводяной смеси и пара котлы подразделяются на *барабанные с естественной циркуляцией, барабанные с многократной принудительной циркуляцией и прямоточные* (рис. 3.22).

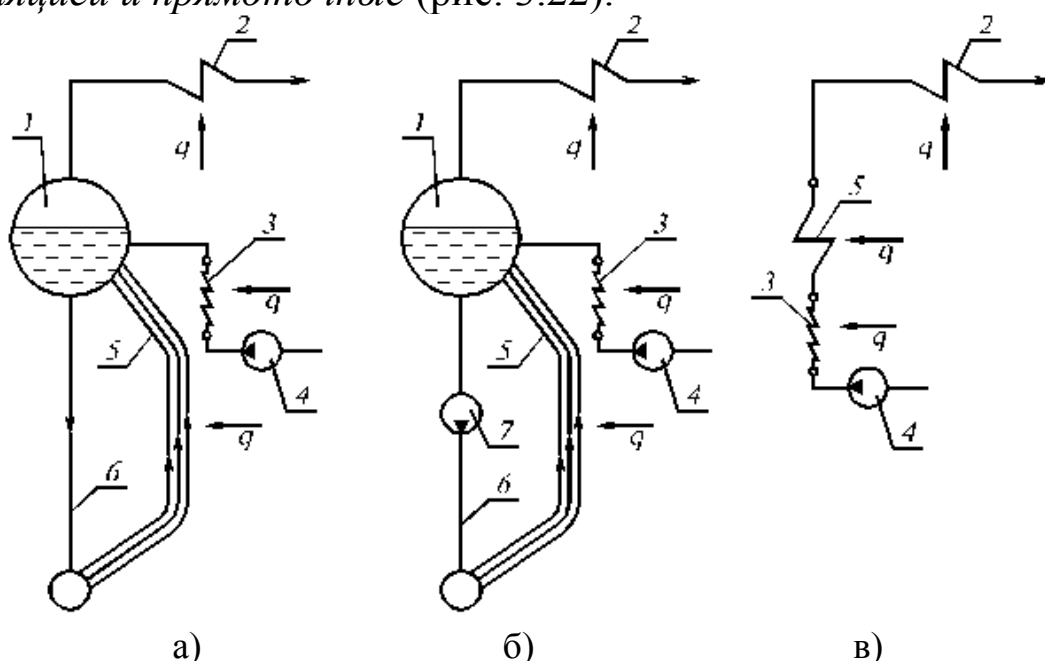


Рис. 3.22. Схемы движения воды, пароводяной смеси и пара в котлах [4]:
а – барабанном с естественной циркуляцией; *б* – барабанном с многократной принудительной циркуляцией; *в* – прямоточном; 1 – барабан; 2 – пароперегреватель; 3 – водяной экономайзер; 4 – питательный насос; 5 – обогреваемые трубы; 6 – опускные трубы; 7 – циркуляционный насос

В барабанных котлах с естественной циркуляцией движение пароводяной смеси в подъемных (обогреваемых) трубах и жидкости в опускных (необогреваемых) трубах происходит вследствие разности их плотностей. В котлах с многократной принудительной циркуляцией движение воды и пароводяной смеси осуществляется с помощью циркуляционного насоса. В прямоточных котлах нет циркуляционного контура, нет многократной циркуляции воды, отсутствует барабан, вода прокачивается питательным насосом через экономайзер, испарительные поверхности и пароперегреватель, включенные последовательно.

3.4.3.3 Основные типы паровых котлов, устанавливаемых в производственных и отопительных котельных

Основные показатели, по которым классифицируются паровые котлы, следующие: 1) паропроизводительность, определяемая количеством пара, вырабатываемым в единицу времени; 2) параметры пара или горячей воды (давление и температура); 3) температура питательной воды; 4) КПД котлоагрегата.

В настоящее время предлагается классифицировать котлы и по тепловой мощности (теплопроизводительности), которая при одинаковой паропроизводительности изменяется в зависимости от параметров пара, температуры питательной воды, наличия промежуточного перегрева и т. п.

Паровые котлы разделяют на газотрубные (рис. 3.23 а) и водотрубные (рис. 3.23 б).

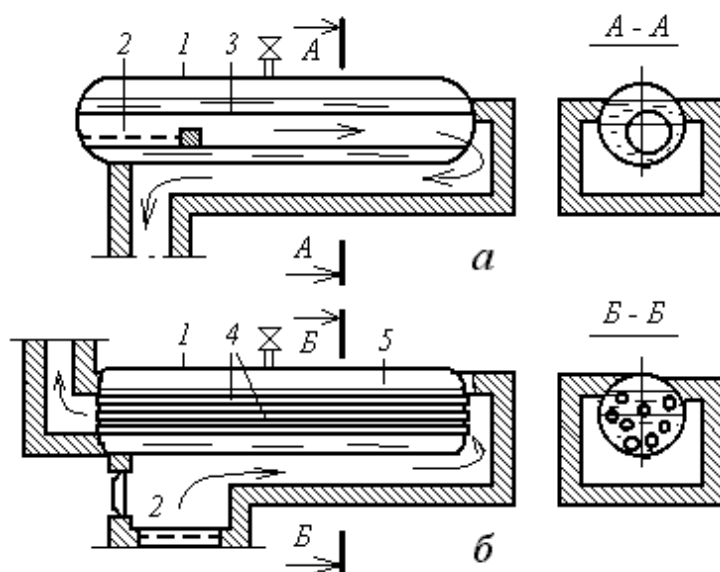


Рис. 3.23. Схема газотрубного котла с большим объемом воды:

а) жаротрубного; б) с дымогарными трубами

1- барабан; 2 – топка; 3 – жаровая труба; 4 – дымогарные трубы; 5 – паровое пространство (стрелками показан путь дымовых газов)

В газотрубных котлах продукты сгорания движутся внутри труб, омываемых водой, в водотрубных котлах наоборот: вода движется внутри труб, а газы обогревают их снаружи.

Водотрубные котлы состоят из барабанов, коллекторов и пучков кипяtilьных труб небольшого диаметра. В них содержится гораздо меньший объем воды по сравнению с газотрубными, так как объем барабана существенно меньше объема цилиндрического барабана.

В зависимости от угла наклона труб к горизонту водотрубные котлы подразделяют на *горизонтальные* (угол $10-15^{\circ}$, рис. 3.24 а) и *вертикальные* (угол $50-90^{\circ}$, рис.3.24 б).

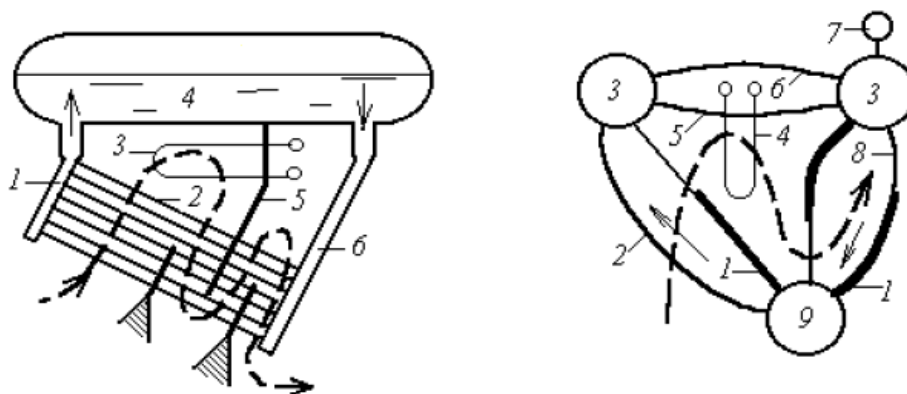


Рис. 3.24. Схема водотрубного котла:

а) горизонтального: 1 – подъемная камера; 2 – пучок кипяtilьных труб; 3 – перегреватель; 4 – барабан; 5 – перегородки, направляющие движение газов; 6 – опускная камера;

б) вертикального: 1 – перегородки, направляющие движение газов; 2 – пучок подъемных кипяtilьных труб; 3 – верхние барабаны; 4 – перегреватель; 5 – водоперепускные трубы; 6 – пароперепускные трубы; 7 – сухопарник; 8 – пучок опускных труб; 9 – нижний барабан

Котлы *малой производительности с избыточным давлением пара до 70кПа* используются в сельскохозяйственном производстве для выработки пара на бытовые, хозяйственные и технологические нужды (табл.3.2). *Котлы малой и средней производительности с давлением пара более 70 кПа:*

– котлы типа *Е (КЕ)* паропроизводительностью 2,5-25 т/ч со словесными топочными устройствами;

– газомазутные котлы типа *Е (ДЕ)* паропроизводительностью 1,0-20 т/ч;

– котлы типа *ДКВр* паропроизводительностью 2,5-20 т/ч с газомазутными топками.

Котлы типа ДКВр (двухбарабанные, вертикально-водотрубные, реконструированные) производят насыщенный или перегретый пар давлением 1,3-3,9 МПа с номинальной температурой до 442⁰С (рис.3.25) [5].

Таблица 3.2

Технические характеристики паровых котлов паропроизводительностью до 1,5 т/ч

Марка котла	Паропроизводительность, кг/ч	Давление пара, кПа	Температура пара, 0С	Расход топлива		КПД, %
				объем газа, м ³ /ч	массовый мазута, кг/ч	
КТ-Ф-300	300	до 70	120	-	37	не менее 76
КТ-500	500	до 70	не менее 120	-	61	не менее 76
КТ-1000	1000	до 70	не менее 120	-	120	не менее 76
КВ-300у	340	до 70	не менее 120	-	26,3	85
КЖ-Ф-500	500	до 70	не менее 120	-	37	не менее 85
Д-900	900	до 70	не менее 120	-	63,5	не менее 91
КГ-300	300	до 70	120	-	-	не менее 87
Д-721Г-Ф	750	до 70	не менее 120	62,5	-	87
КГ-1500	1500	до 70	не менее 120	130	-	90-94

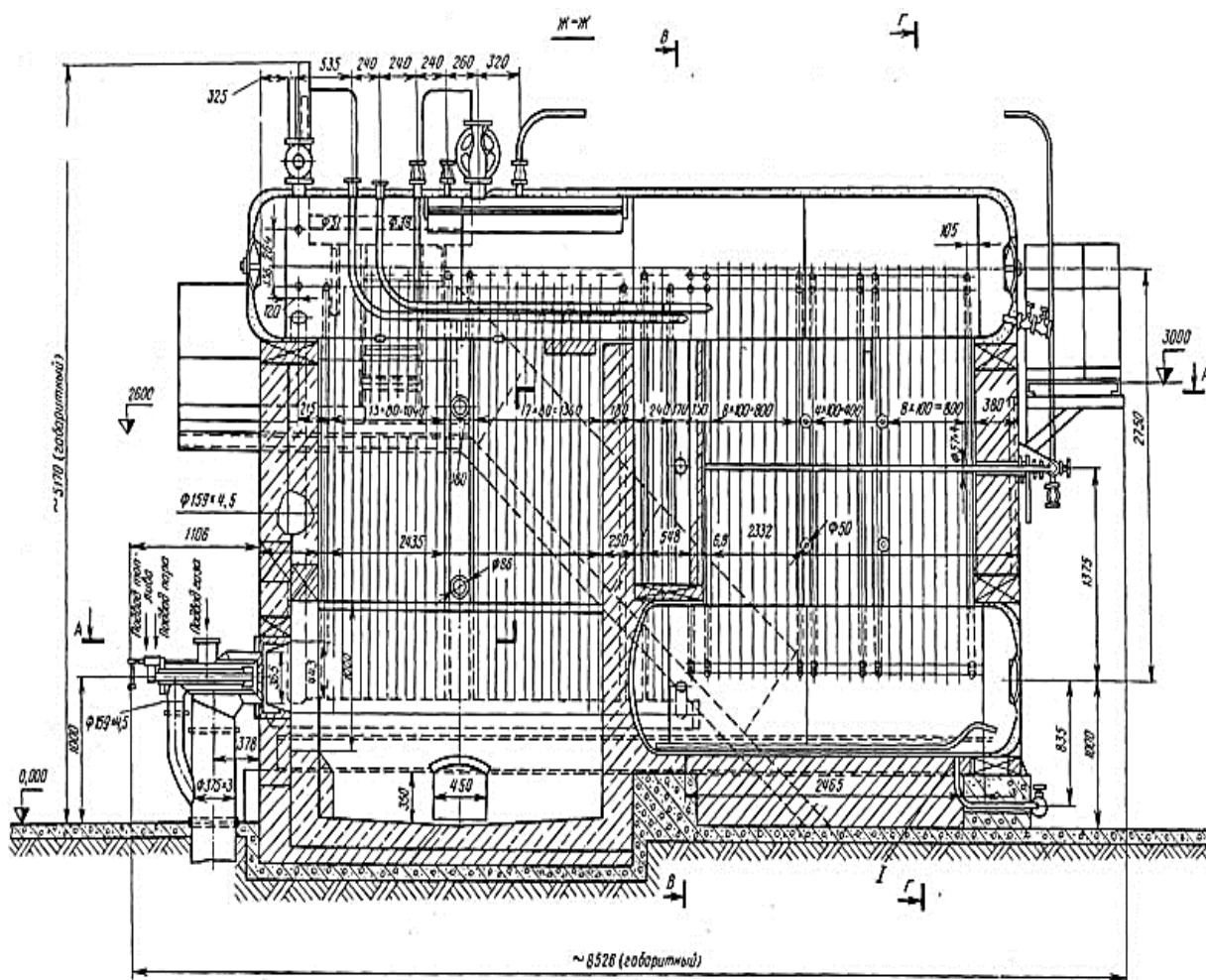


Рис. 3.25. Паровой котел типа ДКВр

Котлы выпускают с топками для сжигания твердого, жидкого и газообразного топлива. Данный тип котлов отличается простотой конструкции, высокой экономичностью и малыми габаритами. Котлы ДКВр оснащены плотным кипяtilьным пучком, что обеспечивает глубокое охлаждение продуктов сгорания. Топочная камера обеспечивает высокий теплообмен продуктов сгорания с поверхностями нагрева, так как топка выполнена с экранными поверхностями. Котлы компонуються различными топками для сжигания различных видов топлива. Технические характеристики котлов ДКВр представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3

Технические характеристики паровых котлов ДКВр

Тип котла	Технические данные						
	Паро- произ., т/ч	Раб. давление, МПа	Темп.пара, °С	КПД,%		расход топ- лива	
				газ	мазут	газ, м³/ч	мазут. кг/ч
1	2	3	4	5	6	7	8
ДКВр-2,5-13ГМ	2,5	1,3	194	90	89	280	265
ДКВр-4-13ГМ	4,0	1,3	194	90	87,9	446	422
ДКВр-4-13- 255ГМ	4,0	1,3	220	90	89	470	450
ДКВр-6,5-13ГМ	6,5	1,3	194	91	89	721	684
ДКВр-6,5-23ГМ	6,5	2,3	220	91	89	721	684
ДКВр-6,5-13- 255ГМ	6,5	1,3	220	87	86	770	730
ДКВр-6,5-23- 370ГМ	6,5	2,3	370	87	86	770	730
ДКВр-10-13ГМ	10	1,3	194	91	89	1105	1045
ДКВр-10-23ГМ	10	2,3	220	91	89	1180	1120
ДКВр-10-13- 255ГМ	10	1,3	255	91	89	1180	1120
ДКВр-10-23- 370ГМ	10	2,3	370	91	89	1180	1120
ДКВр-10-39ГМ	10	3,9	254	91	90	-	115кг/ т/ч
ДКВр-10-39- 440ГМ	10	3,9	440	-	90	-	115кг/ т/ч
ДКВр-20-13ГМ	20	1,3	194	92,1	90,3	2060	1960

Продолжение таблицы 3.3

1	2	3	4	5	6	7	8
ДКВр-20-23ГМ	20	2,3	220	92,1	90,3	2060	1960
ДКВр-20-13-250ГМ	20	1,3	250	91,6	89,5	2180	2080
ДКВр-20-23-250ГМ	20	2,3	250	91,6	89,5	2180	2080
ДКВр-20-23-370ГМ	20	2,3	370	91,5	89,5	2180	2080

Отечественная промышленность выпускает также паровые котлы Е-1,0-0,9; Е-1,6-0,9ГМН и Е-2,5-0,9ГМН (табл.3.4).

Таблица 3.4

Техническая характеристика котлов Е-1,0-0,9; Е-1,6-0,9ГМН и Е-2,5-0,9ГМН

Показатель	Е-1,0-0,9	Е-1,6-0,9ГМН	Е-2,5-0,9ГМН
Вид топлива	мазут, газ	мазут, газ	мазут, газ
Производительность	1	1,6	2,5
Температура пара, °С	174	174	174
Расчетный КПД, %	89,5	89,0	89,5
Объем топочной камеры, м ³	2	2	4,3
Топочное устройство	горелка РГМГ-1	горелка РГМГ-2	горелка РГМГ-2
Габаритные размеры котла (длина×ширина×высота)	4200×2300×2900	4200×2850×2450	5350×2850×2450

3.4.3.4 Основные типы водогрейных котлов, устанавливаемых в производственных и отопительных котельных

Водогрейный котел – устройство, имеющее топку, обогреваемое продуктами сжигаемого в ней топлива, и предназначенное для нагревания воды, находящейся под давлением выше атмосферного и используемой в качестве теплоносителя вне самого устройства. Максимальная температура воды на выходе из котлов, в зависимости от их теплопроизводительности, может составлять 95, 115, 150 и 200°С. По материалу, из которого изготовлены водогрейные котлы, их можно разделить на *стальные* и *чугунные*. Чугунные котлы отличаются большей коррозионной стойкостью. По характеру циркуляции воды (независимо от конструкции) все водогрейные котлы являются *прямоточными*.

Чугунные водогрейные котлы работают при давлении воды в системе не более 0,6 МПа. Максимальная температура нагреваемой воды – 95°С. Допускается работа котлов с температурой до 115°С при рабочем давлении в системе отопления не ниже 0,35 МПа. В настоя-

щее время чугунные котлы выпускают теплопроизводительностью, как правило, не превышающей 2 МВт.

Чугунные котлы комплектуются внутренними и выносными топками. Котлы с внутренними топками предназначены для сжигания высокосортного топлива (каменного угля, антрацита), в них топочные устройства размещают внутри поверхности нагрева (между секциями).

В котлах с выносными топками топочные устройства располагают вне поверхности нагрева, что позволяет сжигать низкосортные виды топлива (торф, древесные отходы).

Широкое применение в сельскохозяйственном производстве получили чугунные водогрейные котлы КЧ-1, КЧ-2 (котлы типа «Универсал») и КЧ-3 (котлы типа «Энергия»), работающие под давлением до 0,5 МПа и нагревающие воду до 95-115⁰С (табл.3.5).

Таблица 3.5

Техническая характеристика чугунных водогрейных котлов

Группа котлов	Тепловая мощность, кВт		Площадь условной поверхности нагрева*, м ²
	общая	секции	
КЧ-1	81,5...232	11,6	7,1-20
КЧ-2	328...1300	23,2	29-112
КЧ-3	652...1815	34,8	56-166

* Площадь условной поверхности нагрева – это площадь поверхности нагрева, квадратный метр которой при работе котла с ручной топкой на отсортированном антраците и при тепловом напряжении зеркала горения 580 кВт/м² передает теплоты котловой воде 11,63 кВт/м² при КПД не ниже 70%

Данные типы котлов имеют естественную циркуляцию воды и выполнены по единому принципу, их сборка производится из отдельных чугунных секций, соединенных между собой с помощью отдельных конических ниппелей, которые вставляют в специальные отверстия и стягивают стяжными болтами (рис.3.26) [14].

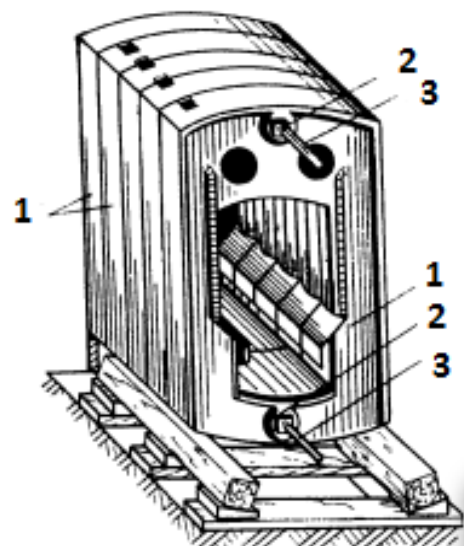


Рис. 3.26. Схема соединений секций чугунного котла: 1 – секции котла; 2 – отверстия под вкладыши-ниппели; 3 – стяжные болты

Котел КЧ-1 имеет теплопроизводительность от 81,5 до 232 кВт (рис.3.27).

Топка данного котла оборудована колосниковой решеткой с плиточными колосниками. Вода в котел поступает через нижний патрубок 8 и расходится по секциям, топливо поступает через загрузочную дверцу 6, воздух подается через дверку зольника 7. Топливо сгорая, отдает свое тепло нагреваемой воде, при этом продукты сгорания поступают в газоходы, разрежение в котле регулируется с помощью шиберов 9, который приводят в управление с помощью троса 11.

Помимо секционных чугунных котлов в отопительных котельных широко используются *стальные водотрубные котлы* следующих типов: ТВГ, КВГ, КВ-ГМ (табл.3.6).

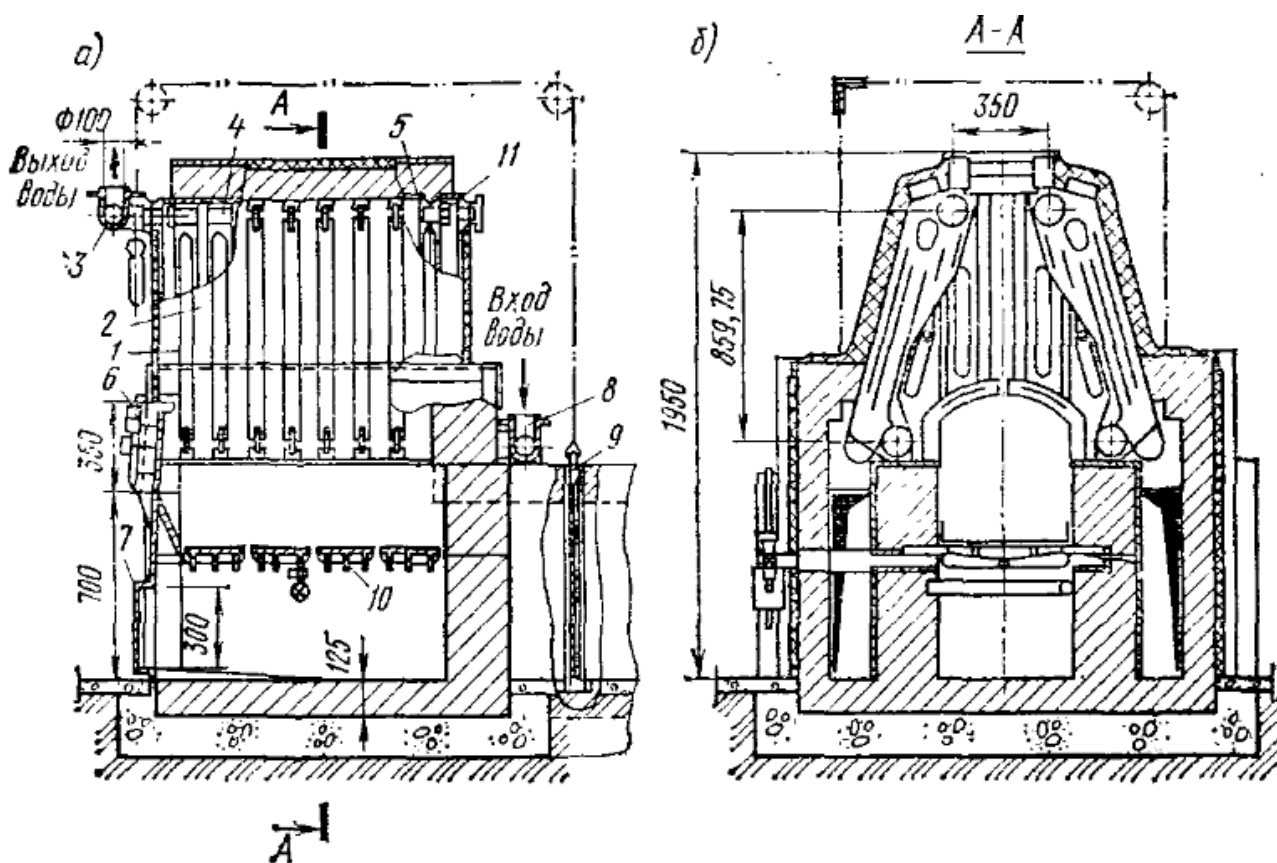


Рис. 3.27. Чугунный водогрейный котел типа КЧ-1

а) продольный разрез б) поперечный разрез

- 1 – крайняя секция, 2 – средняя секция, 3 и 8 – патрубки, 4 – ниппель,
 5 – стяжной болт, 6 – загрузочное устройство, 7- дверка зольника,
 9 – шибер, 10- колосниковая решетка, 11 – трос

Теплофикационный водогрейный газовый котел ТВГ представляет собой прямоточный секционный теплогенератор с принудительной

циркулирующей воды, оборудованный отдельным дымососом и вентилятором. Котлы ТВГ выпускаются теплопроизводительностью 4,65 МВт (ТВГ-4) и 9,3 МВт (ТВГ-8). Особенностью котлов является развитая радиационная поверхность. Котлы ТВГ-4 и ТВГ-8 имеют три двухсветных экрана и четыре горелки. Двухсветные экраны делят топку на четыре отсека. Кроме того, каждый котел имеет два односветных экрана, расположенных у стенок, и потолочный экран, частично переходящий во фронтальный экран. Конвективная поверхность нагрева состоит из двух секций с верхними и нижними коллекторами, соединенными между собой восемью стояками, в каждый из которых вварены по четыре П-образных змеевика. Змеевики располагаются параллельно фронту котла в шахматном порядке. Для направления движения воды по змеевикам в стояках есть перегородки.

Таблица 3.6

Характеристика водогрейных котлов типа ТВГ

Показатели	Тип котла	
	ТВГ-4	ТВГ-8
Производительность, кВт	4650	9300
Площадь поверхности нагрева, м ²	140	282
Температура уходящих газов, °С	180	180
Температура воды, °С		
нагретой	150	150
оборотной	70	70
КПД котла, %	91,5	91,5
Габаритные размеры, мм	3500x3840x4000	4900x3840x4650

Для сжигания газа используются подовые горелки с прямой щелью, заканчивающейся сверху внезапным расширением. Горелки размещены между вертикальными топочными экранами.

Стальные прямоточные *водогрейные котлы КВ-ГМ* унифицированной серии выпускаются различных типоразмеров тепловой мощностью от 2-116,2 МВт (табл.3.7). Котлы предназначены для установки на ТЭЦ, в производственно-отопительных и отопительных котельных, работающих на газообразном и жидком топливе и оборудованы ротационными газомазутными горелками.

Котлы типа *КВ-ГМ -4* и *КВ-ГМ-6,5* рассчитаны на подогрев воды от 70 до 150 °С с качественным регулированием отпуска тепла. Котлы имеют единый профиль и различаются размерами (глубиной) топочной камеры и конвективной шахты.

Котлы *КВ-ГМ-10-150* [14], *КВ-ГМ-20-150* и *КВ-ГМ-30-150* обеспечивают подогрев воды до 150°С с разностью температур воды на входе и выходе, равной 80 °С, работают с постоянным расходом воды

на всех нагрузках. Котлы являются прямоточными, имеют единый профиль в разрезе и различаются только глубиной топки и конвективного газохода.

Таблица 3.7

Техническая характеристика стальных водогрейных котлов типа КВ-ГМ

Марка котла	Тепловая мощность, МВт	Массовый расход воды, т/ч	Расход топлива		Температура уходящих газов, °С		КПД, %	
			объемный (газ), м ³ /ч	массовый (мазут), кг/ч	газ	мазут	газ	мазут
КВ-ГМ-4	4,6	49,5	515	500	150	245	90,5	86,35
КВ-ГМ-6,5	7,6	80	830	800	153	245	91,1	87
КВ-ГМ-10	11,6	123,5	1290	1200	185	230	91,8	88,5
КВ-ГМ-20	23,3	247	2580	2450	190	240	91,5	88,85
КВ-ГМ-30	34,9	370	3680	3870	195	240	91,8	88,6
КВ-ГМ-50	58,2	618	6250	5750	142	138	92,6	92,7
КВ-ГМ-100	116,2	1235	12520	11550	180	180	91,1	91,3

Котлы *КВ-ГМ-50-150* и *КВ-ГМ-100-150* выполнены водотрубными, прямоточными с П-образной сомкнутой компоновкой поверхностей нагрева. Котлы предназначены для получения горячей воды с температурой 150°С в отдельно стоящих котельных для использования в системах отопления, вентиляции и горячего водоснабжения объектов промышленного и бытового назначения и на ТЭЦ в качестве пиково-резервных источников тепла. Котлы используются для работы, как в основном режиме, так и в пиковом (для подогрева сетевой воды соответственно от 70 до 150 °С и от 110 до 150 °С). Котлы должны работать с постоянным расходом воды.

Топки котлов оборудованы газомазутными горелками с ротационными форсунками типа РГМГ-20 (две горелки на котле КВ-ГМ-50-150) и РГМГ-30 (три горелки на котле КВ-ГМ-100-150). Топка и задняя стена конвективного газохода полностью экранированы. Конвективная поверхность нагрева котлов состоит из трех пакетов, расположенных в вертикальном газоходе. Каждый пакет набирается из П-образных ширм.

Котлы полностью унифицированы между собой и отличаются только глубиной топочной камеры и конвективного газохода.

Водогрейные котлы типа ПТВМ предназначены для работы на газообразном (основное) и жидком (для кратковременной работы) топливе. Эти котлы имеют башенную компоновку, то есть конвективные поверхности нагрева располагаются непосредственно над то-

почной камерой, выполненной в виде прямоугольной шахты. Топочная камера котлов полностью экранирована. Топка котлов типа ПТВМ-180 помимо фронтального, заднего и двух боковых экранов имеет два ряда двухсветных экранов, которыми она разделяется на три сообщающиеся камеры.

Конвективные поверхности нагрева котлов типа ПТВМ различной теплопроизводительности однотипны и отличаются только длиной П-образных змеевиков и числом параллельных змеевиков, составляющих одну секцию.

В последнее время в энергетической промышленности России большое внимание уделяется разработке и выпуску новых *жаротрубно-дымогарных* водогрейных котлов. Они находят широкое применение в районных, заводских и коммунально-бытовых отопительных котельных, приходя на смену стальным водотрубным и чугунным водогрейным котлам.

В настоящее время распространены жаротрубно-дымогарные котлы с трехходовым движением дымовых газов. Трехходовой по движению газов жаротрубно-дымогарный котел, например АВ-2 (рис. 1.28), состоит из горизонтального цилиндрического барабана с плоскими отбортованными днищами.

В таблице 3.8 приведены основные технические характеристики некоторых типов водогрейных котлов жаротрубно-дымогарного типа, выпускаемых отечественными производителями.

Таблица 3.8

Основные технические характеристики и размеры водогрейных котлов жаротрубно-дымогарного типа

Величина	Марка котлов		
	КВЖ	АВ	КВаГн
Теплопроизводительность, МВт (Гкал/ч)	2,00–5,00 (1,72–4,30)	8,12 (7,00)	0,09–2,33 (0,08–2,00)
Температура воды, °С:			
на входе в котел	70	70	70
на выходе из котла	115	95; 95; 114; 150	<115
Давление воды, МПа	0,9	0,07; 0,17; 0,9; 0,9	0,4; 0,6*
Масса установки, т	9,17–24,93	25,10–30,20	0,32–4,165
КПД котла, %:			
на газе	89,0–89,5	93,0–91,0	92,0
на мазуте	86,8–88,8	–	–

* Рабочее давление равно 0,4 МПа для котлов тепловой мощностью до 0,19 МВт включительно

3.4.4 Вспомогательные поверхности нагрева котлов

3.4.4.1 Пароперегреватели

Пароперегреватель – это устройство, в котором происходит получение перегретого пара из сухого насыщенного, он представляет собой систему змеевиков, выполненных из углеродистой стали. В зависимости от расположения змеевиков пароперегреватели бывают горизонтальные и вертикальные. Наиболее чаще используемые – вертикальные, их подразделяют на конвективные (тепло передается конвекцией), радиационно-конвективные (тепло от газов передается как конвекцией, так и излучением) и радиационные (воспринимают тепло в основном излучением).

Конвективные пароперегреватели (рис.3.28) размещаются за топочной камерой или за первым газоходом, радиационные – непосредственно в топочной камере, радиационно-конвективные – в газоходе котла и в топочной камере.

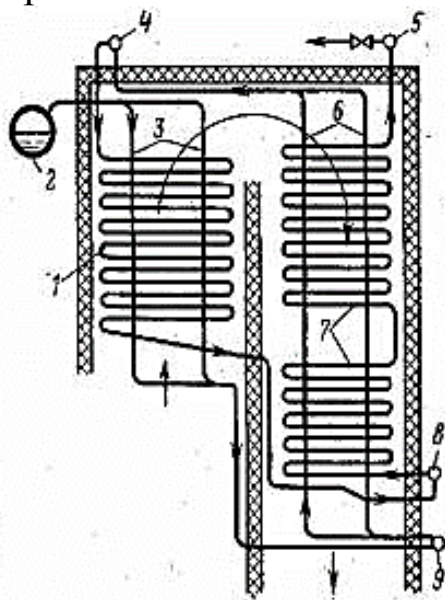


Рис. 3.28. Конвективный пароперегреватель:

- 1 – первая ступень пароперегревателя, 2 – барабан, 3,6 - подвесные трубы, 4,8 - промежуточные коллектора, 5 – выходная камера, 7 – вторая ступень пароперегревателя, 9 – коллектор подвесных труб

Радиационные перегреватели (рис. 3.29) выполняют в виде ширм, состоящие из близко расположенных друг к другу вертикальных или горизонтальных труб, в котлах данные ширмы расположены на расстоянии 450-1000 мм друг от друга. Конвективные паропере-

греватели выполняют в виде вертикальных или горизонтальных змеевиковых труб.

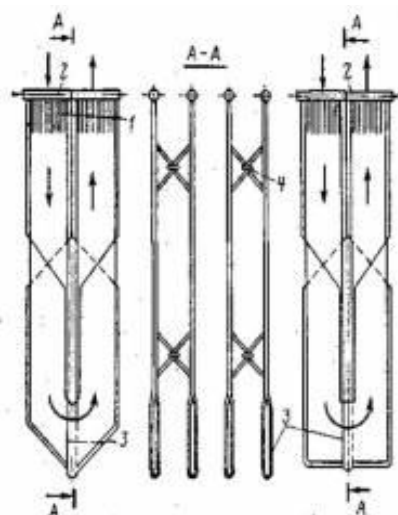


Рис. 3.29. Вертикальный радиационный перегреватель:
 а – клинообразная форма низа ширмы, б – горизонтальная форма низа ширмы,
 1 – труба ширмы, 2 – камеры, 3 – обвязочные трубы, 4 – хомут

Регулирование перегрева пара происходит с помощью изменения количества питательной воды, проходящей через устройство. В котлах с давлением до 2,4 МПа температуру не регулируют, свыше 3,9 МПа изменяют с помощью впрыска конденсата в пар, путем изменения расхода продуктов сгорания через пароперегреватель, изменением положения факела в топке и другими способами.

В зависимости от направления движения пара и газов пароперегреватели подразделяют:

- прямоточные – газ и пар движутся в одном направлении;
- противоточные – движутся в противоположном;
- со смешанным движением потоков – в первой по ходу движения пара части змеевиков газы и пар движутся в противоположных направлениях, при завершении перегрева – они движутся прямоточно (рис.3.30).

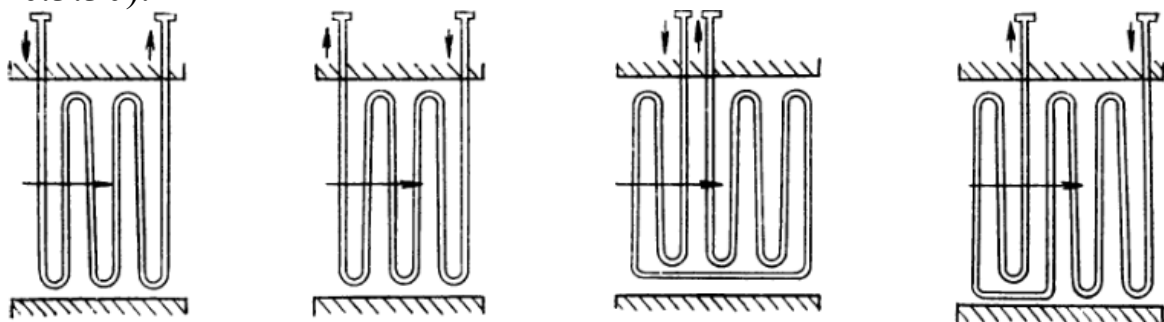


Рис. 3.30. Схемы движения газа и пара в пароперегревателях:
 а) прямоточная б) противоточная в) двойной противоток г) смешанный ток

Наиболее оптимальной по условиям надежности работы является смешанная схема работы пароперегревателя, так как в области наибольшей тепловой нагрузки в начале газохода температура пара является умеренной, завершение перегрева пара будет происходить при меньшей тепловой нагрузке. При прямоточной схеме температурный напор минимален, что требует увеличения поверхности пароперегревателя, при противоточной схеме, змеевики обогреваемые продуктами сгорания с наиболее высокой температурой встречают уже перегретый пар и охлаждаются при этом недостаточно.

3.4.4.2 Экономайзеры

Экономайзеры служат для подогрева питательной воды перед ее поступлением в испарительную часть котла. Данный подогрев осуществляется уходящими от топки газами. Экономайзеры изготавливают чугунными и стальными, в зависимости от степени подогрева питательной воды их подразделяют на некипящие и кипящие. В некипящих - питательная вода подогревается на 20-30⁰С ниже температуры кипения, в кипящих - температура кипения не ограничена, в них от 10% воды и более превращается в пар.

Чугунные экономайзеры – экономайзеры некипящего типа, для исключения разрушения труб вследствие гидравлических ударов при кипении воды. Изготавливаются из ребристых труб с фланцами, соединенных между собой в колонки, состоящие из вертикальных или горизонтальных рядов. Их достоинства – устойчивость против коррозии и небольшая стоимость, недостаток – низкая теплопередача и громоздкость. Для снижения температуры поверхности труб в экономайзерах предусмотрены обдувочные устройства, встроенные в блоки.

Чугунный водяной блочный одноколонковый экономайзер выполняется из ребренных труб 3 (рис. 3.31), соединяемых между собой калачами. Питательная вода проходит последовательно по всем трубам снизу вверх, а продукты горения проходят через зазоры между ребрами труб.

Стальные экономайзеры (рис.3.32) - экономайзеры как кипящего, так и некипящего типов, по конструкции схожи с пароперегревателями, выполнены из труб-змеевиков, концы которых приварены к сборным коллекторам. Змеевики расположены в горизонтальном шахматном порядке.

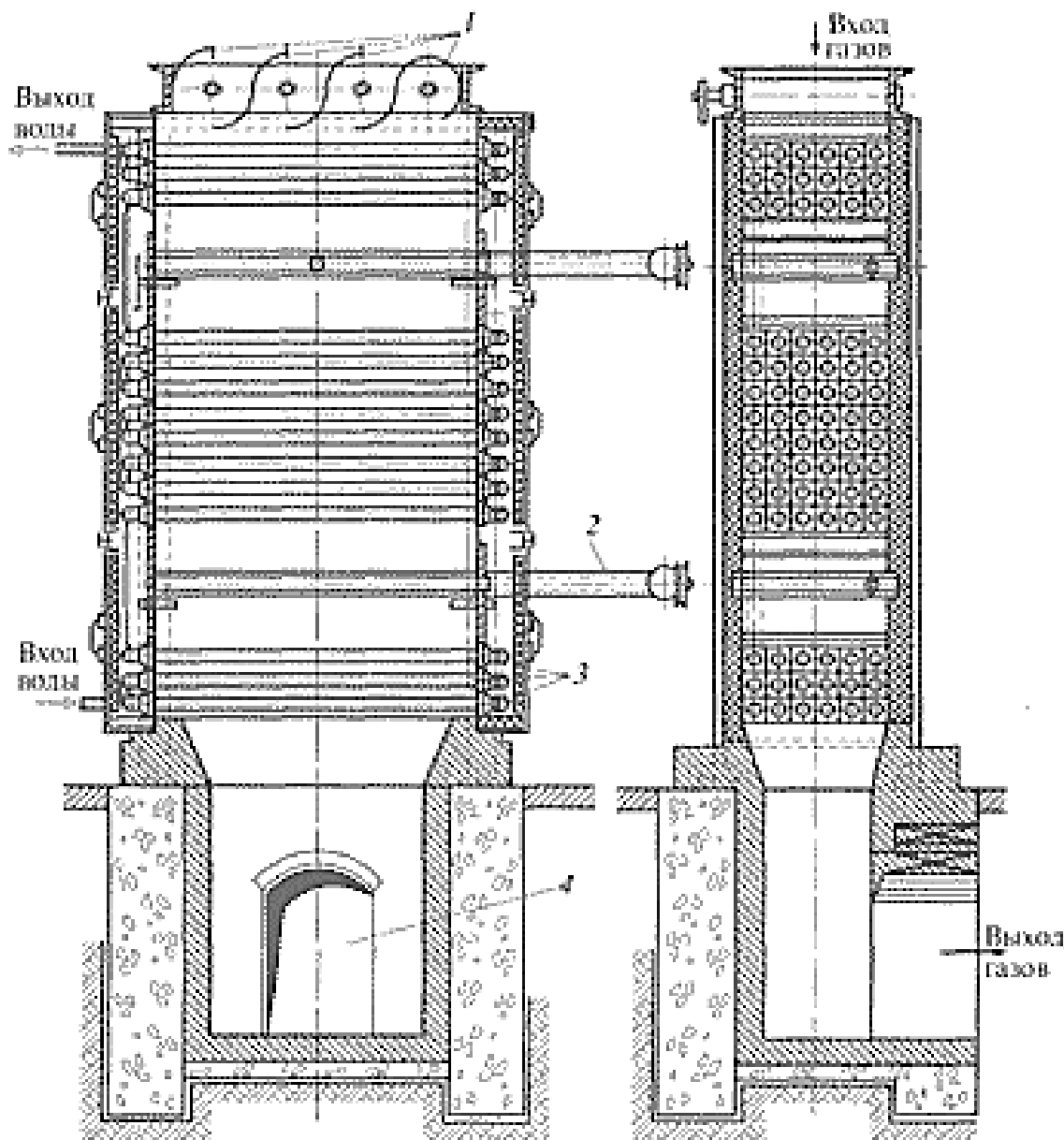


Рис. 3.31. Чугунный водяной блочный одноколонковый экономайзер:
 а-продольный разрез; б-поперечный разрез;
 1-заслонки; 2-обдувочное устройство; 3-чугунные оребренные трубы; 4-газоход

По сравнению с чугунными экономайзерами стальные имеют более высокий коэффициент теплопередачи и более компактны, но они более чувствительны к коррозии. В кипящих экономайзерах необходимо поддерживать высокие скорости потока для уменьшения перегрева пара (не менее 1 м/с – для воды, 10-12 м/с - для дымовых газов). Во избежание коррозии внутренних поверхностей устройств проводится дегазация воды, внешних поверхностей - температура воды на входе в экономайзер должна быть выше на 5-10⁰С температуры точки росы водяных паров в дымовых газах.

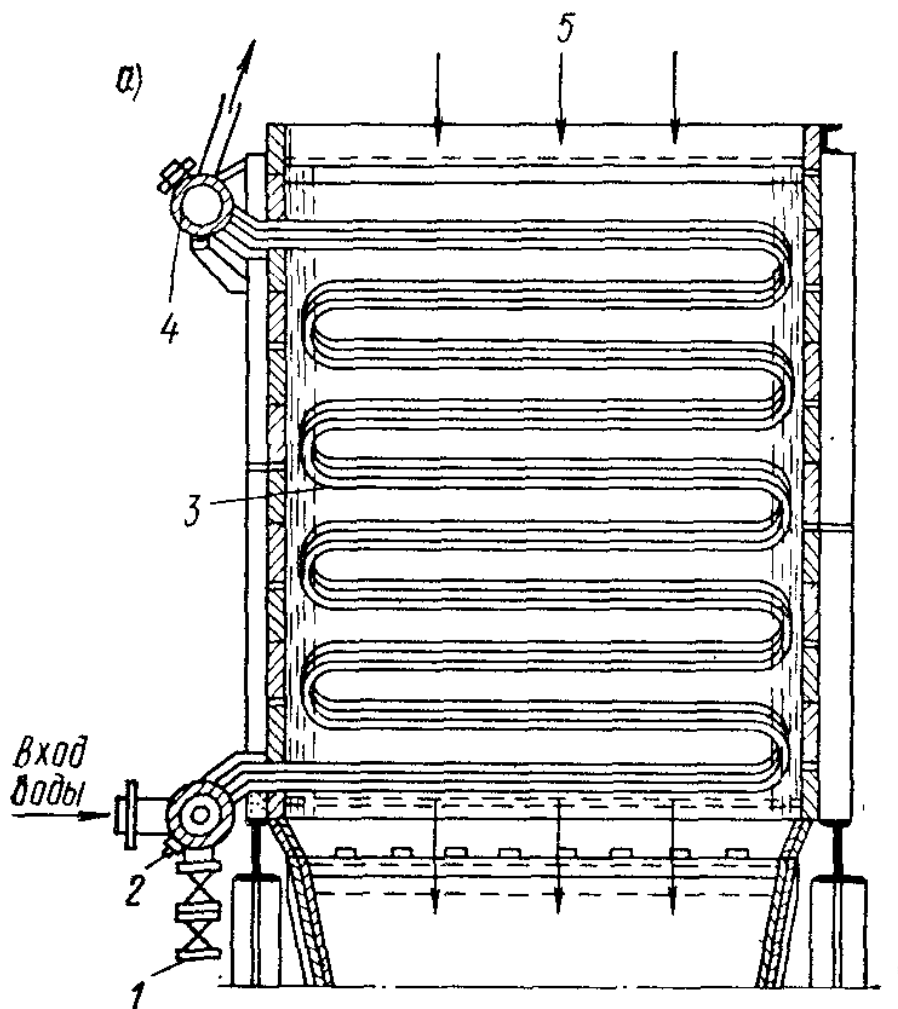


Рис. 3.32 - Стальной трубчатый экономайзер:

1, 7 - спускной и запорный вентили; 2 – входной коллектор; 3 – трубы; 4 – входной коллектор подогретой воды; 5 – вход газов, 6 – барабан котла; 8,9 – обратный питательный и предохранительный клапаны; 10 – обводной трубопровод питания

3.4.4.3 Воздухоподогреватели

Воздухоподогреватели – это устройства для подогрева воздуха уходящими из котла продуктами сгорания перед его подачей в топку котла. Данное устройство существенно уменьшает потери теплоты с уходящими газами, так как при использовании подогретого воздуха повышается температура горения топлива и соответственно КПД котельного агрегата. По способу передачи теплоты воздухоподогреватели подразделяют на рекуперативные (передача теплоты от газа к воздуху происходит через разделяющую их стенку) и регенеративные (передача теплоты от продуктов сгорания к воздуху происходит пу-

тем попеременного нагревания и охлаждения одной и той же поверхности нагрева).

Рекуперативные воздухоподогреватели (рис.3.33) применяют в котлах малой и средней мощности. Они выполняются в виде рекуперативных трубчатых многоходовых по воздуху теплообменников. Воздух омывает вертикально расположенные стальные трубы, по которым движутся дымовые газы. В трубчатых воздухоподогревателях воздух подогревается до температуры не выше $300-320^{\circ}\text{C}$. При необходимости подогрева воздуха до температуры $380-420^{\circ}\text{C}$ вместо одноступенчатой компоновки применяют двухступенчатую, то есть между ступенями вводят экономайзер, что повышает температурный напор.

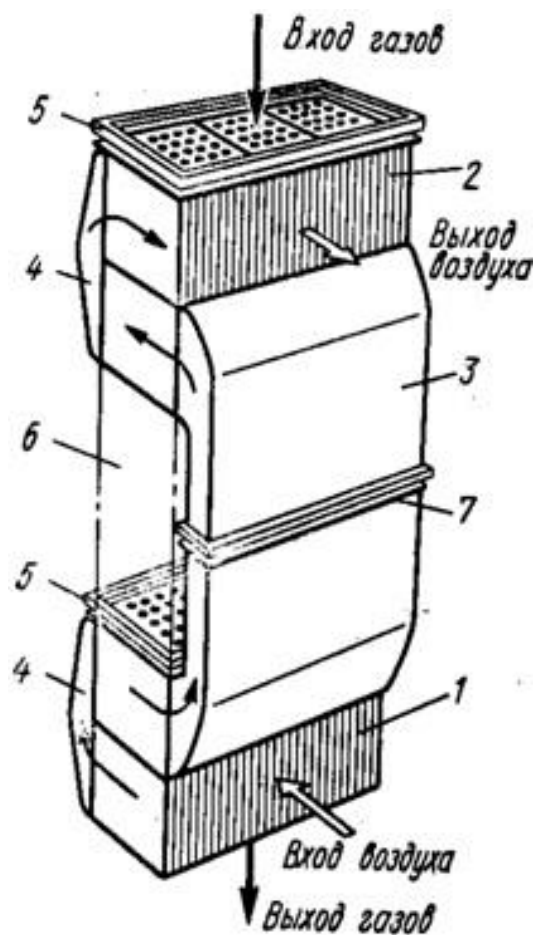


Рис. 3.33. Рекуперативный воздухоподогреватель: 1 – нижние кубы воздухоподогревателя; 2 – верхние кубы воздухоподогревателя; 3, 4- перепускные короба; 5, 7 – компенсаторы; 6 – место установки экономайзера

Регенеративный воздухоподогреватель (рис.3.34) выполнен в виде корпуса, внутри которого установлен на валу ротор с набивкой из тонких ($0,6-1$ мм) стальных листов, которые образуют каналы малого диаметра для прохода воздуха и продуктов сгорания. Вверху и внизу к кожуху приварены патрубки для подвода и отвода газов и воздуха. Ротор разделен вертикальными перегородками на сектора, вал вращается, обеспечивая круговое вращение набивки. Находясь между газовыми патрубками, набивка нагревается, между воздушными – охлаждается, отдавая теплоту воздуху.

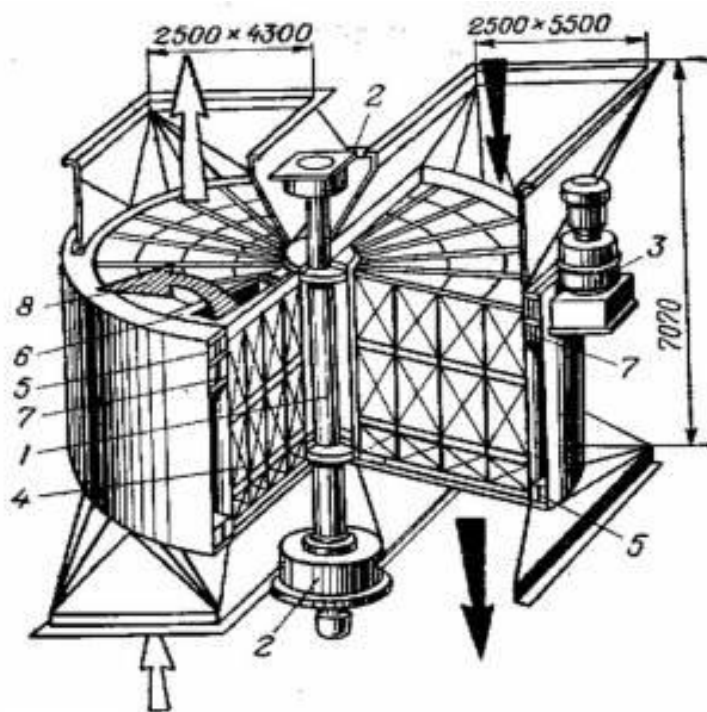


Рис. 3.34. Регенеративный воздухоподогреватель:
 1 – вал ротора; 2 – подшипники; 3 – электродвигатель; 4 – набивка;
 5 – наружный кожух; 6,7 – радиальное и периферийное уплотнение;
 8 – утечка воздуха

Регенеративные воздухоподогреватели менее металлоемки, обладают более низким аэродинамическим сопротивлением, но из-за наличия вращающихся деталей требуют установки сложных уплотнений.

В приложении 1 представлены схемы наиболее часто используемых вспомогательных поверхностей нагрева котлов.

3.4.5 Вспомогательные устройства котельного агрегата

3.4.5.1 Тяговые и дутьевые устройства

Для работы котла в топку необходимо подавать воздух, из нее удалять дымовые газы. При движении воздуха по воздуховодам и продуктов сгорания по газоходам возникают аэродинамические сопротивления, на которое затрачивается определенное количество энергии. Напор, необходимый для преодоления данных сопротивлений может создаваться за счет естественной или искусственной тяги.

Система естественной тяги применяется в котлах малой мощности при малых сопротивлениях движению потоков воздуха и продуктов сгорания. Естественная тяга возникает за счет разности давлений

воздуха, поступающего в топку, и продуктов горения, удаляемых через дымовую трубу (рис.3.35).

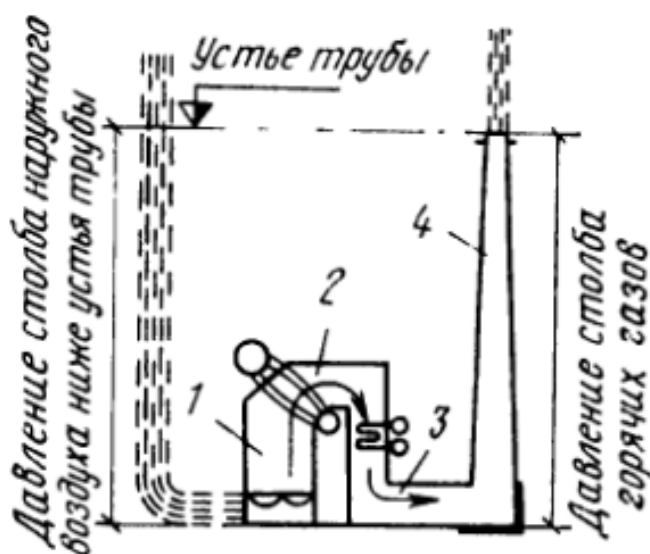


Рис. 3.35. Схема действия естественной тяги

Действие дымовой трубы основано на принципе сообщающихся сосудов. При этом тяга, создаваемая дымовой трубой, зависит от высоты трубы и разности плотностей атмосферного воздуха и продуктов горения

$$P_T = H_{\text{тр}} g (\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{п.г.}}), \quad (106)$$

где $H_{\text{тр}}$ — высота трубы, м; g — ускорение свободного падения, $\text{м}^2/\text{с}$; $\rho_{\text{в}}$ — плотность атмосферного воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$; $\rho_{\text{п.г.}}$ — плотность продуктов горения, $\text{м}^3/\text{кг}$.

Регулирование естественной тяги осуществляется при помощи шиберов (металлических пластин), установленных в газоходах между котельным агрегатом и дымовой трубой.

Искусственная тяга применяется в котельных с котлами средней и большой производительности. При искусственном дутье и тяге подачу воздуха осуществляют с помощью дутьевых вентиляторов, удаление топочных газов с помощью дымососов.

Дымососы и вентиляторы близки по своему устройству, состоят из ротора с лопатками и неподвижного кожуха, при этом дымососы работают в более тяжелых условиях, чем вентиляторы, так как они отсасывают газы с более высокой температурой (до 250°C) (рис.3.36).

Отсюда в дымососах предусмотрено водяное охлаждение подшипников, лопатки и кожух выполнены из более прочных материалов.

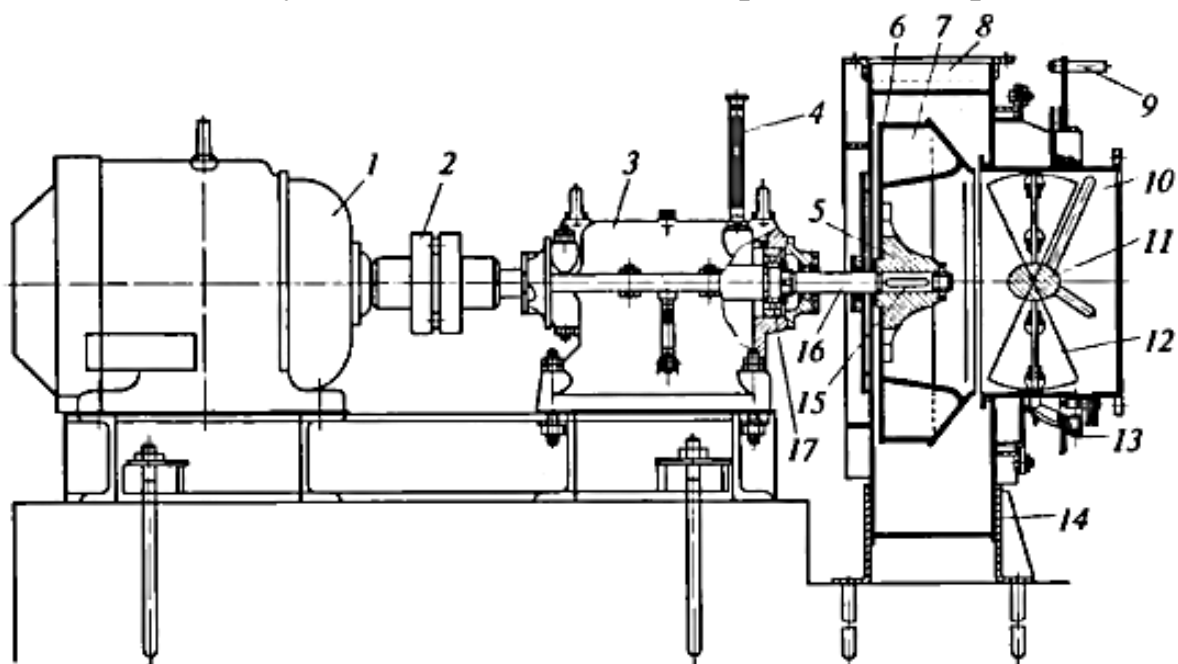


Рис.3.36 Установка с центробежным дымососом (вентилятором):
 1 – электродвигатель; 2 – муфта; 3 – ходовая часть; 4 – термометр;
 5 – ротор; 6 – диск; 7 – лопатки; 8,10 – выходной и входной патрубки;
 9 – рукоятка поворота лопастей; 11 – центральный рассекаватель;
 12 – поворотные лопасти; 13 – поворотное кольцо; 14 – корпус;
 15 – втулка; 16 – вал; 17 – подшипник

Часовая производительность вентилятора, м³/ч определяется по формуле

$$V_B = \frac{1,1\alpha_T V_0 B (t_B + 273)}{273}, \quad (107)$$

где 1,1 – коэффициент запаса; α_T – коэффициент избытка воздуха в топке, V_0 – теоретически необходимое количество воздуха, Нм³/кг; В – количество сжигаемого топлива, кг/ч; t_B – температура подаваемого воздуха, °С.

Часовая производительность дымососа, м³/ч

$$V_B = \frac{1,1V_T B (t_T + 273)}{273}, \quad (108)$$

где V_T – объем дымовых газов перед дымососом, Нм³/кг; t_T – дымовых газов перед дымососом, °С.

В таблицах 3.9 и 3.10 приведены основные характеристики дымо-сосов и вентиляторов, выпускаемых фирмой «Мовен».

Таблица 3.9

Основные характеристики вентиляторов фирмы «Мовен»

Параметры	Конструктивное исполнение	Частота вращения, об/мин	Установленная мощность, кВт	Производительность, м ³ /ч	Давление, Па	Температура перемещаемой среды, °С
ВДН-8	1	1500	15	10,2	2190	30
ВДН-9	1	1500	15	14,65	2780	30
ВДН-10	1	1500	30	19,6	3450	30
ВДН-11,2	1	1500	45	27,65	4320	30
ВДН-12,5	1	1500	90	39,1	5320	30
ВД-13,5	3	1500	250	60	5000	30
ВДН-15	3	1500	315	50	3500	30
ВД-15,5	3	1500	320	90	6600	30
ВДН-17	3	1500	630	75	4500	30

Таблица 3.10

Технические характеристики дымососов фирмы «Мовен»

Параметры	Конструктивное исполнение	Частота вращения, об/мин	Установленная мощность, кВт	Производительность, м ³ /ч	Давление, Па	Температура перемещаемой среды, °С
ДН-8	1	1500	15	10,2	1400	200
ДН-9	1	1500	15	14,65	1780	200
ДН-10	1	1500	30	19,6	2210	200
ДН-11,2	1	1500	45	27,65	2760	200
ДН-12,5	1	1500	75	38	3430	200
ДН-15	3	1000	75	50	2260	200
ДН-17	3	1000	160	73	2880	200
ДН-19	3	1000	200	108	3640	200
ДН-21	3	1000	400	143	4600	200
ДН-22	3	750	320	154	2680	200
ДН-24	3	750	400	185	3150	200
ДН-26	3	750	630	237	3700	200

3.4.5.2 Золоулавливающие устройства и устройства для удаления золы и шлака

Эффективность работы золоулавливающих устройств зависит от физико-химических свойств золы и транспортирующих ее дымовых газов. Основными параметрами золы являются плотность, дисперсный состав, удельное электрическое сопротивление, слипаемость.

Для очистки газов от золы и пыли применяются аппараты, различающиеся по конструкции и принципу осаждения частиц. Их подразделяют на четыре группы: «сухие» механические, «мокрые» механические, фильтры и электрофильтры.

Золопылеуловители характеризуются эффективностью улавливания, которая представляет собой отношение массы уловленной пыли к общему количеству пыли, поступающей в аппарат.

К «сухим» механическим аппаратам относятся: осадительные камеры, циклоны, инерционные, жалюзийные, вихревые и динамические пылеуловители.

Осадительные камеры представляют собой пустотелые или с горизонтальными полками камеры. В них используется гравитационное осаждение частиц при прохождении газа через объем аппарата со скоростью 0,2-0,8 м/с. Жалюзийные золопылеуловители просты по конструкции и имеют небольшое гидравлическое сопротивление. Они состоят из жалюзийной решетки и пылеуловителя (циклона).

Скорость газа в жалюзийном пылеуловителе составляет 12–15 м/с; гидравлическое сопротивление решетки – 100–500 Па. Применяется для улавливания частиц крупнее 20 мкм.

Циклоны являются наиболее распространенными аппаратами для очистки газов от золы и пыли (рис.3.37) [5,14]. Они просты в изготовлении, надежно работают при высоких температурах и давлениях газов, имеют практически постоянное гидравлическое сопротивление и не изменяют фракционную эффективность с ростом запыленности газов. Подводка газов в

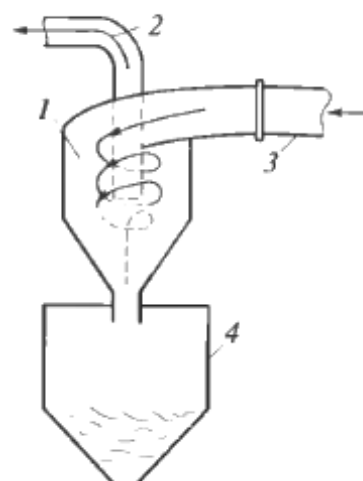


Рис. 3.37. Схема работы циклона: 1- корпус; 2 – труба для удаления чистых газов; 3 – патрубков входа дымовых газов; 4 – бункер для сбора воды

циклон может быть спиральной, тангенциальной, тангенциально-винтообразной. Циклоны могут быть цилиндрическими и коническими. Цилиндрические циклоны являются высокопроизводительными аппаратами, а конические – высокоэффективными.

Для повышения степени очистки применяют циклоны небольшого диаметра (0,23–0,5 м), объединяемые в батареи, так называемые *батареиные циклоны*. Распространены три типа элементов батарейных циклонов: с осевым направляющим аппаратом (БЦР-254), полулитоочным подводом газа (БЦУ-М) и четырехзаходным подводом газа (БЦ-512). Более высокую степень улавливания имеют батарейные циклоны типов БЦУ-М и БЦ-512.

К группе *«мокрых» механических пыле-золоуловителей* (рис. 3.38) относятся: *полые, насадочные, тарельчатые, ударно-инерционного действия, центробежные, скоростные (скрубберы Вентури) скрубберы*. Удаление золы (пыли) в них происходит при непосредственном контакте жидкости с запыленным газом. Принцип их действия основан на отделении частиц золы (пыли) от потока инерционными силами и их прилипанию к пленке воды, омывающей стенки или поверхность насадки, что исключает возврат частиц в поток газа. В золоуловителях такого типа помимо улавливания золы протекают химические процессы поглощения из дымовых газов оксидов углерода и серы.

В корпусе 7 золоуловителя с прутковыми решетками (рис.3.38 а) поток газов подводится по входному патрубку 4 к решетке, которая омывается водой при помощи сопел 3. Основная часть золы, отбрасываемая потоком, остается на внутренних стенках корпуса, омываемые водой, поступающей через сопла, зола смывается вниз, газ без примесей покидает золоуловитель через верхний выходной патрубок 1. Зола, оседающая на патрубках, смывается водой в коническую часть 6 корпуса, затем поступая в смывное устройство 5.

В золоуловителях с трубами Вентури (рис.38 б) газовый поток с пылью поступает в трубу Вентури 10. В трубе происходит распыление воды при помощи сопла 9. Вода разгоняется до скорости потока до 50-75 м/с, превращаясь в мелкий влажный туман. Проходя через диффузор 11, газовый поток тормозится, золовые частицы фильтруются через влажный туман, увлажняются и в каплеуловителе 12 отделяются от газового потока, оседая на стенки корпуса. Смыв частиц производится потоком воды в золосмывное устройство 5.

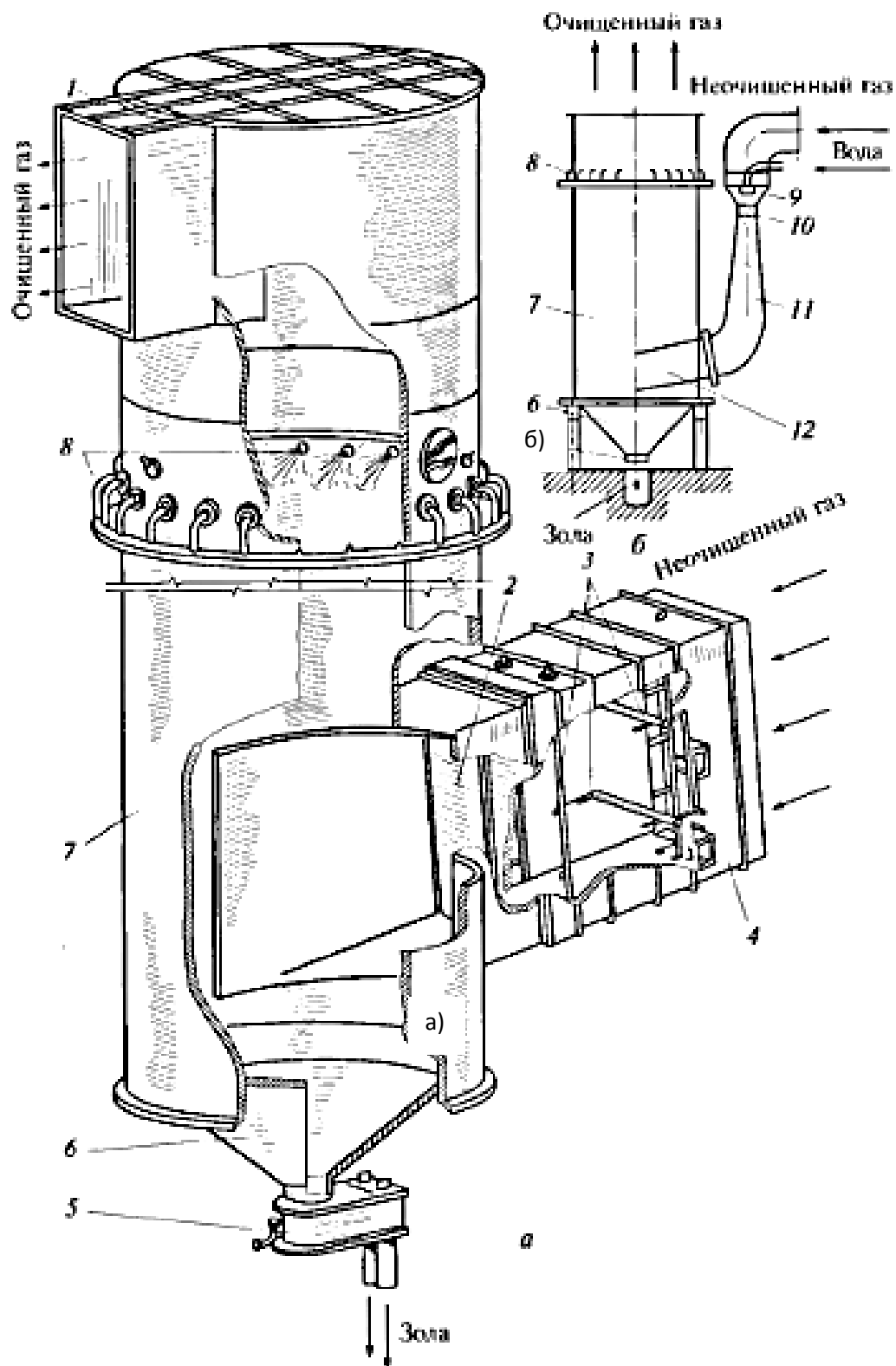


Рис.3.38. Мокрый золоуловитель:

а) – пруткового типа; б) – типа МВ с трубами Вентури;

1 - выходной патрубок; 2 – прутковая решетка; 3,9 – орошающие сопла;
4 – входной патрубок; 5 – водосмываемое устройство; 6 – коническая часть;

1 – корпус; 8 – смывные сопла; 10 – труба Вентури; 11 – диффузор;

12 – каплеуловитель

Полые скрубберы представляют собой колонны круглого или прямоугольного сечения, в которых осуществляется контакт между газом и каплями воды, распыляемой форсунками. Форсунки устанавливаются в колонне в одном или нескольких сечениях. Наиболее распространены противоточные скрубберы. Скорость газа в них изменяется от 0,6 до 1,2 м/с. Если работа производится при скоростях газа до 5–8 м/с, то устанавливаются каплеуловители. Гидравлическое сопротивление скруббера без каплеуловителя составляет 250 Па. Высокая эффективность скруббера обеспечивается при размере частиц, превышающем 10 мкм.

В *пылеуловителях с подвижной насадкой* в качестве насадки используют кольца, седла и шары из полимерных материалов или пористой резины. Плотность насадки не должна превышать плотности жидкости. Оптимальный режим пылеулавливания в таких аппаратах устанавливается при полном псевдоожигении.

В *тарельчатых колоннах* зола (пыль) удерживается газожидкостным (пенным) слоем, образующимся на контактных тарелках при взаимодействии газа и жидкости. Наиболее распространены пенные аппараты с ситчатыми тарелками или с провальными тарелками – дырчатыми, решетчатыми, трубчатыми и колосниковыми.

В основе работы *пористых фильтров* всех видов лежит процесс фильтрования газов через пористые перегородки. При фильтровании твердые и жидкие частицы задерживаются на перегородке, а газ полностью проходит через нее. Фильтрующие перегородки весьма разнообразны, но в основном они состоят из волокнистых или зернистых элементов. В зависимости от назначения пористые фильтры условно разделяют на фильтры тонкой очистки, воздушные фильтры и промышленные фильтры.

Фильтры тонкой очистки предназначены для улавливания, в основном, субмикронных частиц из газов с низкой начальной концентрацией ($< 1 \text{ мг/м}^3$). Их применяют для улавливания особо токсичных частиц с высокой эффективностью. Для очистки газов на 99 % от частиц размером 0,05–0,5 мкм используют материалы в виде тонких листов или объемных слоев из тонких или ультратонких волокон (диаметром менее 2 мкм).

Воздушные фильтры используются в системах приточной вентиляции и кондиционирования воздуха.

К *промышленным фильтрам* относятся тканевые, зернистые и грубоволокнистые фильтры, используемые для очистки промышлен-

ных газов с концентрацией золы (пыли) до 60 г/м^3 . Наиболее распространены тканевые фильтры, которые содержат гибкую фильтрующую перегородку, имеющую форму цилиндрических рукавов (рукавные фильтры) (рис. 1.27). Эффективность таких фильтров – более 99,5 %, а потери напора составляют 1-1,5 кПа при скорости фильтрации 0,5-2 м/с.

Тканевые фильтры изготавливают из материала, который должен выдерживать высокую температуру уходящих газов. В качестве материала фильтров используют шерсть, шерстяной войлок или лавсан при температуре газов до $130 \text{ }^\circ\text{C}$. Для температуры около $260 \text{ }^\circ\text{C}$ применяют стекловолокно и стекловолокно с графитом. Длительность работы ткани составляет 1–3 года. Тканевые фильтры обычно делают многокамерными. Число рукавов в одной камере может составлять 100 и более. Дымовые газы поступают снизу внутрь рукавов, осаждение частиц пыли происходит на внутренней поверхности стенки рукава. При регенерации в одну из камер прекращается подача дымовых газов, и прилипшие к ткани слои пыли удаляются встряхиванием или вибрацией рукавов. Отделению пыли способствует также струя сжатого воздуха, направляемая против движения, осуществляемого в процессе фильтрации. Отделившаяся пыль падает в пылесборник, находящийся под рукавами, и удаляется с помощью шнеков.

Промышленные *электрофильтры* используются для очистки больших объемов газа (до 1 млн. $\text{м}^3/\text{ч}$) с концентрацией частиц до 50 г/м^2 . В них происходит улавливание частиц любых размеров с эффективностью более 99%. Электрофильтры могут работать при температурах газов до $400\text{--}450 \text{ }^\circ\text{C}$ как под разрежением, так и под давлением. Гидравлическое сопротивление их равно $100\text{--}150 \text{ Па}$.

Электрофильтры подразделяются: по конструкции – на *однозонные* и *двухзонные*; по направлению газового потока – на *горизонтальные* и *вертикальные*; по конструкции осадительных электродов – на *пластинчатые* и *трубчатые*; по способу удаления пыли с электродов – на «сухие» и «мокрые»; в зависимости от количества последовательно расположенных электрических полей – на однополюсные и многополюсные; в зависимости от числа параллельных электрофильтров – на одно- и многосекционные.

Очистка дымовых газов в электрофильтре происходит в результате создания неравномерного электрического поля высокого напряжения и образования коронного разряда между электродами. Образующиеся в зоне коронного разряда ионы и электроны вызывают ток

от коронирующих к осадительным электродам – ток короны. Частицы золы, находясь между электродами, заряжаются под действием сил электрического поля, двигаются к осадительным электродам и осаждаются на них. При длительности пребывания газов в активной зоне фильтра не менее 8 сек и скорости движения газов 1,2-1,5 м/с степень улавливания составляет 99-99,8 %.

В приложении 1 представлены схемы наиболее часто встречающихся вспомогательных устройств котельного агрегата.

3.4.6 Докотловая подготовка воды

Содержащиеся в природных водах вещества можно разделить на следующие три группы:

– грубодисперсные примеси (взвешенные вещества) с размером частиц более 10^{-4} мм (растительные остатки, частицы песка, глины и т.д.);

– коллоидно–растворенные примеси (10^{-4} – 10^{-6} мм, примеси как органического, так и минерального происхождения; к первым относятся гуминовые вещества, вымываемые из почвы, ко вторым – кремниевые кислоты, соединения железа);

– молекулярно–, и ионнодисперсные вещества (истинно растворенные примеси) с размером частиц менее 10^{-6} мм (истинно растворимом состоянии в воде находятся газы (O_2 , CO_2 , H_2S , N_2), а также катионы и анионы поступивших в воду солей Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , NO_2^-).

В соответствии с действующими правилами Ростехнадзора докотловая обработка воды должна предусматриваться:

- 1) для всех котлов паропроизводительностью более 0,7 т/ч;
- 2) для котлов, имеющих экранные поверхности нагрева, независимо от паропроизводительности и давления;
- 3) для неэкранированных котлов, сжигающих высококалорийное топливо (газ, мазут);
- 4) для всех водогрейных котлов.

Основными способами докотловой обработки воды являются: *коагуляция и осветление, осаждение, магнитный метод, обработка путем ионного обмена.*

Процесс удаления из воды тонкой взвеси путем ввода специальных реагентов (сернокислый алюминий $Al(SO_4)_3 \cdot 12H_2O$, сернокислое железо $FeSO_4 \cdot 7H_2O$, хлорное железо $FeCl_2 \cdot 6H_2O$) называется *коагуля-*

цией. Методы и оборудование для коагуляции и осветления воды выбирают в зависимости от характера и величины загрязнений.

К методам обработки воды путем *осаждения* относятся *известкование, известково-содовый, термический методы*.

Известкование основано на связывании ионов, подлежащих удалению в малорастворимые соединения, осаждаемые в виде шлама. Основное назначение известкования – удаление из воды связанной и свободной углекислоты, снижение щелочности и сухого остатка исходной воды с одновременным ее умягчением. Известкование, совмещенное с коагуляцией, позволяет обезжелезить поверхностные воды, удалить органические вещества. Процесс известкования осуществляют в осветлителях, при этом перед осветлителями воду необходимо подогреть до 30–40 °С (процесс подогрева воды осуществляется автоматически).

Применение *известково-содового* метода позволяет осаждать соли жесткости совместно известью и содой. При этом протекают те же реакции, что и при известковании, но магний удаляется полностью, а кальциевые соли некарбонатной жесткости удаляются содой.

Термический метод осаждения эффективен при нагревании исходной воды до температуры кипения и интенсивном ее перемешивании. При этом протекают реакции разложения солей карбонатной жесткости. Данный метод применяется в тех случаях, когда не требуется глубокого умягчения воды и когда в исходной воде содержится в основном бикарбонат кальция, поскольку выпадение в осадок $Mg(OH)_2$ происходит очень медленно. Содержание в исходной воде органических веществ тормозит процесс кристаллизации и выпадение шлама, это в значительной степени снижает эффективность термического метода. Указанные ограничения делают метод практически малоприменимым.

Обработка воды *магнитным способом* заключается в воздействии магнитных полей на поток воды. При этом вода после воздействия магнитного поля при нагреве ее в котле не дает никаких отложений накипи, и соли жесткости выпадают в виде шлама. При обработке воды магнитным полем концентрация растворенных газов (O_2 и CO_2) и окислов железа в ней снижается, то есть уменьшение концентрации кислорода под влиянием магнитного поля является одним из способов торможения электрических процессов, а следовательно, и коррозии металлов. Для обработки воды магнитным полем наиболее широко применяются аппараты ПМУ с постоянными магнитами и

АМО-УХЛ4 с электромагнитами. Для достижения необходимого эффекта при магнитной обработке воды нужно удалять образующийся шлам. Шлам обычно удаляется продувкой. При магнитной обработке наиболее экономичной и эффективной является нижняя продувка, если продувочное устройство примыкает непосредственно к грязевику.

Эффективным способом физического метода водоподготовки воды является *ультразвуковой*. Ультразвуковые колебания (2–40 кГц) применяются для предотвращения накипеобразования в паровых котлах низкого давления. Механическое воздействие ультразвуковых волн на процессы накипеобразования проявляется при вибрациях металлической поверхности, контактирующих с котловой водой. При воздействии сил инерции на растущий кристалл, а также при разрушающем действии поперечных волн на границе кристаллических связей прочность связи внутри накипи, между накипью и металлом нарушается, и образуются трещины. Капиллярный эффект существенно увеличивает скорость проникания воды к поверхности нагрева, где она мгновенно испаряется, вызывая вспучивание и отслаивание накипи. Отслоившиеся чешуйки накипи, скапливающиеся в нижней части котла, удаляются периодической продувкой. Большую роль играют содержащиеся в воде газовые пузырьки. Колеблющийся с ультразвуковой частотой пузырек попадает в трещину и нарушает сцепление накипи со стенкой.

Ионные методы основаны на способности некоторых практически нерастворимых в воде материалов (ионообменных смол) вступать в ионный обмен с растворимыми в воде солями, сорбируя из обрабатываемой воды одни ионы и отдавая в обрабатываемый раствор эквивалентное количество других ионов, которыми ионит периодически насыщается при регенерации.

Катиониты при регенерации их растворами NaCl, H₂SO₄, NH₄Cl способны обменивать содержащиеся в них катионы (соответственно Na⁺, H⁺, или NH₄⁺) на катионы обрабатываемой воды. Этот процесс называется *катионированием*. Аниониты при регенерации их щелочью NaOH, содой Na₂CO₃ или поваренной солью NaCl способны как бы заряжаться соответственно анионами OH⁻, CO₃²⁻, или Cl⁻ и затем обменивать их на анионы, содержащиеся в обрабатываемой воде. Этот процесс называется *анионированием*. Наиболее распространенными методами обработки воды путем ионного обмена являются: Na–катионирование, Na–Cl–ионирование, H–катионирование и параллельное H–Na–катионирование.

Na–катионный метод умягчения воды основан на способности некоторых нерастворимых в воде веществ (сульфоуголь, синтетические смолы), отрегенированных поваренной солью, обменивать подвижно распо-

ложенный катион на эквивалентное количество легкорастворимых натриевых солей.

Na-Cl-ионирование основано на умягчении воды с одновременным снижением щелочности и осуществляется путем последовательного фильтрования обрабатываемой воды через натрий-катионный фильтр первой ступени, хлор-анионитный фильтр, а затем натрий-катионный фильтр второй ступени.

Метод *водород-катионирования* заключается в фильтровании обрабатываемой воды через катионит, отрегенированный кислотой. В процессе этого фильтрования катионы, растворенные в обрабатываемой воде, обмениваются на водород, вода умягчается – катионы жесткости Ca^{2+} и Mg^{2+} обмениваются на водород; бикарбонатный ион, образующий так называемую карбонатную жесткость, разрушается с образованием углекислоты, а анионы солей постоянной жесткости образуют эквивалентное количество минеральных кислот.

3.4.7 Внутрикотловая обработка воды

Внутрикотловая обработка осуществляется путем ввода в котел щелочных реагентов, которые в сочетании с подогревом воды в котле вызывают осаждение солей жесткости в виде нерастворимых соединений CaCO_3 и $\text{Mg}(\text{OH})_2$. В качестве реагентов могут использоваться едкий натр, кальцинированная сода, тринатрийфосфат в зависимости от состава исходной воды и требований к составу котловой воды. Внутрикотловая обработка должна обязательно сопровождаться периодическим или непрерывным удалением из котла шлама (продувкой). Магнитный метод является разновидностью внутрикотловой обработки воды при применении его для чугунных паровых котлов при температуре более $100\text{ }^\circ\text{C}$. Метод может быть рекомендован в основном для воды с карбонатной жесткостью до 10 мг-экв/л.

3.5 Защита окружающей среды от отходов производства, имеющих вредные компоненты

Все процессы, связанные с преобразованием энергии, в частности, производство, транспортировка, переработка и сжигание органического топлива, являются мощным источником антропогенного воздействия на окружающую среду. Источники негативного влияния котельных и тепловых электрических станций (ТЭС) на органическом топливе на природу можно классифицировать:

по характеру воздействия

– ухудшающие качество воздуха (выбросы оксидов азота и серы, монооксида углерода CO, летучих углеводородов, пыли, сажи и ряда других загрязняющих веществ);

– изменяющие радиационно–тепловой баланс атмосферы (эмиссия парниковых газов – CO₂, CH₄, N₂O), а также выбросы, приводящие к образованию озона и сульфатного аэрозоля в нижних слоях атмосферы (выбросы NO_x и SO_x);

– нарушающие естественный тепловой режим (сброс теплоты);

– шумовое воздействие;

– загрязнение водных объектов сточными водами;

по территориальному масштабу

– локальные (ухудшение окружающей среды в непосредственной близости (до 100 км) от источника загрязнения или сброса теплоты);

– региональные (трансграничный (на несколько тысяч километров) перенос загрязняющих веществ);

– глобальные (изменения климата, разрушение озонового слоя).

Наблюдения за составом атмосферы свидетельствуют о значительном увеличении атмосферных концентраций основных парниковых газов, как за этот период, так и по сравнению с доиндустриальной эпохой. Производимые расчеты показывают, что антропогенная эмиссия (выброс) метана и оксида азота N₂O играет основную роль в увеличении их атмосферных концентраций. Метеорологические наблюдения показывают, что за последние сто лет среднеглобальная температура увеличилась на 0,6 °С, из которых 0,4 °С пришлось на последние 30 лет.

Тем не менее, в последние десятилетия в мировой энергетике наблюдаются процессы, приводящие к значительному снижению ее негативного воздействия на окружающую среду. Таковыми процессами являются: изменения в топливно-энергетическом балансе, внедрение природоохранных технологий и повышение энергоэффективности экономики (повышение КПД установок преобразования энергии, снижение энергоемкости производства). Указанные тенденции уже привели к заметному снижению удельных выбросов основных парниковых газов и загрязняющих веществ в атмосферу. Аналогичное снижение удельной эмиссии оксидов серы и азота в теплоэнергетике индустриально развитых стран связано с повышением эффективности производства электроэнергии, использованием экологически более чистого топлива и внедрением технологий подавления образования оксидов азота и очистки дымовых газов от SO_x и NO_x.

ЧАСТЬ 4

Практические задания

Практическое занятие №1 «Тепловой баланс котла»

Задача №1

Составить тепловой баланс котла для определения КПД брутто и расчетного расхода твердого топлива (каменный уголь).

Таблица 4.1

Исходные данные

По предпоследней цифре зачетной книжки	$t_в, ^\circ\text{C}$	$t_{н.в.}, ^\circ\text{C}$	$D_n, \text{кг/кг}$	$V_o, \text{м}^3/\text{кг}$	$t_n, ^\circ\text{C}$	K	$B, \text{кг/с}$
1	2	20	1,6	5,03	110	0,7	0,75
2	4	25	1,5	5,02	120	0,8	0,76
3	6	30	1,4	5,01	130	0,9	0,77
4	7	35	1,3	4,91	140	1,0	0,78
5	10	40	1,2	4,92	150	0,9	0,79
6	12	45	1,1	4,93	160	0,8	0,8
7	14	50	1,0	4,95	170	0,7	0,81
8	16	55	0,9	4,96	180	0,8	0,82
9	18	60	0,8	4,97	190	0,9	0,83
0	20	65	0,7	4,99	200	1,0	0,84

Таблица 4.2

Исходные данные

По последней цифре зачетной книжки	$D_{пн}, \text{кг/с}$	$D_{нп}, \text{кг/с}$	$G, \text{кг/с}$	$Q_{4иль}, \text{кДж/кг}$	$Q_{4пр}, \text{кДж/кг}$	$Q_{4ун}, \text{кДж/кг}$
1	0,9	0,34	15,5	1900	1700	2100
2	0,7	0,32	15,6	1800	1600	2000
3	0,8	0,3	15,7	1700	1500	1900
4	0,7	0,28	15,8	1600	1400	1800
5	0,6	0,24	15,9	1500	1300	1700
6	0,5	0,22	16,0	1400	1200	1600
7	0,4	0,2	16,1	1300	1100	1500
8	0,3	0,18	16,2	1200	1000	1400

9	0,2	0,15	16,3	1100	900	1300
0	0,1	0,11	16,4	1000	800	1200

Таблица 4.3

Исходные данные

По предпо- следней цифре зачетной книжки	W^p , %	CO , %	RO_2 %	C^p , %	$S^p_{л}$, %
1	5	1	0,25	68	0,2
2	6	2	0,26	67	0,1
3	7	3	0,2	66	0,2
4	8	4	70,28	65	0,1
5	9	5	0,29	64	0,2
6	10	6	0,3	63	0,1
7	9	7	0,31	62	0,2
8	8	8	0,32	61	0,1
9	7	9	0,33	60	0,2
0	6	10	0,34	59	0,1

Решение

Располагаемая теплота, кДж/кг, при работе котла на твердом или жидком топливе определяется из следующего выражения:

$$Q_p^p = Q_n^p + Q_{в.вн} + Q_{пар} + Q_{физ.м.} + Q_k, \quad (109)$$

где Q_n^p - низшая теплота сгорания рабочей массы каменного угля равна 22800 кДж/кг; $Q_{в.вн}$ – теплота, вносимая в топку с воздухом на 1 кг топлива; $Q_{пар}$ - теплота, вносимая с дутьевым (форсуночным) паром на 1 кг топлива; $Q_{физ.м.}$ - физическая теплота 1 кг или 1 м³ топлива; Q_k - теплота, затраченная на разложение карбонатов при сжигании сланцев.

Теплота, вносимая в топку с воздухом определяется

$$Q_{в.вн} = \alpha_T \cdot V^o \cdot C'_{ps} \cdot \Delta t_g, \quad (110)$$

где C'_{ps} - средняя объемная теплоемкость воздуха при постоянном давлении, кДж/(кг·К) (приложение 10); Δt_g - разность температур подогретого и холодного воздуха; α_T - коэффициент избытка воздуха в топке; V^o -

количество воздуха, необходимое для полного сгорания твердого или жидкого топлива, м³/кг.

Теплота, вносимая в топку с паровым дутьем

$$Q_{нар} = D_n (h_n - 2510), \quad (111)$$

где D_n – расход пара, идущего на дутье или распыливание топлива, кг/кг; h_n – энтальпия пара, кДж/кг, берем из приложения 11, по температуре пара.

Физическая теплота топлива

$$Q_{физ.м.} = C_T^p \cdot t_T, \quad (112)$$

где C_T^p – теплоемкость рабочей массы топлива, кДж/(кг·К) (для каменных углей–1,121); t_T – температура топлива на входе в топку, °С.

Теплоемкость рабочей массы топлива

$$C_T^p = C_T^c \frac{100 - W^p}{100} + C_{H_2O} \frac{W^p}{100}, \quad (113)$$

где C_T^c , C_{H_2O} – соответственно теплоемкости сухой массы твердого топлива и воды, кДж/(кг·К): для каменных углей $C_T^c = 0,962$, $C_{H_2O} = 4,19$; W^p – влажность рабочей массы, %.

Теплота, затраченная на разложение карбонатов

$$Q_k = 40,66K (CO_2)_k^p, \quad (114)$$

где K – коэффициент разложения карбонатов; $(CO_2)_k^p$ – содержание диоксида углерода в карбонатах в рабочей массе равен 1,5%.

Теплота, полезно использованная в паровом котлоагрегате, определяется из следующего соотношения, кДж/кг:

$$Q_1 = \frac{D_{mn}}{B} \left[(h_{mn} - h_{ng}) + \frac{P}{100} (h_{kg} - h_{ng}) \right] + D_{mn} \cdot (h_{ng} - h_{ng}), \quad (115)$$

где D_{nn} , D_{nn} – соответственно расход перегретого и насыщенного пара, кг/с; B – расход натурального топлива, кг/с; h_{nn} , $h_{нв}$, $h_{не}$, $h_{ке}$ – соответственно энтальпии перегретого и насыщенного пара, питательной и котловой воды, кДж/кг (приложения 10-12); P – величина непрерывной продувки, равна 20%.

Для водогрейного котла используется формула

$$Q_1 = \frac{G}{B} \cdot (h'' - h'), \quad (116)$$

где G – расход воды через котел, кг/с; h'' , h' – соответственно энтальпии воды на входе в котел и выходе из него, кДж/кг.

Процентная доля теплоты (%), полезно использованной в котлоагрегате

$$q_1 = \frac{Q_1}{Q_p} \cdot 100. \quad (117)$$

Потери теплоты, кДж/кг, с уходящими газами

$$Q_2 = \frac{H_{yx} - \alpha_{yx} H_{xв}}{100} (100 - q_4), \quad (118)$$

где H_{yx} – энтальпия уходящих газов определяется по графику $H_{yx} - t$ по температуре уходящих газов t_{yx} и по линии, характеризующей последнюю поверхность нагрева, кДж/кг; $H_{xв}$ – энтальпия холодного воздуха, кДж/кг; α_{yx} – избыток воздуха в уходящих газах, численно равен избытку воздуха в продуктах сгорания в последнем газоходе, определяется как α_i .

Энтальпия холодного воздуха

$$H_{xв} = V^o \cdot C_{pxв} \cdot t_{xв}, \quad (119)$$

где $C_{pxв}$ – изобарная теплоемкость холодного воздуха, кДж/(м³ · К); $t_{xв}$ – температура холодного воздуха.

Процентная доля

$$q_2 = \frac{Q_2}{Q_p^p} \cdot 100. \quad (120)$$

Потери теплоты от химической неполноты сгорания топлива, кДж/кг, определяются содержанием в продуктах сгорания окиси углерода

$$Q_3 = \frac{CO(C^p + 0,375S_l^p)}{RO_2 + CO}, \quad (121)$$

где CO – содержание оксида углерода в уходящих газах, %; RO_2 – содержание сухих трехатомных газов в уходящих газах, %.

Или процентная доля

$$q_3 = \frac{Q_3}{Q_p^p} \cdot 100. \quad (122)$$

Потери теплоты от механической неполноты сгорания топлива, кДж/кг, складываются из трех составляющих

$$Q_4 = Q_4^{шл} + Q_4^{np} + Q_4^{ун}, \quad (123)$$

где $Q_4^{шл}$ – потери теплоты топлива со шлаком, кДж/кг; Q_4^{np} – потери теплоты с провалом топлива под колосниковую решетку, кДж/кг; $Q_4^{ун}$ – потери теплоты с частичками топлива, уносимыми уходящими газами, кДж/кг.

Процентная доля

$$q_4 = \frac{Q_4}{Q_p^p} \cdot 100 = \frac{327A^p}{Q_p^p} \left(a_{шл+np} \cdot \frac{C_{шл+np}}{100 - C_{шл+np}} + a_{ун} \cdot \frac{C_{ун}}{100 - C_{ун}} \right), \quad (124)$$

Где $a_{шл+np}$, $a_{ун}$ – доли золы в шлаке, провале и уносе от общего количества золы, введенного в топку с топливом, соответственно равны 40% и 20%; $C_{шл+np}$, $C_{ун}$ – содержание горючих в шлаке, провале и уносе, соответственно равны 30% и 10%.

КПД брутто котельного агрегата можно определить по уравнению прямого баланса, %

$$\eta_{\kappa} = \frac{Q_1}{Q_p^p} 100, \quad (125)$$

или по уравнению обратного баланса, если известны все потери, %

$$\eta_{\kappa} = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6). \quad (126)$$

Зная величину КПД, можно определить расход топлива, подаваемого в топку котла, кг/с

$$B = \frac{Q_1}{Q_p^p \eta_{\kappa}} 100. \quad (127)$$

Задача №2

В топке котельного агрегата паропроизводительностью D сжигается природный газ данного состава CO_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 , C_4H_{10} , C_5H_{10} , N_2 . Определить расход натурального и условного топлива, если известны КПД брутто котлоагрегата $\eta_{\kappa.а.}^{бр}$, давление перегретого пара $P_{п.п.}$, температура перегретого пара $t_{п.п.}$, температура питательной воды $t_{п.в.}$ и величина непрерывной продувки $П$.

Таблица 4.4

Исходные данные

По предпоследней цифре зачетной книжки	Состав газа, %						
	CO_2 ,	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}	C_5H_{10} ,	N_2 ,
1	1,2	91,9	2,1	1,3	0,4	0,1	3,0
2	1,1	91,0	2,0	1,4	0,3	0,2	4,0
3	1,3	90,6	1,9	1,5	0,2	0,3	4,2
4	1,4	89,6	1,8	1,6	0,1	0,4	5,1
5	1,5	92,0	1,7	1,7	0,5	0,5	2,1
6	1,6	90,3	1,6	1,8	0,6	0,6	3,5
7	1,7	89,7	1,5	1,9	0,7	0,7	3,8
8	1,8	88,8	1,4	2,0	0,8	0,8	4,4
9	1,9	89,1	1,3	2,1	0,9	0,9	4,8
0	2,0	89,4	1,2	2,2	1,0	1,0	3,2

Исходные данные

По последней цифре зачетной книжки	$\eta_{к.а.}^{бр}, \%$	$P_{п.п.}, МПа$	$t_{п.п.}, ^\circ C$	$t_{п.в.}, ^\circ C$	$P, \%$	$D, кг/с$
1	89	1,4	280	100	3	3,9
2	88	1,5	220	99	4	3,8
3	87	1,6	240	98	3	3,7
4	86	1,7	260	97	2	3,6
5	85	1,8	300	96	1	3,5
6	84	1,9	350	95	2	3,4
7	83	2,0	400	94	3	3,3
8	82	2,1	450	93	4	3,2
9	81	2,2	500	92	3	3,1
0	80	2,3	200	91	2	3,0

Решение:

Низшая теплота сгорания газообразного топлива, ($кДж/м^3$)

$$Q_{Н}^C = 126,4CO_2 + 358,5CH_4 + 638,5C_2H_6 + 913C_3H_8 + 1187C_4H_{10} + 146,2C_5H_{10} + 108,2N_2.$$

Располагаемое тепло топлива, ($кДж/м^3$)

$$Q_P^Г = Q_H^C. \quad (128)$$

Количество тепла, полученное в котельном агрегате, ($кДж/кг$)

$$Q_{к.а.} = (h_{п.п.} - h_{п.в.}) + \frac{P}{100} (h' - h_{п.в.}). \quad (129)$$

Энтальпию перегретого пара $h_{п.п.}$, питательной воды $h_{п.в.}$ и котловой воды h' (принимаемой равной энтальпии воды при температуре кипения) определяем по таблицам насыщенного водяного пара (по давлению и температуре) и перегретого пара (приложения 10-12).

Расход топлива

$$B = \frac{DQ_{к.а.}}{Q_P^C \eta_{к.а.}^{бр.}}, \text{ м}^3 / \text{с}. \quad (130)$$

Расход условного топлива

$$B_{усл.} = \frac{BQ_H^P}{29350} \text{ м}^3 / \text{с}. \quad (131)$$

Задача № 3

В топке котельного агрегата паропроизводительностью D сжигается каменный уголь марки $Д$ состава: C^P , H^P , $S^P_{л.}$, N^P , O^P , A^P , W^P . Определить КПД брутто котельного агрегата, расход натурального топлива и расчетный расход топлива, если известны давление перегретого пара $P_{н.н.}$, температура перегретого пара $t_{н.н.}$, температура питательной воды $t_{П.В.}$, величина непрерывной продувки Π , потери теплоты с уходящими газами q_2 , потери теплоты от химической неполноты сгорания топлива q_3 , потери теплоты от механической неполноты сгорания топлива q_4 и потери теплоты в окружающую среду q_5 .

Таблица 4.6

Исходные данные

По предпо- следней цифре зачетной книжки	Состав рабочей массы каменного угля, %						
	C^P	H^P	$S^P_{л.}$	N^P	O^P	A^P	W^P
1	58,7	4,2	0,3	1,9	9,7	13,2	12
2	59,8	4,1	0,4	1,8	9,8	13,1	11
3	60,9	4,0	0,5	1,7	9,9	13,0	10
4	62,0	3,9	0,6	1,6	10,0	12,9	9
5	63,1	3,8	0,7	1,5	10,1	12,8	8
6	64,2	3,7	0,8	1,4	10,2	12,7	7
7	58,3	3,6	0,9	1,3	10,3	12,6	13
8	57,4	3,5	1,0	1,2	10,4	12,5	14
9	56,5	3,4	1,1	1,1	10,5	12,4	15
0	55,6	3,3	1,2	1,0	10,6	12,3	16

Исходные данные

По последней цифре зачетной книжки	$D, \text{кг/с}$	$P_{\text{п.п.}}, \text{МПа}$	$t_{\text{п.п.}}, \text{°C}$	$t_{\text{п.в.}}, \text{°C}$	$\Pi, \%$	$q_2, \%$	$q_3, \%$	$q_4, \%$	$q_5, \%$
1	1,8	4,0	450	100	4	6,5	0,5	4	0,5
2	1,9	4,2	400	110	3	6,4	0,4	3	0,4
3	2,0	4,4	350	120	2	6,3	0,3	2	0,3
4	2,1	4,6	300	130	3	6,2	0,2	1	0,2
5	2,2	4,8	280	140	4	6,1	0,1	2	0,3
6	2,3	5,0	260	150	3	6,0	0,2	3	0,4
7	2,4	3,8	240	160	2	6,6	0,3	4	0,5
8	2,5	3,6	220	170	3	6,7	0,4	3	0,4
9	2,6	3,4	200	180	4	6,8	0,5	2	0,3
0	2,7	3,2	180	190	3	6,9	0,6	1	0,2

Решение

Низшая теплота сгорания, кДж/кг

$$Q_H^P = 339C^P + 1030H^P - 109(O^P - S^P_{\text{л}}) - 25W^P. \quad (132)$$

Располагаемое тепло топлива

$$Q_P^P = Q_H^P, \text{кДж/кг}. \quad (133)$$

Тепло, полезно используемое в котельном агрегате

$$q_1 = 100 - q_2 - q_3 - q_4 - q_5, \%. \quad (13)$$

КПД котельного агрегата брутто

$$\eta_{\text{к.а.}}^{\text{бр}} = q_1. \quad (135)$$

Количество тепла, полученное в котельном агрегате

$$Q_{\text{к.а.}} = (h_{\text{п.п.}} - h_{\text{п.в.}}) + \frac{P}{100} (h' - h_{\text{п.в.}}). \quad (136)$$

Энтальпию перегретого пара $h_{п.п.}$, питательной воды $h_{п.в.}$ и котловой воды h' (принимаемой равной энтальпии воды при температуре кипения) определяем по таблицам насыщенного водяного пара (по давлению и температуре) и перегретого пара (приложения 10-12).

Расход натурального топлива

$$B = \frac{DQ_{к.а.}}{Q_P \eta_{к.а.}^{бр.}}, \text{ кг / с.} \quad (137)$$

Расход условного топлива

$$B_{усл.} = \frac{BQ_H^P}{29350}, \text{ кг / с.} \quad (138)$$

Практическое занятие №2 «Топливное хозяйство»

Топливо до поступления в топочное устройство проходит через стадии приемки, перегрузки и дополнительной подготовки к сжиганию. Перевозка топлива от места добычи осуществляется железнодорожным, водным или автомобильным транспортом, а также с помощью канатной подвесной дороги, ленточными транспортерами и по трубопроводам.

Топливоподача газообразного топлива

Газообразное топливо поступает от магистральных газопроводов и газораспределительных станций (ГРС) к потребителям по распределительным и внутризаводским газопроводам.

Распределительные газопроводы – газопроводы для перемещения газа до ввода к отдельным предприятиям и жилым массивам.

Соединение распределительных газопроводов городских сетей с газопроводами котельных осуществляется при помощи газопроводов, называемых вводами. В зависимости от давления подводимого газа газопроводы подразделяются на газопроводы высокого, среднего и низкого давления. По газопроводам низкого давления природный газ подается при давлении до $0,05 \text{ кгс/см}^2$, то есть для котлов небольшой

производительности. Для котельных с агрегатами большей производительности подводится газопровод высокого - от 3 до 12 кгс/см² или среднего - от 0,05 до 3 кгс/см² давления. Подготовленный природный газ от ГРС по распределительным газопроводам подается в местные газорегулировочные пункты (ГРП) или в газорегуляторные установки (ГРУ), располагаемые поблизости от потребителей газа. В ГРУ и ГРП происходит снижение давления газа до заданного уровня и очистка газа от примесей, а также производится его учет. ГРУ и ГРП сооружают в соответствии с правилами безопасности в газовом хозяйстве, обязательными для всех ведомств и организаций. Принципиальная схема двухниточного ГРП, устанавливаемого вне котельной, показана на рисунке 4.1. Помещение ГРП оборудуется системами вентиляции, отопления и освещения. Оборудование и приборы, устанавливаемые на ГРП, – это предохранительный клапан, регулятор давления (основной элемент ГРП), фильтр, установка диафрагмы для учета расхода газа, приборы контроля давления и температуры, краны, задвижки, газопроводы, крепления трубопроводов.

Регулятор давления устанавливается в зависимости от максимально расчетного расхода газа потребителями и необходимого перепада давления при редуцировании. Перед регуляторами устанавливаются предохранительные клапаны, служащие для перекрытия потока газа в случае превышения или понижения давления газа.

Для очистки газа от примесей перед клапанами устанавливают фильтр с пропускной способностью от 6000 до 38000 м³/ч. Подбор фильтров осуществляется с учетом потерь давления, возникающих в корпусе и в кассете фильтра. Учет расхода газа ведется при помощи диафрагмы и дифманометров, перед ними установлен термометр для замера температуры газа. Для осуществления подачи газа от ГРП и к ним предусмотрено размещение внутренних газопроводов.

Принципиальная схема разводки газа внутри котельной показана на рисунке 4.2. Из схемы следует, что распределение газа по отдельным агрегатам и горелкам для надежной работы топочных устройств и безопасности персонала должно быть автоматизировано и оснащено арматурой.

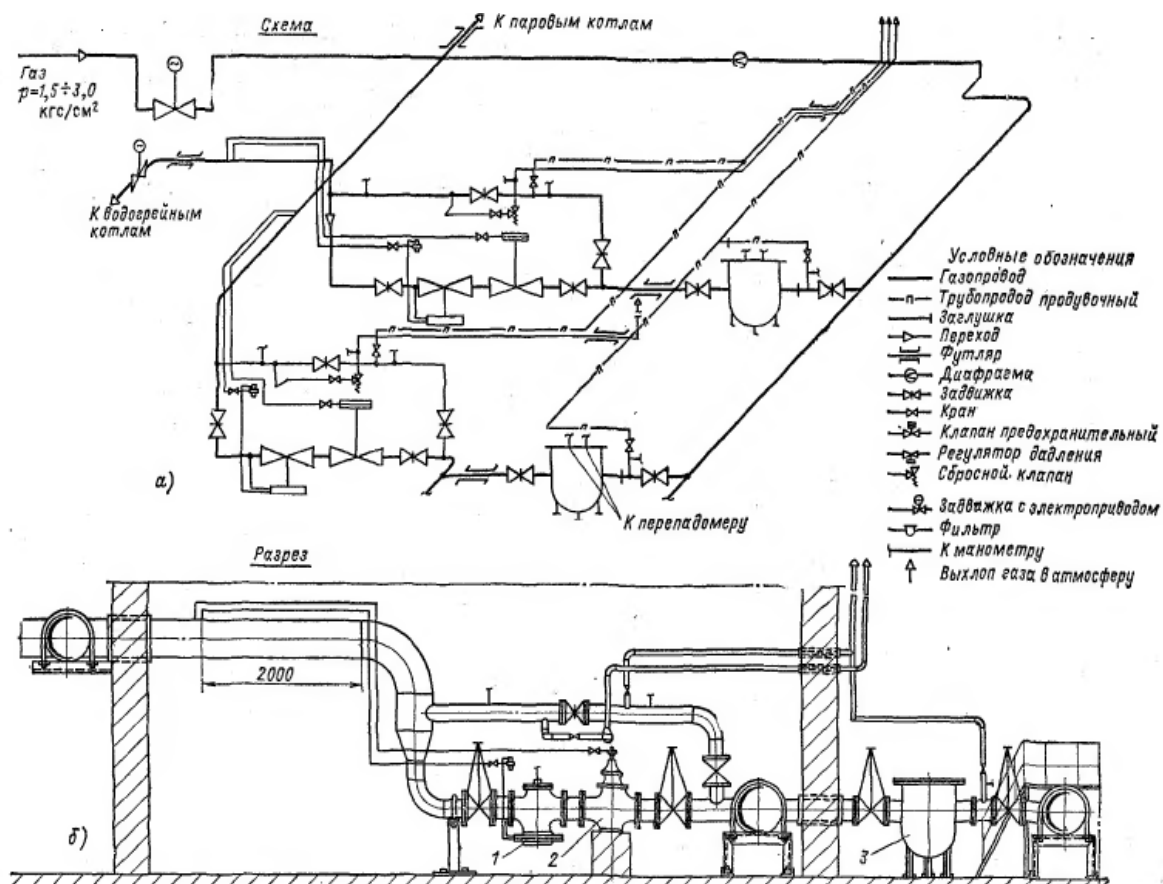


Рис.4.1. Принципиальная схема газорегулировочного пункта (ГРП):
1 – регулятор давления, 2 – клапан предохранительный, 3 – фильтр

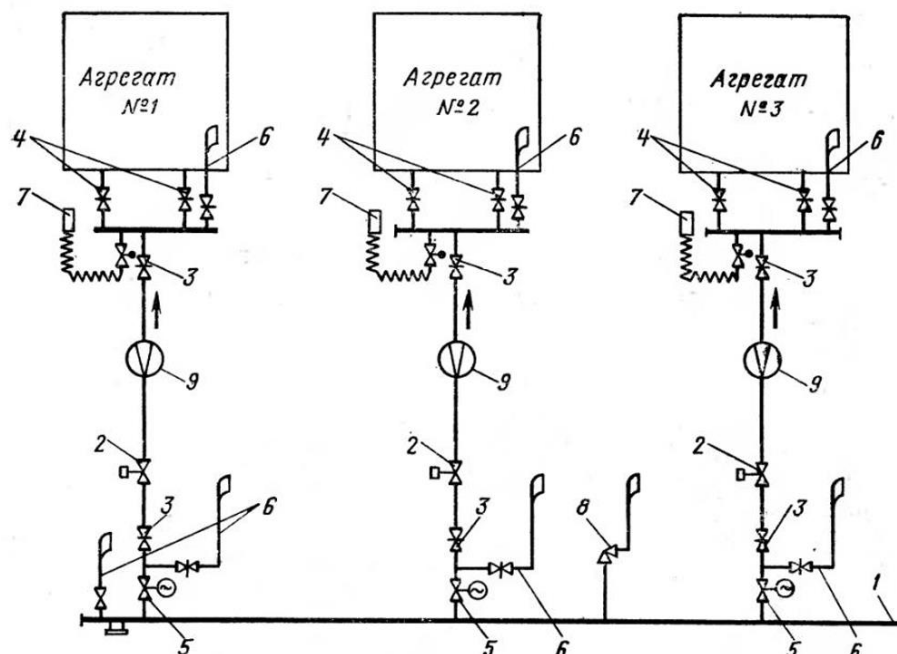


Рис. 4.2. Схема подачи газа от ГРП к котлоагрегатам:

1 - общая магистраль; 2 - регуляторы расхода; 3 - запорные органы - задвижки; 4 - краны самосмазывающиеся к горелкам; 5 - запорные задвижки с электроприводом; 6 - свечи (трубопроводы для продувки и выхлопа газа); 7 - устройство для розжига горелок (запальники); 8 - предохранительный клапан; 9 - диафрагма для измерения расхода газа.

Топливоподача жидкого топлива

Жидкое топливо – топочные мазуты с повышенной вязкостью и большим содержанием серы - может доставляться в котельную железнодорожным и автомобильным транспортом, а при расстоянии от нефтеперерабатывающего завода до 20 км - по трубопроводам; мазут марки 200 подается только по трубопроводу. Мазут используется в виде основного топлива, если газ является дополнительным видом в периоды сезонных его избытков, или резервным, если газ является основным топливом, а мазут используется в зимние месяцы. Также мазут может применяться в качестве аварийного топлива, на случай непродолжительного прекращения подачи газа.

Перевозка мазута по железной дороге осуществляется в цистернах грузоподъемностью от 16 до 50 т. Для обеспечения слива требуется подогрев мазута в цистернах до температуры 60 - 70°C. Имеется ряд способов подогрева, основным считается подача в мазут водяного пара при давлении 6-12 кгс/см². При транспорте автоцистернами разогрев мазута осуществляется на нефтебазе и мазут закачивается в автоцистерну горячим.

Комплекс мазутного хозяйства состоит из подъездных железнодорожных путей, сливной эстакады с промежуточной емкостью, мазутной насосной, электрических щитов и бытовых помещений, мазутохранилища, коммуникаций, установки для сбора конденсата, очистных устройств сточных вод, устройства для пожаротушения, установки для приема, хранения и ввода в мазут жидких присадок. Для приема мазута, поступающего в железнодорожных цистернах, сооружаются сливные устройства в виде лотков и промежуточной емкости, обогреваемых паром давлением до 5 кгс/см². Иногда сливные устройства оборудуются паропроводами и шлангами с наконечниками для разогрева мазута в цистернах. Поступление жидкого топлива из сливных лотков и приемного устройства в хранилище происходит самотеком или насосами. Хранилища размещаются над землей или под землей. Выбор объемов промежуточных емкостей выполняется в соответствии с условиями соблюдения установленного нормативного времени, рекомендуются к использованию емкости объемами 100, 250, 500, 750 м³.

Емкость хранилищ мазута для котельных рассчитывается – на 10-суточный расход – при доставке по железной дороге;

– на 5-суточный расход – при доставке автомобильным транспортом;

– на 3-суточный расход – если мазут является аварийным видом топлива;

– на 2-суточный расход – при доставке мазута по трубопроводам.

Суточный расход мазута – это расход рабочими паровыми котлами, кроме резервных, при их номинальной нагрузке и расход водогрейными котлами при их работе в течение 24 часов при средней температуре за самый холодный месяц.

При проектировании складов должны применяться типовые проекты подземных и наземных железобетонных резервуаров. Металлические резервуары применяются в случае малого расстояния до зданий и сооружений котельных. В случае если металлические резервуары наземные, на них должна быть предусмотрена тепловая изоляция. Количество резервуаров в мазутохранилище должно быть не менее двух.

Ситуационные планы расположения мазутного хозяйства показаны на рисунке 4.3, где представлены железнодорожные пути и сливные лотки 2, над которыми устанавливаются цистерны, коллекторы 5, по которым пар поступает в цистерны на разогрев топлива. Из лотков топливо течет по трубопроводам в приемные баки 4 и хранилища 3. Из хранилищ с помощью насосов, установленных в подземной или надземной мазутонасосной станции 1, топливо перекачивается в котельную. Температура перекачиваемого мазута в зависимости от его вязкости (марки) составляет 40-80°C. Из хранилищ в котельную мазут необходимо прокачивать насосами непрерывно для предупреждения его застывания, сливая избыток обратно в хранилище, то есть осуществляя непрерывную циркуляцию.

Для подачи мазута в котельную служат центробежные насосы с электроприводом; их число должно быть не менее двух, а производительность каждого равна наибольшему расходу топлива. При отсутствии надежного снабжения электроэнергией в насосной станции должно быть установлено не менее двух насосов с паровым приводом на полную потребность мазута. Для осуществления циркуляции устанавливается насос производительностью в 40 - 50% от основного, а иногда и с меньшим напором. Для перекачивания топлива из промежуточной емкости 4 в хранилища также устанавливаются специальные насосы.

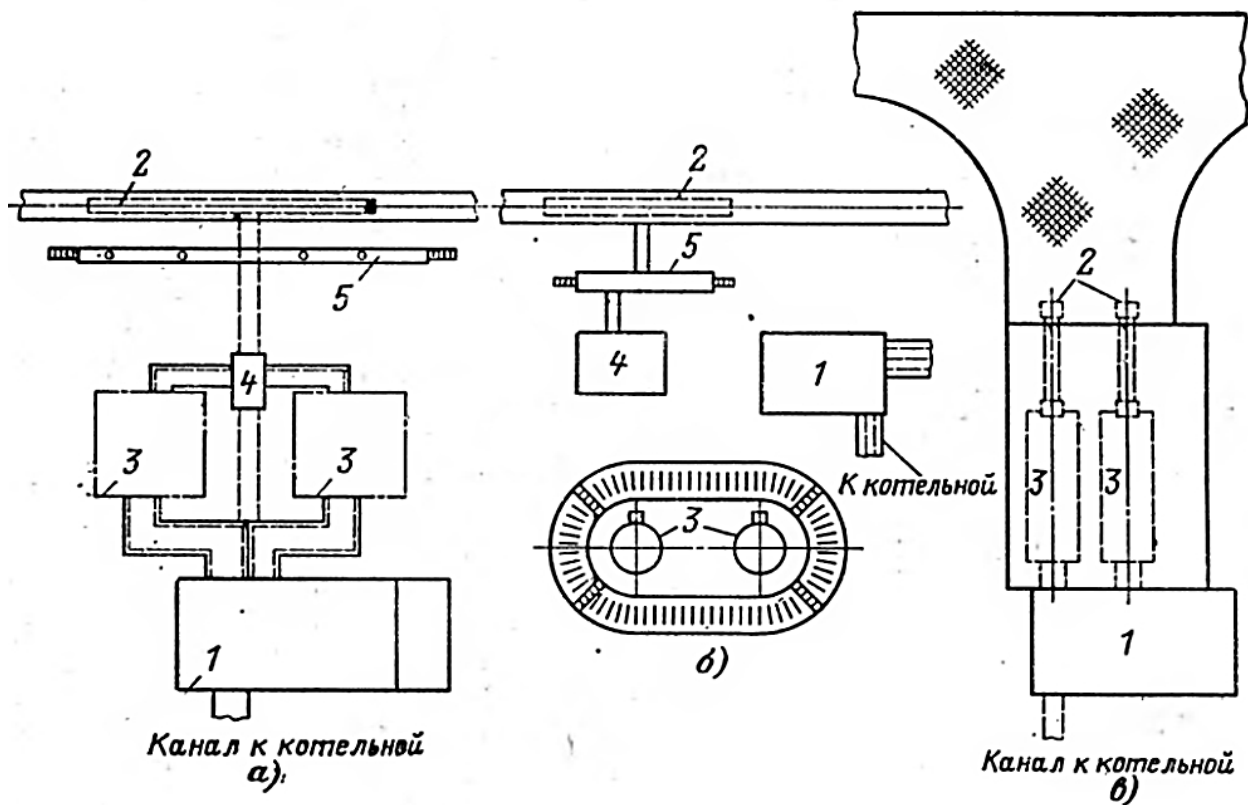


Рис. 4.3. Планы расположения мазутного хозяйства:

- а - с подземными бетонными хранилищами и насосной станцией при поступлении мазута в железнодорожных цистернах;
- б - с надземными хранилищами, насосной станцией при поступлении мазута по железной дороге;
- в - с подземными хранилищами при транспорте мазута автоцистернами.

Если мазут является резервным топливом, трубопровод для мазута прокладывается один, но с непрерывной циркуляцией.

На рисунке 4.4 представлена схема трубопроводов мазутного хозяйства с двумя резервуарами емкостью 5000 м³. В приведенной схеме и в других типовых схемах складов мазута применяется метод циркуляционного подогрева с перемешиванием мазута при помощи сопел на коллекторе подачи топлива в резервуарах.

Пар из котельной к мазутному хозяйству поступает по двум паропроводам - рабочему или резервному. Паропроводы и трубопроводы для мазута прокладываются в общей изоляции для уменьшения потерь теплоты мазутом. В пределах котельной участка мазутопровода от магистрали до форсунок должны иметь устройства для продувки. В котельных с водогрейными котлами разогрев мазута ведется горячей водой в специальных теплообменниках.

На рисунке 4.5 показан пример выполнения системы паропроводов и трубопроводов для мазута в пределах хранилищ топлива, мазутонасосной станции и котельной. Топливо из хранилищ проходит фильтры грубой очистки 3 и поступает к насосам 1 с электроприводом или насосам 2 с паровым приводом. При малых расходах включается насос 6. После насосов мазут проходит подогреватели 5, поступает к фильтрам тонкой очистки 4 и далее через измерительное устройство по трубопроводам 10 к котлоагрегатам 15. Неизрасходованное топливо по трубопроводу 11 сливается обратно в мазутохранилище 13. Для перекачивания мазута из одной емкости в другую, например, из приемной емкости 14, установлены насосы 7, подающие топливо по трубопроводу 8 через фильтры 9 в хранилища 13. Насыщенный пар из котельной по двум паропроводам 12 поступает в коллектор, из которого направляется к подогревателям, к паровому приводу насосов, в греющие змеевики наземных хранилищ 13 и подземного хранилища 14. Конденсат от подогревателей и из змеевиков в хранилищах стекает в колодец для дренажей 16. В подогревателях мазут нагревается до 85 - 130°C в зависимости от марки мазута, типа форсунок и способа распыливания. В тех случаях, когда в мазут добавляются жидкие присадки для борьбы с коррозией и отложениями на поверхностях нагрева, топливо следует нагревать до еще более высокой температуры. Для приема, хранения и смешивания с топливом жидких присадок должны быть предусмотрены соответствующие емкости и насосы. Конденсат, если он загрязнен топливом, должен быть собран в колодце 16 и затем, пройдя мазутоловушки и очистку, может быть сброшен в канализацию. Остатки топлива от очистки резервуаров, из мазутоловушек и других мест сжигают.

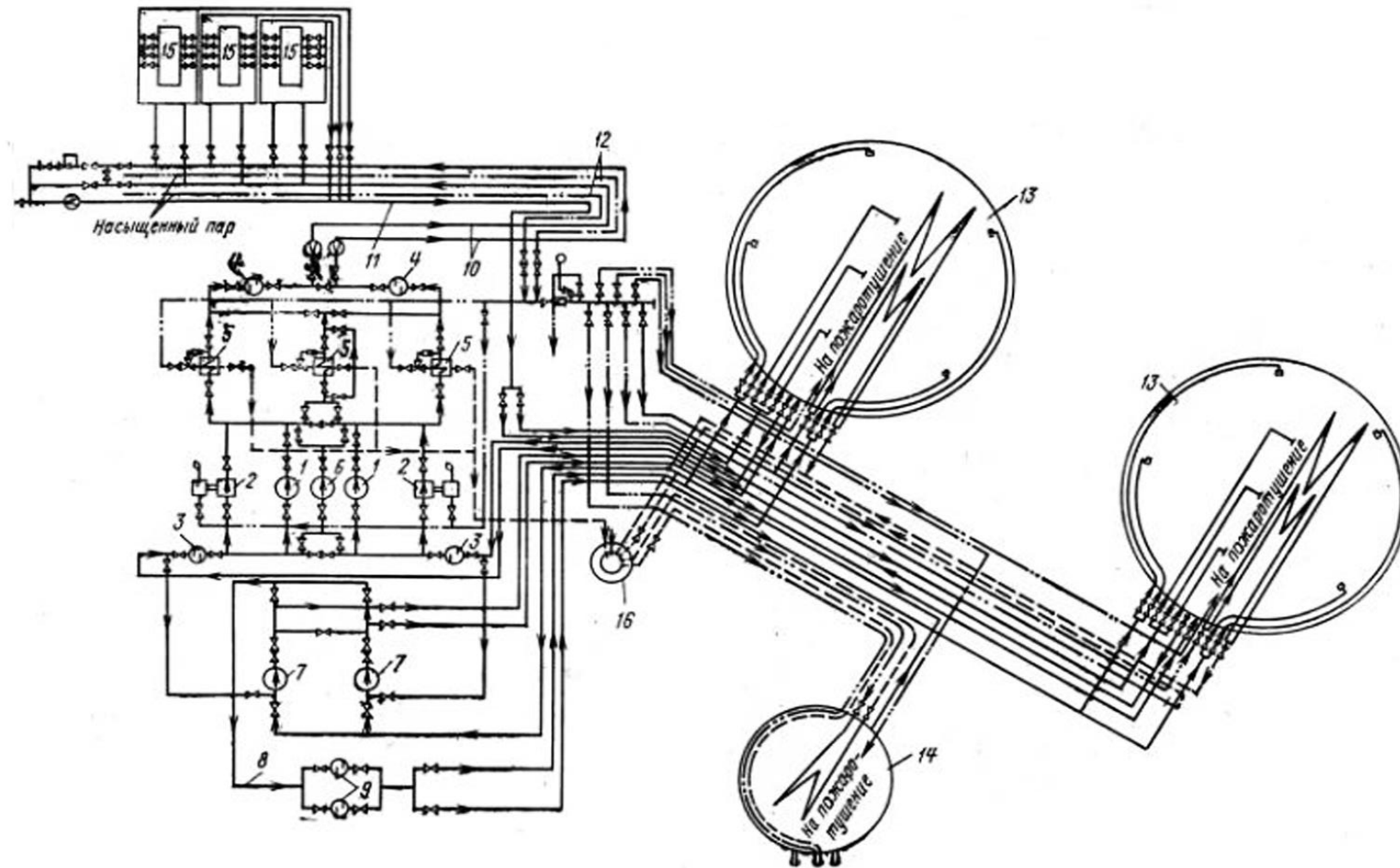


Рис. 4.5. Схема трубопроводов и размещение оборудования в мазутном хозяйстве, хранилищах и котельной:

1 -насос с электроприводом основной; 2 - паровой насос; 3 - фильтры грубой очистки; 4- фильтры тонкой очистки; 5 - подогреватели мазута; 6 – насос; 7 - перекачивающие насосы; 8 - трубопровод для очистки баков; 9 - фильтры грубые; 10 - мазутопровод напорный; 11- мазутопровод сливной; 12 - паропроводы к мазутному хозяйству; 13 - наземные мазутохранилища; 14 - подземный промежуточный бак; 15 - паровые котлы; 16 - дренажный колодец

Топливоподача твердого топлива

Твердое топливо (антрациты, каменные, бурые угли, торф) поступает по железной дороге с широкой или узкой колеей и доставляется автотранспортом, и лишь изредка - водным путем. Наиболее крупные открытые железнодорожные вагоны с широкой колеей имеют грузоподъемность 60 т, они оборудованы со дна люками для разгрузки с каждой боковой стороны; средние вагоны имеют грузоподъемность 25 т и наклонное дно к люкам.

При подаче твердого топлива по узкой железнодорожной колее, что обычно применяется при использовании добытого поблизости торфа, грузоподъемность вагона составляет около 8 т; вагон имеет односкатное дно и оборудован шестью люками в сторону для разгрузки. При автотранспорте применяются самосвалы грузоподъемностью 2,5 т и более.

Топливное хозяйство котельной включает в себя устройства и сооружения для разгрузки, приема, складирования и подачи топлива в бункера котлов.

При разгрузке топлива в крупные склады применяют роторные вагоноопрокидыватели (рис.4.6), обеспечивающие быструю и полную разгрузку вагонов от топлива.

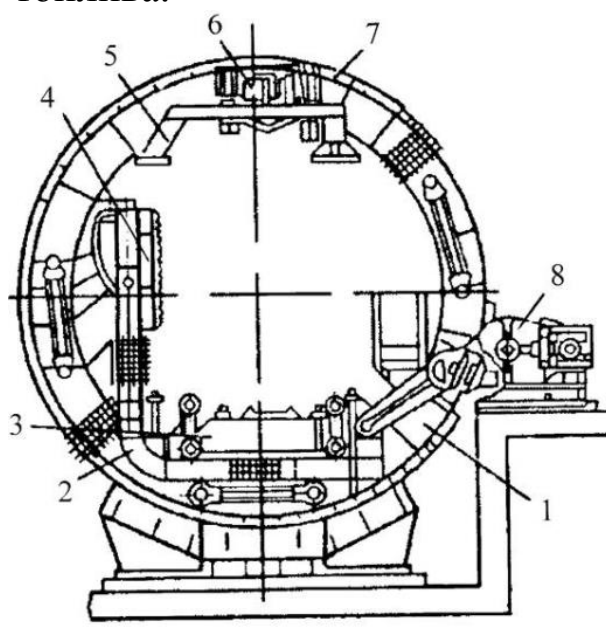


Рис.4.6. Роторный вагоноопрокидыватель

Роторные вагоноопрокидыватели осуществляют поворот вагона на 160-170° относительно продольной геометрической оси, проходящей через боковую стенку, и состоят из ротора 1 с зубчатыми венцами 7, люльки 2, моста-платформы 3, опорных роликов, вибраторов 6 с

упорами 5 и привода 8. Ротор имеет четыре кольцевых диска, связанных между собой трубчатыми фермами и верхними балками с подвешенными к ним вибраторами. Каждый из дисков опирается бандажами на две двухроликовые балансирные опоры. Рядом с бандажами на диске укреплены зубчатые венцы 7, находящиеся в зацеплении с шестернями ведущего вала электропривода. В роторе расположены две люльки, имеющие привалочные стенки 4, армированные резиновой плитой толщиной 100 мм.

В зимнее время для разогрева смерзшегося топлива на территории котельных строятся закрытые размораживающиеся тепляки.

Транспорт топлива из разгрузочного устройства в котельную или на склад осуществляется с помощью конвейеров, на которые топливо подается при помощи питателей. Конвейеры бывают следующих типов: ленточные, пластинчатые, скребковые.

При открытом способе добычи топлива, когда его куски могут достигать размера в 900 мм, на складе рекомендуется устанавливать для предварительного дробления валково-зубчатые дробилки. Валково-зубчатые или винтовые дробилки устанавливают при слоевом сжигании, а при камерном способе - молотковые. При размоле торфа в молотковых мельницах дробилки не устанавливают; если сжигается фрезерный торф в топках Шершнева, то дробилки необходимы.

Для уменьшения расхода энергии на дробление топлива следует из топлива до дробилок грохотами отделать мелкие фракции. По конструкции грохоты делятся на неподвижные и вибрационные.

Неподвижные грохоты состоят из стальных полос трапецеидальной формы, установленных после конвейера до входа топлива в дробилку. Угол наклона полос к горизонтали принимают равным 35 - 55°.

Ширина щелей между полосами принимается равной 20-30 мм. При высоковлажных топливах, содержащих, например, включения глины, необходима очистка щелей, для чего имеются механизированные приспособления.

В установках малой и средней производительности, как правило, удается обойтись неподвижными грохотами с ручной, а на влажных топливах - с механизированной очисткой. Производительность грохота и дробилки должна быть одинаковой с производительностью ленточного конвейера.

При засорении топлива древесиной, особенно при сжигании фрезерного торфа, до дробилок устанавливаются щеполовители. Над

бункерами котельной для удаления топлива с лент применяют так называемые плужковые сбрасыватели. Двигатели подачи топлива в бункера котельной имеют блокировку, которая выключает все двигатели при останове одного из них. Крупные топливоподачи автоматизируются.

Все поступающее твердое топливо до разгрузки должно быть взвешено, если его суточный расход превышает 20 т; при суточном расходе топлива в 250 т и более топливо взвешивается и при подаче со склада в бункера котельной. При поступлении топлива на территорию котельной по железной дороге для его разгрузки сооружаются устройства, которые позволяют принять часть или весь железнодорожный состав, разгрузить и очистить вагоны от остатков топлива, а затем отправить порожние вагоны на железнодорожную станцию. Устройство, на котором проводят перечисленные работы, называют разгрузочной эстакадой.

Простейшей открытой эстакадой является насыпь высотой от 1,0 до 2,8 м с уложенными на ней железнодорожными путями (рис. 4.7). Длина такой эстакады определяется суточным расходом топлива в котельной при средней температуре самого холодного месяца. Если этот расход менее 250 т, то длина эстакады принимается для одновременной разгрузки 2 - 3 вагонов в 30 - 50 м; при расходе от 250 до 750 т длина эстакады равна примерно 300 м. При наличии эстакады разгрузка топлива должна проводиться в сторону топливоподачи и склада, то есть быть двусторонней. В некоторых случаях вместо эстакады сооружаются закрытые разгрузочные сараи.

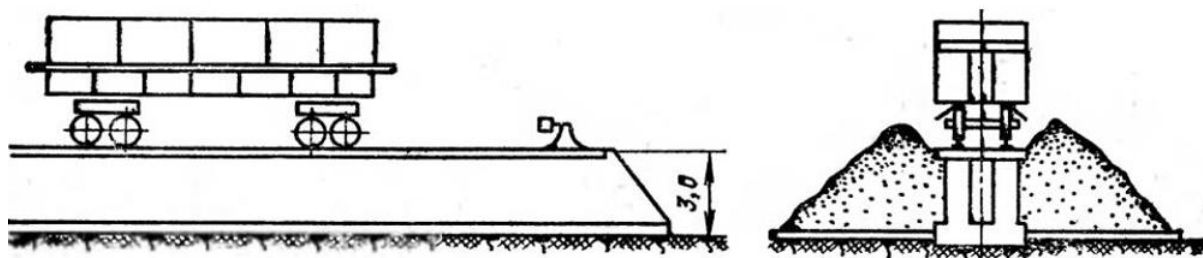


Рис. 4.7. Открытая эстакада для разгрузки топлива

Приемное устройство для топлива на территории котельной состоит из одного или нескольких железнодорожных путей, ниже отметки которых располагаются траншеи или бункера, в которые топливо сыпается из саморазгружающихся вагонов.

Размещение складов твердого топлива происходит вблизи котельных установок, склады, как правило, делают открытыми.

Территория открытого расходного склада должна быть спланирована так, чтобы имелся уклон в сторону дренажных канав, служащих для отвода атмосферных осадков. Отметка нижнего слоя топлива должна быть на 0,5 м выше наивысшего уровня грунтовых вод. Если почва территории, отведенной под склад, песчаная, илистая или торфяная, то поверхность земли необходимо покрыть несколькими слоями шлака, глинобетона на шлаке толщиной 10-15 см, уплотнить укаткой и только после этого складировать топливо на покрытии. Если склад располагается на плотных суглинистых почвах, основанием для расположения штабелей может являться спланированный и уплотненный естественный грунт. Применять для покрытия асфальт или дерево нельзя, так как топливо при хранении может разогреваться. Закрытые расходные склады для твердого топлива располагаются в одной ячейке здания котельной с торца расширения и допускаются только для котельных небольшой производительности менее 5,8 МВт (до 5 Гкал/ч), расположенных в стесненных условиях среди населенной местности, а также в некоторых особых случаях, например при расположении котельной на территории предприятий, применяющих кондиционированный воздух, и иногда в районах Крайнего Севера.

Для механизации погрузочно-разгрузочных работ и перемещения твердого топлива на открытых складах топлива используются погрузчики, бульдозеры и краны-перегрузжатели для укладки топлива в штабеля и подачи в котельные. Штабеля могут иметь произвольные размеры для всех видов углей при наличии на складе крана-перегрузжателя, скрепера и нескольких железнодорожных путей. При малой механизации целесообразно штабеля выполнять с размерами, условно показанными на рисунке 4.8.

Расстояние между подошвами соседних штабелей должно быть для бурых и каменных углей не менее 1 м при высоте штабеля до 3 м и не менее 2 м при большей высоте.

Торф укладывают в штабеля с расстоянием между их подошвами не менее 5 и 20 м между торцами. От железной дороги штабеля следует размещать на расстоянии не менее 5 м и от автодороги - не менее 2 м.

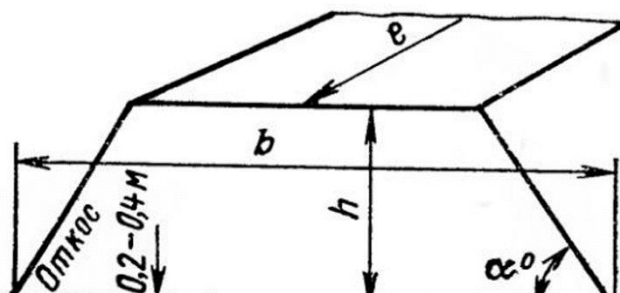


Рис. 4.8. Штабеля твердого топлива на складе

На всех складах, оборудованных кранами, целесообразно в качестве вспомогательных механизмов предусматривать бульдозеры. При подаче угля на склад и со склада автомобильным транспортом с помощью самосвалов схема склада упрощается, так как погрузка и разгрузка автомобилей могут осуществляться в любой точке склада. При оборудовании склада бульдозерами уголь, как и при канатных скреперных установках, из приемного устройства подается в первичный штабель, из которого бульдозерами распределяется по основному штабелю. При подаче со склада уголь подается бульдозерами в подземный приемный бункер, соединенный с основной системой топливоподачи. В настоящее время бульдозеры на складах топлива почти полностью вытеснили канатные скреперные установки. Бульдозеры могут также применяться и для непосредственной подачи угля от разгрузочной эстакады в штабель.

С расходного склада в котельную твердое топливо подается с помощью механизмов и устройств. Комплекс механизмов и устройств, которые перемещают топливо со склада в котельную, называют топливоподачей. Для подачи твердого топлива со склада в котельную применяют главным образом ленточные конвейеры. На рисунке 4.9 приведена компоновка склада топлива и топливоподачи ленточными конвейерами для котельной с котлами КВ-ТС-20. Один из барабанов приводит ленту в движение. Топливо можно выгрузить с конвейера в любом месте специальными разгрузочными устройствами. Ширина ленты устанавливается в зависимости от формы, производительности, насыпной массы топлива и принятой скорости конвейерных лент. Скорость ленты не превышает 1-2 м/с и определяется в зависимости от вида топлива, ширины ленты и способа разгрузки. Угол наклона конвейеров не должен превышать для рядового угля 18° , для дробленого угля и фрезерного торфа — $20-21^\circ$. Ленточные конвейеры в районах с холодным климатом устанавливаются в закрытых галереях, в которых зимой поддерживается температура не ниже $+50^\circ\text{C}$. Внутренняя высота галереи проектируется не менее 2,2 м. Между ленточными конвейерами выполняется продольный проход шириной не менее 1 м. Ширина проходов между транспортером и стенкой галереи для обслуживания и ремонта принимается 0,7 м. Допускается уменьшение боковых зазоров до 0,35 м на длине не более 1500 мм.

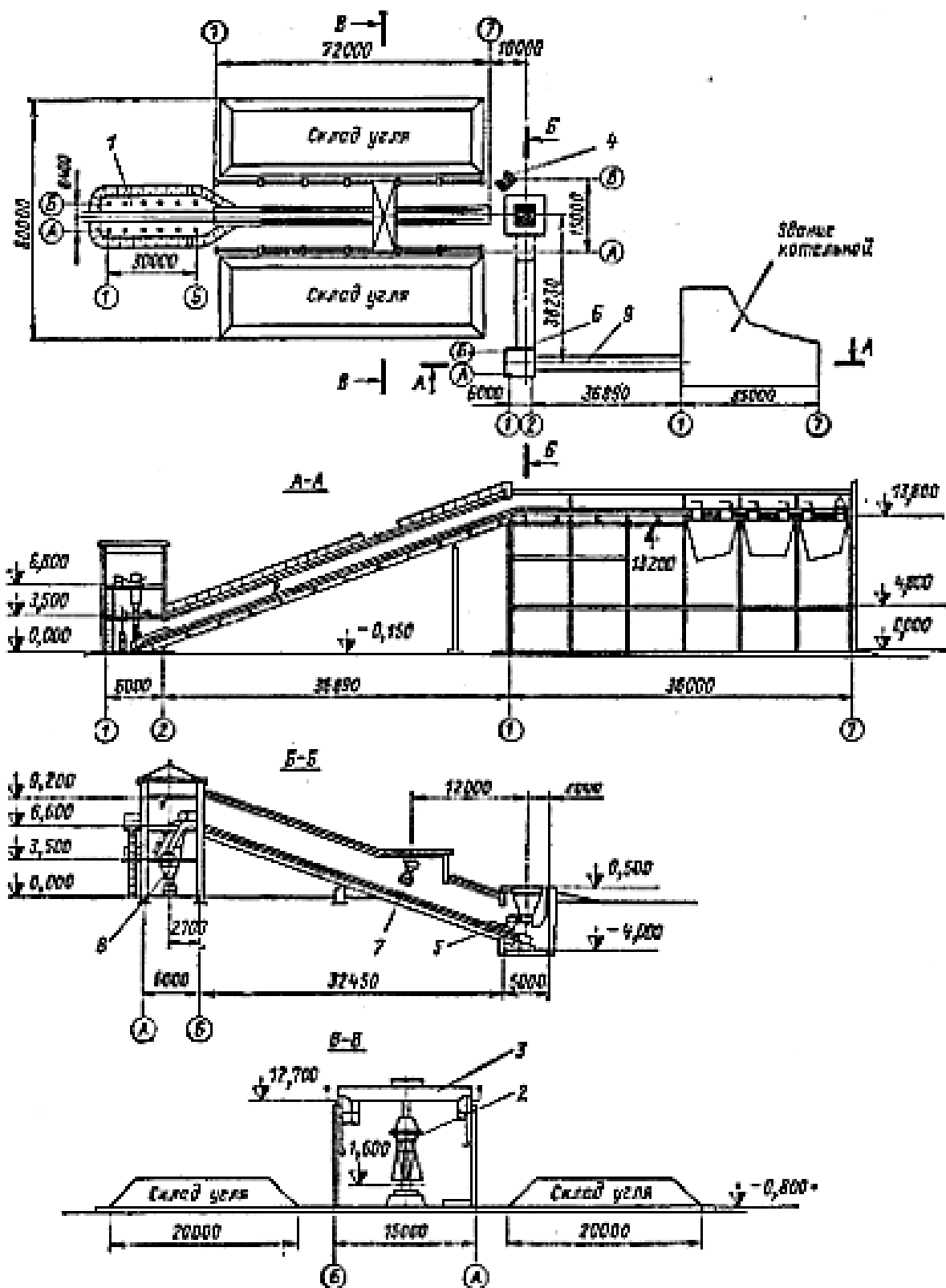


Рис.4.9. Компонка склада топлива и топливоподачи для котельной с котлами КВ-ТС-200:

- 1 – люкоподъемник; 2 – виброразгрузчик; 3 – кран мостовой; 4 - бульдозер; 5 – питатель качающийся; 6 – конвейер ленточный №1; 7 – сепаратор подвесной; 8 – дробилка двухвалковая зубчатая; 9 – конвейер ленточный №2

Также в крупных котельных применяют топливоподачу с ленточным конвейером, схема которого дана на рисунке 4.10.

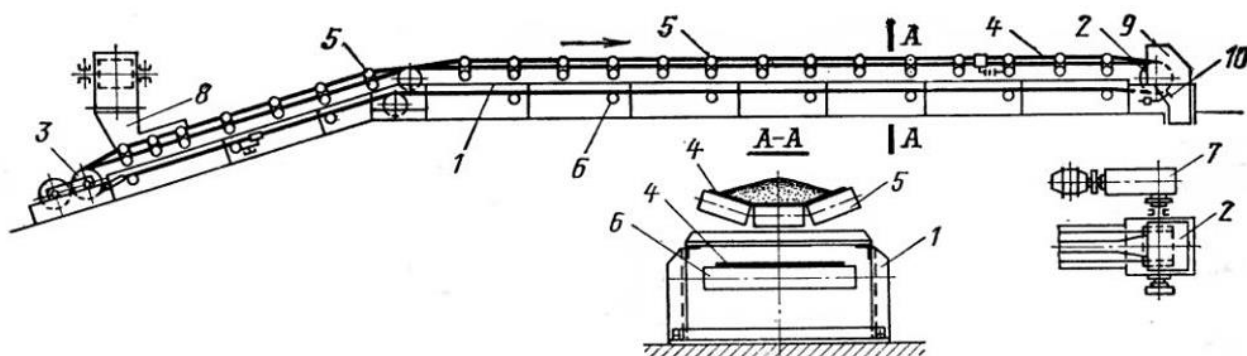


Рис. 4.10. Ленточный конвейер топливоподачи стационарного типа

Ленточные конвейеры состоят из опорной металлической конструкции 1, на одном конце которой расположен вращаемый электродвигателем через редуктор 7 приводной барабан 2. В барабан встроен электромагнит для удаления из угля стальных предметов. Иногда барабан с электромагнитом устанавливается ниже приводного, и к нему направляется поток топлива. На другом конце конструкции имеется второй натяжной барабан 3, который может перемещаться в горизонтальных направляющих и натягивать с помощью груза ленту конвейера. В верхней части конструкции помещены на небольшом расстоянии друг от друга (1,0-1,5 м) специальные ролики 5, на которые опирается нагруженная топливом лента 4. В местах поступления на ленту топлива 8 расстояния между роликами уменьшаются в 2-3 раза. В нижней части конструкции имеются ролики 6, поддерживающие ленту от провисания; их устанавливают на расстоянии друг от друга в 2-3 м. Верхние ролики 5 чаще всего образуют лоток для увеличения нагрузки ленты. Топливо с ленты удаляется в точке 5, а металл - в точке 10. Ленточные конвейеры устанавливаются для подачи топлива со склада к грохотам и дробилкам и для транспорта - в бункера котельной. В местах пересыпки устанавливаются грохоты и дробилки, а перед ними - электромагнитные сепараторы в виде барабана или на подвесках. Угол наклона конвейера зависит от вида топлива и принимается для угля в пределах 16- 20°. Скорость движения прорезиненной ленты конвейера выбирается обычно в пределах от 1,0 до 2,0 м/с и во всех случаях не более 3,0 м/с.

В небольших котельных ленточные транспортеры не находят широкого применения, так как их высокая производительность не может быть эффективно использована. Вместо ленточных конвейеров в таких котельных для транспорта топлива широко применяются электротельферы, элеваторы и скиповые подъемники. Электротельферы изготавливаются грузоподъемностью 0,5-5,0 т. Подвесные дороги с вагонетками, имеющими механизм передвижения с электроприводом, применялись в основном в топливоподачах малой производительности. При таких схемах топливоподачи топливо доставлялось со склада в специальных вагонетках, после чего они снимались тельферами и подавались для разгрузки в соответствующий котельный бункер. Недостатком схемы является необходимость применения ручного труда, так что подобные топливоподачи в последнее время не находят применения.

Ковшовые элеваторы применяются в топливоподачах котельных с небольшой территорией. Стоимость ковшовых элеваторов значительно меньше стоимости ленточных конвейеров. Промышленностью выпускаются цепные элеваторы тихоходного и быстроходного типа. Производительность элеватора при емкости ковшей в 16 л и скорости 0,4 м/с составляет 85 м³/ч. Вертикальные тихоходные элеваторы обычных типов плохо работают на влажном топливе, особенно в зимнее время. Требуется периодическая очистка ковшей и башмака. Элеваторы быстроходного типа на влажных топливах работают лучше тихоходных. Разгрузка ковшей быстроходных элеваторов осуществляется над верхним барабаном элеватора под действием силы тяжести и центробежной силы. Скорость движения элеватора около 1,0-1,25 м/с.

Ковшовые элеваторы требуют строгого ограничения размера кусков топлива и равномерного питания. Раздача топлива по бункерам котлов в случаях применения ковшовых элеваторов производится горизонтальным ленточным конвейером.

Скиповые подъемники могут применяться в топливоподачах для вертикального или наклонного транспорта топлива и для распределения топлива по бункерам котлов. На рисунке 4.11 показана схема топливоподачи со скиповым подъемником.

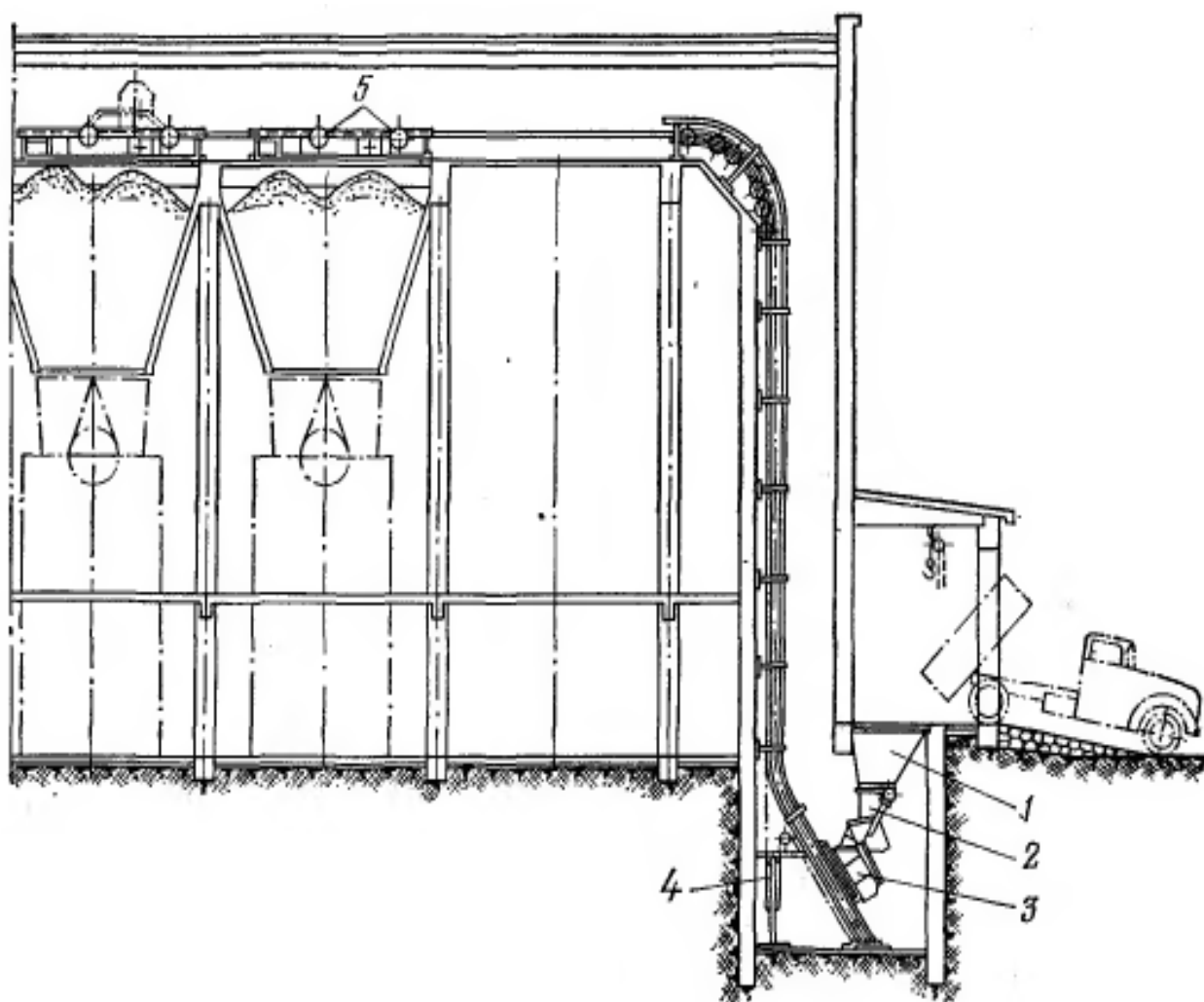


Рис.4.11. Схема топливоподачи со скиповым подъемником:
 1 – бункер приемный; 2 – дозатор автоматический; 3 – ковш;
 4 – устройство натяжное; 6 – опрокидыватель ковша

Подача угля со склада в приемный бункер подъемника осуществляется автосамосвалами или автопогрузчиками. Скиповый подъемник представляет собой автоматически нагружаемый и разгружаемый ковш емкостью 0,5; 0,75; 1,0 или 1,5 м³, перемещающийся по вертикальным, наклонным или горизонтальным направляющим при помощи электролебедки. При работе скипового подъемника неизбежны просыпание топлива при погрузке и необходимость периодической ручной очистки пола подбункерного помещения. Производительность подъемников составляет в зависимости от способа загрузки ковша, емкости ковша и длины котельной от 5 до 25 т/ч.

Наиболее простой из механизированных топливоподач является устройство, имеющее дробилку и ковшовый подъемник Шевьева с емкостью ковша 0,5 м³ (рис.4.12).

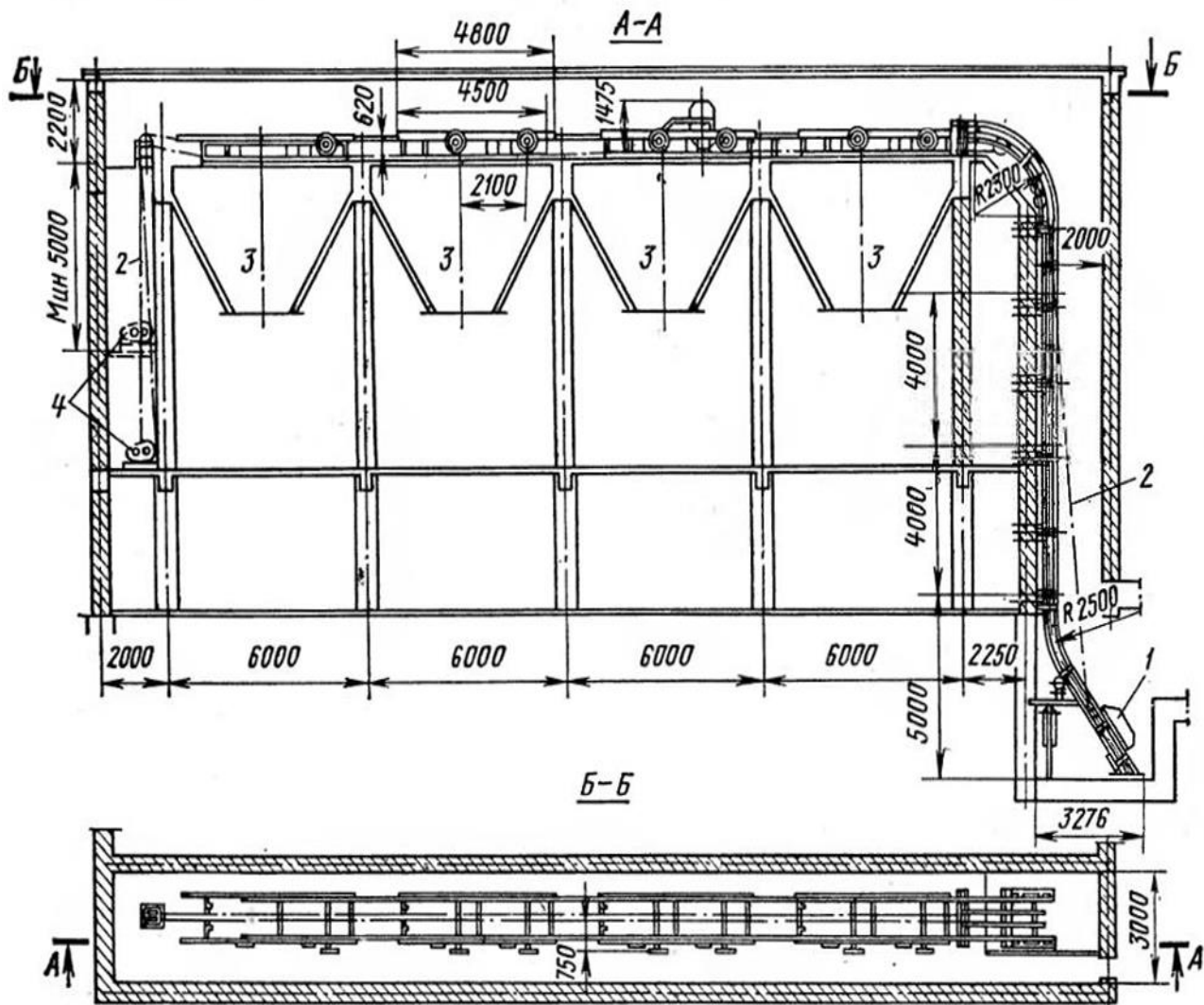


Рис. 4.12. Топливоподача с дробилкой и подъемником Шевьева:
1 – ковш; 2 – трос; 3 – котельный агрегат; 4 - лебедка

Топливо с помощью бульдозера или погрузчика подается в расположенный на нулевой отметке приемный бункер, из которого поступает в винтовую дробилку и затем в расположенный ниже бункер; отсюда дробленое топливо периодически насыпается в ковш 1. Ковш с помощью троса 2 перемещается до бункера котельного агрегата 3 и, опрокидываясь, засыпает в него топливо.

Привод ковша осуществляется однобарабанной лебедкой 4 с электродвигателем мощностью около 11 кВт. Ковш имеет емкость 0,5 - 0,75 и 1,0 м³. Производительность такой установки топливоподачи зависит от емкости ковша при дробленом топливе и при ходе ковша в 25 м она составляет 10,5; 16 и 20 т/ч, а при ходе ковша 65 м - 4,5; 7,0 и 9,5 т/ч; при недробленном угле она ниже в 1,5 - 2 раза. По произво-

длительности топливоподача с винтовой дробилкой может обеспечить при двухсменной работе котельную с производительностью до 23 МВт (20 Гкал/ч).

На рисунке 4.13 показана схема топливоподачи для крупных котельных с водогрейными (КВ-ТК-100) и паровыми (К-50-14) котлами.

В состав комплекса топливоподачи входят следующие объекты: размораживающее устройство, приемно-разгрузочное отделение, склад угля (по особому требованию принят 30-дневный запас), дробильное отделение, надбункерная галерея и галереи наклонных ленточных конвейеров.

Поступающие маршруты с углем разбиваются на подачи, которые поочередно поступают на разгрузку. Максимальное количество вагонов в подаче — 14 шт. При необходимости полувагоны направляются в размораживающее устройство и далее подаются на два параллельных пути приемно-разгрузочного отделения. С помощью маневровых устройств полувагоны устанавливаются над приемными бункерами. После открытия люков полувагонов уголь высыпается в бункера.

Отделение оборудуется виброразгрузчиками для механизированной выгрузки и зачистки полувагонов. Закрывание люков полувагонов после их разгрузки производится с помощью люкоподъемников.

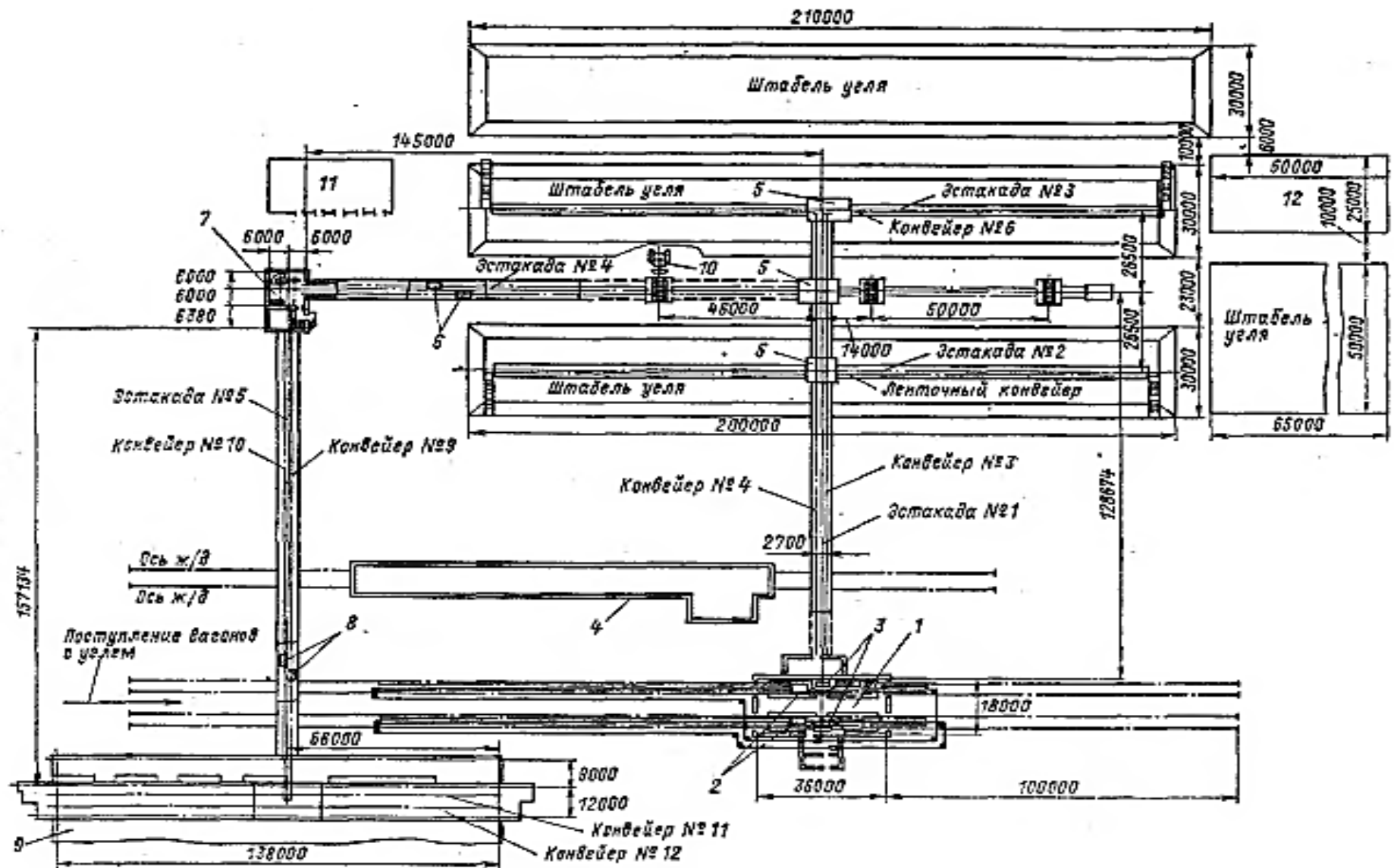


Рис.4.13. Компонка склада топлива и топливоподачи для котельной с котлами КВ-ТК-100 и К-50-14

Для дробления крупных кусков угля на решетках приемки бункеров применены передвижные дробильнофрезерные машины, мощность приёмно-разгрузочного устройства составляет 450— 500 т/ч.

Из приемных бункеров уголь подается на ленточные транспортеры (3 и 4) пластинчатыми конвейерами типа УПК-12. Конвейерами №3 и 4 уголь транспортируется по галерее (эстакаде) №1 на передвижные ленточные конвейеры №5 и 6, установленные в галереях №2 и 3. На расходном складе угля передвижные ленточные конвейеры №5 и 6 отсыпают открытые штабеля угля, бульдозеры формируют и укатывают их. Емкость каждого из двух штабелей принята равной 21 000 т угля. Дополнительно предусмотрено хранение резервного угля в штабеле емкостью 33 000 т. Общая емкость склада составляет 75 000 т угля. Со склада в дробильное отделение уголь транспортируется ленточными конвейерами № 7 и 8. Конвейеры загружаются бульдозерами через приемные бункера с качающимися питателями. В дробильном отделении установлены грохоты и молотковые дробилки.

Из дробильного отделения ленточными конвейерами №9 и 10 уголь передается на реверсивные передвижные ленточные конвейеры № 11 и 12, загружающие бункера котлов через воронку с приводным шибером. Загрузка бункеров котлов производится поочередно по минимальному уровню загрузки бункера. Все технологические процессы описанного выше проекта топливоподачи максимально автоматизированы. Конвейеры № 7 и 8 оснащены подвесными электромагнитными сепараторами и электромагнитными шкивами для отделения металлических частиц.

На ленточных конвейерах № 9 и 10 установлены автоматические весы ЛТМ-1М и пробоотборник системы ВТИ. Топливоподача рассчитана на производительность 250—300 т/ч.

Практическое занятие №3 «Состав и теплота сгорания топлива»

Задача № 1

Определить низшую и высшую теплоту сгорания горючей массы бурого угля марки Б2, если состав его рабочей массы приведен в таблице 4.8.

Таблица 4.8

Исходные данные

По последней цифре зачетной книжки	Состав рабочей массы каменного угля, %						
	C^P	H^P	$S^P_{л}$	N^P	O^P	A^P	W^P
1	28,7	2,2	2,7	0,6	8,6	25,2	32
2	29,6	2,1	2,8	0,7	8,5	25,3	31
3	38,5	2,0	2,9	0,8	8,4	25,4	30
4	31,4	1,9	3,0	0,9	8,3	25,5	29
5	33,1	1,8	3,1	1,0	8,2	25,6	28
6	41,9	1,7	3,2	1,1	8,1	25,7	27
7	34,1	1,6	3,3	1,2	8,0	25,8	26
8	35,0	1,5	3,4	1,3	7,9	25,9	25
9	35,9	1,4	3,5	1,4	7,8	26,0	24
0	36,8	1,3	3,6	1,5	7,7	26,1	23

Решение

Высшая теплота сгорания рабочей массы, кДж/кг

$$Q^P_B = 339C^P + 1256H^P - 109(O^P - S^P_{л}). \quad (139),$$

Низшая теплота сгорания, кДж/кг

$$Q^P_H = 339C^P + 1030H^P - 109(O^P - S^P_{л}) - 25W^P. \quad (140)$$

Задача № 2

Определить низшую и высшую теплоту сгорания рабочей массы, приведенную влажность, приведенную зольность, приведенную сернистость и тепловой эквивалент каменного угля марки А, если состав его рабочей массы приведен в таблице 4.9.

Таблица 4.9

Исходные данные

По последней цифре зачетной книжки	Состав рабочей массы каменного угля, %					
	C^P	H^P	$S^P_{л}$	O^P	A^P	W^P
1	63,8	1,2	0,6	1,3	22,9	8,9
2	65,0	1,3	0,5	1,4	22,8	9,0
3	73,9	1,4	0,4	1,5	22,7	9,1
4	84,8	1,5	0,3	1,6	22,6	9,2
5	64,7	1,6	0,2	1,7	22,5	9,3
6	73,6	1,7	0,1	1,8	22,4	9,4
7	64,3	1,8	0,2	1,9	22,3	9,5
8	73,0	1,9	0,3	2,0	22,2	9,6
9	63,7	2,0	0,4	2,1	22,1	9,7
0	63,4	2,1	0,5	2,2	22,0	9,8

Решение

Высшая теплота сгорания рабочей массы

$$Q^P_B = 339C^P + 1256H^P - 109(O^P - S^P_{л}), \text{ кДж/кг.} \quad (141)$$

Низшая теплота сгорания

$$Q^P_H = 339C^P + 1030H^P - 109(O^P - S^P_{л}) - 25W^P, \text{ кДж/кг.} \quad (142)$$

Приведенная влажность

$$W^P_{п} = \frac{W^P}{Q^P_H}, \text{ г/Дж.} \quad (143)$$

Приведенная зольность

$$A^P_{п} = \frac{A^P}{Q^P_H}, \text{ г/Дж.} \quad (144)$$

Приведенная сернистость

$$S^P_{п} = \frac{S^P}{Q^P_H}, \text{ г/Дж.} \quad (145)$$

Тепловой эквивалент каменного угля

$$\mathfrak{E} = \frac{Q^P_H}{29,35}. \quad (146)$$

Задача № 3

Определить низшую и высшую теплоту сгорания рабочей массы каменного угля марки Г, если даны состав его горючей массы, зольность по сухой массе и влажность рабочая в таблицах 4.10-4.11.

Таблица 4.10

Исходные данные					
По предпоследней цифре зачетной книжки	Состав горючей массы каменного угля, %.				
	C^r	H^r	$S^r_{л}$	N^r	O^r
1	77,0	5,7	9,7	1,3	6,3
2	78,0	5,8	9,6	1,4	6,3
3	76,7	5,9	9,5	1,5	6,4
4	86,0	6,0	9,4	1,6	6,0
5	77,3	6,1	9,3	1,7	6,6
6	82,1	6,2	9,2	1,8	6,7
7	76,0	6,3	9,1	1,9	6,7
8	76,7	6,4	9,0	2,0	5,9
9	76,6	6,5	8,9	2,1	5,9
0	76,3	6,6	8,8	2,2	6,1

Таблица 4.11

Исходные данные		
По последней цифре зачетной книжки	Зольность по сухой массе	Влажность рабочая, %
	A^{CP}	W^P
1	33	6
2	32	7
3	31	8
4	30	9
5	29	8
6	28	7
7	27	6
8	26	5
9	25	6
0	24	7

Решение

Коэффициент пересчета из сухой массы в рабочую

$$\frac{100 - W^P}{100} \quad (147)$$

Пересчет сухой массы золы в рабочую

$$A^P = \frac{100 - W^P}{100} A^C, \% \quad (148)$$

Коэффициент пересчета из горючей массы в рабочую

$$\frac{100 - A^P - W^P}{100} \quad (149)$$

Пересчет горючей массы углерода, водорода, серы, азота и кислорода в рабочую массу

$$C^P = \frac{100 - A^P - W^P}{100} C^G, \%, \quad H^P = \frac{100 - A^P - W^P}{100} H^G, \%, \text{ и т.д.} \quad (151)$$

Низшая теплота сгорания

$$Q_H^P = 339,5C^P + 1256H^P - 109(O^P - S_{л}^P) - 25,8(9H^P + W^P), \text{ кДж/кг} \quad (152)$$

Высшая теплота сгорания

$$Q_B^P = Q_H^P + 2514 \left(\frac{9H^P + W^P}{100} \right), \text{ кДж/кг.} \quad (153)$$

Задача № 4

Определить объем продуктов полного сгорания на выходе из топки, необходимый для сгорания 1 кг каменного угля марки К. Состав и коэффициент избытка воздуха представлены в таблице 4.12.

Таблица 4.12

Исходные данные

По предпоследней цифре зачетной книжки	состав рабочей массы каменного угля, %							По последней цифре зачетной книжки	Коэффициент избытка воздуха a_r
	C^P	H^P	$S_{л}^P$	N^P	O^P	A^P	W^P		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	53,7	3,3	0,8	0,8	4,8	27,6	9	1	1,1
2	55,1	3,1	0,7	0,9	4,7	27,5	8	2	1,2
3	56,4	3,0	0,6	1,0	4,6	27,4	7	3	1,3

Продолжение таблицы 4.12

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4	57,5	2,9	0,5	1,1	4,5	27,5	6	4	1,4
5	58,6	2,8	0,4	1,2	4,4	27,6	5	5	1,5
6	59,7	2,7	0,3	1,3	4,3	27,7	4	6	1,6
7	60,8	2,6	0,2	1,4	4,2	27,8	3	7	1,7
8	61,7	2,5	0,3	1,5	4,1	27,9	2	8	1,8
9	62,6	2,4	0,4	1,6	4,0	28,0	1	9	1,9
0	53,5	2,3	0,5	1,7	3,9	28,1	10	0	2,0

Решение

Теоретический объем сухих трехатомных газов CO_2 и SO_2

$$V_{RO_2} = 1,866 \frac{C^P + 0,375S_n^P}{100}, \text{ м}^3 / \text{кг}. \quad (154)$$

Теоретически необходимый объем воздуха

$$V_B^O = 0,0889(C^P + 0,375S_n^P) + 0,265H^P - 0,0333O^P, \text{ м}^3 / \text{кг}. \quad (155)$$

Теоретический объем азота

$$V_{N_2} = 0,79V_B^O + 0,8 \frac{N^P}{100}, \text{ м}^3 / \text{кг}. \quad (156)$$

Теоретический объем водяных паров при $a_T=1$

$$V_{H_2O}^O = 0,111H^P + 0,0124W^P + 0,0161V_B^O, \text{ м}^3 / \text{кг}. \quad (157)$$

Теоретический объем водяных паров при $a_T=1,3$

$$V_{H_2O} = V_{H_2O}^O + 0,0161V_B^O (a_T - 1), \text{ м}^3 / \text{кг}. \quad (158)$$

Объем продуктов полного сгорания на выходе из топки

$$V_\Gamma = V_{RO_2} + V_{N_2} + V_{H_2O}, \text{ м}^3 / \text{кг}. \quad (159)$$

Задача №5

Определить объем сухих газов и содержание CO_2 и SO_2 в них, получаемых при полном сгорании 1 кг каменного угля марки D . Состав и коэффициент избытка воздуха взять в таблице 4.13.

Таблица 4.13

Исходные данные

По предпоследней цифре зачетной книжки	Состав рабочей массы каменного угля, %							По последней цифре зачетной книжки	Коэффициент избытка воздуха a_{Γ}
	C^P	H^P	$S_{\text{л}}^P$	N^P	O^P	A^P	W^P		
1	58,7	4,2	0,3	1,9	9,7	13,2	12	1	1,3
2	60,0	4,1	0,4	1,8	9,6	13,1	11	2	1,0
3	61,3	4,0	0,5	1,7	9,5	13,0	10	3	1,2
4	62,6	3,9	0,6	1,6	9,4	12,9	9	4	1,3
5	63,9	3,8	0,7	1,5	9,3	12,8	8	5	1,4
6	65,2	3,7	0,8	1,4	9,2	12,7	7	6	1,5
7	66,5	3,6	0,9	1,3	9,1	12,6	6	7	1,6
8	67,8	3,5	1,0	1,2	9,0	12,5	5	8	1,7
9	69,1	3,4	1,1	1,1	8,9	12,4	4	9	1,8
0	70,6	3,3	1,0	1,0	8,8	12,3	3	0	1,9

Решение

Теоретический объем сухих трехатомных газов CO_2 и SO_2

$$V_{RO_2} = 1,866 \frac{C^P + 0,375S_{\text{л}}^P}{100}, \text{ м}^3 / \text{кг}. \quad (160)$$

Теоретически необходимый объем воздуха

$$V_B^O = 0,0889(C^P + 0,375S_{\text{л}}^P) + 0,265H^P - 0,0333O^P, \text{ м}^3 / \text{кг}. \quad (161)$$

Теоретический объем азота

$$V_{N_2} = 0,79V_B^O + 0,8 \frac{N^P}{100}, \text{ м}^3 / \text{кг}. \quad (162)$$

Объем сухих газов

$$V_{C.G.} = V_{RO_2} + V_{N_2} + (a_T - 1)V_B^O, \text{ м}^3 / \text{кг}. \quad (163)$$

Содержание CO₂ в сухих газах

$$CO_2 = \frac{0,0187C^P}{V_{C.G.}} 100, \%. \quad (164)$$

Содержание SO₂ в сухих газах

$$SO_2 = \frac{0,0187 \cdot 0,375S_{\text{Л}}^P}{V_{C.G.}} 100, \%. \quad (165)$$

Задача №6

Определить энтальпию продуктов сгорания при данном коэффициенте избытка воздуха, образовавшихся при полном сгорании 1 м³ природного газа данного состава, и если известна температура газов на выходе из топки (табл. 4.14, 4.15). При решении задачи воспользуемся приложением 12.

Таблица 4.14

Исходные данные

По предпоследней цифре зачетной книжки	Состав природного газа, %					
	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	N ₂	CO ₂
1	98,2	0,4	0,1	0,1	1	0,2
2	96,7	0,5	0,3	0,2	2	0,3
3	95,2	0,6	0,5	0,3	3	0,4
4	93,7	0,7	0,7	0,4	4	0,5
5	92,2	0,8	0,9	0,5	5	0,6
6	90,7	0,9	1,1	0,6	6	0,7
7	89,2	1,0	1,3	0,7	7	0,8
8	87,7	1,1	1,5	0,8	8	0,9
9	86,2	1,2	1,7	0,9	9	1,0
0	84,7	1,3	1,9	1,0	10	1,1

Таблица 4.15

Исходные данные

По последней цифре зачетной книжки	Коэффициент избытка воздуха	Температура газов, °С
	a_{Γ}	ϑ_{Γ}
1	1	1100
2	1,1	1105
3	1,2	1110
4	1,3	1115
5	1,4	1120
6	1,5	1125
7	1,6	1130
8	1,7	1135
9	1,8	1140
0	1,9	1145

Решение

Теоретический объем воздуха необходимый для сгорания 1 м³ топлива

$$V_B^O = 0,0476 \left[\sum \left(m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n \right], \text{ м}^3/\text{кг} \quad (166)$$

Теоретический объем азота

$$V_{N_2} = 0,79V_B^O + \frac{N_2}{100}, \text{ м}^3/\text{кг} \quad (167)$$

Объем сухих трехатомных газов

$$V_{RO_2} = 0,01(CO_2 + \sum m C_m H_n), \text{ м}^3/\text{кг} \quad (168)$$

Теоретический объем водяных паров

$$V_{H_2O} = 0,01 \left(\sum \frac{n}{2} C_m H_n + 0,124d \right) + 0,0161V_B^O, \text{ м}^3/\text{кг} \quad (169)$$

где $d = 10 \text{ г}/\text{м}^3$ – влагосодержание газообразного топлива.

Энтальпия газообразных продуктов сгорания

$$I_{\Gamma}^O = (V_{RO_2} C_{CO_2} + V_{N_2} C_{N_2} + V_{H_2O}) \vartheta_{\Gamma}, \text{ кДж}/\text{м}^3. \quad (170)$$

Практическое занятие №4 «Топочные устройства»

Задача № 1

Определить площадь колосниковой решетки, которую необходимо установить над вертикально-водотрубным котлом паропроизводительностью D , работающим на каменном угле марки T состава: C^P , H^P , $S^P_{л}$, N^P , O^P , A^P , W^P , если известны давление перегретого пара $P_{n.n.}$, температура перегретого пара $t_{n.n.}$, температура питательной воды $t_{п.в.}$, КПД брутто котлоагрегата $\eta_{к.а.}^{бр}$, величина непрерывной продувки Π и тепловое напряжение площади колосниковой решетки Q/R .

Таблица 4.16

Исходные данные

По предпоследней цифре зачетной книжки	Состав рабочей массы каменного угля, %						
	C^P	H^P	$S^P_{л}$	N^P	O^P	A^P	W^P
1	62,7	3,1	2,8	0,9	1,7	23,8	5
2	61,4	3,2	2,9	1,0	1,8	23,7	6
3	60,1	3,3	3,0	1,1	1,9	23,6	7
4	58,8	3,4	3,1	1,2	2,0	23,5	8
5	57,5	3,5	3,2	1,3	2,1	23,4	9
6	56,2	3,6	3,3	1,4	2,2	23,3	10
7	54,9	3,7	3,4	1,5	2,3	23,2	11
8	53,6	3,8	3,5	1,6	2,4	23,1	12
9	52,3	3,9	3,6	1,7	2,5	23,0	13
0	51,0	4,0	3,7	1,8	2,6	22,9	14

Таблица 4.17

Исходные данные

По последней цифре зачетной книжки	$\eta_{к.а.}^{бр}$, %	$P_{п.п.}$, МПа	$t_{п.п.}$, °C	$t_{п.в.}$, °C	Π , %	D , кг/с	Q/R , кВт/м ²	Q/V , кВт/м ²
1	88	4	430	140	4	6,1	1150	470
2	87	3	420	130	3	6,0	1100	480
3	86	2	410	120	2	5,9	1050	490
4	85	1	400	110	1	5,8	1000	500
5	84	2	440	100	2	5,7	1200	510
6	83	3	450	150	3	5,6	1250	520
7	82	4	460	160	4	5,5	1300	530
8	81	5	470	170	3	6,2	1350	540
9	80	6	480	180	2	6,3	1400	550
0	79	7	490	190	1	6,4	1450	560

Решение

Низшая теплота сгорания

$$Q_{H}^P = 339C^P + 1030H^P - 109(O^P - S^P_{л}) - 25W^P, \text{ кДж/кг.} \quad (171)$$

Располагаемое тепло топлива

$$Q_P^P = Q_H^P, \text{ кДж/кг.} \quad (172)$$

Количество тепла, полученное в котельном агрегате

$$Q_{к.а.} = (h_{п.п.} - h_{п.в.}) + \frac{\Pi}{100}(h' - h_{п.в.}). \quad (173)$$

Энтальпию перегретого пара $h_{п.п.}$, питательной воды $h_{п.в.}$ и котловой воды h' (принимаемой равной энтальпии воды при температуре кипения) определяем по таблицам насыщенного водяного пара (по давлению и температуре) и перегретого пара.

Расход топлива

$$B = \frac{DQ_{к.а.}}{Q_P^P \eta_{к.а.}^{бр.}}, \text{ кг/с.} \quad (174)$$

Площадь колосниковой решетки определим из уравнения

$$\frac{Q}{R} = \frac{BQ_H^P}{R}. \quad (175)$$

Задача № 2

Определить объем топочного пространства, предназначенного для вертикально-водотрубного котла паропроизводительностью D , при работе на каменном угле марки A состава: C^P , H^P , $S^P_{л}$, N^P , O^P , A^P , W^P , если известны давление перегретого пара $P_{п.п.}$, температура перегретого пара $t_{п.п.}$, температура питательной воды $t_{п.в.}$, КПД брутто котлоагрегата $\eta_{к.а.}^{бр.}$, величина непрерывной продувки Π и тепловое напряжение площади колосниковой решетки Q/V .

Таблица 4.18

Исходные данные

По предпоследней цифре зачетной книжки	Состав рабочей массы каменного угля, %						
	C ^P	H ^P	S ^P _л	N ^P	O ^P	A ^P	W ^P
1	2	3	4	5	6	7	8
1	59,3	2,6	3,3	1,5	2,5	20,8	10
2	60,4	2,7	3,2	1,4	2,4	20,9	9
3	61,5	2,8	3,1	1,3	2,3	21,0	8
4	62,6	2,9	3,0	1,2	2,2	21,1	7
5	63,7	3,0	2,9	1,1	2,1	21,2	6
6	64,8	3,1	2,8	1,0	2,0	21,3	5
7	65,9	3,2	2,7	0,9	1,9	21,4	4
8	67,0	3,3	2,6	0,8	1,8	21,5	3
9	68,1	3,4	2,5	0,7	1,7	21,6	2
0	69,2	3,5	2,4	0,6	1,6	21,7	1

Таблица 4.19

Исходные данные

По последней цифре зачетной книжки	$\eta_{к.а.}^{бр}$ %	$P_{п.п.}$, МПа	$t_{п.л.}$, °C	$t_{п.в.}$, °C	Π , %	Q/V , кВт/м ²
1	91	1	150	110	2	600
2	90	2	200	120	3	550
3	89	3	250	130	4	500
4	88	4	300	140	3	450
5	87	5	350	150	2	400
6	86	6	400	160	3	350
7	85	7	450	170	4	300
8	84	8	500	180	3	250
9	83	9	550	190	2	200
0	82	8	600	200	3	150

Решение

Низшая теплота сгорания

$$Q_{H}^P = 339C^P + 1030H^P - 109(O^P - S^P_{л}) - 25W^P, \text{кДж/кг.} \quad (176)$$

Располагаемое тепло топлива

$$Q_P^P = Q_H^P, \text{кДж/кг.} \quad (177)$$

Количество тепла, полученное в котельном агрегате

$$Q_{к.а.} = (h_{п.п.} - h_{п.в.}) + \frac{\Pi}{100} (h' - h_{п.в.}). \quad (178)$$

Энтальпию перегретого пара $h_{п.п.}$, питательной воды $h_{п.в.}$ и котловой воды h' (принимаемой равной энтальпии воды при температуре кипения) определяем по таблицам насыщенного водяного пара (по давлению и температуре) и перегретого пара (приложения 10-12).

Расход топлива

$$B = \frac{DQ_{к.а.}}{Q_p \eta_{к.а.}^p}, \text{ кг / с.} \quad (179)$$

Объем топочного пространства определим из уравнения

$$\frac{Q}{V} = \frac{BQ_H^p}{V}. \quad (180)$$

Задача № 3

В топке котельного агрегата паропроизводительностью D сжигается природный газ состава: CO_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 , C_4H_{10} , C_5H_{12} , N_2 . Определить тепловое напряжение топочного объема и КПД топки, если известны давление перегретого пара $P_{п.п.}$, температура перегретого пара $t_{п.п.}$, температура питательной воды $t_{п.в.}$, КПД брутто котлоагрегата $\eta_{к.а.}^{бр}$, величина непрерывной продувки Π , потери теплоты от химической неполноты сгорания топлива q_3 и потери теплоты от механической неполноты сгорания топлива q_4 .

Таблица 4.20

Исходные данные

По предпоследней цифре зачетной книжки	Состав газа, %						
	CO_2	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}	C_5H_{10}	N_2
1	0,8	84,5	3,8	1,9	0,9	0,3	7,8
2	1,2	87,2	2,1	1,3	0,4	0,1	7,7
3	0,9	85,0	3,7	1,8	0,8	0,2	7,6
4	1,0	85,1	3,6	1,7	0,7	0,4	7,5
5	1,1	85,3	3,5	1,6	0,6	0,5	7,4
6	1,3	85,4	3,4	1,5	0,5	0,6	7,3
7	1,4	85,7	3,3	1,4	0,3	0,7	7,2
8	1,5	86,0	3,2	1,2	0,2	0,8	7,1
9	1,6	86,4	2,9	1,1	0,1	0,9	7,0
0	1,7	84,4	2,5	2,2	1,1	1,2	6,9

Таблица 4.21

Исходные данные

По последней цифре зачетной книжки	$\eta_{к.а.}^{бр} \%$	$P_{п.п.}, МПа$	$t_{п.п.}, ^\circ C$	$t_{п.в.}, ^\circ C$	$\Pi, \%$	$D, кг/с$	$q_3, \%$	$q_4, \%$
1	90	1,4	280	130	4	7,05	1	2
2	89	1,6	260	120	3	6,85	2	3
3	88	1,8	240	110	2	6,65	3	4
4	87	2,0	220	140	4	6,45	4	5
5	86	2,2	200	150	3	6,25	5	6
6	85	2,4	180	160	2	6,05	6	7
7	84	2,6	160	170	4	5,75	7	8
8	83	2,8	140	180	3	5,55	8	9
9	82	3,0	120	190	2	5,35	9	1
0	81	3,2	300	200	4	5,05	10	6

Решение

Низшая теплота сгорания газообразного топлива

$$Q_H^C = 126,4CO_2 + 358,5CH_4 + 638,5C_2H_6 + 913C_3H_8 + 1187C_4H_{10} + 146,2C_8H_{12} + 108,2N_2, \text{кДж}/\text{м}^3. \quad (181)$$

Располагаемое тепло топлива

$$Q_P^\Gamma = Q_H^C, \text{Дж}/\text{м}^3. \quad (182)$$

Количество тепла, полученное в котельном агрегате

$$Q_{к.а.} = (h_{п.п.} - h_{п.в.}) + \frac{\Pi}{100} (h' - h_{п.в.}). \quad (182)$$

Энтальпию перегретого пара $h_{п.п.}$, питательной воды $h_{п.в.}$ и котловой воды h' (принимаемой равной энтальпии воды при температуре кипения) определяем по таблицам насыщенного водяного пара (по давлению и температуре) и перегретого пара (приложения 10-12).

Расход топлива

$$B = \frac{DQ_{к.а.}}{Q_P^C \eta_{к.а.}^{бр.}}, \text{ кг / с.} \quad (183)$$

Тепловое напряжение площади колосниковой решетки

$$q_R = \frac{BQ_H^C}{R}, \text{ кВт / м}^2. \quad (184)$$

КПД топки

$$\eta_T = 1 - q_3 - q_4. \quad (185)$$

Задача № 4

В топке котельного агрегата паропроизводительностью D сжигается каменный уголь марки D состава: C^P , H^P , $S^P_{л.}$, N^P , O^P , A^P , W^P . Определить тепловое напряжение площади колосниковой решетки, КПД топки, если известны давление перегретого пара $P_{п.п.}$, температура перегретого пара $t_{п.п.}$, температура питательной воды $t_{п.в.}$, КПД брутто котлоагрегата $\eta_{к.а.}^{бр.}$, величина непрерывной продувки Π , площадь колосниковой решетки R , потери теплоты от химической неполноты сгорания топлива q_3 , потери теплоты от механической неполноты сгорания топлива q_4 .

Таблица 4.22

Исходные данные

по предпоследней цифре зачетной книжки	Состав рабочей массы каменного угля, %						
	C^P	H^P	$S^P_{л.}$	N^P	O^P	A^P	W^P
1	58,7	4,2	0,3	1,9	9,7	13,2	12
2	62,7	3,1	2,8	0,9	1,7	23,8	5
3	59,9	4,1	0,6	1,8	9,2	13,4	11
4	61,4	4,0	0,9	1,7	8,4	13,6	10
5	62,9	3,9	1,2	1,6	7,6	13,8	9
6	64,6	3,8	1,5	1,5	6,4	14,2	8
7	65,7	3,7	1,8	1,4	5,8	14,6	7
8	67,6	3,6	2,1	1,3	4,6	14,8	6
9	70,1	3,5	2,4	1,2	3,2	15,6	4
0	70,4	3,4	3,3	1,1	2,2	16,6	3

Таблица 4.23

Исходные данные

По последней цифре зачетной книжки	$\eta_{к.а.}^{бр}$, %	$P_{п.п.}$, МПа	$t_{п.п.}$, °С	$t_{п.в.}$, °С	Π , %	D , кг/с	R , м ²	q_3 , %	q_4 , %
1	88	4	450	140	4	2,5	12	0,8	4,2
2	87	5	400	130	3	2,4	11	0,9	4,1
3	86	6	350	120	2	2,3	10	1,1	4,0
4	85	7	300	110	4	2,2	9	0,7	4,3
5	84	3	250	150	3	2,1	8	0,6	4,4
6	83	2	200	160	2	2,0	13	0,5	4,5
7	82	4	150	170	4	1,9	14	0,4	4,6
8	81	5	100	180	3	1,8	15	0,3	4,7
9	80	6	500	190	2	1,7	16	1,2	4,8
0	79	3	550	200	4	1,6	17	1,3	4,9

Решение

Низшая теплота сгорания

$$Q_{H}^P = 339C^P + 1030H^P - 109(O^P - S^P_{л}) - 25W^P, \text{ кДж/кг.} \quad (186)$$

Располагаемое тепло топлива

$$Q_P^P = Q_H^P, \text{ кДж/кг.} \quad (187)$$

Количество тепла, полученное в котельном агрегате

$$Q_{к.а.} = (h_{п.п.} - h_{п.в.}) + \frac{\Pi}{100} (h' - h_{п.в.}), \text{ кДж/кг} \quad (188)$$

Энтальпия перегретого пара $h_{п.п.}$, питательной воды $h_{п.в.}$ и котловой воды h (принимаемой равной энтальпии воды при температуре кипения) определяем по таблицам (приложения 10-12).

Расход топлива

$$B = \frac{DQ_{к.а.}}{Q_P^P \eta_{к.а.}^{бр}}, \text{ кг/с.} \quad (189)$$

Тепловое напряжение площади колосниковой решетки

$$q_R = \frac{BQ_H^P}{R}, \text{ кВт/м}^2. \quad (190)$$

$$\text{КПД топки} \quad \eta_T = 1 - q_3 - q_4. \quad (191)$$

Практическое занятие №5 **«Устройство, классификация и принцип работы** **горелочных устройств»**

Горелка - устройство для образования смесей пылевидного, газообразного или жидкого топлива с воздухом и подачи их в зону горения.

Горелочные устройства для камерного сжигания твердого топлива

Пылеугольные горелки служат для организованного ввода угольной пыли и воздуха в топку. Размолотая и подсушенная топливная пыль при температуре 70—130°С при помощи потока первичного воздуха через горелки вдувается в топочную камеру. Через горелки в топку поступает вторичный воздух при температуре 250—420°С, смешиваясь, два потока образуют горючую смесь.

Для сжигания угольной пыли применяют круглые (вихревые) и прямоточные (щелевые) пылевые горелки. Для сжигания пылевидного топлива совместно с газом применяют комбинированные пылеугольные горелки.

Вихревые горелки

В вихревых горелках пылевоздушная смесь и вторичный воздух образуют завихренные струи, которые закручиваются в одном направлении специальными завихрителями. Закручивание потоков достигается при помощи улиток, устанавливаемых на входе в горелку, или лопаток, установленных в горелке аксиально или тангенциально (рис. 4.15).

В горелке ОРГРЭС (рис. 4.16) вторичный воздух, получивший вращение в улиточном устройстве, встречаясь с пылевоздушной смесью, увлекает ее. Пылевоздушная смесь поступает в топку через центральную трубу, которая имеет чугунный наконечник, обеспечивающий распыливание смеси на высоком уровне, что позволяет улучшить процесс воспламенения топлива. В улиточно-лопаточных горелках завихрение пылевоздушной смеси происходит в улитке, вторичный воздух – в аксиальном лопаточном завихрителе (рис.4.17).

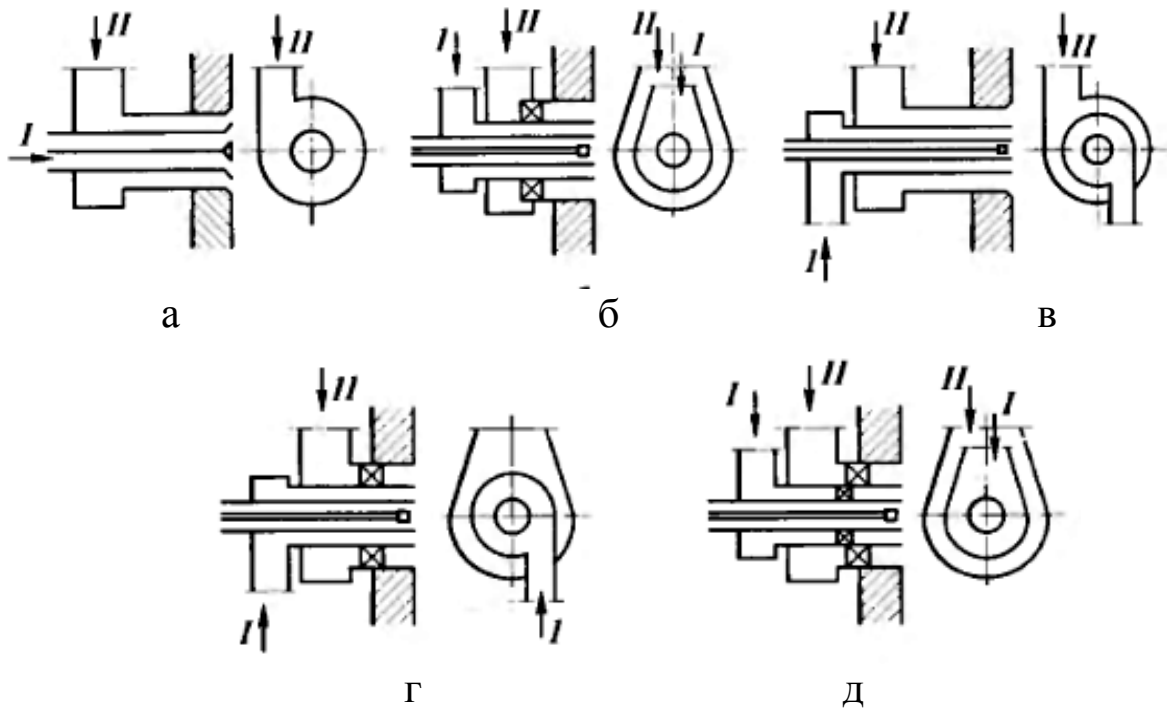


Рис.4.15. Принципиальные схемы пылеугольных вихревых горелок:
 а – прямоточно-улиточные; б – прямоточно-лопаточные;
 в – двухулиточные; г – улиточно-лопаточные; д – лопаточно-лопаточные

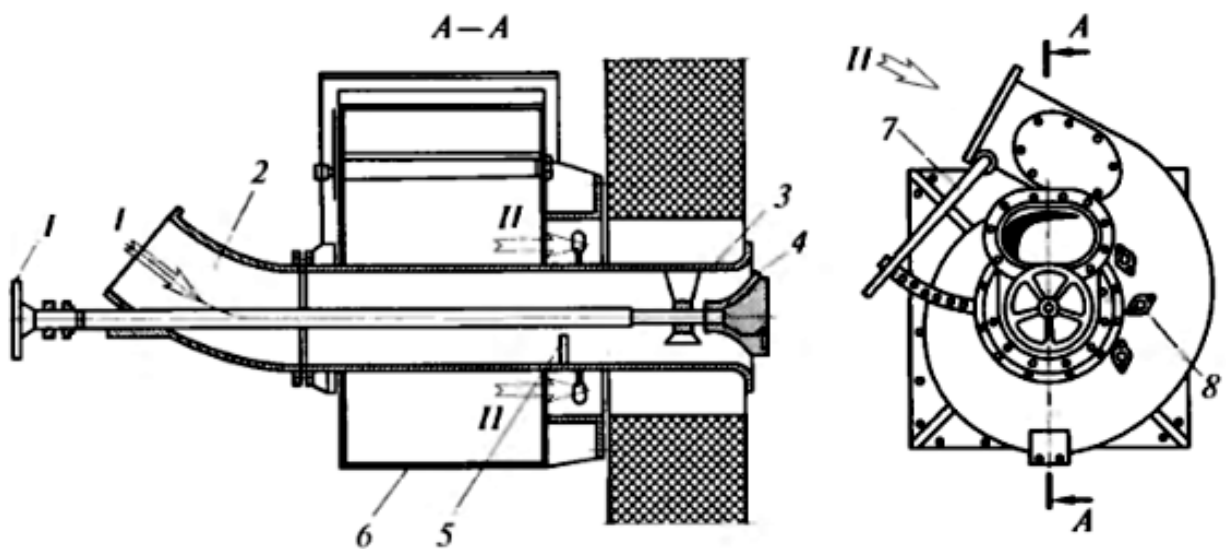


Рис.4.16. Вихревая пылеугольная горелка ОРГЭС:
 1 – штурвал управления конусом; 2 – входной патрубок первичного воздуха;
 3 – наконечник; 4 – конус-рассекатель; 5 – порог; 6 – улитка вторичного
 воздуха; 7 – рукоятка языкового шибера; 8 – отверстие для мазутной форсунки

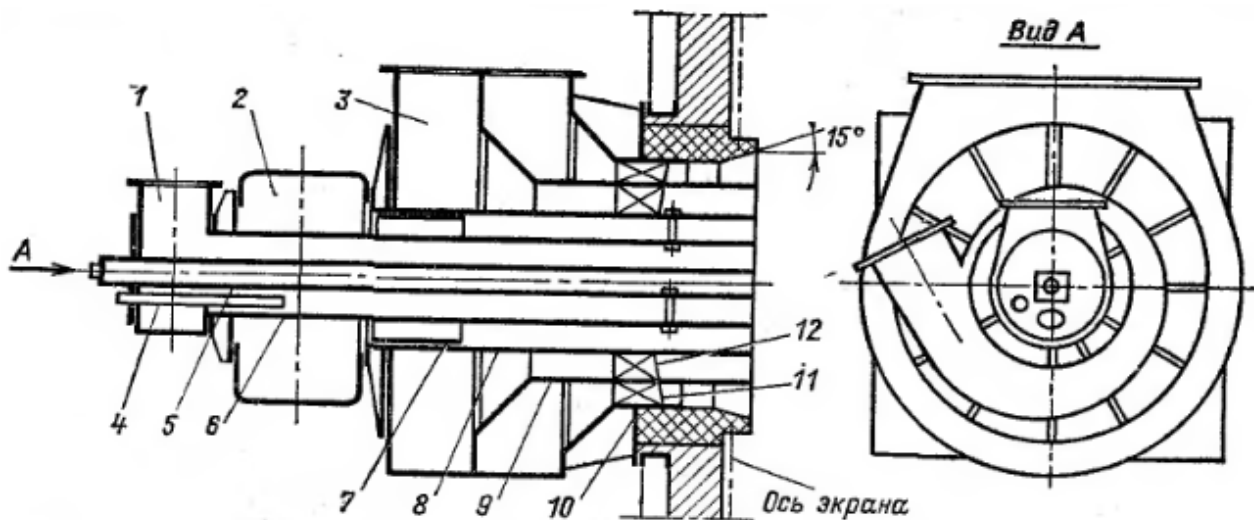


Рис.4.17. Пылеугольная вихревая улиточно-лопаточная двухпоточная горелка:

1 – короб воздуха для форсунки; 2 – улитка аэросмеси; 3 – короб двухпоточный; 4 – труба установки электрогазового запальника; 5 – труба мазутной форсунки; 6 – труба внутренняя; 7 – предохранитель; 8 – труба пылевоздушной смеси; 9 – труба разделительная; 10 – фланец несущий; 11 – регистр наружный; 12 – регистр внутренний

В прямоточно-улиточных горелках пылевоздушная смесь поступает в горелку по прямоточному каналу через рассекатель на выходе, вторичный воздух закручивается в улиточном завихрителе (рис.4.18). Структура струи пылевоздушной смеси напрямую зависит от типа и конструкции завихривающих аппаратов. Крутка потока $\frac{F}{d^2}$ в улитке зависит от площади входного патрубка улитки F и от диаметра входного сечения d . В прямоточно-улиточных горелках лучшее раскрытие факела достигается путем установления рассекателя в выходном сечении, при этом оптимальный угол раскрытия рассекателя находится в пределах $90-120^\circ$. На полноту сгорания топлива сильное влияние оказывают скорости вдувания в топку первичной смеси и вторичного воздуха. При малой скорости первичной смеси возможны выпадение из потока крупных частиц топлива и обгорание выходных патрубков горелки.

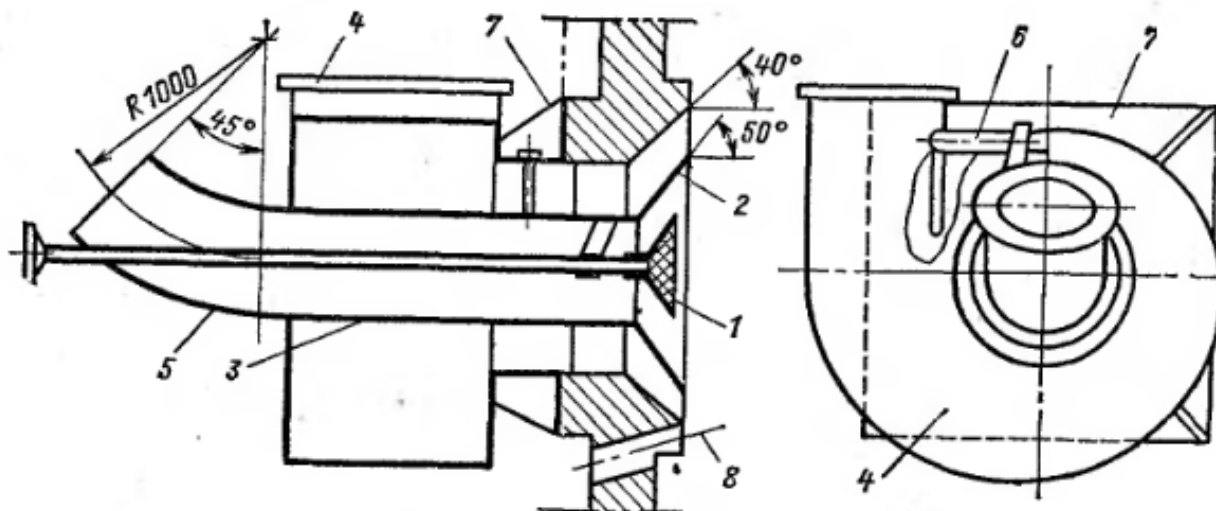


Рис.4.18. Прямоточно-улиточная горелка:

- 1 – раскатель с приводной штангой; 2 – раструб;
 3 – труба пылевоздушной смеси; 4 – улитка; 5 – патрубок; 6 – шибер;
 7 – фланец несущий; 8 – отверстие для запальника

Слишком большая скорость первичной смеси ухудшает условия воспламенения и увеличивает длину факела. Скорость вторичного воздуха в горелках малой и средней производительности составляет 18-21 м/с, высокой производительности – 26-30 м/с.

Прямоточные горелки

Данный тип горелок достаточно прост по конструкции, в них пыль топлива и вторичный воздух подаются в топку самостоятельными потоками через узкие прямые щели без закрутки потоков. Ввиду отсутствия турбулизирующего эффекта прямоточные горелки создают дальнебойные струи с малым углом расширения и слабым перемешиванием потоков. Это горелочное устройство сжигает пылевидное топливо в тонких плоских параллельных струях. Прямоточная горелка имеет одно или несколько сопел, пылевоздушная смесь подается в топку со скоростью 20—30 м/с через вертикальные узкие вытянутые амбразуры, расположенные на расстоянии 1,2—2 м одна от другой. Оси горелок расположены в одной вертикальной плоскости, которые образуют блок горелок (рис.4.19).

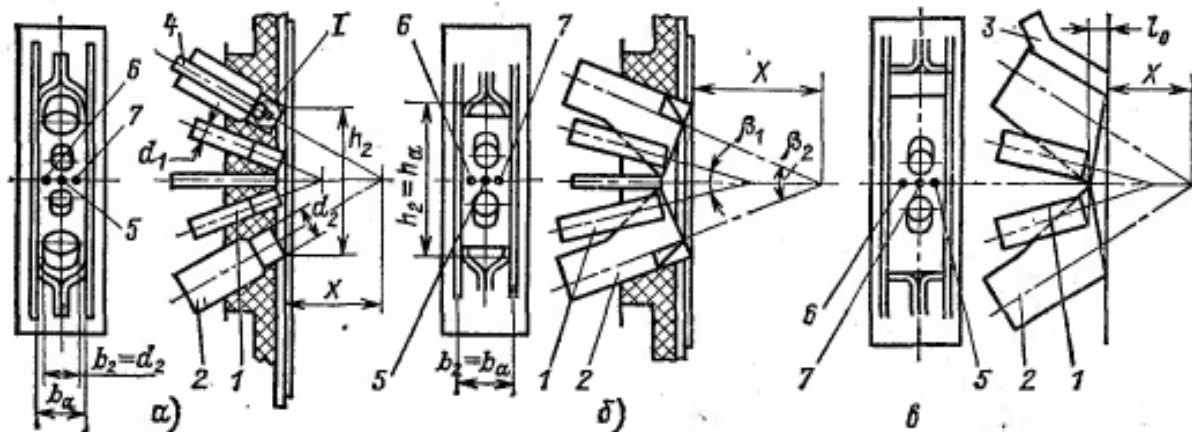


Рис. 4.21. Горелка с центральной подачей пылевоздушной смеси:
 а – для низкорекреакционных углей; б – для высокорекреакционных углей;
 в – с подачей сушильного агента или газов рециркуляции в горелке;
 1 – пылевоздушная смесь; 2 – вторичный воздух; 3 – сушильный агент или газы рециркуляции; 4 – газообразное топливо; 5 – мазут; 6 – запально-защитное устройство; 7 - гляделки

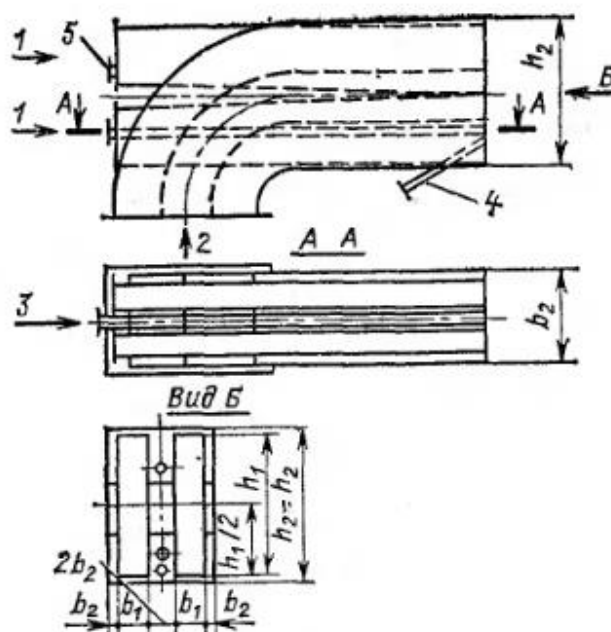


Рис.4.22. Прямоточная вертикально-щелевая горелка с чередующейся подачей пылевоздушной смеси:
 1 – пылевоздушная смесь; 2 – вторичный воздух; 3 – мазут;
 4 – запально-защитное устройство; 5 - гляделки

Сопла в щелевых горелках могут быть подвижными и поворотными. При сжигании различных сортов углей применяются разные типы пылеугольных горелок (табл. 4.24), при этом расположение их в топке может быть тангенциальным (рис.4.23) и встречным (рис.4.24).

Таблица 4.24

Область применения и пределы тепловой мощности
рекомендуемых конструкций горелок

Тип горелок	Топливо	Тепловая мощность горелки, Гкал/ч	Расположение горелок	Способ шлакоудаления	Схемы пылеприготовления
С односторонней подачей пылевоздушной смеси	Тощие угли	13-45	-	Твердое шлакоудаление	С промежуточным бункером и прямое вдувание
	Каменный и бурый угли	13 и более	тангенциальное	То же	С промежуточным бункером
Плоскофакельные с центральной подачей пылевоздушной смеси	Антрацитовый штыб, полуантрациты, тощие угли	30-65	встречное	Твердое шлакоудаление	С промежуточным бункером
	Каменный и бурый угли	30 и более	встречное	То же	С промежуточным бункером и прямое вдувание
Вертикально-щелевые с чередующейся подачей пылевоздушной смеси	Бурый уголь	20-45	встречное	То же	Прямое вдувание
Горизонтально-щелевые с чередующейся подачей пылевоздушной смеси	Каменный уголь	30-65	Тангенциальное	То же	То же

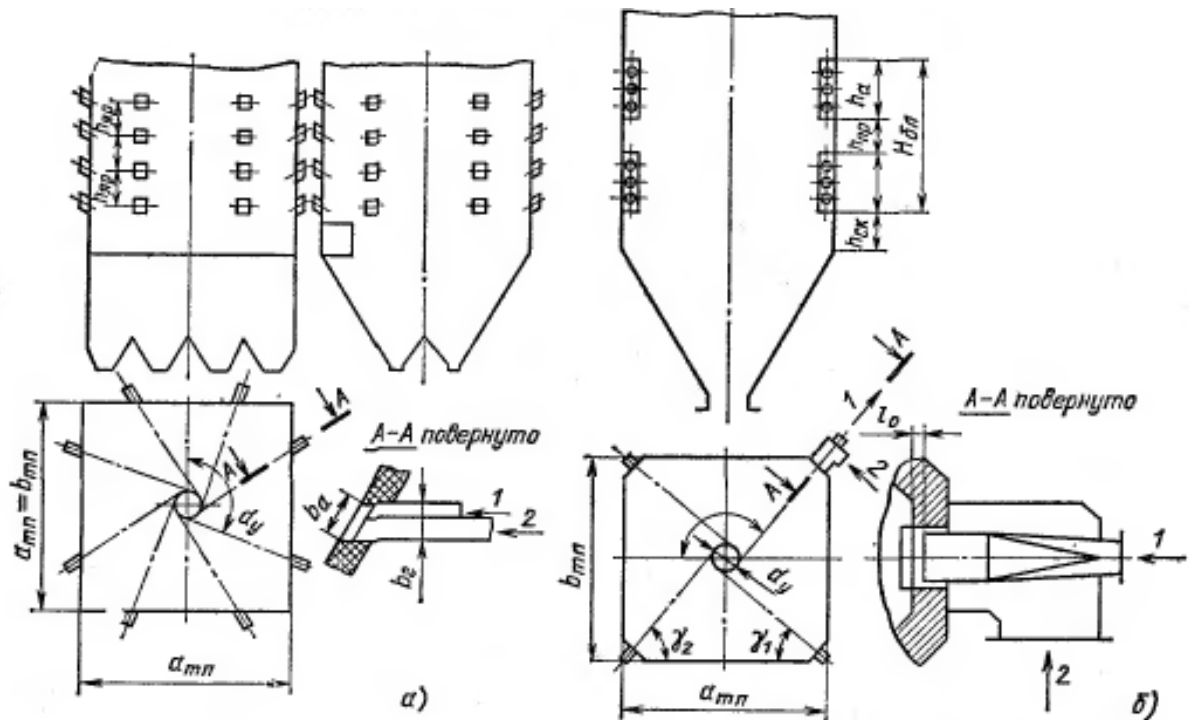


Рис.4.23. Тангенциальное расположение прямоточных горелок с твердым шлакоудалением:

а – вертикально-щелевые горелки с односторонним подводом пылевоздушной смеси; б – горизонтально-щелевые горелки с чередующейся подачей пылевоздушной смеси; 1 – пылевоздушная смесь; 2 – вторичный воздух

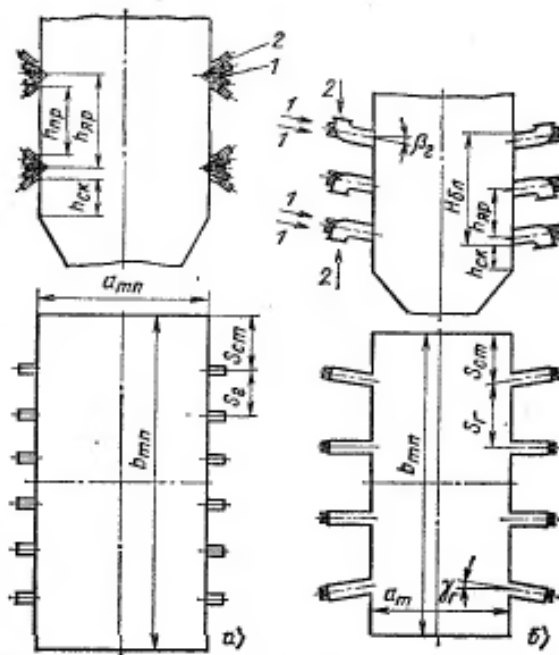


Рис.4.24. Встречное расположение прямоточных горелок в топках с твердым шлакоудалением:

а – плоскофакельные горелки б – вертикально-щелевые горелки с чередующейся подачей пылевоздушной смеси; 1 – пылевоздушная смесь; 2 – вторичный воздух

Компоновка пылеугольных горелок

Расположение горелок в топках различно. Пылеугольные горелки располагают на фронтальных или боковых стенках топочного объема котла.

В топках с удалением шлака в твердом состоянии горелки располагаются на фронтальной стене, напротив друг друга, на двух стенах или в углах топочной камеры (рис. 4.25).

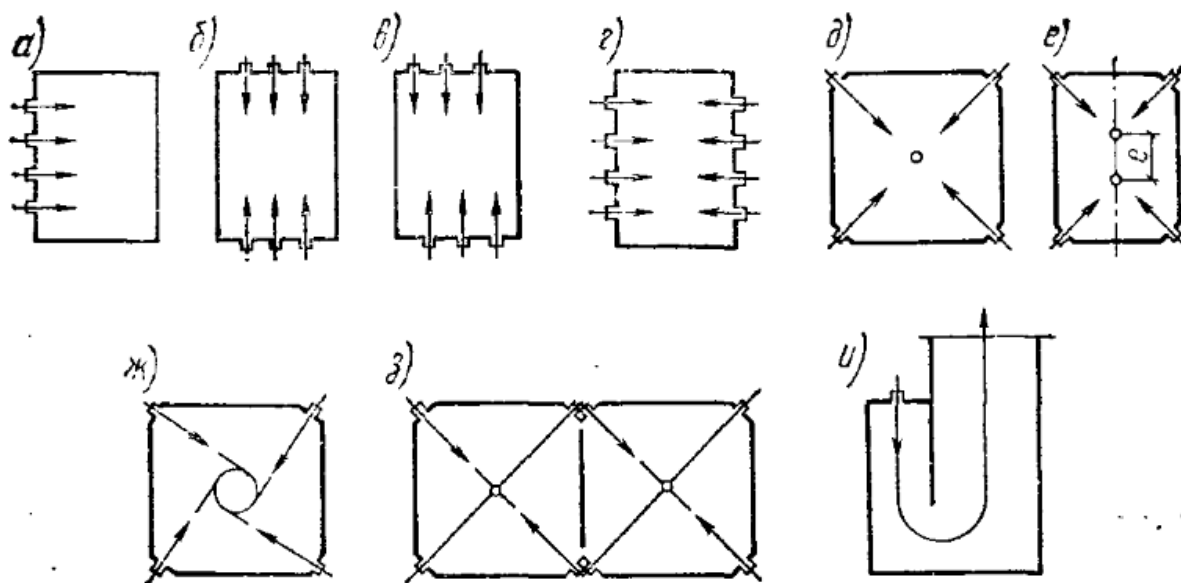


Рис.4.25. Схемы расположения пылеугольных горелок:
а – фронтальное; б – встречное; в – встречно-смешанное;
г – двухфронтальное; д – угловое с одним фокусом встречи факелов;
е – угловое боковое с двумя фокусами встречи;
ж – тангенциальное угловое; з – угловое в топке с двухсветным экраном;
и - потолочные

При одно-, двухфронтальном и боковом размещении применяют вихревые и щелевые горелки с расстоянием между вихревыми горелками большим, чем между щелевыми. Продукты сгорания, выходящие из крайних горелок, не должны касаться топочных.

Короткофакельные вихревые горелки располагают в топках фронтально (рис. 4.25, а).

В котлах средней производительности горелки часто располагают в симметричном порядке на противоположных боковых стенках (рис.4.25 б, в). Горелки с повышенной дальностью располагают на боковых стенках топки, так как ширина топки больше ее глубины.

В котельных агрегатах большой мощности горелки располагают на фронтальной и задней стенках топки (рис. 4.25 з).

При угловой компоновке горелок применяют диагональное расположение с одним фокусом встречи факелов в центре сечения топки (рис. 11 з) и блочное с двумя фокусами (рис.4.25 е).

При тангенциальной компоновке угловых горелок в топке образуется вертикальный вихрь, обеспечивающий хорошее перемешивание.

В топках, разделенных двухсветными экранами, угловые горелки размещают в углах каждой части камеры (рис.4.25 з). Угловые горелки также устанавливают в 2-4 яруса, что обеспечивает достаточным количеством топлива котельные агрегаты большой мощности.

Блочное расположение угловых горелок применяется в топках, вытянутых по фронтальной части. При потолочном расположении горелок заполнение факелом достаточно хорошее (рис.4.25и), но так как усложняется компоновка топки, данный способ применяют достаточно редко.

Горелочные устройства для сжигания жидкого и газообразного топлива

Горелочные устройства для сжигания жидкого топлива

В качестве жидкого топлива в промышленных котельных используют, как правило, мазут, который сжигается во взвешенном состоянии, предварительно перед поступлением в камеру сжигания подвергаясь распылу на мелкие капли при помощи специальных устройств – форсунок. По принципу действия их подразделяют на механические, паровые и воздушные.

Форсунки с механическим распылением

В форсунках с механическим распылением (рис. 4.26) используется кинетическая энергия струи мазута, создаваемая давлением топливного насоса. Выходя под давлением с повышенной скоростью через небольшое отверстие форсунки, мазут распыляется. Мазутная форсунка с механическим распыливанием, представленная на рисунке 4.26, состоит из ствола 2, ввернутого в корпус 1, на конце ствола зафиксирована пустотелой гайкой распыливающая горелка. Горелка состоит из распределительного диска 3, завихривающего диска 4, распыливающей шайбы 5.

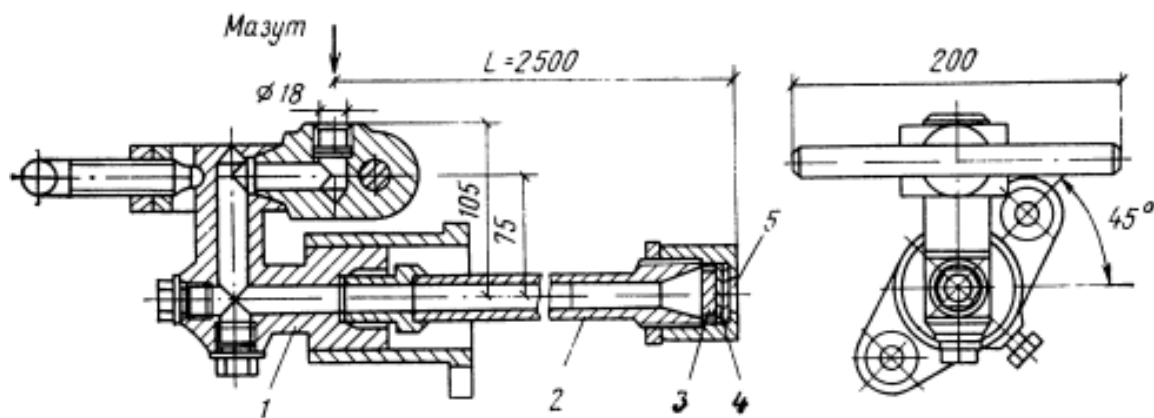


Рис.4.26. Мазутная форсунка с механическим распыливанием:

- 1 – корпус; 2 – ствол; 3 – распределительный диск;
4 – завихрывающий диск; 5 – распыливающая шайба

Достоинствами данных форсунок является то, что на распыл топлива не требуется пар, они бесшумны и компактны. Недостатками – их быстрое загрязнение и соответствующая этому частая чистка.

Паровые форсунки

В паровых форсунках распыление топлива достигается в результате использования кинетической энергии струи пара, вытекающей из форсунки при давлении 0,4-1,6 МПа. Для распыления применяют насыщенный и слабopегрeтый пар.

Паровая форсунка, изображенная на рисунке 4.27, состоит из двух труб 2, 3 и корпуса 1.

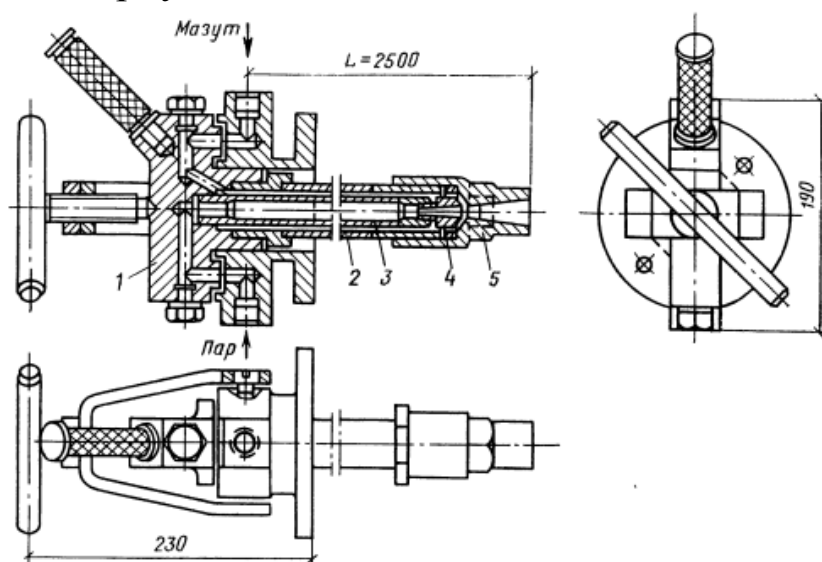


Рис.4.27. Мазутная форсунка с паровым распыливанием:

- 1 – корпус; 2,3 – концентрическая труба; 4 – расширяющееся сопло; 5 - гайка

Во внутреннюю трубу 3 поступает пар, который, выходя из расширяющегося сопла 4 со скоростью более 1000 м/с, распыливает топливо, поступающее по кольцевому каналу между трубами через щель между соплом и гайкой 5.

Паровые форсунки применяют в котлах малой производительности, так как на распыл топлива требуется значительное количество пара и предварительный подогрев мазута. Распыл сопровождается сильным шумом и снижением температуры в топке из-за охлаждающего действия пара.

Воздушные форсунки

Воздушные форсунки применяются в водогрейных котельных малой теплопроизводительности. Воздух для распыла подается от вентилятора с давлением 2-7 кПа. Малая скорость воздуха приводит к недостаточно хорошему распылу топлива, поэтому данные форсунки применяются ограниченно. На рисунке 4.28 представлена схема форсунки с воздушным распыливанием топлива, которая используется на котлах малой мощности.

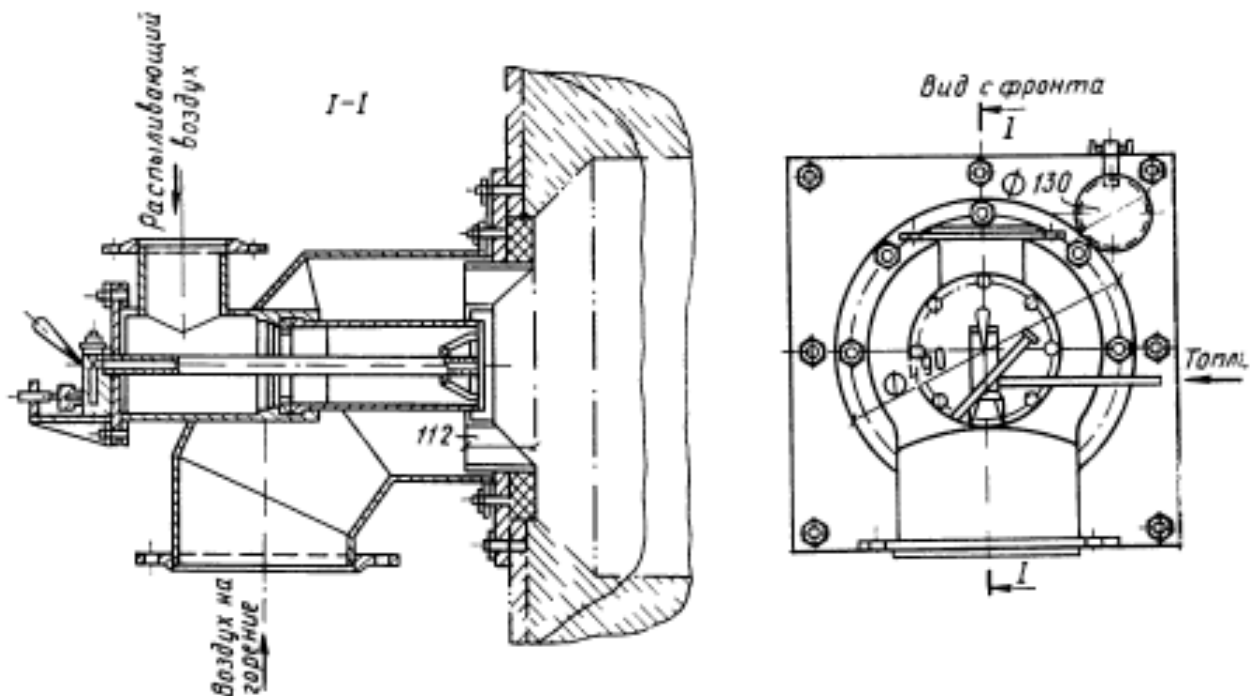


Рис. 4.28. Форсунка с воздушным распыливанием топлива

Паромеханические форсунки

Паромеханические форсунки (рис. 4.29) мало отличаются от механических.

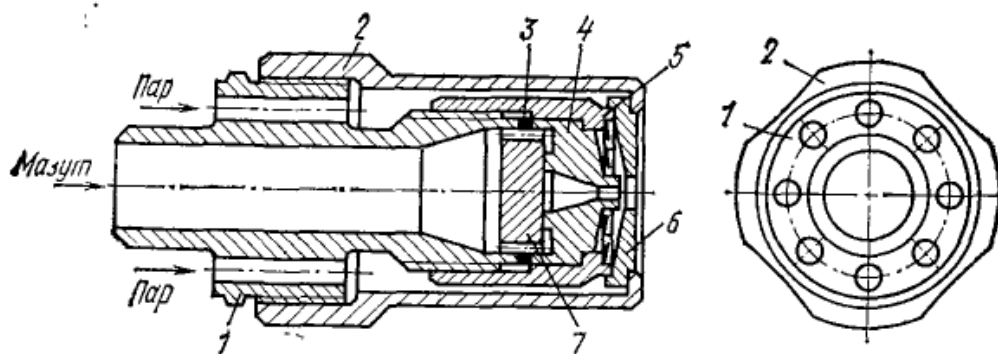


Рис.4.29. Паромеханическая форсунка:

1 – корпус; 2 – накидная гайка; 3 – прокладка; 4 – механический завихритель; 5 – паровой завихритель; 6 – насадка; 7 – распределительный диск

В форсунках имеются два канала: один — мазутный, другой — паровой. Мазутный канал аналогичен каналу механической форсунки. При большой нагрузке котла топливо последовательно проходит механический завихритель и насадку. В случае малой нагрузки пар поступает в паровой канал, проходит систему отверстий в корпусе форсунки и паровой завихритель и далее, встречаясь с мазутом, распыляет его. Одновременно с паровым действует и механическое распыление, которое при низком давлении не обеспечивает получения капель должного размера. Производительность паромеханических форсунок составляет 5—7 т/ч.

Ротационные форсунки

В настоящее время широкое применение получили ротационные форсунки, в которых топливо распыливается под действием центробежной силы (рис.4.30).

Центробежная сила создается при вращении конического стакана 5, топливо к которому поступает при давлении или самотеком по трубопроводу 2. Вращение создает центробежную силу, которая прижимает топливо к внутренней поверхности стакана, затем оно стекает к краю, срывается и распыливается.

Улучшение распыла достигается путем подачи воздуха вентилятором 6 через зазор между стаканом 5 и насадкой 4. Подача воздуха регулируется заслонкой 7. Подача вторичного воздуха осуществляется через кольцевое пространство между насадкой 4 и корпусом 3. Привод вентилятора осуществляется от электродвигателя 1 через клиноременную передачу на вал 8.

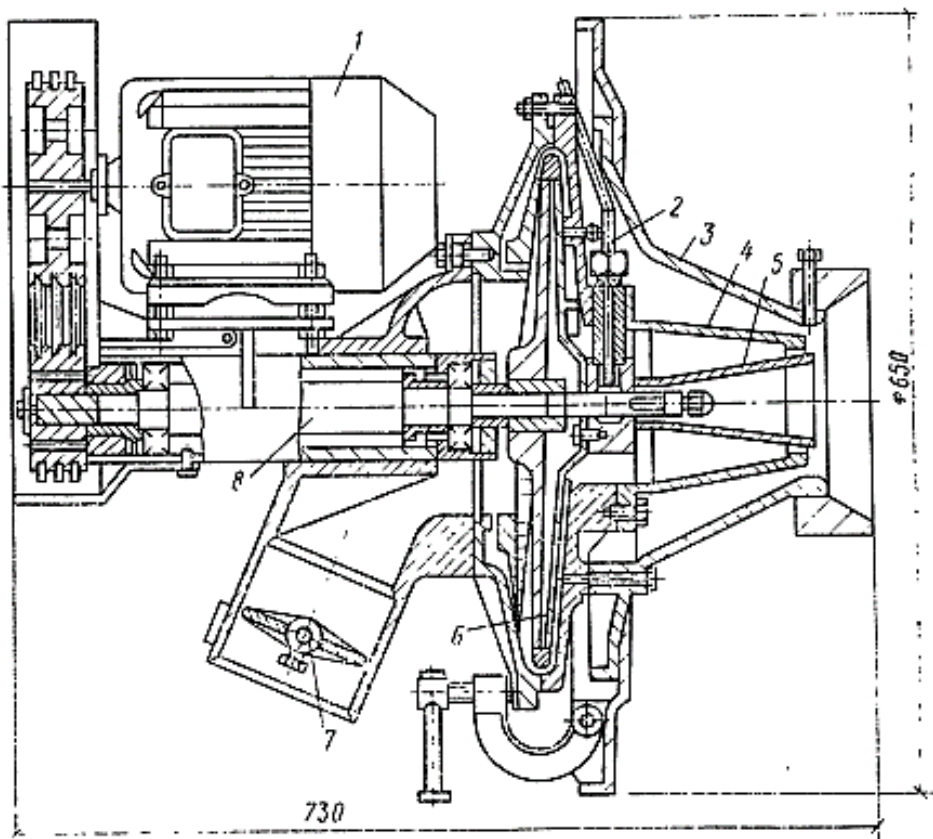


Рис.4.30. Ротационная форсунка:
 1 – электродвигатель; 2 – трубопровод; 3 – корпус; 4 – насадка;
 5 – коническая чаша; 6 – вентилятор; 7 – заслонка; 8 - вал

Горелочные устройства для сжигания газообразного топлива

По способу подвода воздуха газовые горелки делятся на две группы:

- инжекционные горелки с подачей воздуха при использовании инжектирующего эффекта потока газа;
- смесительные горелки с принудительной подачей воздуха дутьевыми вентиляторами.

Смесительные горелки

В районных котельных используют горелки второй группы, работающие на газе низкого давления, что обеспечивает безопасность и удобство эксплуатации. Недостатками этих горелок являются необходимость затраты электроэнергии на дутье и отсутствие саморегулируемости соотношения «воздух–газ». Котельные агрегаты, оборудованные горелками с принудительной подачей воздуха, снабжают системой автоматического регулирования подачи воздуха в соответствии с расходом газа и автоматической блокировкой, прекращающей подачу газа при недоступном уменьшении расхода воздуха и последующего погасания пламени. Смесительные горелки бывают низкого

давления (давление газа перед горелкой до 2 кПа) и среднего (давление газа перед горелкой до 30 кПа). Горелка, приведенная на рисунке 4.31, является горелкой низкого давления.

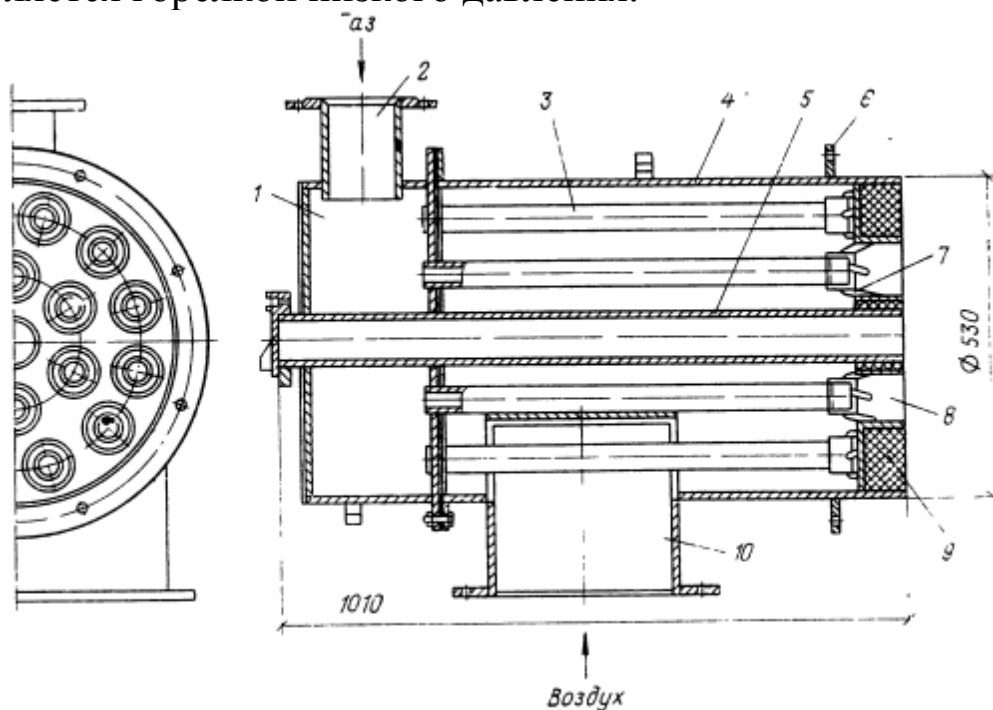


Рис.4.31. Газовая горелка системы «Мосгазпроект»:

1 – камера; 2 - патрубок для поступления газа в корпус; 3, 5 – трубка;
4 – корпус; 6 – фланец; 7 – лопатки; 8 – отверстие для поступления газа в камеру; 9 – стенка корпуса; 10 – патрубок для поступления воздуха в корпус

Воздух и газ поступают в корпус 4 по отдельным патрубкам 2 и 10. Газ из камеры 1 через отверстие 8 в стенке 9 поступает по трубкам 3 в корпус горелки. Воздух через патрубок 10 при помощи вентилятора поступает в корпус, двигаясь между трубками 3, попадает через отверстия 8 в топку. Перед этим воздух завихряется, проходя через специальные лопатки 7. Для розжига горелки внутри ее установлена трубка 5.

Инжекционные горелки

В инжекционных горелках, работающих при давлении до 2,5кПа, количество подсасываемого первичного воздуха составляет 30-70% от его общего объема, вторичный воздух недостающего объема поступает в топку посредством возникающего в ней разрежения. В инжекционных горелках, работающих при давлении 10-30 кПа, не требуется подача вторичного воздуха, так как количество подсасываемого первичного воздуха полностью обеспечивает процесс горения в горелке. Данные горелки классифицируются на прямые и угловые.

На рисунке 4.32 представлена схема инжекционной горелки системы инж. Казанцева.

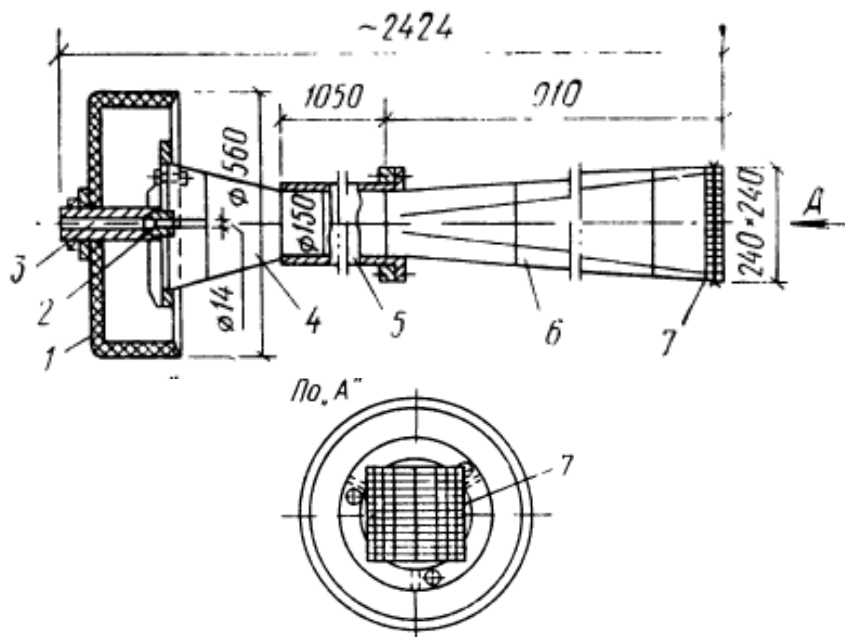


Рис.4.32. Газовая инжекционная горелка системы инж. В.В. Казанцева

Газ, поступающий в трубу 3, проходит через сопло 2, поступает в конфузор смесителя 4. Одновременно в смеситель поступает воздух из атмосферы, смешивается с газом, далее смесь через диффузор поступает в топку. В горелке расположены регулятор подачи воздуха 1 и стабилизатор 7, предназначенный для обеспечения надежности воспламенения смеси.

Практическое занятие №6 «Подбор котлов»

Задача №1

Подобрать в котельную котлы, зная расходы теплоты на отопление, вентиляцию, горячее водоснабжение и оборудование, используя данные таблиц 4.25, 4.26.

Таблица 4.25

Исходные данные

По предпоследней цифре зачетной книжки	$Q_{от}$, кВт	$Q_{в}$, кВт	$Q_{г.в}$, кВт	$Q_{1об}$, кВт	$Q_{2об}$, кВт
1	2	3	4	5	6
1	1400	130	55	60	50
2	1300	120	50	55	45
3	1200	110	45	50	40

Продолжение табл. 4.25

1	2	3	4	5	6
4	1100	100	40	45	35
5	1000	90	35	40	30
6	900	80	30	35	25
7	800	70	25	30	20
8	700	60	20	25	15
9	600	50	15	20	10
0	500	40	10	15	5

Таблица 4.26

Исходные данные

По последней цифре зачетной книжки	$P_{2\max}$, МПа	$P_{1\max}$, МПа	t_n , °С
1	0,20	1,1	95
2	0,19	1,0	150
3	0,18	0,9	95
4	0,17	0,8	150
5	0,16	0,7	95
6	0,14	0,6	150
7	0,14	0,5	95
8	0,13	0,4	150
9	0,12	0,3	95
0	0,11	0,2	150

Решение

Расход пара D , кг/ч, подсчитываем отдельно для отопления, вентиляции, горячего водоснабжения и оборудования

$$D = \frac{3600 \cdot Q}{\eta(h'' - h')}, \quad (192)$$

где Q_g - расход теплоты на отопление, вентиляцию, горячее водоснабжение и оборудование, кВт; η - коэффициент использования тепла; на отопление и оборудование $\eta = 0,95$; горячее водоснабжение $\eta = 0,92$; вентиляцию $\eta = 0,9$; h'', h' - соответственно энтальпия сухого насыщенного пара и кипящей жидкости для систем отопления, вентиляции и горячего водоснабжения при $t_n = 95^\circ\text{C}$ или $t_n = 150^\circ\text{C}$ и $t_g = 55^\circ\text{C}$; для оборудования при заданном максимальном давлении расчет проводим отдельно для каждого оборудования.

Общий расход пара, кг/ч,

$$D_{об} = \sum D. \quad (193)$$

Непредвиденные расходы пара, кг/ч,

$$D_H = 0,1D_{об}. \quad (194)$$

Общий расход пара с учетом непредвиденных расходов пара, кг/ч,

$$D'_{об} = D_{об} + D_H. \quad (195)$$

В котельной должно быть не менее двух и не более четырёх стальных котлов, при этом котлы однотипные по теплоносителю должны иметь одинаковую площадь поверхности нагрева. Количество котлов, необходимых для установки в котельной определяем

$$n_k = \frac{D'_{об}}{D_k} = (2 - 4), \quad (196)$$

где D_k - тепловая мощность одного котла, кг/ч, приложение 3.

Задача №2

Рассчитать тепловую схему котельной, нарисовать с указанием найденных величин, приведенных в таблицах 4.27.

Таблица 4.27

Исходные данные $t_{nn}, ^\circ\text{C}$

По предпоследней цифре зачетной книжки	$Q_p,$ Bm	$Q_{г.в.с.},$ Bm	$Q_{т.н.},$ Bm	$t_n,$ $^\circ\text{C}$
1	15765200	664784	237024	95
2	14531247	827293	236900	150
3	15516474	825929	237072	95
4	12161482	508764	113987	150
5	12483672	509352	111628	95
6	16603269	862458	623451	150
7	13645824	736242	264259	95
8	17151179	986339	120684	150
9	15328596	635982	213654	95
0	14652878	795628	225685	150

Решение

Тепловая схема иллюстрирует взаимосвязь между отдельными элементами оборудования котельной и отображает тепловые процессы, связанные с трансформацией теплоносителя и исходной воды.

В качестве примера рассмотрим тепловую схему водогрейной котельной с отпуском теплоты в открытые тепловые сети, изображенную на рисунке 4.33.

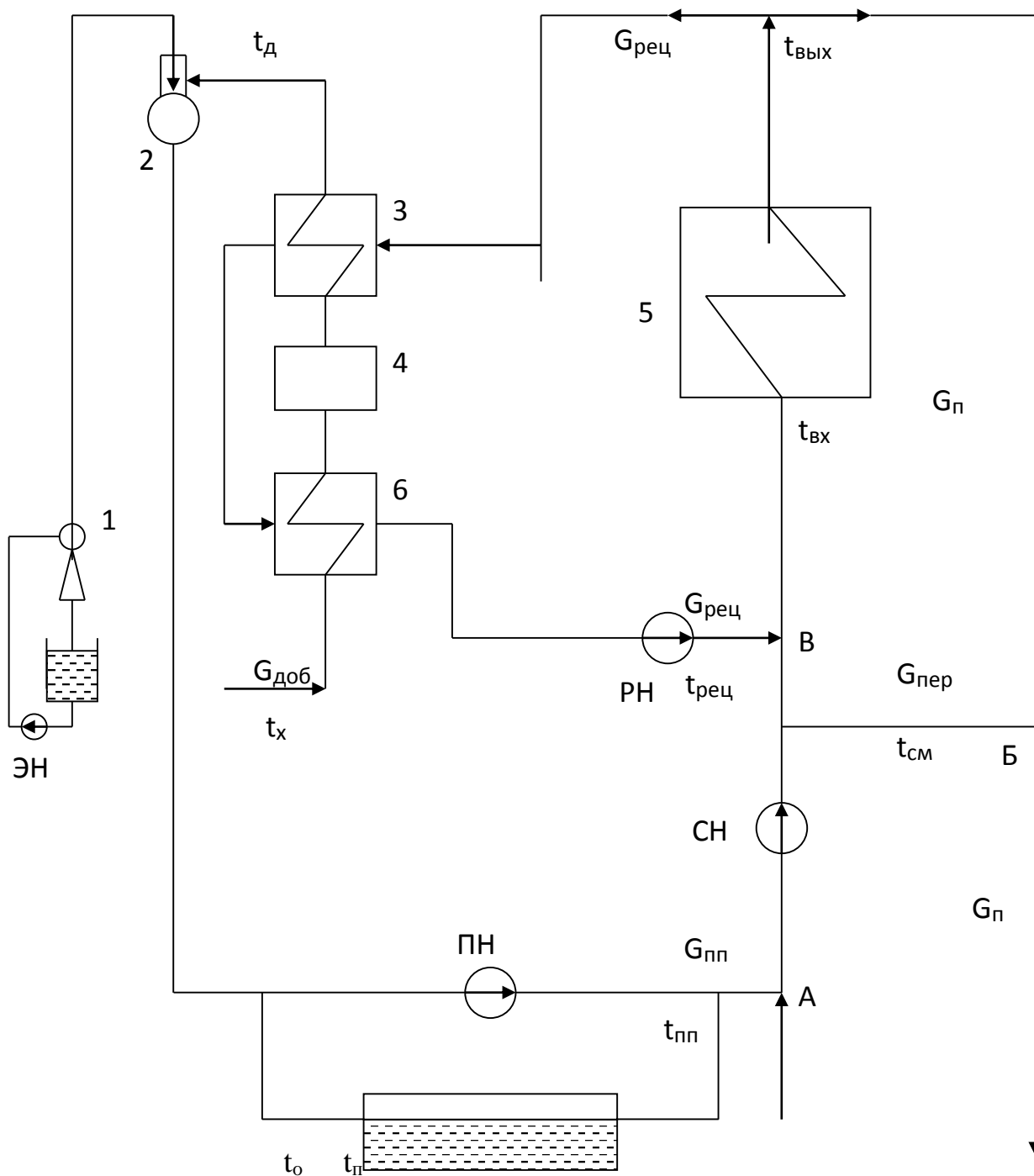


Рис. 4.33. Принципиальная тепловая схема водогрейной котельной с отпуском теплоты в открытые тепловые сети:

1 – эжектор; 2 – деаэратор; 3 – подогреватель химочищенной воды; 4 – фильтры химводоочистки; 5 – котлы; 6 – подогреватель исходной воды; ЭН, ПН, РН и СН – насосы соответственно эжекторный, подпиточный, рециркуляционный и сетевой

Во всасывающий коллектор сетевых насосов *СН* поступает вода из обратной магистрали, и сюда же насосами *ПН* подаётся подпиточная.

Исходная вода для подпитки сети поступает из водопровода, проходит через подогреватель, фильтры химводоочистки 4. Затем вода идёт в подогреватель химочищенной воды 3 и вакуумный деаэрактор 2, в котором поддерживается вакуум 0,03 МПа за счёт отсасывания из колонки паровоздушной смеси водоструйным эжектором 1. Часть воды $G_{пер}$ после сетевых насосов перепускается в обвод котлов 5 и смешивается с водой, нагретой в котлах, регулируя температуру в подающей магистрали на уровне, соответствующем температурному графику сети. Для поддержания температуры воды на входе в котёл $t_{вх}$ на уровне, исключающем выпадение конденсата из дымовых газов на хвостовых поверхностях нагрева котла, часть нагретой воды в количестве $G_{рец}$ рециркуляционным насосом *РН* возвращается в напорный коллектор сетевых насосов. Теплота этой воды используется также для нагрева добавочной воды в подогревателях 6 и 3.

Температуру воды (°С) перед сетевыми насосами $t_{см}$ определяют из уравнения теплового баланса точки смешения *A*

$$t_{см} = \frac{G_o \cdot t_o + G_{nn} \cdot t_{nn}}{G_n}, \quad (197)$$

где $G_o = G_{п} - G_{пп}$ - расход воды в обратной магистрали, м³/ч; t_{nn} - температура подпиточной воды (60-70°С); t_o - температура воды в обратной сети (70 °С); G_n - расход воды в подающей магистрали, м³/ч; G_{nn} - количество подпиточной воды, м³/ч.

Расход воды (м³/ч) в подающей магистрали определяется по уравнению

$$G_n = \frac{3,6 \cdot Q_{р.в.}}{C_v (t_n - t_o) \rho_o}, \quad (198)$$

где $Q_{р.в.}$ - расчетная тепловая нагрузка покрываемая теплоносителем (водой), $Q_{р.в.} = Q_p - Q_{с.н}$, Вт; C_v - теплоемкость воды (4,19 Кдж/(кг·К)); ρ_o - плотность обратной воды, кг/м³, приложение 4.

Тепловая мощность (Bm) потребляемой котельной на собственные нужды равна

$$Q_{с.н.} = (0,03...0,1) \cdot Q_p. \quad (199)$$

Количество подпиточной воды ($m^3/ч$) определяется по уравнению

$$G_{пп} = \frac{3,6 \cdot (Q_{г.в.с.} + Q_{м.н.})}{C_g(t_g - t_x) \rho_{пп}} + 0,02 \cdot G_n, \quad (200)$$

где $\rho_{пп}$ - плотность подпиточной воды, $\rho_{пп} = \rho_0$, $кг/м^3$.

Расход воды на перепуск $G_{пер}$ ($m^3/ч$) по линии обвода котла находят из уравнения теплового баланса при смешивании потоков в точке B

$$G_{пер} = G_n \frac{t_{вых} \cdot \rho_{вых} - t_n \cdot \rho_n}{t_{вых} \cdot \rho_{вых} - t_{см} \cdot \rho_{см}}, \quad (201)$$

где $t_{вых}$ - проектная температура воды за котлом, котлов марок ДКВР, ТВГ, Е, равна $150^\circ C$; $\rho_{вых}, \rho_n$ - плотность воды на выходе из котла и в подающей магистрали, $кг/м^3$, приложение 4.

Расход воды по линии рециркуляции для предварительного принятого значения $t_{рец} = 75-150^\circ C$ перед поступлением воды в напорный коллектор сетевых насосов определяют по формуле

$$G_{рец} = \frac{G_{доб} (t_d - t_x) \rho_{доб}}{(t_{вых} - t_{рец}) \rho_{рец} \cdot \eta_n}, \quad (201)$$

где $\rho_{рец}$, $\rho_{доб}$ - плотность воды рециркулируемой (для принятого значения $t_{рец}$) и добавочной (при температуре t_x), $кг/м^3$; η_n - к.п.д. подогревателя (0,97...0,98); $G_{доб}$ - расход добавочной воды с учётом потерь в тепловой схеме самой котельной, $G_{доб} = 1,05 G_{пп}$, $m^3/ч$; t_d - температура воды, подаваемой в деаэратор ($70^\circ C$); t_x - температура холодной воды ($5^\circ C$).

Температуру воды на входе в котёл определяют из уравнения теплового баланса точки смешивания B

$$t_{вх} = \frac{G_{рец} \cdot t_{рец} \cdot \rho_{рец} + (G_o + G_{nn} - G_{неп}) \cdot t_{см} \cdot \rho_{см}}{(G_{рец} + G_o + G_{nn} - G_{неп}) \rho_{вх}}, \quad (202)$$

где $\rho_{вх}$ - плотность воды на входе в котел, $\rho_{вх} = \rho_o$, кг/м³.

Температура $t_{вх}$ должна быть не менее 65°C, если топливо газ, и 45–55°C, если топливо уголь. В том случае, когда это условие не выполняется, следует повторить расчёт $G_{рец}$ и $t_{вх}$, приняв другое значение $t_{рец}$. Расход воды через котлы G_k с учётом необходимости подогрева добавочной воды определяют из формулы

$$G_k = \frac{3,6 \cdot Q_{р.в.} + G_{доб} (t_d - t_x) C_v \cdot \rho_{доб}}{(t_{вых} - t_{вх}) C_v \cdot \rho_{вых}}. \quad (203)$$

Полученное значение должно соответствовать с точностью до 1% значению G_k , найденному из выражения

$$G_k = (G_n - G_{неп}) + G_{рец}. \quad (204)$$

При невыполнении этого требования следует повторить расчёт, приняв новое значение $t_{рец}$ и соответствующее ему значение $G_{рец}$.

Практическое занятие №7 «Защита окружающей среды»

Для производственной котельной, работающей на каменном угле марки D , выбрать дымовую трубу, если известны следующие данные: паропроизводительность одного котла D ; объем дымовых газов v_g ; содержание серы в топке S^u_c ; зольность топлива A^u ; доля золы топлива в уносе $a_{ун}$; расход топлива (на один котел) B_p ; потеря тепла с механическим недожогом q_4 ; число установленных в котельной котлов n_k ; температура газов на входе в дымосос ϑ_o ; КПД золоуловителя $\eta_{эл}$; средняя температура самого жаркого месяца в полдень t_6 .

Таблица 4.28

Исходные данные

По предпоследней цифре зачетной книжки	$D, \text{ м/ч}$	$v_2, \text{ м}^3/\text{кг}$	$S^ч, \%$	$A^ч, \%$	a_{yn}
1	25	11,07	0,3	13,2	0,1
2	20	10,85	0,2	13,0	0,2
3	15	9,63	0,1	12,8	0,3
4	10	8,35	0,3	12,6	0,1
5	5	7,46	0,2	12,4	0,2
6	30	11,56	0,1	12,2	0,3
7	35	11,85	0,3	11,8	0,1
8	40	11,98	0,2	11,6	0,2
9	45	12,45	0,1	11,4	0,3
0	50	13,68	0,3	11,2	0,1

Таблица 4.29

Исходные данные

По последней цифре зачетной книжки	$B_p, \text{ кг/с}$	$q_4, \%$	n_k	$g_0, \text{ }^\circ\text{C}$	$\eta_{эл}$	$t_6, \text{ }^\circ\text{C}$
1	2,5	5	4	138	0,88	26
2	2,4	4	2	139	0,89	27
3	2,3	3	4	140	0,9	28
4	2,2	2	2	141	0,91	29
5	2,1	1	4	142	0,87	30
6	2,0	6	2	143	0,86	31
7	2,6	7	4	137	0,85	25
8	2,7	8	2	136	0,84	24
9	2,8	9	4	135	0,83	23
0	2,9	10	2	134	0,82	22

Решение

Объемный расход газов, выходящих из дымовой трубы

$$V_2 = nBv_2\rho_2 = nBv_2 \left(\frac{273 + g_0}{273} \right), \text{ м}^3 / \text{ кг}. \quad (205)$$

Выходную скорость газов принимаем $\omega = 20 \text{ м/с}$.

Требуемый диаметр устья дымовой трубы определяем по уравнению

$$d_{ycm} = \sqrt{\frac{4V_z}{\pi\omega}}, \text{ м} \quad (206)$$

Принимаем к установке дымовую трубу по типовому проекту с диаметром устья d_{ycm} по приложению 5.

Действительная выходная скорость газов будет

$$\omega_d = \frac{4V_z}{\pi d_{ycm}^2}, \text{ м/с} \quad (207)$$

Суммарный выброс SO_2 в расчетном режиме

$$M_{SO_2} = nB1000 \cdot \frac{S_p}{100} \cdot \frac{\mu_{SO_2}}{\mu_s}, \text{ г/с} \quad (208)$$

где $\mu_{SO_2} = 64$ кг/моль и $\mu_s = 32$ кг/моль – молекулярные массы сернистого газа и серы.

Суммарный выброс золы в расчетном режиме

$$M_{зол} = nB1000(1-\eta_{зол}) \left[\left(1 - \frac{q_4}{100}\right) \frac{A_p}{100} \cdot a_{yn} + \frac{q_4}{100} \right], \text{ г/с} \quad (209)$$

где $A_p = \frac{A^y}{Q_i^y}, \%$ – содержание золы в рабочем топливе; Q^p_n – низшая теплота сгорания топлива, $Q^p_n = 22,8$ МДж/кг.

Дальнейший расчет проводим по суммарному выбросу золы, так как он наибольший. Минимально допустимая высота дымовой трубы по допустимой концентрации золы определяем по уравнению

$$H = \sqrt{\frac{A \cdot M \cdot F}{ПДК \sqrt[3]{V_z (g_d - t_g)}}}, \text{ м} \quad (210)$$

где A – коэффициент, зависящий от метеорологических условий местности. Для Дальнего Востока $A = 160$; $F = 1-3$ – коэффициент, учитывающий выброс золы и КПД золоуловителя; $ПДК = 0,5-0,8$ мг/м³ – предельно допустимая концентрация золы.

Принимаем к установке дымовую трубу по типовому проекту высотой $H_{уст}$ по приложению 5.

Для полученного значения $H_{уст}$ подсчитываем коэффициенты

$$f = 10^3 \frac{\omega_{\partial}^2 \cdot d_{уст}}{H_{уст}^2 (\vartheta_{\partial} - t_{\partial})}, \text{ м}/(\text{с}^2 \cdot \text{К}). \quad (211)$$

$$V_M = 0,65 \sqrt[3]{\frac{V_{\partial} (\vartheta_{\partial} - t_{\partial})}{H_{уст}}}, \text{ м}/\text{с}. \quad (212)$$

По полученным значениям f и V_M с помощью графиков по приложениям 6 и 7 определяем безразмерные коэффициенты m и n . Находим по уравнению значение высоты трубы H_2 второго приближения

$$H_2 = H_{уст} \sqrt{\frac{mn}{1}}, \text{ м}. \quad (213)$$

Если разница между $H_{уст}$ и H_2 не большая, второй уточняющий расчет производить нет смысла.

Практическое занятие №8 «Пути экономии энергоресурсов»

Задача № 1

Показать сравнительным расчетом целесообразность применения пара высоких начальных параметров и низкого конечного давления на примере паросиловой установки, работающей по циклу Ренкина, определив располагаемый теплоперепад, термический КПД цикла и удельный расход пара для двух различных значений начальных и конечных параметров пара.

Указать конечное значение степени сухости X_2 (при давлении P_2). Изобразить схему простейшей паросиловой установки. Представить цикл Ренкина в диаграммах $P-V$ и $T-S$ согласно полученным данным при решении для 1 варианта. Задачу решать с помощью $h-S$ диаграммы.

Таблица 4.30

Исходные данные

1 вариант				2 вариант			
Последняя цифра шифра	P_1 , МПа	t_1 , °C	P_2 , МПа	Предпоследняя цифра шифра	P_1 , МПа	t_1 , °C	P_2 , МПа
0	5,0	425	0,0043	0	15,0	600	0,0035
1	5,0	440	0,0045	1	14,0	580	0,0041
2	6,0	460	0,0052	2	14,0	560	0,0045
3	5,5	425	0,0055	3	13,0	550	0,0052
4	6,5	450	0,0061	4	12,0	540	0,0055
5	4,0	375	0,0044	5	12,0	530	0,0063
6	3,5	350	0,0056	6	16,0	530	0,0045
7	3,0	325	0,0458	7	16,0	500	0,0037
8	2,5	300	0,0375	8	9,0	570	0,0056
9	2,3	250	0,0041	9	9,0	480	0,0055

Решение

Термический КПД Ренкина определить по следующему уравнению:

$$\eta_t = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h'_2}, \quad (214)$$

где $h_1 - h_2 = h_0$ - располагаемые теплоперепад, кДж/кг; $h'_2 = 4,19t_n$ - энтальпия кипящей воды при давлении P_2 в конденсаторе, кДж/кг.

Удельный расход пара определяется следующим образом:

$$d_0 = \frac{3600}{h_0} = \frac{3600}{h_1 - h_2}. \quad (215)$$

В диаграмме P - V точка 3 характеризует состояние воды на выходе из конденсатора, линии 3-4 - процесс повышения давления в питательном насосе, 4-5 - подогрев воды в паровом котле, точка 5 - состояние воды при температуре насыщения, 5-6 старобразования в кот-

Задача №2

Произвести тепловой расчет и определить основные размеры вертикального четырехходового пароводяного трубчатого теплообменника, предназначенного для нагрева воды. Вода движется внутри латунных трубок. Греющим теплоносителем служит насыщенный водяной пар, который конденсируется на внешней поверхности трубок.

Таблица 4.31

Исходные данные

Показатели	Номер варианта по последней цифре зачетной книжки				
	1	2	3	4	5
Расход воды в теплообменнике m_1 , кг/с	6,25	6,5	7,0	7,25	7,5
Начальная температура воды в теплообменнике $t'_{жс}$, °С	16	17	18	19	20
Конечная температура воды в теплообменнике $t''_{жс}$, °С	86	87	88	89	90
Давление водяного пара в теплообменнике P_{max} , МПа	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15
Скорость воды ω , м/с	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5

Таблица 4.32

Исходные данные

Показатели	Номер варианта по последней цифре зачетной книжки				
	6	7	8	9	0
Расход воды в теплообменнике m_1 , кг/с	8,0	8,25	8,5	9,0	9,25
Начальная температура воды в теплообменнике $t'_{жс}$, °С	21	22	23	24	25
Конечная температура воды в теплообменнике $t''_{жс}$, °С	91	92	93	94	95
Давление водяного пара в теплообменнике P_{max} , МПа	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20
Скорость воды ω , м/с	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0

Решение

Количество передаваемого тепла, кВт, найдем по уравнению

$$Q = m_1 \cdot C_{\text{в}} (t''_{\text{жс}} - t'_{\text{жс}}), \quad (216)$$

где m_1 - расход воды, кг/с, таблицы 4.31, 4.32; $C_{\text{в}}$ - теплоемкость воды,

$C_{\text{в}} = 4,19 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; $t'_{\text{жс}}, t''_{\text{жс}}$ - начальная и конечная температуры воды, °С.

Определим расход пара, кг/с,

$$m_n = \frac{Q}{0,98 \cdot (h'' - h')}, \quad (217)$$

где h', h'' - соответственно энтальпия сухого насыщенного пара и кипящей жидкости, кДж/(кг·К), приложение 10-12, при заданном максимальном давлении.

Для расчета коэффициента теплоотдачи к внешней поверхности трубки при конденсации пара необходимо знать температуру внешней поверхности стенки и высоту трубки. Так как значения этих величин неизвестны, то расчет проводим методом последовательных приближений.

Средняя арифметическая температура воды

$$t_{\text{жс1}} = 0,5 \cdot (t'_{\text{жс}} + t''_{\text{жс}}). \quad (218)$$

Определяем средний логарифмический температурный напор

$$\Delta t_{\text{л}} = \frac{t''_{\text{жс}} - t'_{\text{жс}}}{\ln \frac{t_{\text{н}} - t'_{\text{жс}}}{t_{\text{н}} - t''_{\text{жс}}}}, \quad (219)$$

где $t_{\text{н}}$ - температура насыщения по максимальному заданному в задании давлению, приложение 10 – 12.

В первом приближении температуру внешней поверхности стенки определяем по уравнению

$$t_{\text{с2}} \approx t_{\text{н}} - \frac{\Delta t_{\text{л}}}{2}. \quad (220)$$

Перепад температур по толщине стенки оцениваем величиной порядка 1°C , тогда

$$t_{c1} = t_{c2} - 1. \quad (221)$$

Кроме того, задаемся высотой трубок $H = 1,5 - 2,5$ м. Приведенную длину трубки находим по уравнению

$$Z = (t_n - t_{c2}) \cdot H \cdot A, \quad (222)$$

где A - комплекс, зависящий только от рода жидкости и температуры насыщения, $1/\text{м} \cdot ^\circ\text{C}$, приложение 8.

При пленочной конденсации сухого насыщенного пара для ламинарного режима течения ($Z < 2300$) пленки конденсата на вертикальных поверхностях и трубах число Рейнольдса определяем по уравнению

$$\text{Re} = 3,8 \cdot Z^{0,78}. \quad (223)$$

При пленочной конденсации сухого насыщенного пара для смешанного режима течения ($2300 < Z < 10000$) пленки конденсата на вертикальных поверхностях и трубах число Рейнольдса определяем по уравнению

$$\text{Re} = [253 + 0,069 \cdot \left(\frac{\text{Pr}_{жс1}}{\text{Pr}_{с1}}\right)^{0,25}] \cdot \text{Pr}_{жс1}^{0,25} \cdot (Z - 2300)^{\frac{4}{3}}, \quad (224)$$

где $\text{Pr}_{жс1}$ - число подобия Прандтля для воды, берется из приложения 9 по средней арифметической температуре воды $t_{жс1}$; $\text{Pr}_{с1}$ - число подобия Прандтля для стенки, берется из приложения 9 по температуре внутренней стенки $t_{с1}$.

Коэффициент теплоотдачи пара, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, определим как

$$\alpha_2 = \frac{\text{Re}}{(t_n - t_{c2}) \cdot H \cdot B}, \quad (225)$$

где B - комплекс, зависящий только от рода жидкости и температуры насыщения, $\text{м}/\text{Вт}$, приложение 8.

Определяем число подобия Рейнольдса

$$\text{Re}_{ж1} = \frac{\omega \cdot d_1}{\nu_{ж1}}, \quad (226)$$

где ω - скорость воды, м/с, таблица 14; d_1 - внутренний диаметр трубок, $d_1 = 0,012$ м; $\nu_{ж1}$ - кинематическая вязкость воды при средней арифметической температуре, м²/с, приложение 9.

Так как режим течения воды турбулентный, число Нуссельта определяем по уравнению

$$\text{Nu}_{ж1} = 0,021 \cdot \text{Re}_{ж1}^{0,8} \cdot \text{Pr}_{ж1}^{0,43} \left(\frac{\text{Pr}_{ж1}}{\text{Pr}_{с1}} \right)^{0,25}. \quad (227)$$

Коэффициент теплоотдачи к воде, Вт/м²·°С

$$\alpha_1 = \text{Nu}_{ж1} \frac{\lambda_{ж1}}{d_1}, \quad (228)$$

где $\lambda_{ж1}$ - коэффициент теплопроводности воды, Вт/м·°С, берется из приложения 9 по средней арифметической температуре воды $t_{ж1}$.

Коэффициент теплопередачи, Вт/м²·°С,

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (229)$$

где δ - толщина стенок, $\delta = 0,001$ м; λ - коэффициент теплопроводности стенки, $\lambda = 104,5$ Вт/м²·°С.

Средняя плотность теплового потока, кВт/м²

$$q = 0,001 \cdot k \cdot \Delta t_{л}. \quad (230)$$

Поверхность нагрева, м², в первом приближении

$$F = \frac{Q}{q}. \quad (231)$$

Число трубок в одном ходе

$$n = \frac{4 \cdot m_1}{\rho_{ж1} \cdot \omega \cdot \pi \cdot d_1^2}, \quad (232)$$

где $\rho_{ж1}$ - плотность воды, кг/м³, берется из приложения 9 по средней арифметической температуре воды $t_{ж1}$.

Общее число трубок

$$n_{общ} = 4 \cdot n, \quad (233)$$

где 4 – число ходов.

Средний диаметр трубок, м,

$$d_{cp} = \frac{d_1 + d_2}{2}, \quad (234)$$

где d_2 - наружный диаметр трубок, $d_1 = 0,014$ м.

Высота трубок в первом приближении

$$H = \frac{F}{\pi \cdot d_{cp} \cdot n_{общ}}. \quad (235)$$

Температура стенок трубок

$$t_{c2} = t_n - \frac{q}{\alpha_2}, \quad (236)$$

$$t_{c1} = t_{c2} - \frac{q}{\lambda} \delta, \quad (237)$$

где q - средняя плотность теплового потока, Вт/м².

Если полученные значения высоты трубок и температур стенок не совпадают с принятыми, произвести повторный расчет, принимая значения полученных величин. Совпадение полученных значений с ранее принятыми величинами должны лежать в пределах точности 1%.

Задача №3

Определить поверхность нагрева рекуперативного газозвоздушно-го теплообменника при прямоточной и противоточной схемах движения теплоносителей и массовый расход продуктов сгорания, если массовый расход нагреваемого воздуха $G_в$, средний коэффициент теплоотдачи от продуктов сгорания к омываемой ими поверхности α_1 , а от воздуха α_2 , толщина разделительной стенки $\delta=5$ мм, а её коэффициент теплопроводности $\lambda=50$ Вт/м·К. Начальные и конечные температуры продуктов сгорания и воздуха соответственно t'_1, t''_1, t'_2 и t''_2 . Коэффициент полезного действия теплообменного аппарата $\eta_{т.а.}$ принять равным 0,98. Значения массовых теплоёмкостей воздуха и продуктов сгорания принять равными $c_в=1010$ Дж/кг·К; $c_{пс}=1580$ Дж/кг·К.

Таблица 4.33

Исходные данные

Предпоследняя цифра шифра	$t'_1, ^\circ C$	$t''_1, ^\circ C$	$t'_2, ^\circ C$	$t''_2, ^\circ C$	Последняя цифра шифра	$G_в$	α_1	α_2
0	600	400	20	300	0	0,5	35	30
1	625	425	15	325	1	1,0	34	31
2	650	450	25	350	2	1,5	30	25
3	675	475	30	375	3	2,0	34	26
4	700	500	10	400	4	2,5	30	28
5	725	525	12	425	5	3,0	32	27
6	750	550	18	450	6	3,5	33	25
7	775	575	28	475	7	4,0	36	29
8	800	600	38	500	8	4,5	31	25
9	578	375	8	275	9	5,0	37	30

Решение:

Для определения среднего температурного напора в теплообменном аппарате целесообразно построить графики изменения температур при прямотоке и противотоке, как показано на рисунке 4.36.

Из рисунка 4.36а видно, что наибольший и наименьший температурные напоры при прямоточной схеме движения теплоносителей определяется

$$\Delta t_{\delta} = t'_1 - t'_2, \quad (238)$$

$$\Delta t_M = t''_1 - t''_2. \quad (239)$$

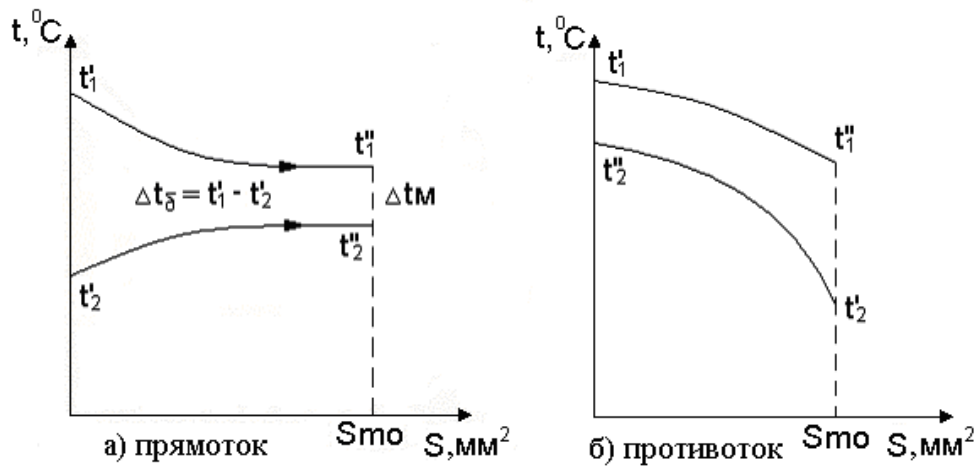


Рис.4.36. График изменения температур воздуха и продуктов сгорания при прямоточном и противоточном движениях теплоносителей

При противоточной схеме движения теплоносителя (рис.4.36б) нельзя сказать заранее, где будет больший температурный напор, а где меньший. В этом случае сначала определяется

$$\Delta t = t'_1 - t''_2 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (240)$$

$$\Delta t = t''_1 - t'_2 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (241)$$

и затем определяется их наибольшее и наименьшее значения.

Средний температурный напор в общем случае определяется как средний логарифмический

$$\Delta t = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_M}{\ln \frac{\Delta t_6}{\Delta t_M}}. \quad (242)$$

Если отношение $\frac{\Delta t_6}{\Delta t_M} < 1,4$, то температурный напор с достаточной точностью может быть определён как средний арифметический

$$\Delta t = \frac{\Delta t_6 + \Delta t_M}{2}.$$

Предположив, что разделительная поверхность плоская, определим коэффициент теплоотдачи, Вт/м²К

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}. \quad (243)$$

Поверхность нагрева (S, m^2) теплообменного аппарата определяется из выражения

$$\begin{aligned} \Delta Q &= K \Delta t S, \\ S &= \frac{Q}{K \Delta t}. \end{aligned}$$

где Q – теплота (Вт), передаваемая в теплообменном аппарате, которая может быть рассчитана по формуле

$$Q = GC_{\epsilon}(t''_2 - t'_2).$$

Массовый расход продуктов сгорания выразим из следующего соотношения:

$$Q = \eta_{m.a.} G_{nc} C_{nc}(t'_1 - t''_1). \quad (244)$$

ЧАСТЬ 5
Пример оформления контрольной работы
для студентов заочной формы обучения направления
35.03.06 (110800.62) «Агроинженерия»

5.1 Принципиальная схема теплоэнергетической установки

5.1.1 Принципиальная схема котельной установки хозяйства (рис.5.1)

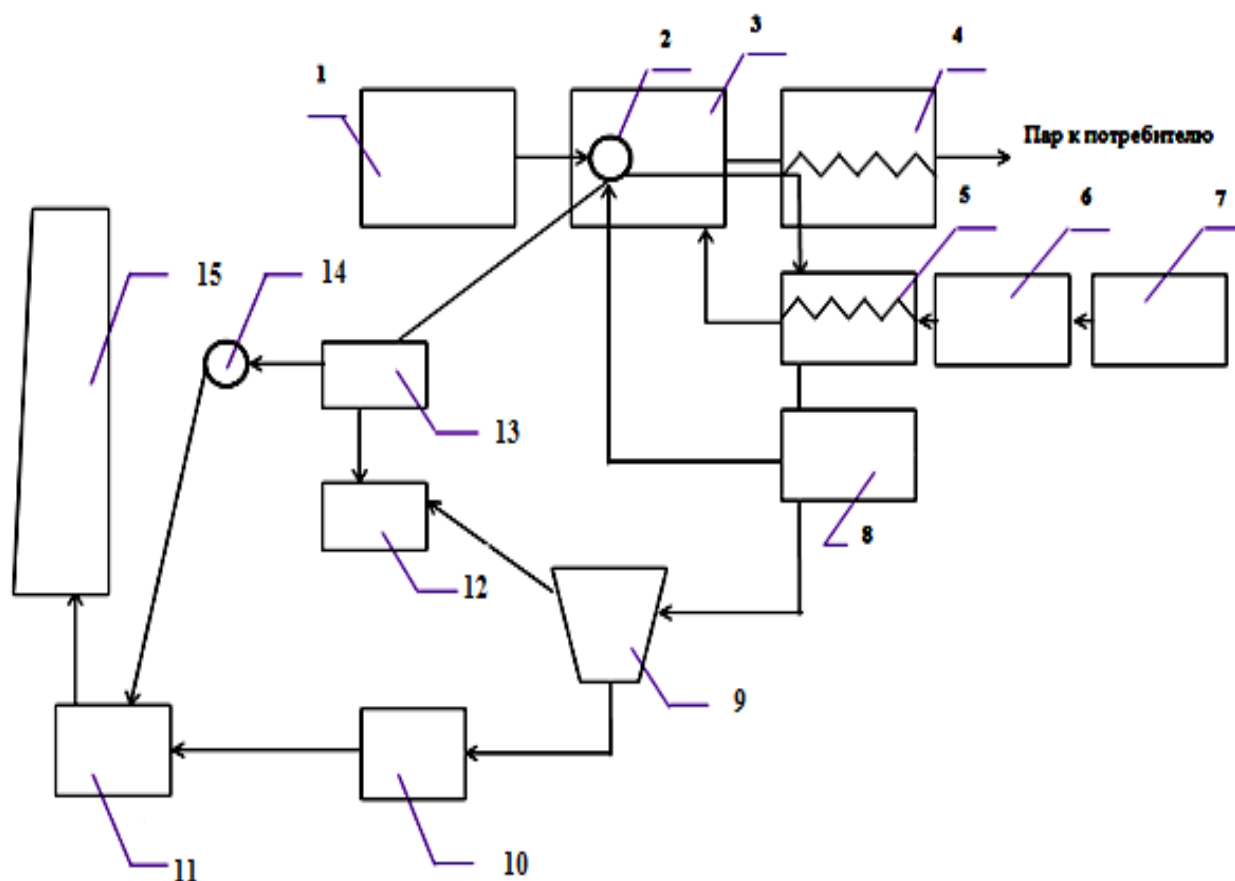


Рис. 5.1. Схема котельной установки:

- 1 - комплекс устройств для хранения, подготовки и подачи топлива; 2 –топка;
- 3 – котел; 4- пароперегреватель; 5- водоподогреватель (водяной экономайзер);
- 6 – очистка воды; 7 - водяной насос; 8 – вентилятор; 9 – золоуловитель;
- 10 – дымосос; 11 - устройство для очистки дымовых газов; 12 - зольный бункер (яма); 13 – циклон; 14 - паровой эжектор; 15 - дымовая труба

5.1.2 Назначение и принцип действия отдельных составляющих котельной установки

К основным элементам оборудования котельной установки относятся

– паровой котел - обогреваемый топочными газами закрытый теплообменный аппарат, служащий для получения насыщенного пара давлением более 1 МПа, используемого вне самого аппарата;

– топка - топливосжигающее устройство, в котором происходит выделение теплоты в процессе горения топлива;

– пароперегреватель - обогреваемый топочными газами теплообменный аппарат, предназначенный для перегрева насыщенного пара;

– экономайзер - теплообменный аппарат для подогрева питательной воды (до ее поступления в котел) за счет использования теплоты продуктов сгорания.

Совокупность перечисленных выше основных элементов оборудования представляет собой котельный агрегат (сокращенно котлоагрегат).

К вспомогательным элементам оборудования котельной установки относятся

– тяговая установка, отсасывающая дымовые газы из газоходов котлоагрегатов и выбрасывающая их через дымовую трубу в атмосферу;

– дутьевая установка, представляющая собой вентилятор, который нагнетает воздух по воздухопроводам в топку;

– питательная установка, состоящая из питательных насосов и трубопроводов, предназначенных для питания котлоагрегатов водой;

– водоподготовительная установка, предназначенная для химической очистки питательной воды;

– паропроводы - стальные трубопроводы для транспортирования пара соответственно между элементами котлоагрегатов и от котлоагрегатов к потребителям;

– топливоподающее устройство (вагонетка) - для подачи топлива с топливного склада в котельную;

– топливный бункер (топливохранилище) - для образования некоторого запаса топлива в котельной.

– золоудаляющее устройство - для удаления из котлоагрегатов золы и шлаков и транспортирования их из котельной на отвалы;

– золоулавливающее устройство - аппараты для улавливания летучей золы из дымовых газов на выходе их из котлоагрегатов в целях борьбы с засорением окружающей среды частицами золы, вылетающими из дымовых труб.

5.1.3 Тепловой баланс котельной установки хозяйства

Уравнение теплового баланса для котельной установки хозяйства

$$Q_p^p = Q_1 + Q_{II} \text{ или } Q_p^p = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6, \quad (170)$$

где Q_p^p – теплота, которой располагают; Q_1 – полезно использованная теплота; Q_{II} – общие потери; Q_2 – потери теплоты с уходящими газами; Q_3 – потери теплоты от химического недожога; Q_4 – потери теплоты от механической неполноты сгорания; Q_5 – потери теплоты в окружающую среду; Q_6 – потери теплоты с физической теплотой шлаков.

Левая приходная часть уравнения теплового баланса является суммой следующих величин:

$$Q_p^p = Q_n^p + Q_{\text{пар}} + Q_{\text{физ.т}}, \quad (171)$$

где Q_n^p – низшая теплота сгорания топлива в расчете на рабочую массу топлива; $Q_{\text{пар}}$ – теплота, вносимая с дутьевым (форсуночным) паром на 1 кг топлива; $Q_{\text{физ.т.}}$ – физическая теплота 1 кг или 1 м³ топлива.

5.1.4 Выводы (в сравнении с типовой котельной)

Отсутствие воздухоподогревателя уменьшает количество поступающего тепла в топку, увеличивает температуру уходящих газов и тем самым снижает количество полезно использованной теплоты Q_1 .

5.2 Топливное хозяйство

5.2.1 План размещения топлива на территории хозяйства (для использования в котельной установке) (рис.5.2).

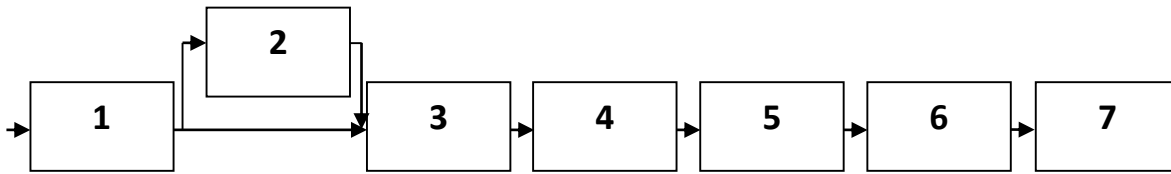


Рис.5.2. Схема компоновки оборудования топливного хозяйства:

1 – вагонные весы; 2 – помещение для размораживания топлива; 3 – приеморазгрузочное устройство; 4 – дробильная установка; 5 – склад; 6 – бункер сырого угля; 7 – система пылеприготовления.

5.2.2 Подготовка топлива к сжиганию в котельной установке

В котельной хозяйства применяется система топливоприготовления, не отличающаяся от типовой.

Из бункера 1 топливо поступает на весы 2, через питатель 3 – в шаровую мельницу 4, где происходит его измельчение и сушка (рис.5.3). Получившаяся аэропыль проходит процедуру очистки от воздуха в сепараторе 5 и циклоне 6, и далее через промежуточный бункер 7 поступает при помощи вентилятора 9 в топочную камеру 12 к горелкам 10. Горячий воздух поступает в топку по воздуховоду 11.

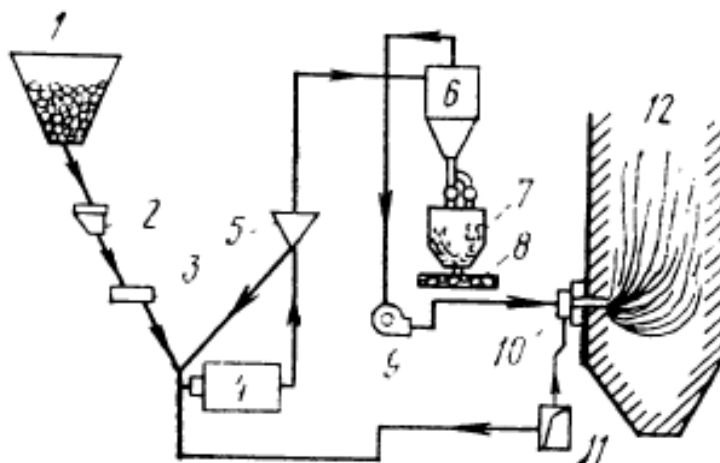


Рис.5.3. Система пылеприготовления с промежуточным бункером

5.2.3 Транспортировка и подача топлива в топку

Топливо поступает на эстакаду 1, сгружается в штабеля 2, далее бульдозером-погрузчиком 3 подается к приемному бункеру 5 наклонного ленточного конвейера 6 (рис.5.4). По конвейеру топливо попадает в дробильное помещение 7 с сепаратором и грохотом 4, затем по-

ступает в двухвалковую зубчатую дробилку, а по ленточному конвейеру 8 - в бункер котельной 9.

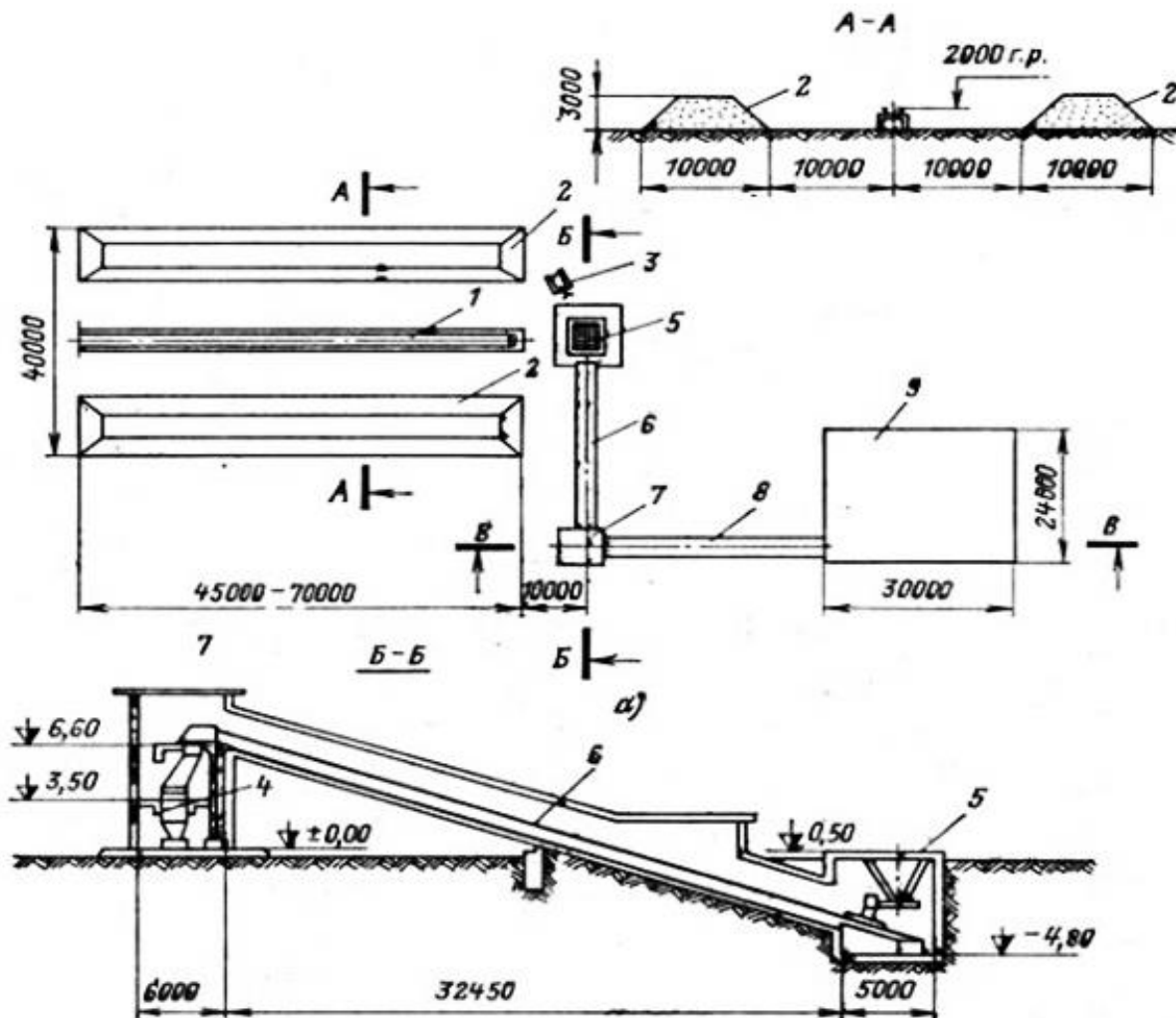


Рис.5.4. Топливоподача в топку

5.2.4 Вывод (в сравнении с типовым)

Описать отличие от типовой установки.

5.3 Топки

5.3.1 Классификация и назначение топок

Топка – устройство котла, предназначенное для сжигания органического топлива, частичного охлаждения продуктов сгорания и выделения золы.

Топки подразделяются на слоевые, камерные и вихревые. При слоевом процессе сжигания топлива поток воздуха проходит через

неподвижный или движущийся в поперечном направлении слой топлива.

При факельном топочном процессе частицы топлива движутся вместе с газовоздушным потоком через топку, находясь во взвешенном состоянии.

При вихревом топочном процессе частицы топлива организовано циркулируют по определенным траекториям до полного выгорания, поэтому в топках можно сжигать более крупные частицы (3–5 мм).

Слоевые топки в зависимости от характера обслуживания различают топки ручные, полумеханические и механические.

Камерные топки позволяют сжигать любое топливо – жидкое, газообразное и твердое в виде пыли.

5.3.2 Топка, установленная в котельной хозяйства (рис.5.5)

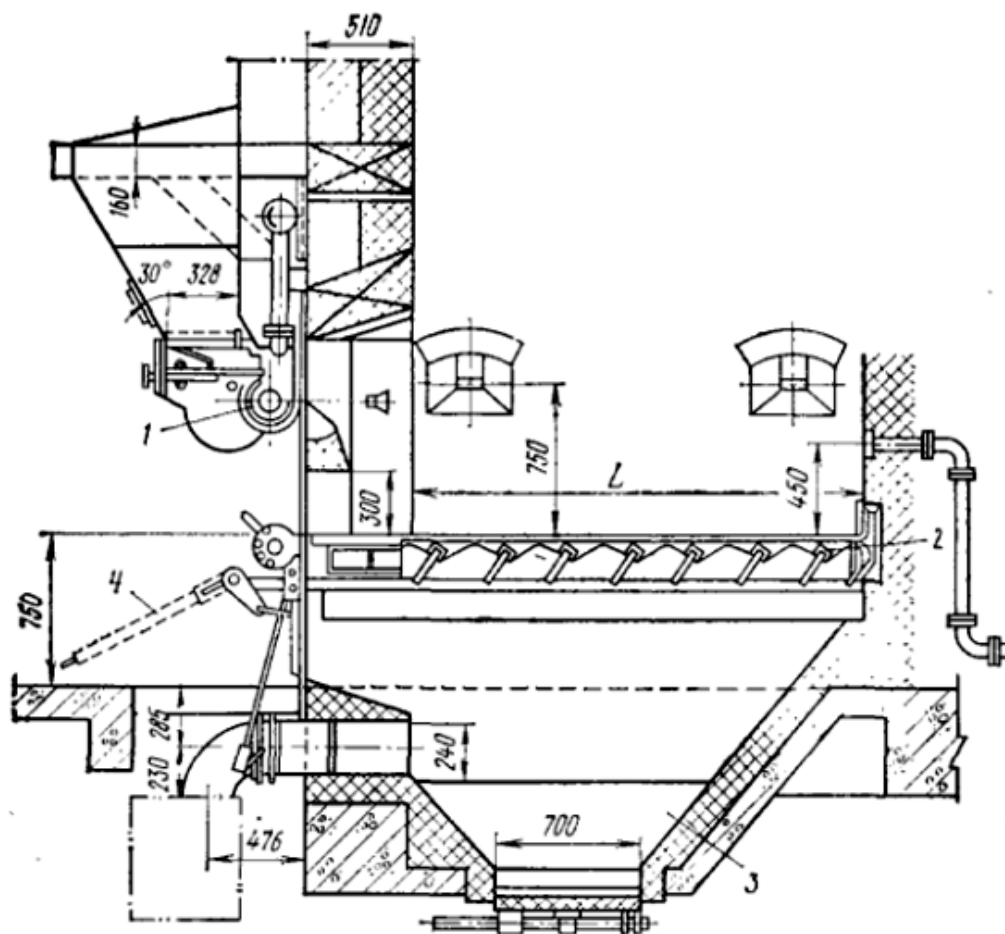


Рис.5.5.Схема полумеханической топки с пневмомеханическим забрасывателем и решеткой с поворотными колосниками

5.3.3 Рассчитать характеристику топки

Расчет производят, используя технические характеристики выбранной топки.

Тепловая мощность топки

$$Q = BQ_p^H, \quad (173)$$

где B – количество сжигаемого топлива за единицу времени, кг; Q_p^H – теплота сгорания топлива, кДж/кг.

Тепловая нагрузка на колосниковую решетку

$$\frac{Q}{R} = \frac{BQ_p^H}{R}, \quad (174)$$

где R – площадь зеркала горения колосниковой решетки, м².

Тепловая нагрузка топочного пространства

$$\frac{Q}{V_T} = \frac{BQ_p^H}{V_T}, \quad (175)$$

где V_m – объем топочного пространства, м³.

Объем топочного пространства

$$V_T = Rh, \quad (176)$$

где h – высота топочного пространства, м.

КПД топки

$$\eta_T = 100 - (q_3 + q_4 + q_5^T + q_6), \quad (177)$$

где q_3 и q_4 – потери тепла соответственно от химической и механической недополноты сгорания, %; q_5^T и q_6 – потери тепла топкой в окружающую среду и с физическим теплом шлака, %.

5.3.4 Вывод (в сравнении с типовой)

Описать отличие от типовой установки.

5.4 Котлы

5.4.1 Котел, установленный в котельной хозяйства (рис.5.6)

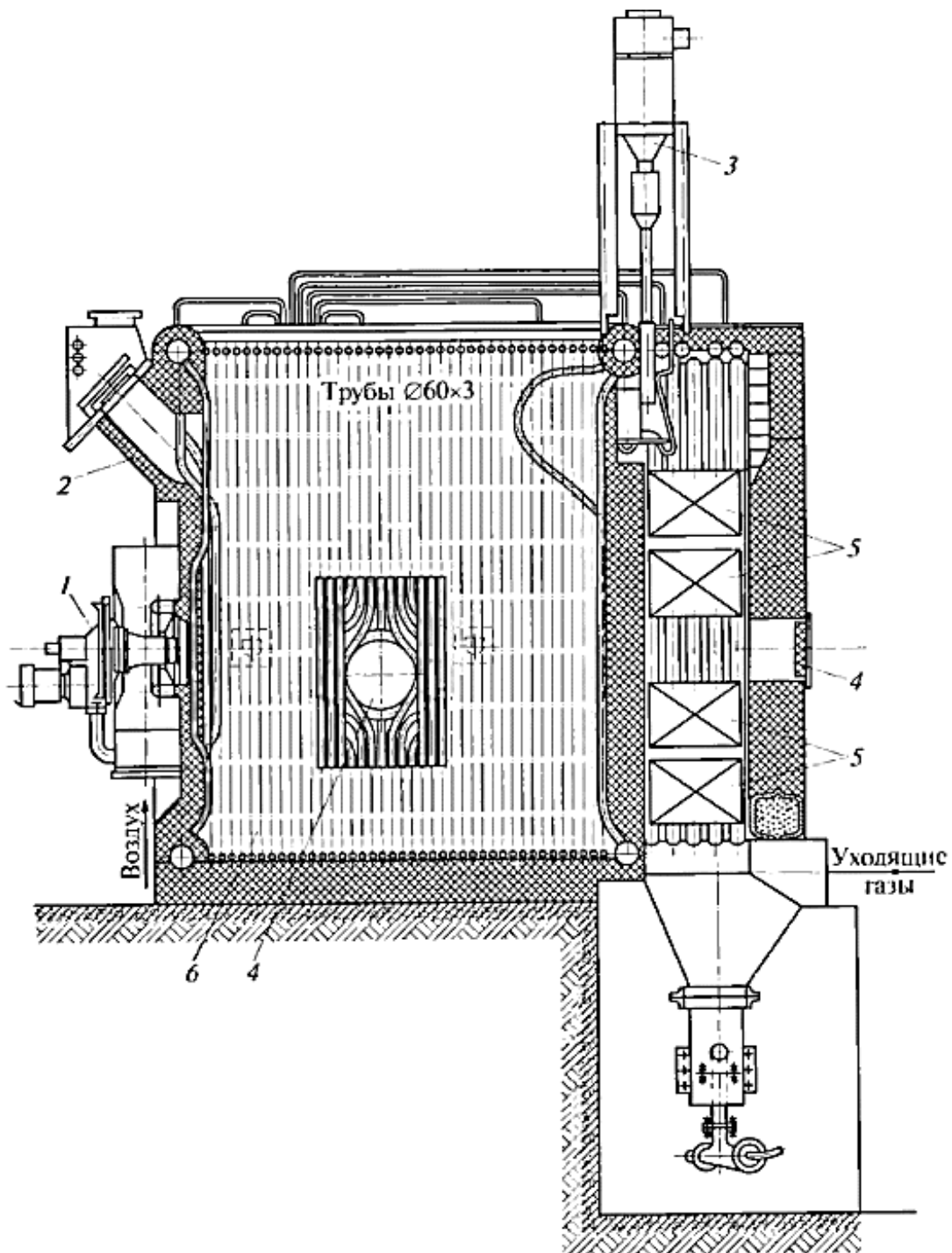


Рис.5.6. Водогрейный котел КВ-ГМ-6,5:

- 1– горелка; 2 – взрывной предохранительный клапан;
- 3– дробеочистка (устройство для очистки поверхностей от загрязнения);
- 4–лаз; 5– поверхности нагрева; 6 - топочная камера

5.4.2 Схема организации движения воды, пароводяной смеси и пара в котельной установке (рис.5.7)

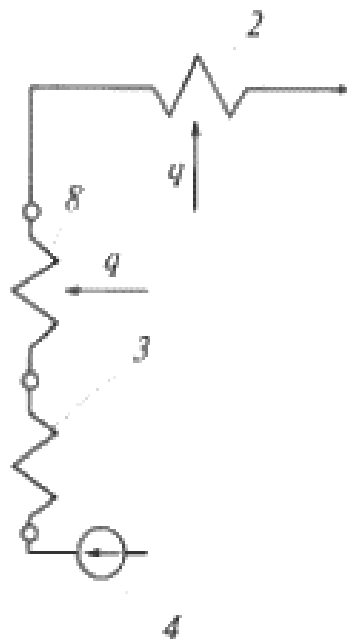


Рис.5.7. Движение воды, смеси пара и воды и пара в водогрейной котельной установке

1 – барабан; 2 – пароперегреватель; 3 – водяной экономайзер; 4 – питательный насос; 5 – обогреваемые трубы; 6 – опускные трубы; 7 – циркуляционный насос

5.4.3 Вывод (в сравнении с типовым)

Описать отличие от типовой установки.

5.5 Вспомогательные устройства котельного агрегата

5.5.1 Тягодутьевое устройство

Вентилятор ВДН-МО-8 предназначен для подачи воздуха в топку паровых котлов (рис.5.8), дымосос ДН-МО-8 — для отсоса дымовых газов. Вентилятор работает при температуре перемещаемого воздуха не ниже минус 30⁰С, дымосос ДН-МО-8 — при температуре перемещаемых газов не выше 200⁰С.

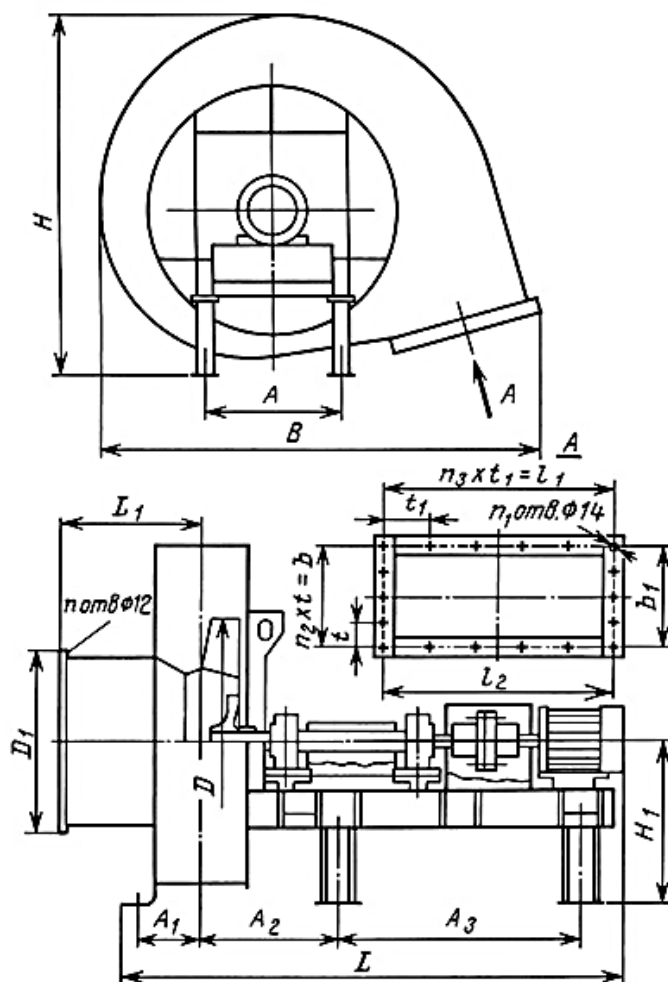


Рис.5.8.Вентилятор ВДН-МО-8

Таблица 5.1

Характеристика тяго-дутьевого устройства, используемого в котельной

Типо-размер машины	Номинальный диаметр рабочего колеса, мм	Производительность на всасывании, м ³ /ч			Производительность на всасывании, м ³ /ч			Масса, кг, не более
		Полное давление, Па	Потребляемая мощность, кВт	при 1000 мин-1	Полное давление, Па	Потребляемая мощность, кВт	при 1500 мин-1	
ВДН-МО-8	800	990	2,3	6 970	2 230	7,9	540	
ДН-МО-8	800	630	1,5	6 970	1 430	5,1	560	

Вентиляторы ВДН-МО-8 и дымососы ДН-МО-8 состоят из собственно вентилятора (дымососа) и блока привода. Блок привода включает в себя раму, ходовую часть, двигатель и муфту. Вентиляторы и дымососы ВДН-МО и ДН-МО-8 для регулирования производительности комплектуются осевым направляющим аппаратом.

5.5.2 Пароперегреватель

В комбинированных пароперегревателях тепло от уходящих газов передается как излучением, так и конвекцией, часть поверхности данных пароперегревателей располагается в газоходе котла, часть - в топочной камере.

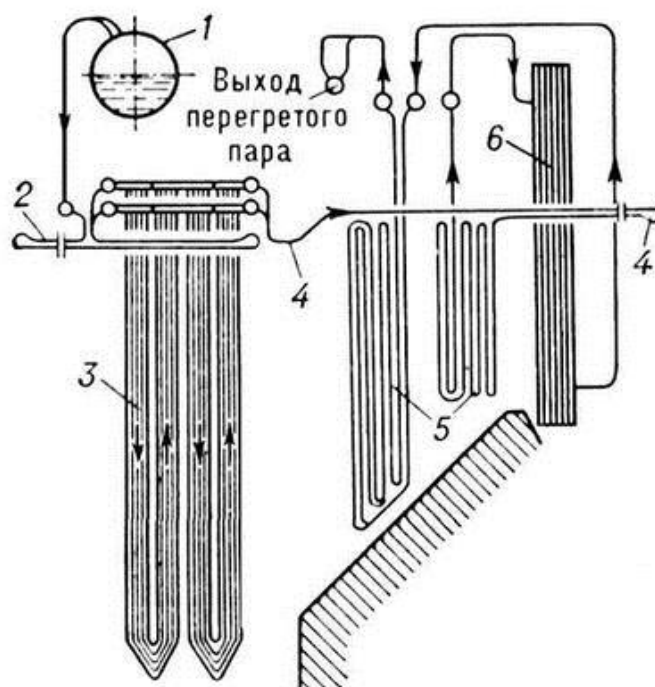


Рис.5.9 Схема комбинированного пароперегревателя:
1 – барабан; 2 – радиационная часть пароперегревателя; 3 – полураддиационная часть пароперегревателя; 4 – потолочные трубы; 5 – конвективная часть пароперегревателя; 6 - парохладитель

5.5.3 Водяной экономайзер (рис.5.10)

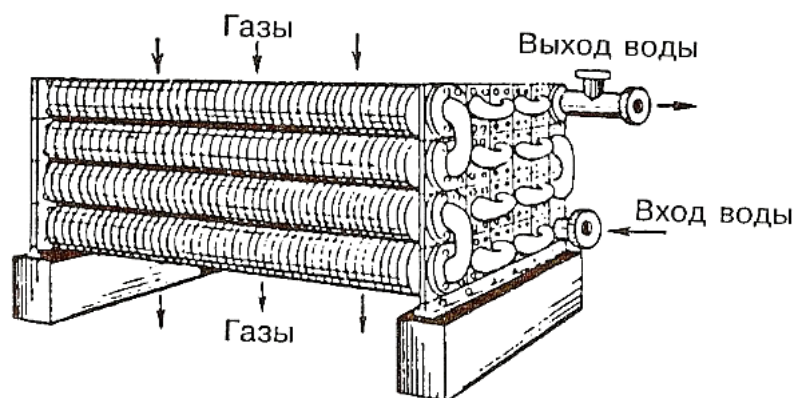


Рис.5.10. Экономайзер чугунный блочный – ЭБ1-808И

Таблица 5.2

Характеристика экономайзера

Типоразмер экономайзера	Поверхность нагрева, м ²	Температура воды, мин. °С	Число колонок	Номинальный расход воды, т/ч	Масса, кг не более
ЭБ1-808И	808,0	на входе - 100	1	27,5	24700
		на выходе - 160			

5.5.4 Воздухоподогреватель

Воздухоподогреватель ВП-О-140 представляет собой жёсткую конструкцию из трубных пакетов, каркаса с плотной обшивкой и воздухоперепускным коробом (рис.5.11).

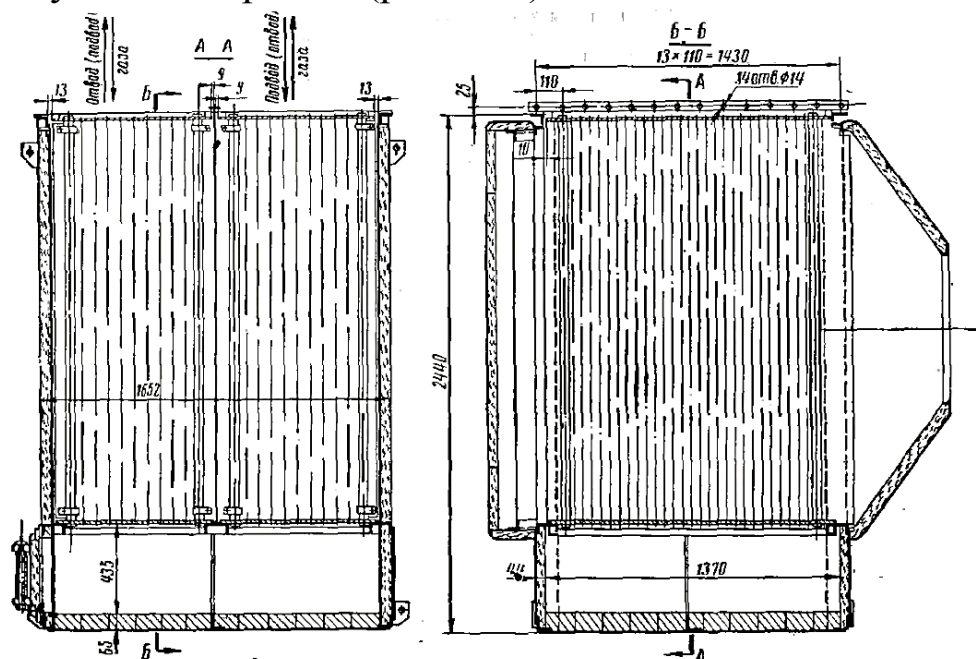


Рис.5.11.Воздухоподогреватель ВП-О-140

Трубный пакет является поверхностью нагрева воздухоподогревателя ВП-О-140 и состоит из стальных параллельных труб, расположенных в шахматном порядке и вваренных в трубные доски. Газ движется внутри труб, а воздух - в межтрубном пространстве. Нагретый воздух подаётся в топочную камеру либо на сушку топлива. Воздухоподогреватель ВП-О-140 является двухходовым по воздуху и газу.

Таблица 5.3

Технические характеристики ВП-О-140

Наименование показателя	Значение
Поверхность нагрева, м ²	140
Габариты, мм	2225x1816x2475
Масса, кг	2840

5.5.5 Очистка котловой воды

Водоподготовка водогрейного котла рассчитывается с учетом следующих параметров: жесткость исходной воды, мощность котла и его тепловой режим, содержание железа, растворенного кислорода, нефтепродуктов, уровень рН, максимальный часовой расход воды для подпитки.

Для получения питательной воды с приемлемым рН уровнем на предприятии обеспечивают типовую схему водоподготовки: предварительная очистка от органики, взвесей, железа, коллоидов и иных вредных элементов; умягчение и деминерализация; ликвидация агрессивных газов; коррекционная обработка.

5.5.6 Питательные устройства

Консольный центробежный насос (рис.5.12) предназначен для перекачивания воды, а также других жидкостей, схожих с водой по плотности и вязкости, с температурой до 85⁰С и содержанием механических примесей в количестве не более 0,1%. Производительность насоса – 90 м³/ч, напор, развиваемый насосом – 55 мм вод.ст.

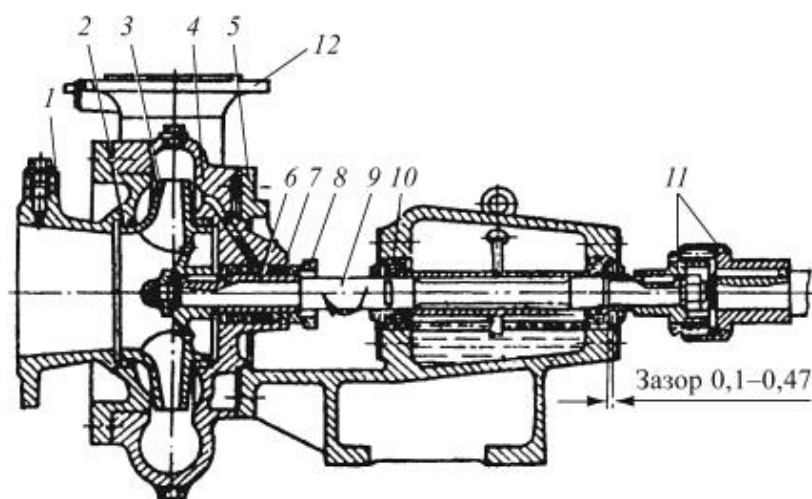


Рис.5.12. Схема центробежного насоса К90/55:

1 – всасывающий патрубок; 2 – уплотнительное кольцо; 3 – рабочее колесо; 4 – спиральный корпус; 5 – кронштейн; 6 – втулка; 7 – сальник; 8 – крышка сальника; 9 – вал; 10 – подшипник; 11 – полумуфты; 12 – напорный патрубок

5.5.7 Трубопроводы и арматура. Контрольно-измерительные приборы и системы автоматического регулирования котельной установки

Каркас котла представлен металлической конструкцией (рис. 5.13), которая поддерживает все устройства котельного агрегата, а также обмуровку. Состоит из вертикальных колонн 1, которые соединены горизонтальными балками 2, нижняя часть колонн снабжена башмаками, каркас установлен на бетонный фундамент.

Поворотный клапан предназначен для предотвращения потока воды в случае отключения насоса или аварийной ситуации.

Рис.5.13. Каркас котла

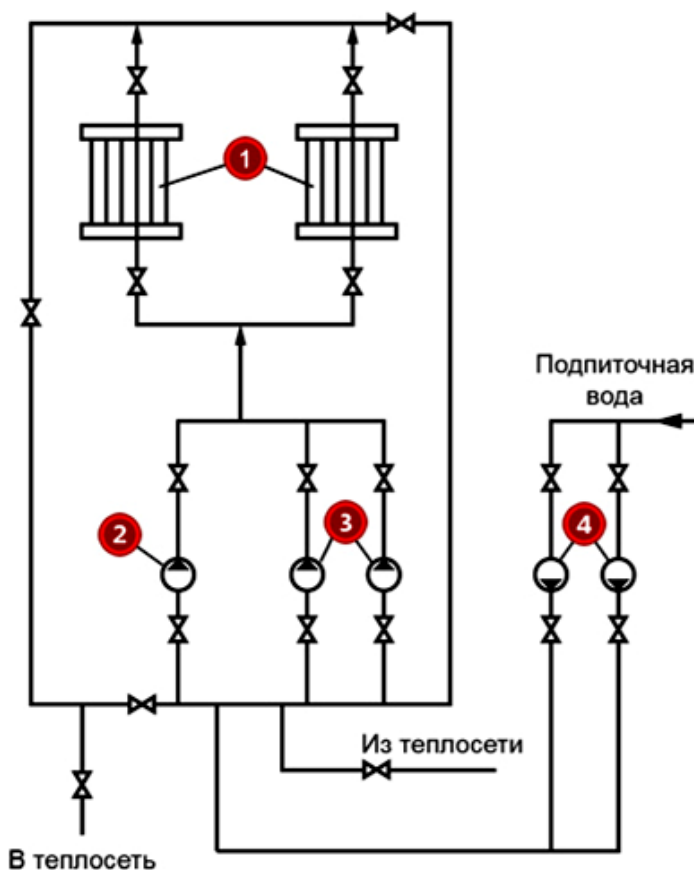
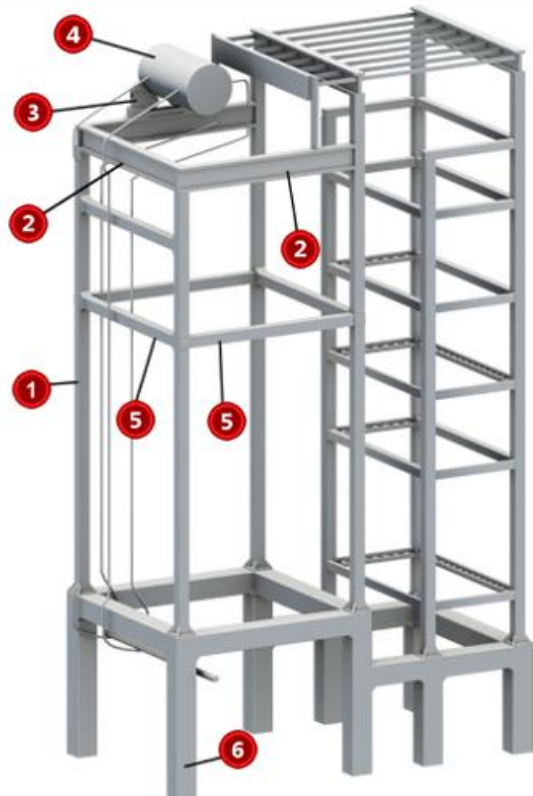


Рис.5.14. Схема питательных трубопроводов водогрейного котла: 1 – водогрейный котел; 2 – резервный циркуляционный насос; 3 – основные циркуляционные насосы; 4 – подпиточный насос

Рис.5.15. Обратный поворотный клапан:
 1 – крышка корпуса; 2 – корпус;
 3 – тарелка; 4 - седло

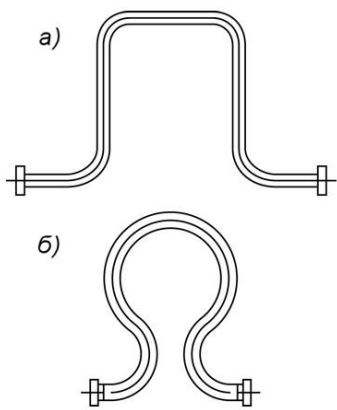
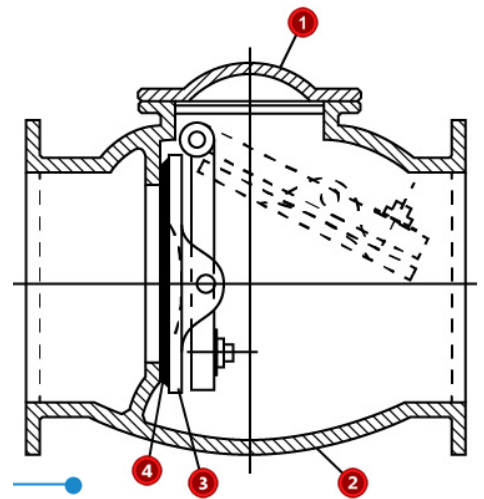
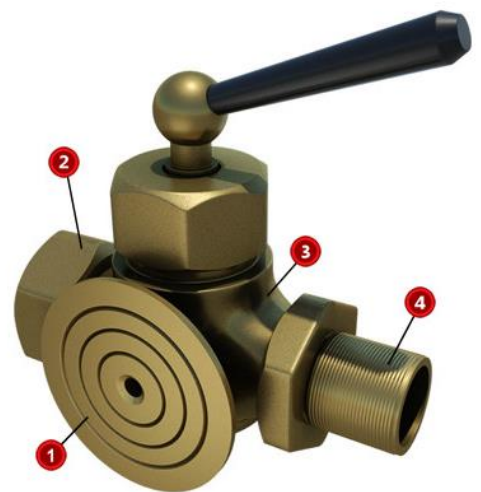


Рис.5.16. Компенсаторы:
 а) П-образный; б) пиробразный

Рис.5.17. Трехходовый кран:
 1 – фланец для контрольного манометра;
 2 – штуцер для манометра;
 3 – корпус; 4 – ниппель для сифонной трубы



5.5.8 Выводы (в сравнении с типовым)
 Описать отличия от типовых установок.

Часть 6

Индивидуальное задание для студентов очной формы обучения

Выбор вопроса для выполнения индивидуального задания производится по двум последним цифрам зачетной книжки.

6.1 Вопросы индивидуального задания

1. Тепловой баланс котельной установки при сжигании (твердого топлива, жидкого и газообразного) /2,6,21,22/.
2. КПД Брутто и нетто установки /2,6,21,22/.
3. Определение расхода топлива для котельной установки /9/.
4. Чугунные секционные котлы /9/.
5. Стальные водогрейные котлы /9/.
6. Принцип работы (схема) и характеристика котла «НИИСТУ-5»/4,5/.
7. Схема использования теплоты отходящих газов котельных агрегатов ТЭЦ для обогрева культивационных сооружений защищенного грунта /9/.
8. Схема утилизации теплоты отработавших газов стационарных ДВС /9/.
9. Принцип работы (схема) и характеристика котла КВ-300М /9/.
10. Принцип работы (схема) и характеристика котла типа ДКВР /9/.
11. Принцип работы (схема) и характеристика котла типа Е-119 /9/.
12. Автоматизированные котлоагрегаты типа МКЗ-7 (схема и характеристика) /9/.
13. Передвижная парокотельная установка ПКН-20 (схема и характеристика) /9/.
14. Классификация, устройство и работа теплообменного оборудования /9/.
15. Классификация рекуперативных теплообменных аппаратов по конструктивным признакам /9/.
16. Расчет топки /9/.
17. Пути экономии топлива при продувке котла /9/.
18. Расход сетевой воды /4,5,14/.

19. Повышение КПД котла (регулирование температуры питательной воды) /4,5,14/.
20. Определение поверхности нагрева парогенератора /15/.
21. Расчет дымососов и их подбор /15/.
22. Расчет дутьевых вентиляторов и их подбор /15/.
23. Расчет циркулярного насоса и его подбор /15/.
24. Расчет питательного насоса и его подбор /15/.
25. Расчет паро-, воздухо- и водопроводов /15/.
26. КПД топки /15/.
27. Расчет экономайзера /15/.
28. Тепловой расчет воздухоподогревателя /15/.
29. Тепловой расчет бойлеров /15/.
30. Принцип работы атмосферного деаэратора тарельчатого типа /4,5,14,25/.
31. Принципиальная схема натрийнатионитовой установки для умягчения воды/4,5,14/.
32. Принципиальная схема двухступенчатой пароводяной водоподогревательной установки смешанного типа /4,15,14/.
33. Отопительная котельная, работающая на газообразном топливе /4,5,14/.
34. Тепловой расчет котельной установки /18/.
35. Существующие способы сжигания различных видов топлива и их экономичность /18/.
36. Подготовка топлива для сжигания в паровых и водогрейных котлах. /10/.
37. Схема пылеприготовительных установок /10/.
38. Оборудование для приготовления топлива (мельница, сепаратор) /10/.
39. Порядок расчета и выбор принципиальной схемы и оборудования пылеприготовительной установки и водогрейного котла /10/.
40. Подготовка мазута к сжиганию в топке (подготовка, подогрев, подача, присадки) /10/.
41. Классификация золоуловителей /10/.
42. Тягодутьевые машины /10/.
43. Дымовые трубы /10/.

44. Деаэраторы питательной воды паровых котлов /10/.
45. Питательные насосы. /10/.
46. Подогреватели высокого давления /10/.
47. Расширители и теплообменники непрерывной и периодической продувки котла /10/.
48. Деаэраторы подпиточной воды /10/.
49. Паровые подогреватели сетевой воды /10/.
50. Охладители конденсата /10/.
51. Насосы водоподогревательных установок и аккумуляторные баки /10/.
52. Скреперное золоудаление /3/.
53. Гидрозолоудаление для котельной средней мощности /3/.
54. Остановка котельного агрегата (кратковременная, полная, вынужденная) /3/.
55. Растопка и включение котельного агрегата в работу /3/.
56. Схема жалюзийного золоуловителя /3/.
57. Схема электрического золоуловителя /3/.
58. Центробежный скруббер /3/.
59. Прибор для измерения небольших избыточных давлений или разрежений /3/.
60. Циклонные топки /3/.
61. Меры борьбы с загрязнением окружающей среды /3/.
62. Схема пневматического золошлакоудаления /3/.
63. Компоновка склада топлива и топливоподачи для котельной с котлами ВТ-ТС-20 /27/.
64. Схема топливоподачи подъемником /27/.
65. Качество воды. Выбор метода и схем подготовки воды для водогрейных и пароводогрейных котельных /27/.
66. Колосниковая решетка типа РПК /27/.
67. Полумеханическая топка ЗП-РПК /27/.
68. Решетка прямого хода типа ТИ /27/.
69. Ленточная цепная решетка обратного хода типа ТЛ-3М /27/.
70. Чешуйчатая цепная решетка обратного хода типа ТИЗ /27/.

71. Номограмма для определения температуры продуктов сгорания на выходе из топки /7/.
72. Расчет водяного экономайзера /7/.
73. Расчет воздухоподогревателя /7/.
74. Шахтная топка для дров с вертикальным зеркалом горения /7/.
75. Шахтная топка дров к жаротрубному котлу /7/.
76. Фортунная топка /7/.
77. Шахтная топка со ступенчатой решеткой /7/.
78. Шахтная топка для торфа /7/.
79. Шахтная топка для пускового торфа (с частичным подмешиванием фрезерного торфа) /7/.
80. Шахтная топка для торфа с механическим отведением шлака /7/.
81. Колосниковая решетка для сжигания антрацита /7/.
82. Топка с покачивающимися колосниками /7/.
83. Схема цепной решетки /7/.
84. Топка системы ВТЧ-комега БЦР /7/.
85. Шахтно-цепная топка системы профессора Макарьева /7/.
86. Ленточно-цепная решетка обратного хода /7/.
87. Наклонно-переталкивающая решетка /7/.
88. Горизонтально-переталкивающая решетка /7/.
89. Кольцевая топка /7/.
90. Топка с нижней подачей /7/.
91. Топка с шурующей планкой системы Ю.Г.Васильева /7/.
92. Пневматический забрасыватель ПМР /7/.
93. Пневматический забрасыватель типа ПМЗ /7/.
94. Скоростная топка конструкции инж.В.В.Померанцева /7/.
95. Схема камерной топки с факельным сжиганием пылевидного топлива /7/.
96. Мельница-вентилятор /7/.
97. Вихревые циклонные топки /7/.
98. Этапы развития стальных котлов /7/.
99. Предохранительный клапан /7/.
100. Циклонное золоулавливание /7/.

101. Циклон НИИОГАЗ /7/.
102. Затвор-мигалка для золы /7/.
103. Схема топливоподачи с центральным бункером, с загрузкой его подъемником и шнековым транспортером /7/.
104. Ковшовый подъемник Шевьева /7/.
105. Капионовый фильтр /7/.
106. Двухпоточный осветительный фильтр /7/.
107. Фильтр соленого раствора /7/.
108. Схема подключения теплообменников /9/.
109. Классификация рекуперативных теплообменных аппаратов по конструктивным признакам /9/.
110. Арматура и контрольно-измерительные приборы (манометр, указатель уровня воды, предохранительный клапан, запорные, регулирующие и продувочные устройства) /17/.
111. Схема устройства производственной котельной, работающей на твердом топливе /13/.
112. Топка с неподвижной колосниковой решеткой и шурующей планкой для каменных углей /13/.
113. Схема внутритопливной обработки воды и удаления шлака /13/.
114. Механический фильтр для очистки воды /13/.
115. Схема установки для очистки конденсата от масла /13/.
116. Схема продувки парового котлоагрегата с использованием тепла /13/.
117. Двухступенчатая колонка деаэрации /13/.
118. Топка НДР /4,5,14/.
119. Топка ПМЗ-ЧДР /4,5,14/.
120. Топка ПМЗ-ЛДР /4,5,14/.
121. Схема компоновки пылесистемы с мельницей-вентилятором /4,5,13/.
122. Деаэратор ЦКТИ /4,5,13/.

6.2 Пример выполнения индивидуального задания

Схема устройства производственной котельной, работающей на твердом топливе

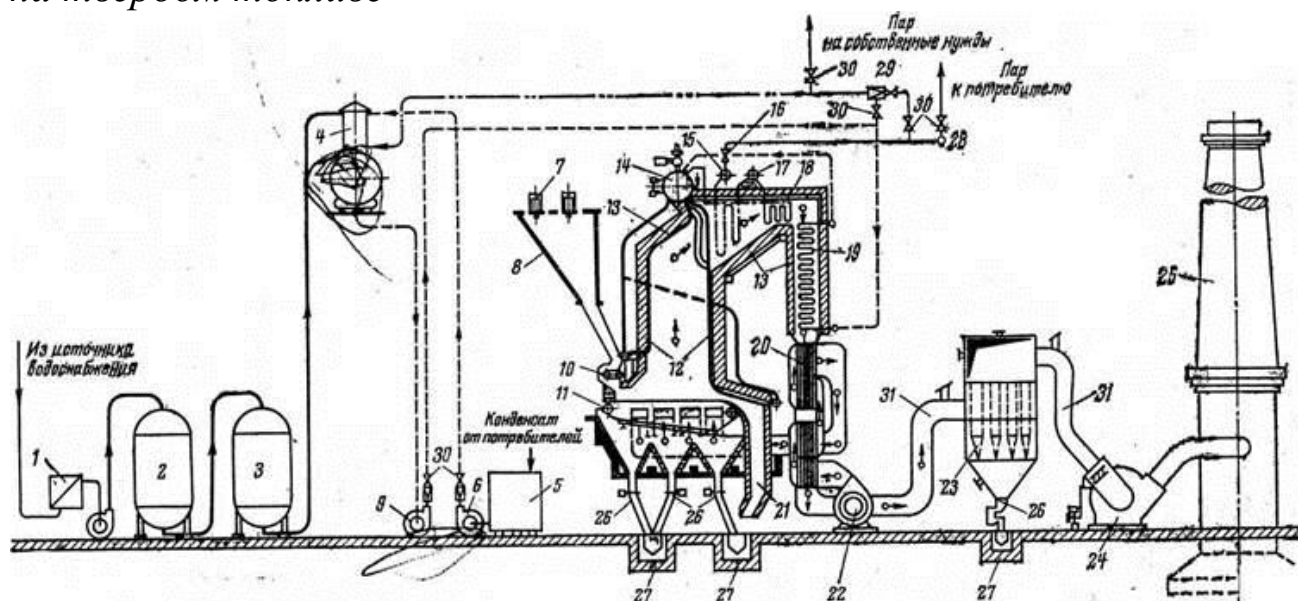


Рис. 6.1. Схема устройства производственной котельной, работающей на твердом топливе:

- 1 — подогреватель сырой воды; 2 и 3- фильтры химической очистки воды; 4 — деаэратор; 5 — бак для конденсата; 6 — насос для перекачки конденсата; 7 — конвейер для подачи топлива; 8 —бункер для топлива; 9 — насос питательной воды; 10 —питатель топлива; 11 — цепная механическая колосниковая решетка; 12 — экраны в топочной камере; 13 ~ обмуровка; 14 — барабан котлоагрегата; 15 — коллектор перегретого пара; 16 — главный запорный вентиль; 17 -регулятор температуры перегретого пара; 18 — пароперегреватель; 19 — водяной экономайзер; 20 — воздухоподогреватель; 21 — бункер для шлака; 22 — дутьевой вентилятор; 23 ~ батарейный золоуловитель; 24 — дымосос; 25 — дымовая труба; 26 — затворы на течках провала и золы; 27 — каналы для удаления шлака и золы водой; 28 главный паропровод и коллектор; 29 — редукционно-охладительная установка; 30 — арматура; 31 - газоходы от котлоагрегата к дымовой трубе.

На рисунке изображена схема устройства производственной котельной, работающей на твердом топливе и снабжающей паром производственное предприятие. До того как вода поступит в котлоагрегат, она будет подогрета в теплообменнике, освобождена от части загрязняющих ее примесей и солей в аппаратах химической очистки и в деаэраторе из нее будут удалены растворенные газы. После водоподготовки вода питательным насосом направляется в котельный агрегат.

Котельный агрегат состоит из поверхностей нагрева 12, испаряющих воду и перегревающих пар — пароперегревателя 18, нагревающих воду — водяного экономайзера 19, подогревающих воздух — воздухоподогревателя 20. Котлоагрегат имеет обмуровку 13, топочное устройство 11, газоходы 31, запорную и регулирующую арматуру 30 и др.

Котлоагрегат состоит из элементов, представляющих собой цилиндры (трубы и сосуды) разного диаметра, соединяемые между собой с помощью сварки или вальцовки. Основными деталями котлоагрегата являются барабан 14, коллекторы 15 и трубы. Для возможности осмотра и очистки барабанов и коллекторов выполняют отверстия, называемые лазами или люками.

Внутренний объем парового котла, занятый водой, называют водяным пространством, занятый паром — паровым пространством; поверхность, отделяющая паровое пространство от водяного, — зеркалом испарения. В паровом пространстве устанавливают устройства для сепарации влаги и пара, а иногда ставят дополнительный барабан, называемый сухопарником. При работе парового котла уровень воды в барабане колеблется между низшим и высшим положением. Низший допускаемый уровень воды в барабанах паровых котлов устанавливается (определяется) для исключения возможности перегрева металла стенок элементов котлоагрегата и обеспечения надежного поступления воды в опускные трубы контуров циркуляции. Обычно низший уровень располагается выше на 100 мм над верхней точкой соприкосновения горячих дымовых газов с неизолированной стенкой элемента котла. Положение высшего допускаемого уровня воды в барабанах паровых котлов определяется из условий предупреждения попадания воды в паропровод или пароперегреватель. Объем воды, содержащейся в барабане между высшим и низшим уровнем, определяет «запас питания», то есть время, позволяющее котлу работать без поступления в него воды. Производительность котлоагрегата определяют по количеству теплоты или массовому количеству пара, получаемого из агрегата. Иногда размеры или производительность котлоагрегата характеризуются величиной поверхностей нагрева.

Радиационные поверхности при размещении в топочной камере называются экранами 12, и они защищают стены от прямого воздействия излучающей среды.

Топочное устройство 11 служит для сжигания топлива. В топочном устройстве может быть осуществлено слоевое сжигание топлива, когда твердое топливо подается для сжигания на колосниковую решетку того или иного типа, или камерное сжигание, когда топливо сжигается в факеле при подаче его через горелки или форсунки. Для подачи твердого топлива на цепную колосниковую решетку, механически перемещающуюся вдоль топочной камеры, служит питатель топлива 10. К питателю топливо поступает из бункера 5. Для загрузки бункера используется конвейер 7, представляющий собой чаще всего ленточный транспортер. На пути от склада до бункеров котельной из топлива извлекаются металлические предметы, куски древесины, а само топливо дробится. Воздух, необходимый для горения топлива при слоевом сжигании, подается вентилятором 22 под колосниковую решетку. В ряде случаев предварительно подогревают его в воздухоподогревателе 20. Иногда часть воздуха подается непосредственно в топочную камеру в виде «острого» дутья. Удаление шлака и провалившихся через решетки частиц твердого топлива в нижней части слоевых топок выполняют специальные емкости— бункера, затворы 26, располагаемые под и в конце колосниковой решетки.

Пар, полученный в испарительных поверхностях нагрева, после осушки и освобождения от части солей направляется в пароперегреватель 18. В нем происходят испарение вынесенной из барабана воды и нагрев пара до заданной температуры. Пароперегреватель состоит из стальных труб, выполняемых в виде змеевиков и объединяемых коллекторами 15, которые обычно размещаются вне газоходов. Иногда часть змеевиков помещают в топочной камере. В первом случае перегреватель называется конвективным 18, во втором — радиационным. Так как перегреватель стремятся расположить в области сравнительно высоких температур, необходимо обеспечивать его надежную работу при всех режимах работы правильным выбором скорости движения пара, распределением его по змеевикам, подбором и изготовлением труб из металла, обладающего надлежащими свойствами. С целью исключения возможности повышения температуры перегретого пара устанавливают специальные регуляторы 17.

В экономайзере 19 нагревается питательная вода, а иногда вода тепловых сетей. Водяные экономайзеры котлоагрегатов среднего и высокого давления изготовляют из стальных труб, для низкого давления — из чугунных или стальных труб.

В водяной экономайзер вода подается питательным насосом 9, за счет напора которого и осуществляется ее принудительное движение в трубах экономайзера.

Воздухоподогреватель 20 в небольших котлоагрегатах располагают обычно после водяного экономайзера. В воздухоподогревателе подогревается воздух, идущий в топочную камеру, под решетку и в систему для подсушки и размола топлива. В случае сжигания топлив с высоким содержанием влаги или твердого топлива в камерной топке подогрев воздуха является обязательным. При сжигании твердого топлива в слое или жидких и газообразных топлив в камере в большинстве случаев для котельных агрегатов малой производительности можно ограничиться установкой только водяного экономайзера.

Воздух в воздухоподогреватель нагнетается дутьевым вентилятором 22 через входные короба-воздуховоды и отводится к топочной камере (или в систему приготовления топлива) коробами горячего воздуха.

При сжигании в камере газообразного топлива весь воздух вводится через горелку, в которой газ и воздух перемешиваются: при сжигании жидкого топлива также весь воздух вводится через горелку, но топливо с помощью форсунок сначала превращается в мелкие капли, которые затем перемешиваются с воздухом.

Если в камерной топке сжигается твердое топливо, то последнее предварительно измельчается в пылеприготовительных установках до размера частиц в несколько микрометров. В этом случае одна часть воздуха вводится через горелку в смеси с топливом (первичный воздух) и другая—через специальные устройства в той же горелке или рядом с ней (вторичный воздух). Иногда часть вторичного воздуха отделяется и вводится через специальные устройства в нижней части или на задней стене топочной камеры.

При сжигании твердого топлива, кроме дымовых газов, образуются шлак и зола, которые необходимо удалить из котлоагрегата и с территории котельной. Из бункеров шлак через течку попадает в устройства для удаления 27, пройдя в некоторых случаях специальную дробилку.

Вместе со шлаком удаляется зола, уловленная из дымовых газов с помощью Золоулавливающих установок 23, размещаемых перед дымососами 24. Золоулавливающие установки и бункера шлака отделяются от устройств для золошлакоудаления специальными затвора-

ми 26. Охлажденные и очищенные от золы дымовые газы удаляются через дымовые трубы 25, высота которых определяется таким образом, чтобы предупредить недопустимое загрязнение воздушного бассейна в районе котельной.

Дымовые газы, пройдя газоходы котлоагрегата, направляются в золоуловители 23, затем в борова 31, дымососы 24 и дымовую трубу 25. Для изоляции дымовых газов от внешней среды применяют обмуровку 13, которая выполняется из кирпича или огнеупорного материала, из металлических щитов с огнеупорами. Обмуровка может опираться непосредственно на фундамент, на металлические конструкции — каркас или крепиться на трубах экранов топочной камеры и газоходов.

Каркас служит для крепления и поддержания всех элементов котельного агрегата — барабанов, поверхностей нагрева, трубопроводов, обмуровки, лестниц и площадок и представляет собой металлические конструкции обычно рамного типа, соединенные с помощью сварки или болтами.

Гарнитурой называются устройства, позволяющие обслуживать топочную камеру, колосниковые решетки и газоходы «отельного агрегата» — лазы, гляделки и люки с крышками и дверками для осмотра и другие устройства для очистки деталей топки и поверхностей нагрева в газохода, шиберы и заслонки для регулирования тяги и дутья и лючки для обдувки.

К вспомогательным устройствам котельной установки принято относить оборудование на ее территории для разгрузки, хранения и подачи топлива. Снабжение котельной топливом может осуществляться различными путями — по железной дороге, автотранспортом и по трубопроводам. При сжигании твердого и жидкого топлива топливное хозяйство состоит из устройств и сооружений для разгрузки, приема, складирования и подачи топлива в бункера котельной или трубопроводы котельной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров, В.Г. Паровые котлы средней и малой мощности / В.Г. Александров. -М.:Энергия,1972.-190 с.
2. Амерханов, Р.А. Теплотехника: учебник для вузов; доп. Мин. с.-х. РФ /Р.А. Амерханов, Б.Х. Драганов.- 2-е изд., перераб. и доп.- М.: Энергоатомиздат, 2006
3. Бузников, Е.Ф. Производственные и отопительные котельные / Е.Ф. Бузников. -М.:Энергоиздат, 1984. -248 с.
4. Губарев, А.В. Теплогенерирующие установки. Часть 1: Учебное пособие / А.В. Губарев, Ю.В. Васильченко. – Белгород: изд-во БГТУ, 2008. – 162 с.
5. Гусев, Ю.Л. Основы проектирования котельных установок / Ю.Л. Гусев. – М.: Стройиздат, 1973. – 248 с.
6. Драганов, Б.Х. Теплотехника и применение теплоты в сельском хозяйстве / Б.Х. Драганов. -М.:Агропромиздат, 1990.- 463 с.
7. Зах, Р.Г. Котельные установки / Р.Г. Зах. - М.:Энергия, 1968.- 352с.
8. Захаров, А.А. Применение теплоты в сельском хозяйстве / А.А. Захаров. – М.: Агропромиздат. 1986. – 286 с.
9. Кирюшатов, А.И. Теплофикация в сельскохозяйственном производстве / А.И. Кирюшатов. - М.: Агропромиздат, 1986.-190 с.
10. Киселев, Н.А. Устройство и эксплуатация котлов и котельного оборудования / Н.А. Киселев. -М.: Высшая школа, 1979.-237 с.
11. Краткий курс теплотехники [Текст] : учеб. пособие; рек. ДВ РУМЦ / С. В. Щитов [и др.]; ДальГАУ. ИМСХ. – Благовещенск : ДальГАУ, 2011. – 147, [1] с.
12. Круглов, Г. А. Теплотехника [Текст] : учеб. пособие; рек. УМО вузов РФ / Г. А. Круглов, И. Г. Булгакова, Е. С. Круглова. – СПб. : Лань, 2010. – 207, [1] с. – (Учебники для вузов. Специальная литература)
13. Мифлиц, О.В. Справочник по подготовке котельных установок / О.В. Мифлиц. -М.:Энергия, 1976. -281 с.
14. Павлов, И.И. Котельные установки и тепловые сети / И.И. Павлов, М.Н. Федоров. – М., Стройиздат, 1977. – 301 с.

15. Панасевич, И.С. Технические расчеты по сельским теплотехническим объектам / И.С. Панасевич. – Горький, 1985. – 126 с.
16. Проектирование систем энергообеспечения [Текст] : учебник; рек. М–вом с.-х. РФ / Р. А. Амерханов [и др.]; под ред. Р. А. Амерханова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 2010. – 548, [1] с. – (Учебники и учеб. пособия для вузов) (К 90-летию Кубанского ГАУ)
17. Роддатис, К.Ф. Котельные установки/ К.Ф. Роддатис. - М.:Энергия,1977.-429 с.
18. Соловьев, Ю.П. Проектирование крупных центральных котельных для комплекса тепловых потребителей / Ю.П. Соловьев. - М.:Энергия,1976.-191 с.
19. Справочник по теплоснабжению сельскохозяйственных предприятий.-М.:Колос, 1983.-319 с.
20. Стырикович, М.А. Парогенераторы электростанции / М.А. Стырикович. - М.: Энергия, 1966.- 211 с.
21. Сушкин, А.А. Теплотехника / А.А. Сушкин. -М.: Металлургия, 1973.-178с.
22. Теплотехника: Учебник для вузов /под ред. В.Н. Луканина.- 5-е изд., стер.- М.: Высшая школа,2005.- 260 с.
23. Теплоэнергетические установки и системы сельского хозяйства: Учебник /Под ред. Б.Х. Дроганова.- М., 2002. – 310 с.
24. Учебно-методический комплекс. Дисциплина Б.3. Теплотехника [Электронный ресурс] / С. В. Щитов [и др.]; каф. «Транспортно-энергетических средств и механизации АПК». – Благовещенск : ДальГАУ, 2012. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM), 20 мБ.
25. Фокин, В.М. Теплогенерирующие установки систем теплоснабжения / М.В. Фокин. – М.: Машиностроение-1, 2006. – 240 с.
26. Черкасский, Е.Б. Меры безопасности при эксплуатации котельных установок / Е.Б. Черкасский, Б.В. Алексеев. - М.:Колос,1974.-208 с.
27. Щеголев, М.М. Котельные установки / М.М. Щеголев. -М.: Стройиздат.- 1966.-423 с.
28. Эстеркин, Р.И. Котельные установки. Курсовое и дипломное проектирование [Текст]: учеб. пособие; доп. Управлением кадров и учеб. заведений РФ / Р.И. Эстеркин.- СПб.: Интеграл, 2010.- 280 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

1 Принципиальные схемы энергетических установок

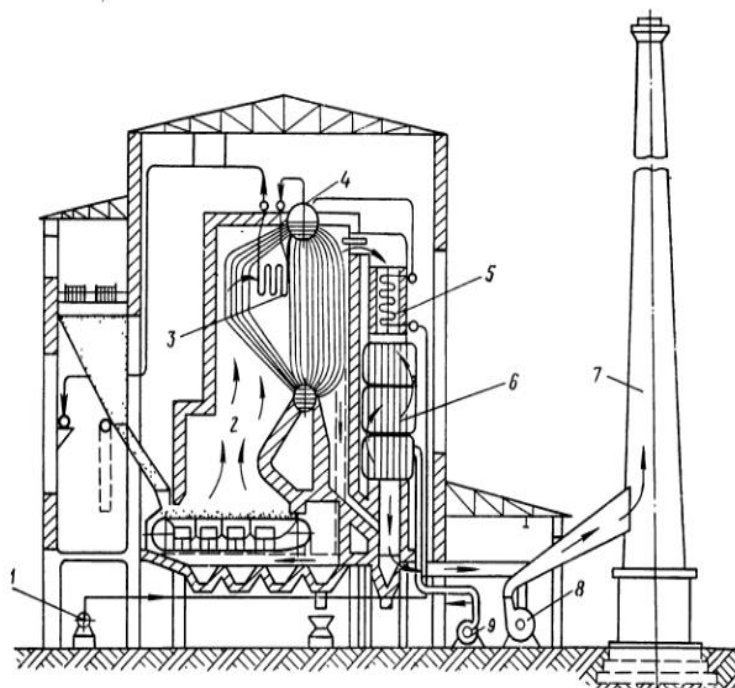


Рис.1 Схема паровой котельной установки:

1 – водяной экономайзер; 2 – топка; 3 – пароперегреватель; 4 – паровой котел;
5 – экономайзер; 6 – воздухоподогреватель; 7 – дымовая труба; 8 – дымосос

2 Топочные устройства

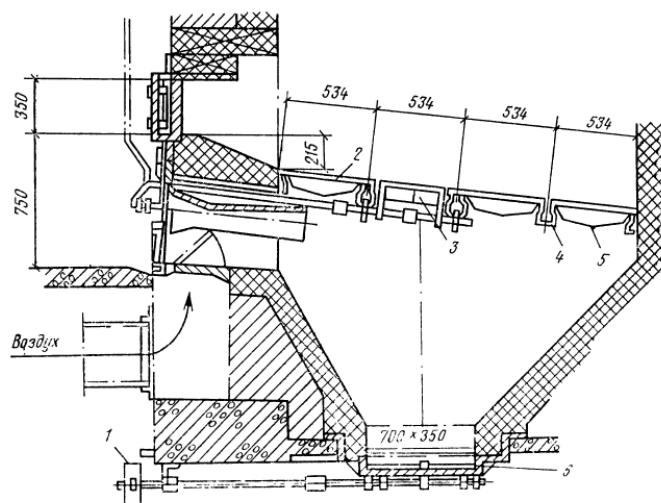


Рис. 2. Ручная топка с опрокидными колосниками:

1– привод; 2– колосниковая решетка; 3– опрокидные колосники; 4– балки;
5 – плиточные колосники

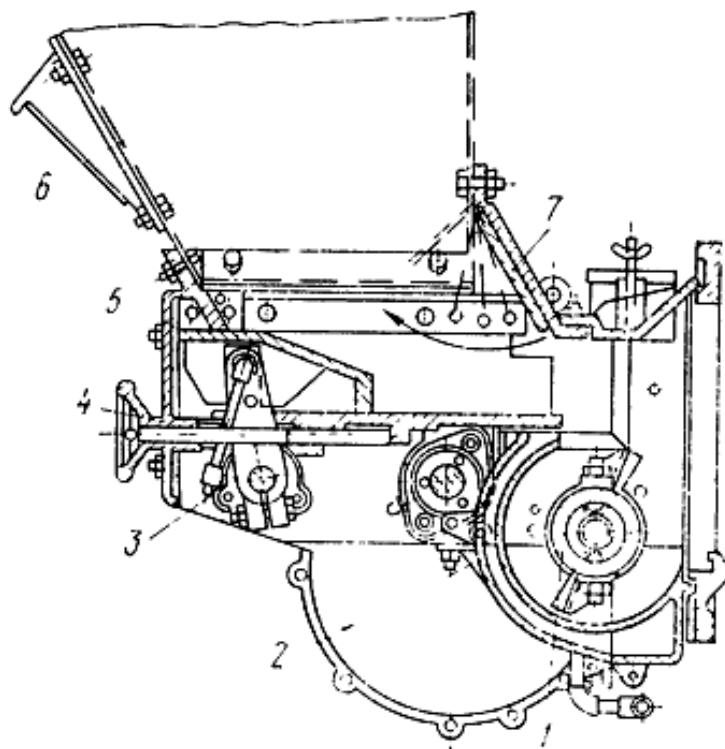


Рис.3. Пневмомеханический забрасыватель ПМЗ системы КЦТИ [5,14]:
 1 – лопасти; 2 – кожух; 3 –вилка; 4 – распределительная плита; 5 – питатель;
 6 – топливный бункер; 7 - заслонка

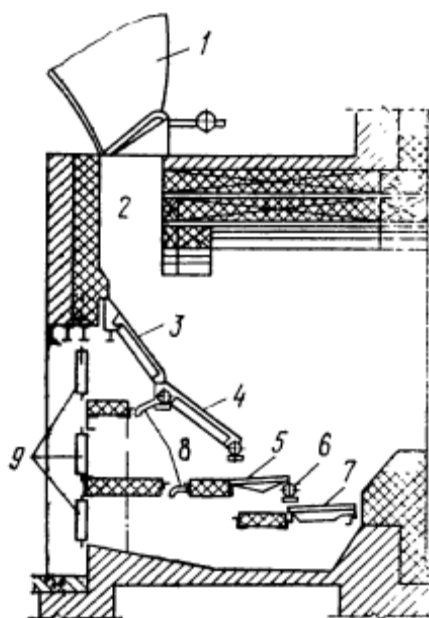


Рис.4. Шахтная топка для сжигания кускового торфа[5,14]:
 1– дверца; 2– топливный бункер; 3– шахта; 4– наклонные колосники;
 5– наклонные колосники; 6– горизонтальные колосники; 7– опорные балки;
 8 – горизонтальные колосники; 9– заслонки

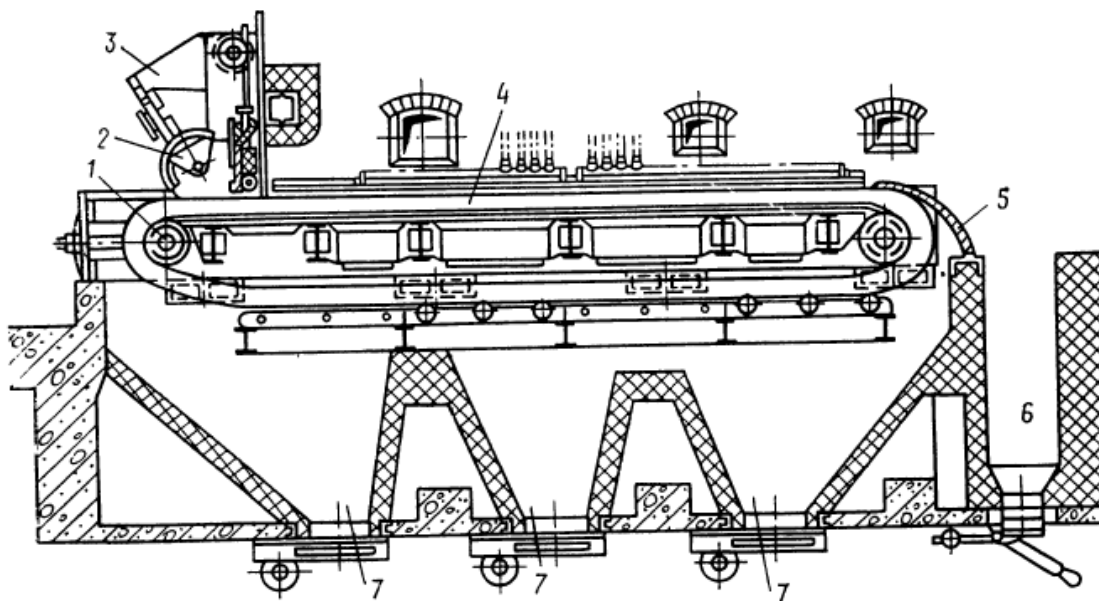


Рис. 5. Цепная решетка типа ЧЦР [14,18]:

- 1 – звездочка; 2 – шибер; 3 – топливная воронка; 4 – колосниковые полотна;
5 – шлакосниматель; 6 – шлаковый бункер; 7 - бункер

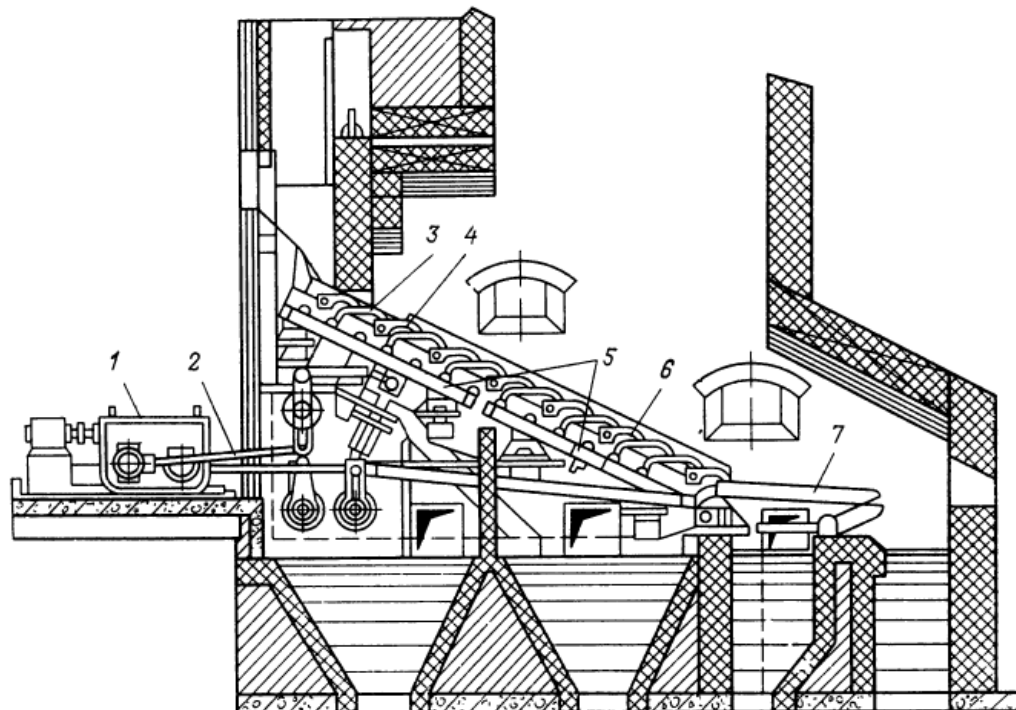


Рис.6. Топка с наклонно-переталкивающей решеткой [14,18]:

- 1 – приводной механизм; 2 – рычаги; 3 – подвижные колосники;
4 – неподвижные колосники; 5 – подвижные тележки;
6 – охлаждаемая панель; 7 – горизонтальные колосники

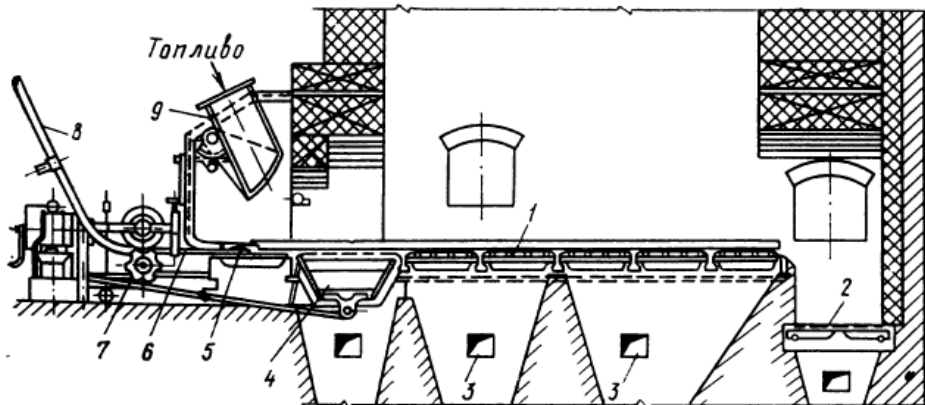


Рис.7. Топка с шурующей планкой системы Васильева [5,14]:
 1 – колосниковая решетка; 2 – дополнительная решетка; 3 – воздуховод;
 4– зажигательная шахта; 5 – шурующая планка; 6 – цепи-штанги;
 б– звездочка; 8 – труба; 9 – бункерный рукав

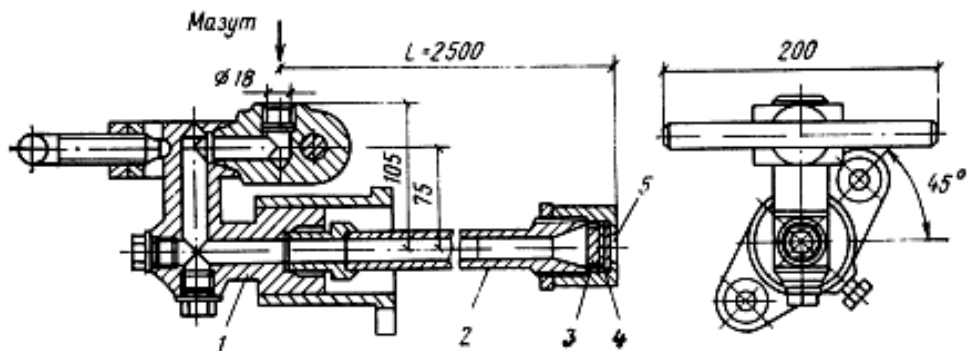


Рис.8. Форсунка с механическим распыливанием мазута [14]:
 1 – корпус; 2 – ствол; 3 – распределительный диск; 4 – завихрывающий диск;
 5 – распыливающая шайба

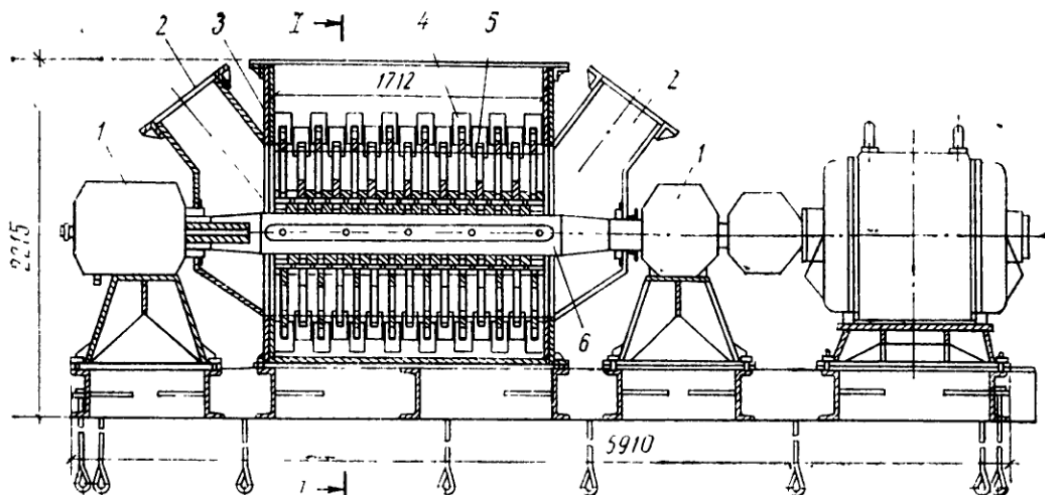


Рис.9. Молотковая мельница:
 1 – подшипники; 2 – патрубки; 3- кожух; 4- чугунные била;
 5- билодержатель; 6 – вал

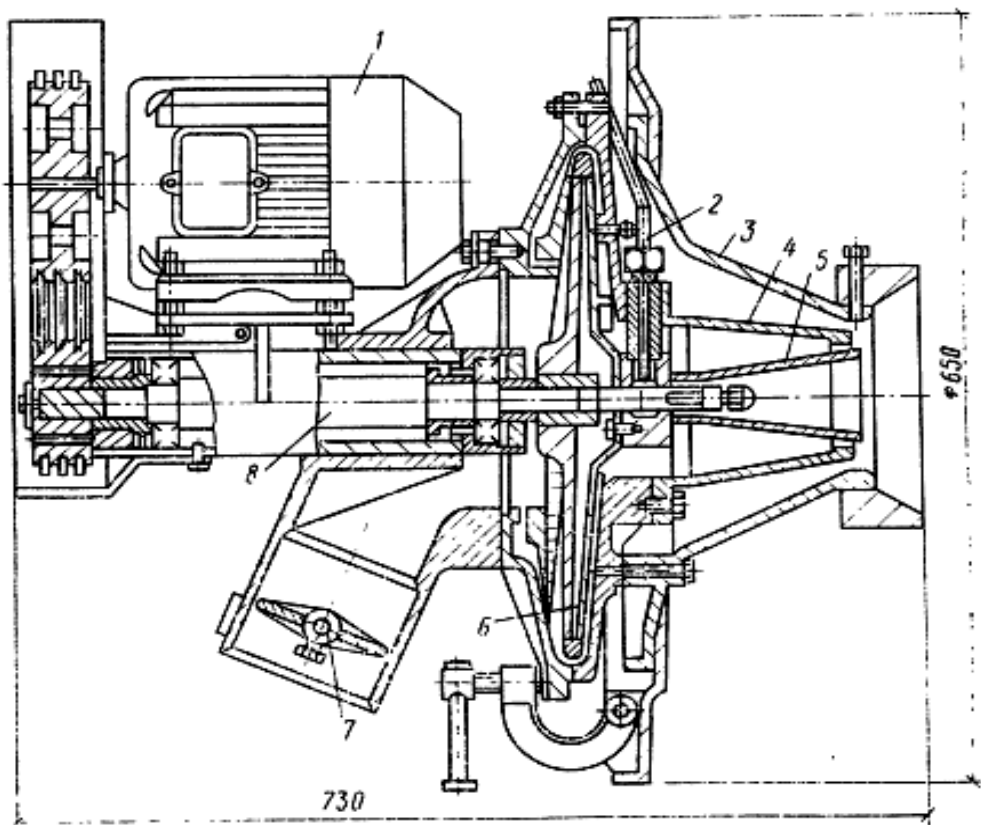


Рис.10. Ротационная форсунка:

1– клиноременная передача; 2 – электродвигатель; 3 – внешний кожух;
4– внутренний кожух; 5– полый вал; 6– крыльчатка; 7– поворотная заслонка

3 Система пылеприготовления

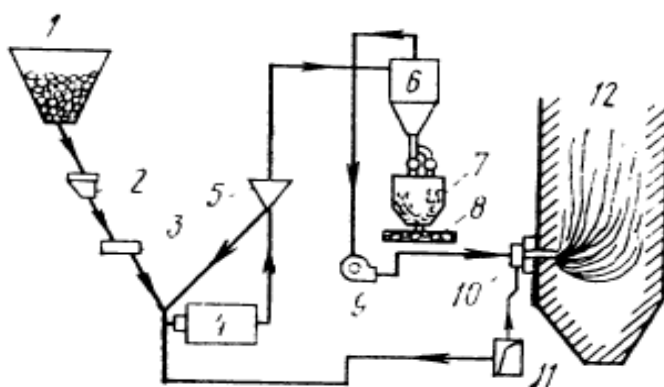


Рис.11. Схема пылеприготовления с промежуточным бункером [14]:
1– бункер; 2– весы; 3– питатель; 4– мельница; 5– сепаратор; 6– циклон;
7– промежуточный бункер; 8 – питатель; 9– вентилятор; 10– горелка;
11 – воздуховод; 12 – топочная камера

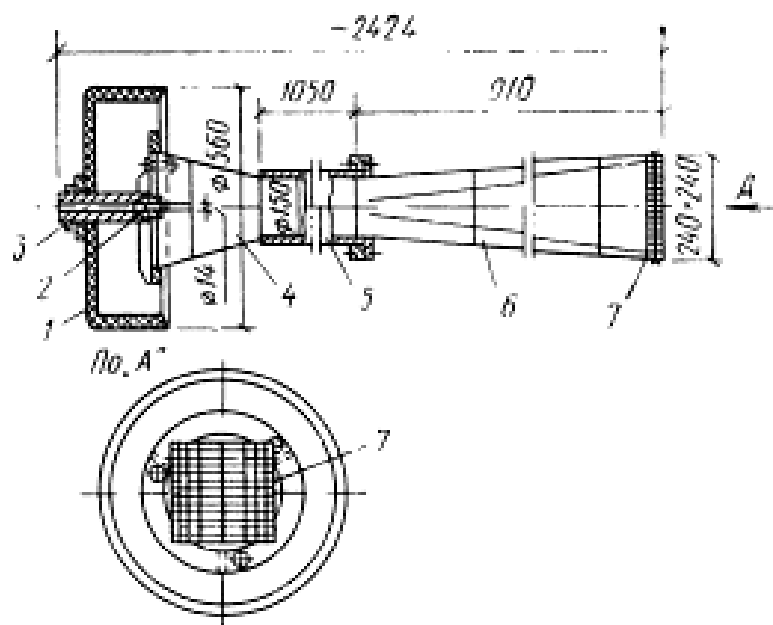


Рис.12. Газовая инжекционная горелка [14]:
 1 – глушитель шума; 2 – сопло; 3 – труба; 4 – смеситель;
 4 – камера смешивания; 6 – диффузор; 7 – стабилизатор

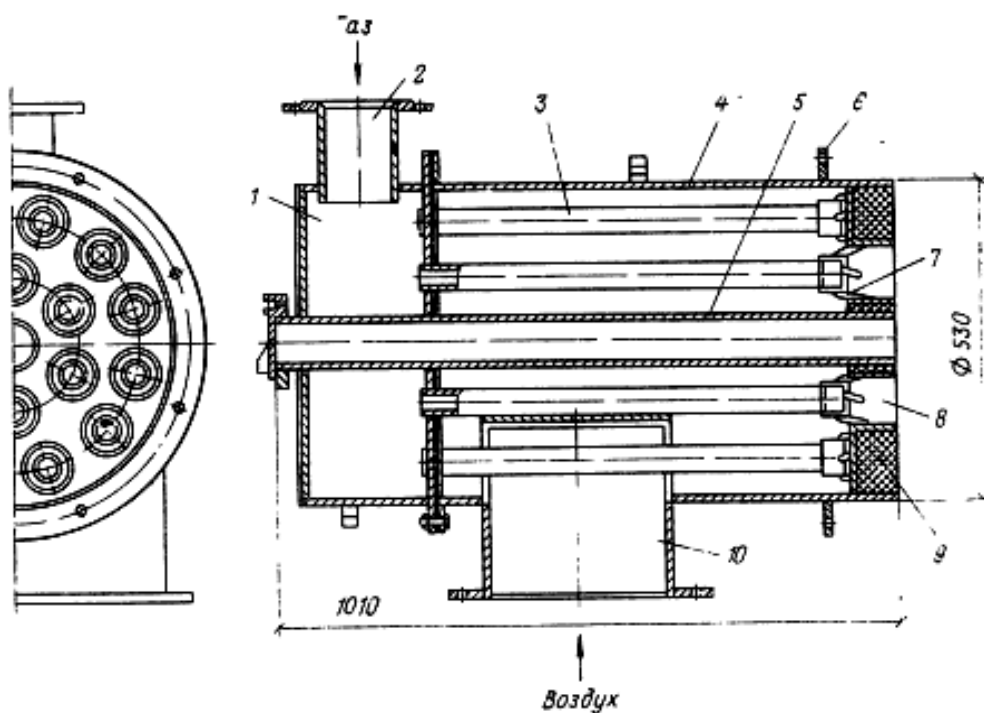


Рис.13. Смесительная горелка [14]:
 1 – камера; 2 – патрубок; 3 – трубки; 4 – корпус; 5 – факельная трубка;
 6 – фланец; 7 – специальные лопатки; 8 – отверстия для прохода газа; 9 – стенка;
 10 – патрубок

4 Котлы

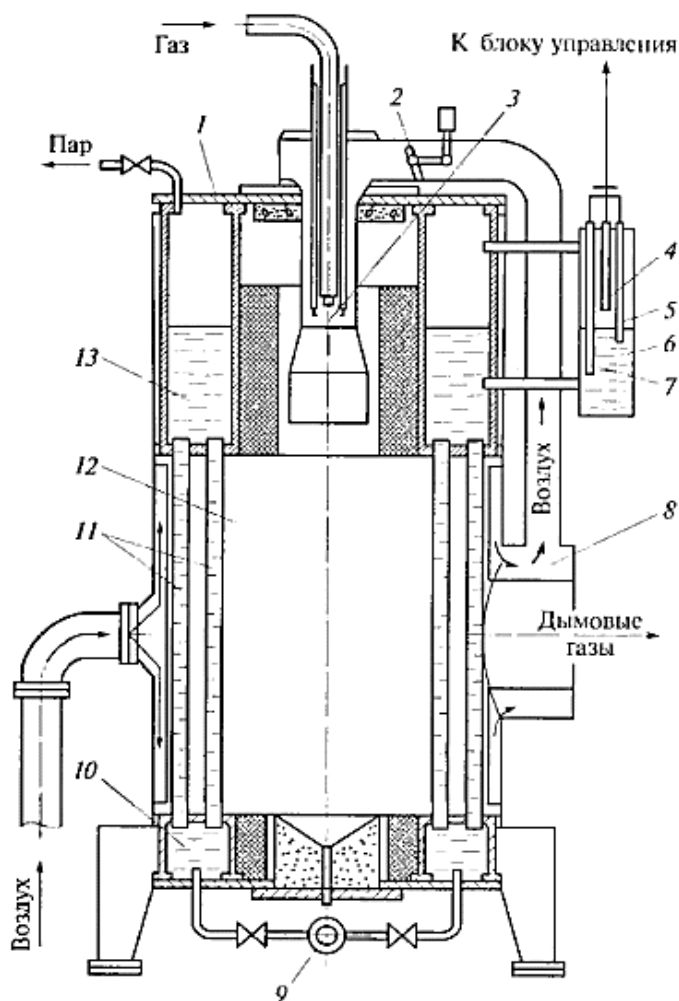


Рис. 14. Паровой котел МЗК-7АГ:

- 1 – крышка; 2 – поворотная заслонка;
3 – горелка; 4 – электрод верхнего уровня воды; 5 – электрод нижнего уровня воды; 6 – уровнемерная колонка; 7 – электрод аварийного уровня воды;
8 – воздушный регистр; 9 – вентиль продувки; 10 – нижний коллектор;
11 – трубы; 12 – топка; 13 – верхний коллектор

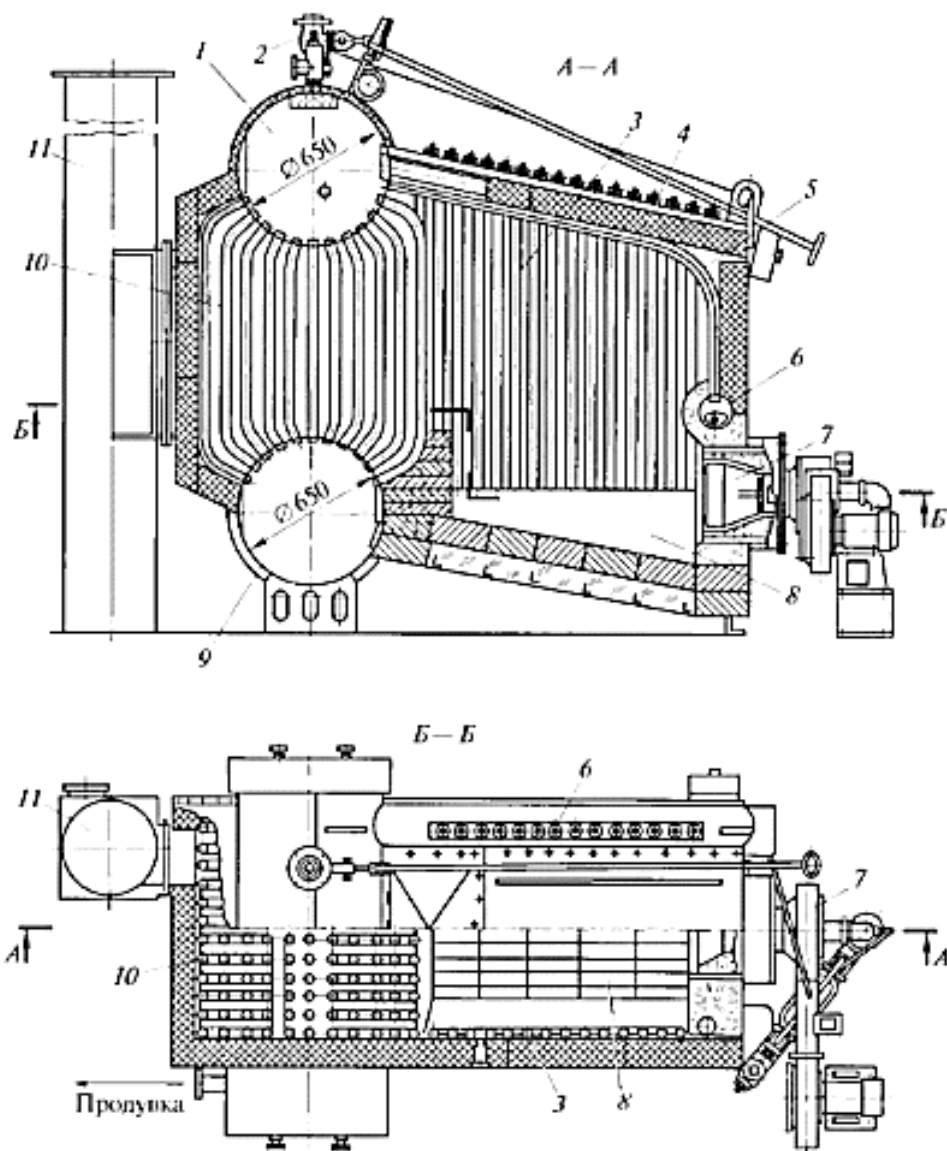


Рис.17. Вертикально-водотрубный паровой котел типа Е-1-9-1Г:
 1 – верхний барабан; 2 – главный паровой вентиль; 3 – боковой экран;
 4 – потолочный экран; 5 – фронтальный экран; 6 – коллектор; 7 – горелка;
 8 – камерная топка; 9 – нижний барабан; 10 – котельный пучок труб;
 11 – дымовая труба

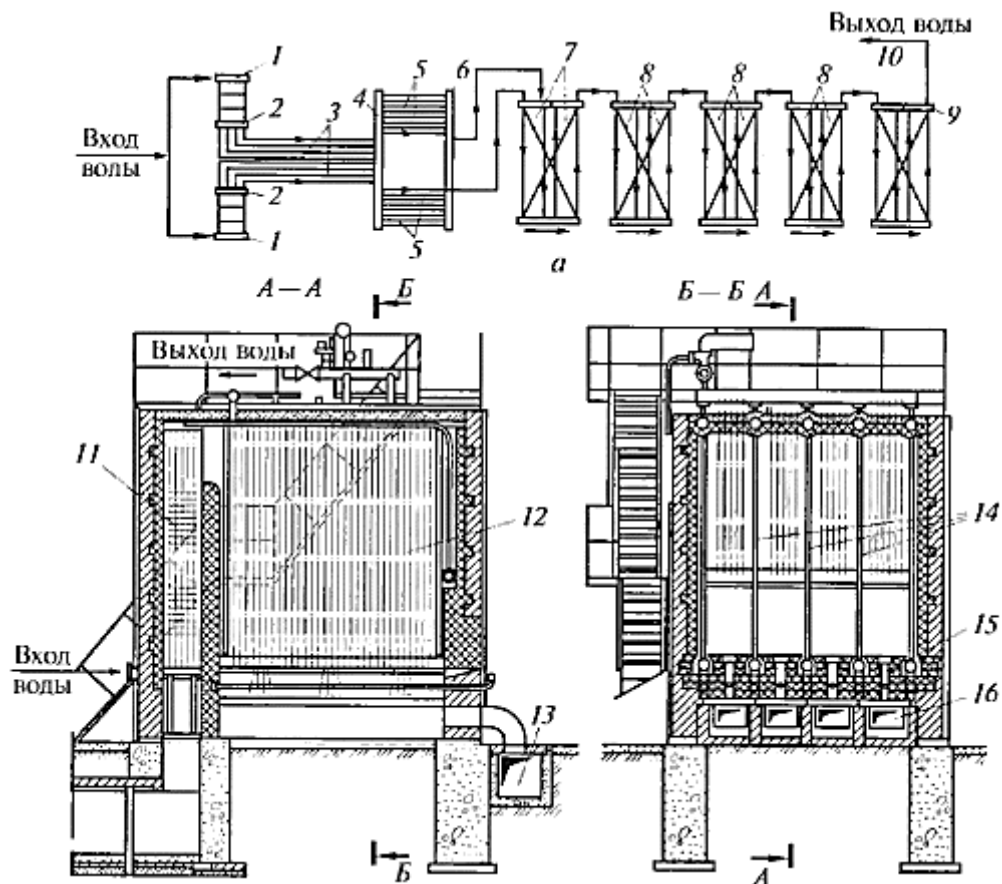


Рис.18. Водогрейный котел ТВГ-8:

- 1 – нижний коллектор конвективной поверхности; 2 – верхний коллектор конвективной поверхности; 3 – потолочно-фронтальные трубы; 4 – нижний коллектор потолочного экрана; 5 - потолочно-фронтальные трубы;
 6– верхний коллектор потолочного экрана; 7 – левые боковые экраны;
 8 – двухсветный экран; 9 – правый боковой экран; 10 – выход воды в теплосеть;
 11 – конвективная поверхность нагрева; 12 – радиационная поверхность топки;
 13 –воздушный канал; 14 - двухсветный экран; 15 - горелки

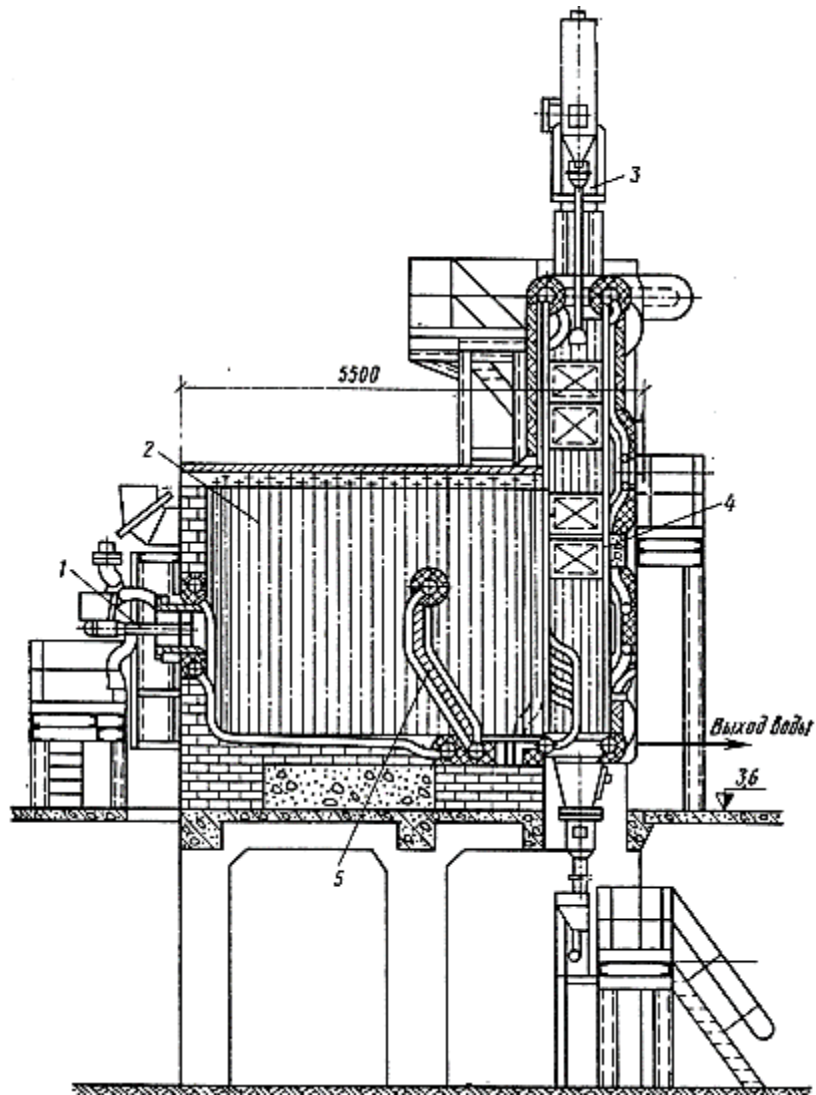


Рис.19. Водогрейный котел типа КВ-ГМ-10:
 1 – грелочное устройство; 2– экран; 3 – дробеочистительное устройство;
 4 – конвективная часть котла; 5 – перегородка в топке

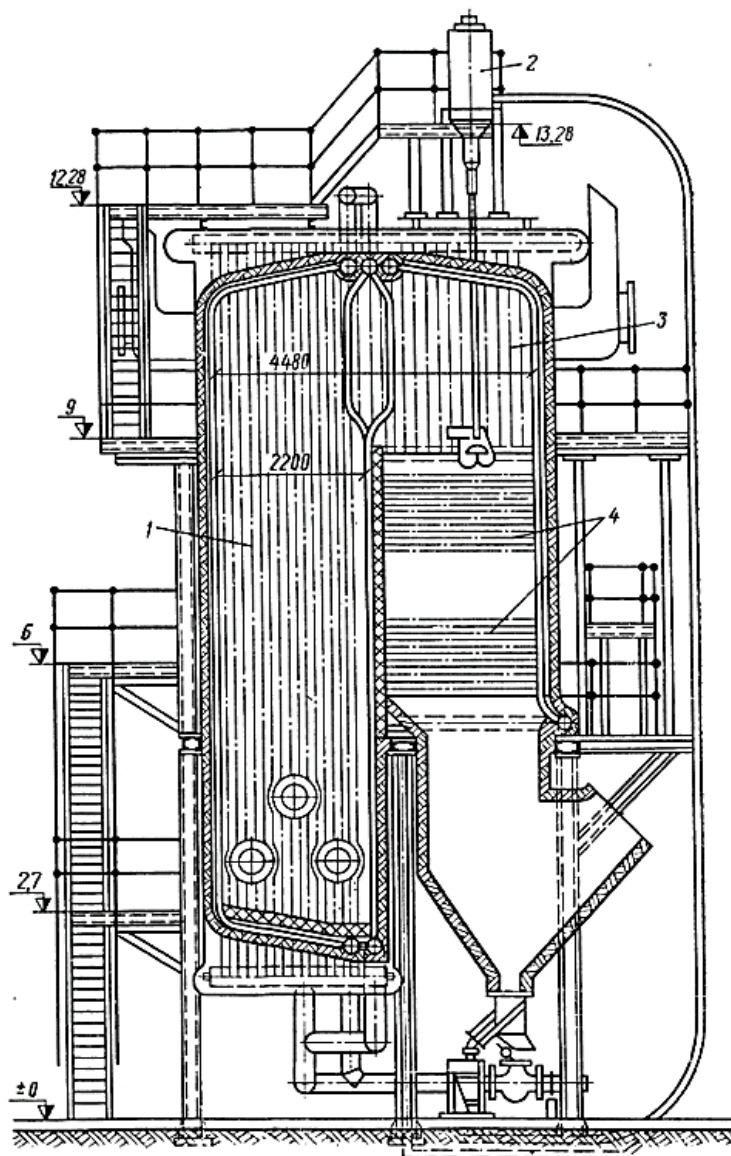


Рис.20. Водогрейный котел типа ПТВМ-30М:

- 1 – топочная камера; 2– дробеочистительное устройство; 3– поворотная камера;
 4– конвективная шахта; 5 - вспомогательные поверхности нагрева котлов

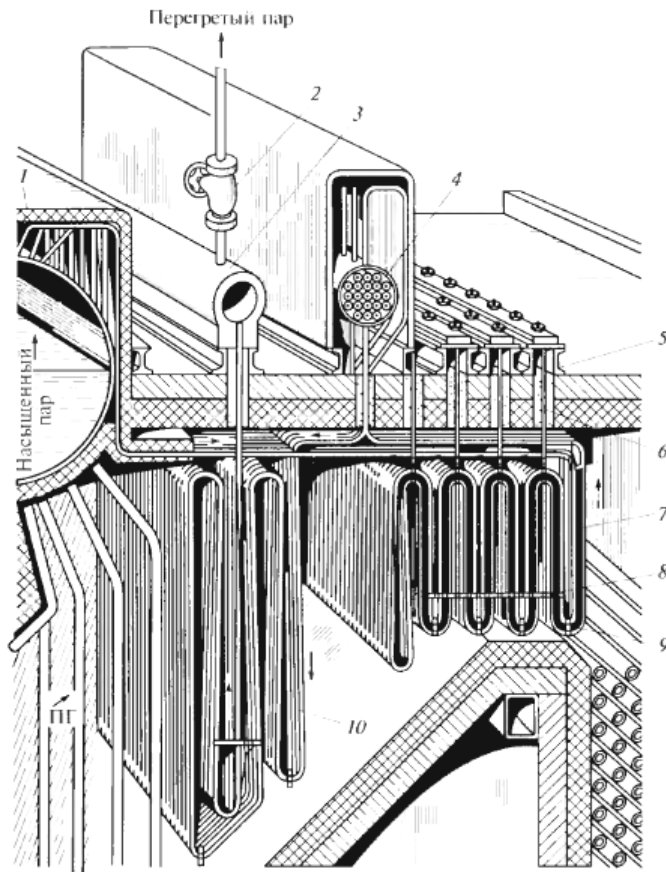


Рис.22. Вертикальный конвективный пароперегреватель:
 1 – барабан котла ; 2 – главная паровая задвижка; 3 – выходной коллектор перегретого пара; 4 – промежуточный коллектор с поверхностным пароохладителем; 5 – балка для подвески змеевиков; 6 – подвеска змеевиков; 7 – змеевик первой ступени; 8 – дистанционная планка; 9 – дистанционная гребенка; 10 – змеевики второй ступни

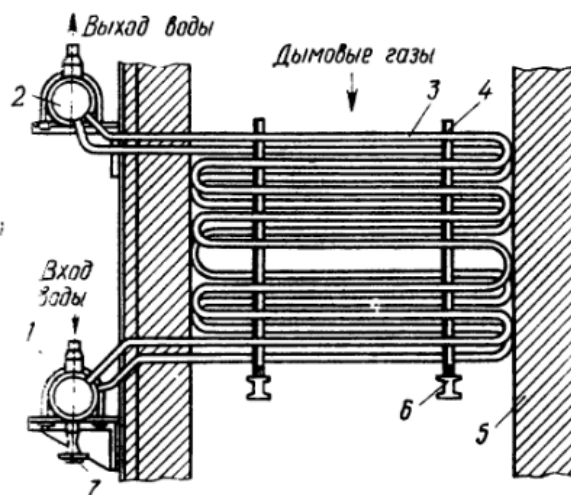


Рис. 23. Стальной змеевиковый экономайзер:
 1 – нижний входной коллектор; 2 – верхний выходной коллектор; 3 –змеевики; 4 –опорные стойки змеевиков; 5 – обмуровка; 6 –опорные балки с воздушным охлаждением 7 –спуск воды

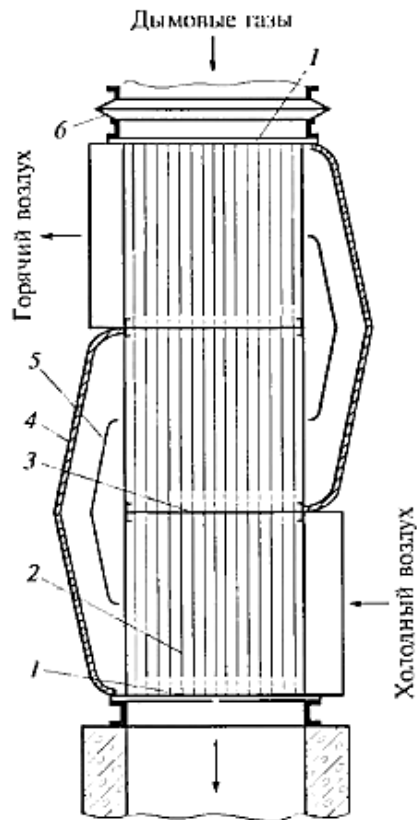


Рис.24. Воздухонагреватель рекуперативного типа:
 1 – трубные диски; 2 – трубы; 3 – перегородка; 4 – кожух;
 5 – направляющая лопатка; 6 – дисковый компенсатор

5 Вспомогательные устройства котельного агрегата

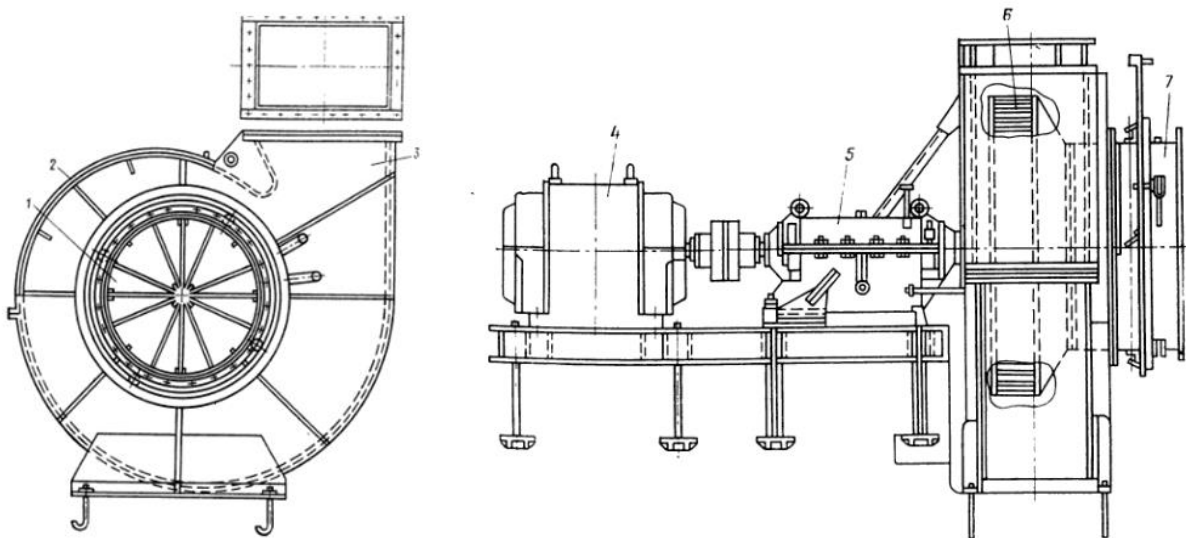


Рис.25. Дымосос-вентилятор:
 1 – направляющий аппарат; 2 – кожух; 3 – диффузор; 4 – электродвигатель;
 5 – подшипники; 6 – рабочее колесо; 7 – патрубок для засоса воздуха

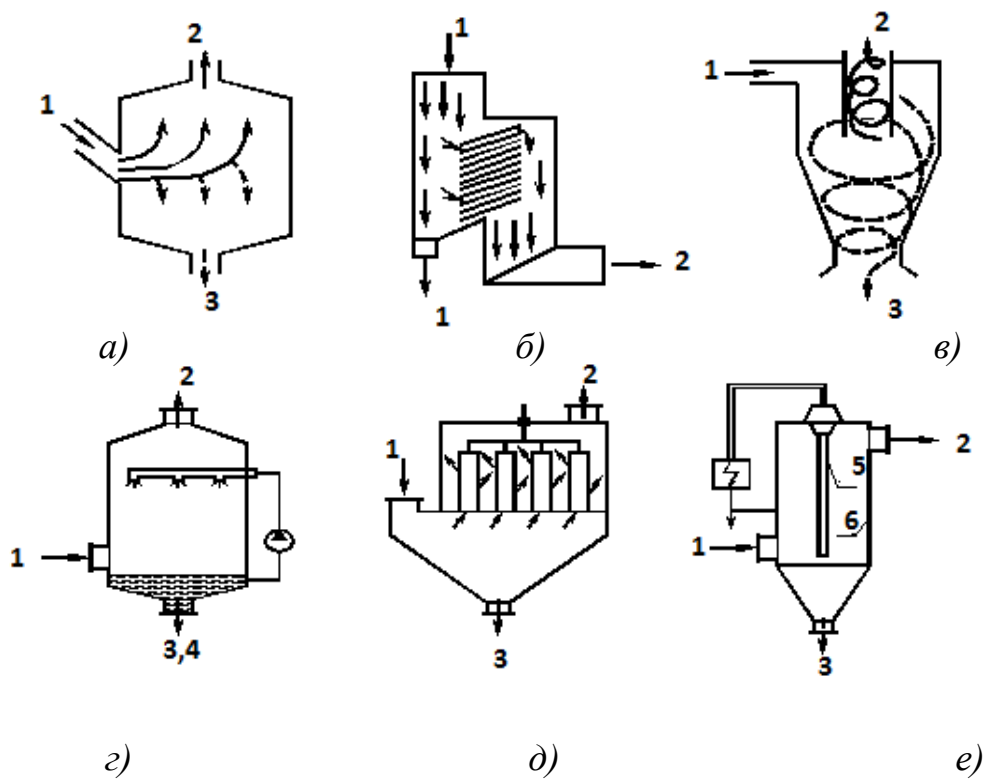


Рис.26. Золопылеуловители ТЭС и котельных [4]:

а – осадительная камера; *б* – жалюзийный золопылеуловитель; *в* – циклон;
г – «мокрый» золоуловитель; *д* – рукавный фильтр; *е* – электрофильтр;
 1 – загрязненные газы; 2 – очищенные газы; 3 – твердые частицы;
 4 – вода; 5 – коронирующие электроды; 6 – осадительные электроды

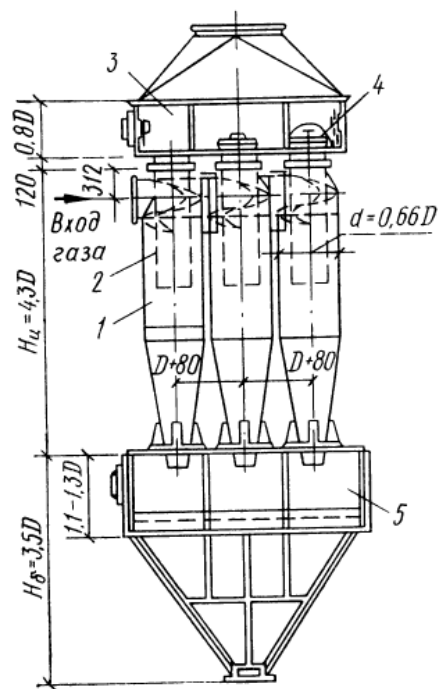


Рис. 27. Схема блока циклонов:

1 – корпус; 2 – выхлопная труба; 3 – газосборник; 4 – заглушка; 5 – бункер

Приложение 2

Средняя теплоемкость газов при постоянном давлении C_{pm} кДж/(м³ · К)

$t_r, ^\circ\text{C}$	O ₂	N ₂	CO	CO ₂	H ₂ O	SO ₂	Воздух абс.сухой
0	1,3059	1,2946	1,2992	1,5998	1,493	1,733	1,2971
100	1,3176	1,2958	1,3017	1,7003	1,502	1,813	1,3004
200	1,3352	1,2996	1,3071	1,7873	1,5223	1,888	1,3071
300	1,3561	1,3067	1,3167	1,8627	1,5424	1,955	1,3172
400	1,3775	1,3163	1,3289	1,9297	1,5654	2,018	1,3289
500	1,3980	1,3276	1,3427	1,9887	1,5897	2,068	1,3427
600	1,4168	1,3402	1,3574	2,0411	1,6148	2,114	1,3565
700	1,4344	1,3536	1,3720	2,0884	1,6412	2,152	1,3708
800	1,4499	1,3670	1,3862	2,1311	1,6680	2,181	1,3842
900	1,4645	1,3796	1,3396	2,1692	1,6957	2,215	1,3976
1000	1,4775	1,3917	1,4126	2,2035	1,7229	2,236	1,4097
1100	1,4892	1,4034	1,4248	2,2349	1,7501	2,261	1,4214
1200	1,5005	1,4143	1,4361	2,2638	1,7769	2,278	1,4327
1300	1,5106	1,4252	1,4465	2,2898	1,8028	–	1,4432
1400	1,5202	1,4348	1,4566	2,3136	1,8280	–	1,4528
1500	1,5294	1,4440	1,4658	2,3354	1,8527	–	1,4620
1600	1,5378	1,4528	1,4746	2,3555	1,8761	–	1,4708
1700	1,5462	1,4612	1,4825	2,3743	1,8996	–	1,4867
1800	1,5541	1,4687	1,4901	2,3915	1,9213	–	1,4867
1900	1,5617	1,4758	1,4972	2,4074	1,9423	–	1,4939
2000	1,5692	1,4825	1,5039	2,4221	1,9628	–	1,5010

Приложение 3

Типоразмеры котлов ДКВР (стальной)

Паропроиз- водительность, D_K , кг/ч	Избыточное давление пара, МПа	
	1,28	2,26
	Насыщенный пар (190 °С)	Насыщенный пар (215 °С)
2500	ДКВР-2,5-13	
4000	ДКВР-4-13	
6500	ДКВР-6,5-13	ДКВР-6,5-23
10000	ДКВР-10-13	ДКВР-10-23
20000	ДКВР-20-13	ДКВР-20-23

Приложение 4

Плотность воды $\rho_{\text{в}}$ в зависимости от температуры

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho_{\text{в}}, \text{кг/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho_{\text{в}}, \text{кг/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho_{\text{в}}, \text{кг/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho_{\text{в}}, \text{кг/м}^3$
0	999,9	40	992,2	90	965,3	115	947,4
5	999,8	50	988,1	95	961,9	120	943,1
10	999,7	60	983,2	100	958,3	130	934,8
20	998,2	70	977,8	105	955,1	140	926,1
30	995,7	80	971,8	110	951,0	150	916,9

Приложение 5

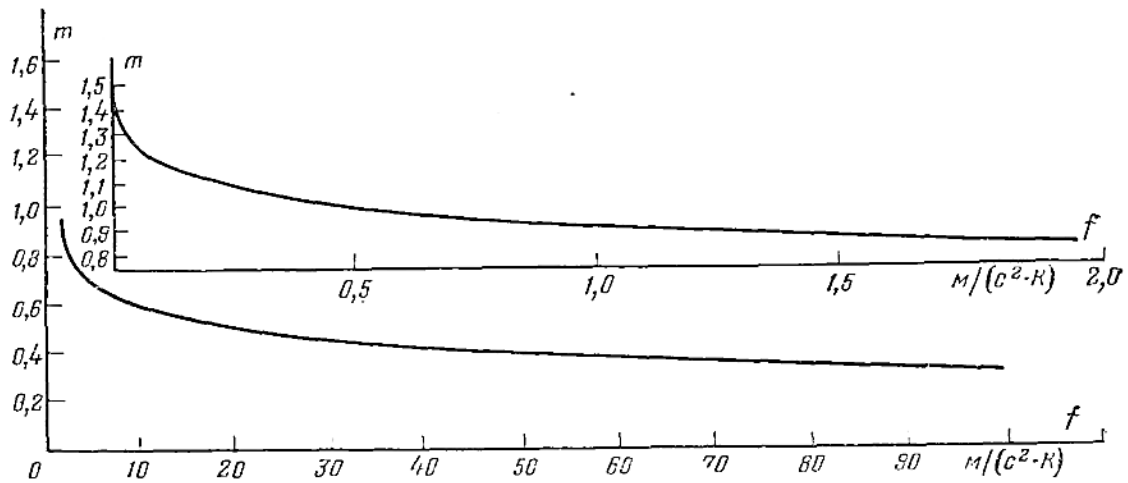
Унифицированный ряд типоразмеров дымовых труб

Высота трубы $H, \text{м}$	Внутренний диаметр устья $d_2, \text{м}$																				
	0,8	0,9	1,0	1,1	1,25	1,4	1,5	1,6	2,0	2,25	2,5	2,75	3,1	3,5	3,9	4,5	5,1	5,9	7,0	8,0	
20																					
25																					
30																					
35																					
40																					
45																					
50																					
55																					
60																					
65																					
70																					
75																					
80																					
90																					
100																					
120																					
150																					
180																					

ПРИМЕЧАНИЕ: 1 – конические кирпичные трубы; 2 – конические кирпичные и цилиндрические железобетонные трубы; 3 – конические железобетонные трубы; 4 – конические кирпичные или железобетонные трубы

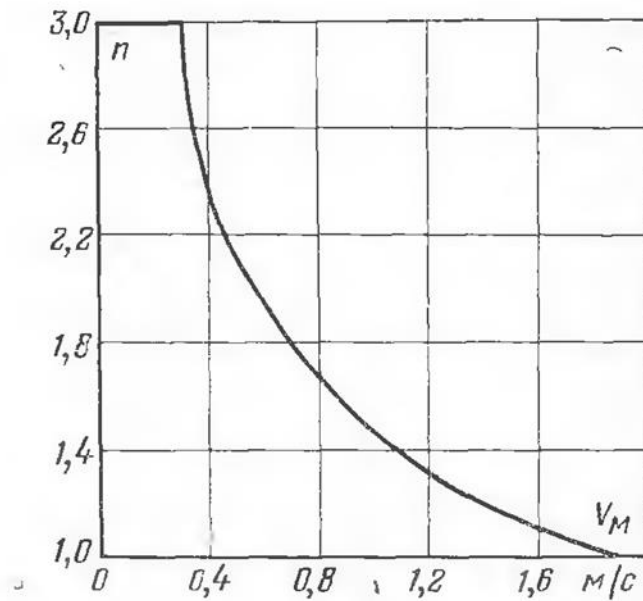
Приложение 6

График для определения коэффициента m



Приложение 7

График для определения коэффициента n



Приложение 8

Значение комплексов А и В для воды

Температура t_H , °C	A, 1/м·°C	B, м/Вт	Температура t_H , °C	A, 1/м·°C	B, м/Вт
102,32	53,6	0,0064	113,32	63,9	0,0072
104,81	53,6	0,00662	115,17	65,7	0,0073
107,14	58,1	0,0068	116,94	67,4	0,0074
109,33	60,1	0,0069	118,62	69,0	0,0076
111,38	62,0	0,0070	120,23	70,6	0,0077

Приложение 9

Физические свойства воды на линии насыщения

Температура, °С	Кинематическая вязкость $\nu \cdot 10^{-6}$, м ² /с.	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/м·°С;	Плотность ρ , кг/м ³	Число подобия Прандтля Pr
0	1,789	0,560	999,9	13,5
10	1,306	0,580	999,7	9,45
20	1,006	0,597	998,2	7,03
30	0,805	0,612	995,7	5,45
40	0,659	0,627	992,2	4,36
50	0,556	0,640	988,1	3,59
60	0,478	0,650	983,1	3,03
70	0,415	0,662	977,8	2,58
80	0,365	0,669	971,8	2,23
90	0,326	0,676	965,3	1,97
100	0,295	0,684	958,4	1,75
110	0,272	0,685	951,0	1,60
120	0,252	0,686	943,1	1,47
130	0,233	0,686	934,8	1,35
140	0,217	0,685	926,1	1,26
150	0,203	0,684	917,0	1,17
160	0,191	0,681	907,4	1,10
170	1,181	0,676	897,3	1,05
180	0,173	0,672	886,9	1,03
190	0,165	0,664	876,0	0,965
200	0,158	0,658	863,0	0,932
210	0,153	0,649	852,8	0,915
220	0,148	0,640	840,3	0,898
230	0,145	0,629	827,3	0,888

НАСЫЩЕННЫЙ ВОДЯНОЙ ПАР (по температурам)

$t, ^\circ\text{C}$	$P,$ МПа	$v',$ $\text{м}^3/\text{кг}$	$v'',$ $\text{м}^3/\text{кг}$	$\rho'',$ $\text{кг}/\text{м}^3$	$h',$ $\text{кДж}/\text{кг}$	$h'',$ $\text{кДж}/\text{кг}$	$r,$ $\text{кДж}/\text{кг}$	$s',$ $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	$s'',$ $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$
0,01	0,0006108	0,0010002	206,3	0,004847	0	2501	2501	0	9,1544
5	0,0008719	0,0010001	147,2	0,006793	21,05	2510	2489	0,0762	9,0241
10	0,0012277	0,0010004	106,42	0,009398	42,04	2519	2477	0,1510	8,8994
15	0,0017041	0,0010010	77,97	0,01282	62,97	2528	2465	0,2244	8,7806
20	0,002337	0,0010018	57,84	0,01729	83,90	2537	2454	0,2964	8,6665
25	0,003166	0,0010030	43,40	0,02304	104,81	2547	2442	0,3672	8,5570
30	0,004241	0,0010044	32,93	0,03037	125,71	2556	2430	0,4366	8,4523
35	0,005622	0,0010061	25,24	0,03962	146,60	2565	2418	0,5049	8,3519
40	0,007375	0,0010079	19,55	0,05115	167,50	2574	2406	0,5723	8,2559
45	0,009584	0,0010099	15,28	0,06544	188,40	2582	2394	0,6384	8,1638
50	0,012335	0,0010121	12,04	0,08306	209,3	2592	2383	0,7038	8,0753
55	0,015740	0,0010145	9,578	0,10440	230,2	2600	2370	0,7679	7,9901
60	0,019917	0,0010171	7,678	0,1302	251,1	2609	2358	0,8311	7,9084
65	0,02501	0,0010199	6,201	0,1613	272,1	2617	2345	0,8934	7,8297
70	0,03117	0,0010228	5,045	0,1982	293,0	2626	2333	0,9549	7,7544
75	0,03855	0,0010258	4,133	0,2420	314,0	2635	2321	1,0157	7,6815
80	0,04736	0,0010290	3,408	0,2934	334,9	2643	2308	1,0753	7,6116
85	0,05781	0,0010324	2,828	0,3536	355,9	2651	2295	1,1342	7,5478

$t, ^\circ\text{C}$	$P,$ МПа	$v',$ $\text{м}^3/\text{кг}$	$v'',$ $\text{м}^3/\text{кг}$	$\rho'',$ $\text{кг}/\text{м}^3$	$h',$ $\text{кДж}/\text{кг}$	$h'',$ $\text{кДж}/\text{кг}$	$r,$ $\text{кДж}/\text{кг}$	$s',$ $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	$s'',$ $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$
90	0,07011	0,0010359	2,361	0,4235	377,0	2659	2282	1,1925	7,4787
95	0,08451	0,0010396	1,982	0,5045	398,0	2668	2270	1,2502	7,4155
100	0,10132	0,0010435	1,673	0,5977	419,1	2676	2257	1,3071	7,3547
105	0,12079	0,0010474	1,419	0,7047	440,2	2683	2243	1,3632	7,2953
110	0,14326	0,0010515	1,210	0,8264	461,3	2691	2230	1,4184	7,2387
115	0,16905	0,0010559	1,036	0,9652	482,5	2698	2216	1,4733	7,1832
120	0,19854	0,0010603	0,8917	1,121	503,7	2706	2202	1,5277	7,1298
125	0,23208	0,0010649	0,7704	1,298	525,0	2713	2188	1,5814	7,0777
130	0,27011	0,0010697	0,6683	1,496	546,3	2721	2174	1,6345	7,0272
135	0,3130	0,0010747	0,5820	1,718	567,5	2727	2159	1,6869	6,9781
140	0,3614	0,0010798	0,5087	1,966	589,0	2734	2145	1,7392	6,9304
145	0,4155	0,0010851	0,4461	2,242	610,5	2740	2130	1,7907	6,8839
150	0,4760	0,0010906	0,3926	2,547	632,2	2746	2114	1,8418	6,8383
155	0,5433	0,0010962	0,3466	2,885	653,9	2753	2099	1,8924	6,7940
160	0,6180	0,0011021	0,3068	3,258	675,5	2758	2082	1,9427	6,7505
165	0,7008	0,0011081	0,2725	3,670	697,3	2763	2066	1,9924	6,7081
170	0,7920	0,0011144	0,2426	4,122	719,2	2769	2050	2,0417	6,6666
175	0,8925	0,0011208	0,2166	4,617	741,1	2773	2032	2,0909	6,6256

$t, ^\circ\text{C}$	$P,$ МПа	$v',$ $\text{м}^3/\text{кг}$	$v'',$ $\text{м}^3/\text{кг}$	$\rho'',$ $\text{кг}/\text{м}^3$	$h',$ $\text{кДж}/\text{кг}$	$h'',$ $\text{кДж}/\text{кг}$	$r,$ $\text{кДж}/\text{кг}$	$s',$ $\text{кДж}/$ $(\text{кг}\cdot\text{К})$	$s'',$ $\text{кДж}/$ $(\text{кг}\cdot\text{К})$
180	1,0027	0,0011275	0,1939	5,157	763,1	2778	2015	2,1395	6,5858
185	1,1234	0,0011344	0,1739	5,750	785,2	2782	1997	2,1876	6,5465
190	1,2553	0,0011415	0,1564	6,394	807,5	2786	1979	2,2357	6,5074
195	1,3989	0,0011489	0,1409	7,097	829,9	2790	1960	2,2834	6,4694
200	1,5551	0,0011565	0,1272	7,862	852,4	2793	1941	2,3308	6,4318
205	1,7245	0,0011644	0,1151	8,688	875,0	2796	1921	2,3777	6,3945
210	1,9080	0,0011726	0,1043	9,588	897,7	2798	1900	2,4246	6,3577
215	2,1062	0,0011812	0,09465	10,56	920,7	2800	1879	2,4715	6,3212
220	2,3201	0,0011900	0,08606	11,62	943,7	2802	1858	2,5179	6,2849
225	2,5504	0,0011992	0,07837	12,75	966,9	2802	1835	2,5640	6,2488
230	2,7979	0,0012087	0,07147	13,99	990,4	2803	1813	2,6101	6,2133
235	3,0635	0,0012187	0,06527	15,32	1013,9	2804	1790	2,6561	6,1780
240	3,3480	0,0012291	0,05967	16,76	1037,5	2803	1766	2,7021	6,1425
245	3,6524	0,0012399	0,05462	18,80	1061,6	2803	1741	2,7478	6,1073
250	3,9776	0,0012512	0,05006	19,98	1085,7	2801	1715	2,7934	6,0721
255	4,325	0,0012631	0,04591	21,78	1110,2	2799	1689	2,8394	6,0366
260	4,694	0,0012755	0,04215	23,72	1135,1	2796	1661	2,8851	6,0013
265	5,087	0,0012886	0,03872	25,83	1160,2	2794	1634	2,9307	5,9667

$t, ^\circ\text{C}$	$P, \text{МПа}$	$v', \text{м}^3/\text{кг}$	$v'', \text{м}^3/\text{кг}$	$\rho'', \text{кг}/\text{м}^3$	$h', \text{кДж}/\text{кг}$	$h'', \text{кДж}/\text{кг}$	$r, \text{кДж}/\text{кг}$	$s', \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	$s'', \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$
270	5,505	0,0013023	0,03560	28,09	1185,3	2790	1605	2,9764	5,9297
275	5,949	0,0013168	0,03274	30,53	1210,7	2785	1574,2	3,0223	5,8938
280	6,491	0,0013321	0,03013	33,19	1236,9	2780	1542,9	3,0681	5,8573
285	6,918	0,0013483	0,02774	36,05	1263,1	2773	1510,2	3,1146	5,8205
290	7,445	0,0013655	0,02554	39,15	1290,0	2766	1476,3	3,1611	5,7827
295	8,002	0,0013839	0,02351	42,53	1317,2	2758	1441,0	3,2079	5,7443
300	8,592	0,0014036	0,02164	46,22	1344,9	2749	1404,2	3,2548	5,7049
305	9,214	0,001425	0,01992	50,20	1373,1	2739	1365,6	3,3026	5,6647
310	9,870	0,001447	0,01832	54,58	1402,1	2727	1325,2	3,3508	5,6233
315	10,561	0,001472	0,01683	59,42	1431,7	2714	1282,3	3,3996	5,5802
320	11,290	0,001499	0,01545	64,72	1462,1	2700	1237,8	3,4495	5,5353
325	12,057	0,001529	0,01417	70,57	1493,6	2684	1190,3	3,5002	5,4891
330	12,865	0,001562	0,01297	77,10	1526,1	2666	1139,6	3,5522	5,4412
335	13,714	0,001599	0,01184	84,46	1559,8	2646	1085,7	3,6056	5,3905
340	14,608	0,001639	0,01078	92,76	1594,7	2622	1027,0	3,6065	5,3361
345	15,548	0,001686	0,009771	102,34	1639	2595	963,5	3,7184	5,2769
350	16,537	0,001741	0,008803	113,6	1671	2565	893,5	3,7786	5,2117
355	17,577	0,001807	0,007869	127,1	1714	2527	813,0	3,8439	5,1385

$t, ^\circ\text{C}$	$P,$ МПа	$v',$ $\text{м}^3/\text{кг}$	$v'',$ $\text{м}^3/\text{кг}$	$\rho'',$ $\text{кг}/\text{м}^3$	$h',$ кДж/кг	$h'',$ кДж/кг	$r,$ кДж/кг	$s',$ кДж/ (кг·К)	$s'',$ кДж/ (кг·К)
360	18,674	0,001894	0,006943	144,0	1762	2481	719,3	3,9162	5,0530
365	19,830	0,00202	0,00599	166,8	1817	2421	603,5	4,0009	4,9463
370	21,053	0,00222	0,00493	203	1893	2331	438,4	4,1137	4,7951
375	22,522	0,00280	0,00347	288	485,3	512,7	27,4	1,0332	1,0755

Примечание. Параметры критического состояния: $t_{\text{кр}} = 374,15^\circ$, $P_{\text{кр}} = 22,129$ МПа, $v_{\text{кр}} = 0,00326$ м³/кг.

НАСЫЩЕННЫЙ ВОДЯНОЙ ПАР (по давлениям)

P , МПа	t , °C	v' , м ³ /кг	v'' , м ³ /кг	ρ'' , кг/м ³	h' , кДж/кг	h'' , кДж/кг	r , кДж/кг	s' , кДж/ (кг·К)	s'' , кДж/ (кг·К)
0,0010	6,92	0,0010001	129,9	0,00770	29,32	2513	2484	0,1054	8,975
0,0015	13,038	0,0010007	87,90	0,001138	54,75	2525	2470	0,1958	8,827
0,0020	17,514	0,0010014	66,97	0,01493	73,52	2533	2459	0,2609	8,722
0,0025	21,094	0,0010021	54,24	0,01843	88,50	2539	2451	0,3124	8,642
0,0030	24,097	0,0010028	45,66	0,02190	101,04	2545	2444	0,3546	8,576
0,0035	26,692	0,0010035	39,48	0,02533	111,86	2550	2438	0,3908	8,521
0,0040	28,979	0,0010041	34,81	0,02873	121,42	2554	2433	0,4225	8,473
0,0045	31,033	0,0010047	31,13	0,03211	130,00	2557	2427	0,4507	8,431
0,0050	32,88	0,0010053	28,19	0,03547	137,83	2561	2423	0,4761	8,393
0,0060	36,18	0,0010064	23,74	0,04212	151,50	2567	2415	0,5207	8,328
0,0070	39,03	0,0010075	20,53	0,04871	163,43	2572	2409	0,5591	8,274
0,0080	41,54	0,0010085	18,10	0,05525	173,90	2576	2402	0,5927	8,227
0,009	43,79	0,0010094	16,20	0,06172	183,3	2580	2397	0,6225	8,186
0,010	45,84	0,0010103	14,68	0,06812	191,9	2584	2392	0,6492	8,149
0,011	47,72	0,0010111	13,40	0,07462	199,7	2588	2388	0,6740	8,116
0,012	49,45	0,0010119	12,35	0,08097	207,0	2591	2384	0,6966	8,085
0,013	51,07	0,0010126	11,46	0,08726	213,8	2594	2380	0,7174	8,057
0,014	52,58	0,0010133	10,69	0,09354	220,1	2596	2376	0,7368	8,031
0,015	54,00	0,0010140	10,02	0,0998	226,1	2599	2373	0,7550	8,007
0,020	60,08	0,0010171	7,647	0,1308	251,4	2609	2358	0,8321	7,907
0,025	64,99	0,0010199	6,202	0,1612	272,0	2618	2346	0,8934	7,830
0,030	69,12	0,0010222	5,226	0,1913	289,3	2625	2336	0,9441	7,769
0,040	75,88	0,0010264	3,994	0,2504	317,7	2636	2318	1,0261	7,670
0,050	81,35	0,0010299	3,239	0,3087	340,6	2645	2204	1,0910	7,593

$P,$ МПа	$t, ^\circ\text{C}$	$v',$ $\text{м}^3/\text{кг}$	$v'',$ $\text{м}^3/\text{кг}$	$\rho'',$ $\text{кг}/\text{м}^3$	$h',$ $\text{кДж}/\text{кг}$	$h'',$ $\text{кДж}/\text{кг}$	$r,$ $\text{кДж}/\text{кг}$	$s',$ $\text{кДж}/$ $(\text{кг}\cdot\text{K})$	$s'',$ $\text{кДж}/$ $(\text{кг}\cdot\text{K})$
0,06	85,95	0,0010330	2,732	0,3661	360,0	2653	2293	1,1453	7,531
0,07	89,97	0,0010359	2,364	0,4230	376,8	2660	2283	1,1918	7,479
0,08	93,52	0,0010385	2,087	0,4797	391,8	2665	2273	1,2330	7,434
0,09	96,72	0,0010409	1,869	0,5350	405,3	2670	2265	1,2696	7,394
0,10	99,64	0,0010432	1,694	0,5903	417,4	2675	2258	1,3026	7,360
0,11	102,32	0,0010452	1,550	0,6453	428,9	2679	2250	1,3327	7,328
0,12	104,81	0,0010472	1,429	0,6999	439,4	2683	2244	1,3606	7,298
0,13	107,14	0,0010492	1,325	0,7545	449,2	2687	2238	1,3866	7,271
0,14	109,33	0,0010510	1,236	0,8088	458,5	2690	2232	1,4109	7,246
0,15	111,38	0,0010527	1,159	0,8627	467,2	2693	2226	1,4336	7,223
0,16	113,32	0,0010543	1,091	0,9164	475,4	2696	2221	1,4550	7,202
0,17	115,17	0,0010559	1,031	0,9699	483,2	2699	2216	1,4752	7,182
0,18	116,94	0,0010575	0,9773	1,023	490,7	2702	2211	1,4943	7,163
0,19	118,62	0,0010591	0,9290	1,076	497,9	2704	2206	1,5126	7,145
0,20	120,23	0,0010605	0,8854	1,129	504,8	2707	2202	1,5302	7,127
0,21	121,78	0,0010619	0,8459	1,182	511,4	2709	2198	1,5470	7,114
0,22	123,27	0,0010633	0,8098	1,235	517,8	2711	2193	1,5630	7,096
0,23	124,71	0,0010646	0,7768	1,287	524,0	2713	2189	1,5783	7,081

$P,$ МПа	$t, ^\circ C$	$v',$ m^3/kg	$v'',$ m^3/kg	$\rho'',$ kg/m^3	$h',$ кДж/кг	$h'',$ кДж/(кг)	$r,$ кДж/кг	$s',$ кДж/ (кг К)	$s'',$ кДж/ (кг К)
0,24	126,09	0,0010659	0,7465	1,340	529,8	2715	2185	1,5929	7,067
0,25	127,43	0,0010672	0,7185	1,392	535,4	2717	2182	1,6071	7,053
0,26	128,73	0,0010685	0,6925	1,444	540,9	2719	2178	1,621	7,040
0,27	129,98	0,0010697	0,6684	1,496	546,2	2721	2175	1,634	7,027
0,28	131,20	0,0010709	0,6461	1,548	551,4	2722	2171	1,647	7,015
0,29	132,39	0,0010721	0,6253	1,599	556,5	2524	2167	1,660	7,003
0,30	133,53	0,0010733	0,6057	1,651	561,4	2725	2164	1,672	6,992
0,31	134,66	0,0010744	0,5873	1,703	56,3	2727	2162	1,683	6,981
0,32	135,75	0,0010754	0,5701	1,754	571,1	2728	2157	1,695	6,971
0,33	136,82	0,0010765	0,5539	1,805	575,7	2730	2154	1,706	6,961
0,34	137,86	0,0010776	0,5386	1,857	580,2	2731	2151	1,717	6,951
0,35	138,88	0,0010786	0,5241	1,908	584,5	2732	2148	1,728	6,941
0,36	139,87	0,0010797	0,5104	1,959	588,7	2734	2145	1,738	6,932
0,37	140,84	0,0010807	0,4975	2,010	592,8	2735	2142	1,748	6,923
0,38	141,79	0,0010817	0,4852	2,061	596,8	2736	2139	1,758	6,914
0,39	142,71	0,0010827	0,4735	2,112	600,8	2737	2136	1,768	6,905
0,40	143,62	0,0010836	0,4624	2,163	604,7	2738	2133	1,777	6,897
0,41	144,51	0,0010845	0,4518	2,213	608,5	2740	2131	1,780	6,889
0,42	145,39	0,0010855	0,4416	2,264	612,3	2741	2129	1,795	6,881
0,43	146,25	0,0010865	0,4319	2,315	616,1	2742	2126	1,804	6,873
0,44	147,09	0,0010874	0,4227	2,366	619,8	2743	2123	1,812	6,865

$P,$ МПа	$t, ^\circ C$	$v',$ m^3/kg	$v'',$ m^3/kg	$\rho'',$ kg/m^3	$h',$ кДж/кг	$h'',$ кДж/(кг)	$r,$ кДж/кг	$s',$ кДж/(кг К)	$s'',$ кДж/(кг К)
0,45	147,92	0,0010883	0,4139	2,416	623,4	2744	2121	1,821	6,857
0,50	151,84	0,0010927	0,3747	2,669	640,1	2749	2109	1,860	6,822
0,60	158,84	0,0011007	0,3156	3,169	670,5	2757	2086	1,931	6,761
0,7	164,96	0,0011081	0,2728	3,666	697,2	2764	2067	1,992	6,709
0,8	170,42	0,0011149	0,2403	4,161	720,9	2769	2048	2,046	6,663
0,9	175,35	0,0011213	0,2149	4,654	742,8	2774	2031	2,094	6,623
1,0	179,88	0,0011273	0,1946	5,139	762,7	2778	2015	2,138	6,587
1,1	184,05	0,0011331	0,1775	5,634	781,1	2781	2000	2,179	6,554
1,2	187,95	0,0011385	0,1633	6,124	798,3	2785	1987	2,216	6,523
1,3	191,60	0,0011438	0,1512	6,614	814,5	2787	1973	2,251	6,495
1,4	195,04	0,0011490	0,1408	7,103	830,0	2790	1960	2,248	6,469
1,5	198,28	0,0011539	0,1317	7,593	844,6	2792	1947	2,314	6,445
1,6	201,36	0,0011586	0,1238	8,080	858,3	2793	1935	2,344	6,422
1,7	204,30	0,0011632	0,1167	8,569	871,6	2795	1923	2,371	6,400
1,8	207,10	0,0011678	0,1104	9,058	884,4	2796	1912	2,397	6,379
1,9	209,78	0,0011722	0,1047	9,549	896,6	2798	1901	2,422	6,359
2,0	210,37	0,0011766	0,09958	10,041	908,5	2799	1891	2,447	6,340
2,1	214,84	0,0011809	0,09492	10,54	919,8	2800	1880	2,470	6,322
2,2	217,24	0,0011851	0,09068	11,03	930,9	2801	1870	2,492	6,305
2,3	219,55	0,0011892	0,08679	11,52	941,5	2801	1860	2,514	6,288
2,4	221,77	0,0011932	0,08324	12,01	951,8	2802	1850	2,534	6,272

P , МПа	t , $^{\circ}C$	v' , m^3/kg	v'' , m^3/kg	ρ'' , kg/m^3	h' , кДж/кг	h'' , кДж/(кг)	r , кДж/кг	s' , кДж/ (кг К)	s'' , кДж/ (кг К)
2,5	223,93	,0011972	0,07993	12,51	961,8	2802	1840	2,554	6,256
2,6	226,03	0,0012012	0,07688	13,01	971,7	2803	1831	2,573	6,242
2,7	228,06	0,0012050	0,07496	13,50	981,3	2803	1822	2,592	6,227
2,8	230,04	0,0012088	0,07141	14,00	990,4	2803	1813	2,661	6,213
2,9	231,96	0,0012126	0,06895	14,50	999,4	2803	1804	2,628	6,199
3,0	233,83	0,0012163	0,06665	15,00	1008,3	2804	1796	2,646	6,186
3,2	237,44	0,0012239	0,06246	16,01	1025,3	2803	1778	2,679	6,161
3,4	240,88	0,0012310	0,05875	17,02	1041,9	2803	1761	2,710	6,137
3,6	244,16	0,0012380	0,05543	18,04	1057,3	2802	1745	2,740	6,113
3,8	247,31	0,0012450	0,05246	19,06	1072,7	2802	1729	2,769	6,091
4,0	250,33	0,0012520	0,04977	20,09	1087,5	2801	1713	2,796	6,070
4,2	253,24	0,0012588	0,04732	21,13	1101,7	2800	1698	2,823	6,049
4,4	256,05	0,0012656	0,04508	22,18	1115,3	2798	1683	2,849	6,029
4,6	258,75	0,0012724	0,04305	23,23	1128,8	2797	1668	2,874	6,010
4,8	261,37	0,0012790	0,04118	24,29	1141,8	2796	1654	2,898	5,991
5,0	263,91	0,0012857	0,03944	25,35	1154,4	2794	1640	2,921	5,973
5,5	269,94	0,0013021	0,03564	28,06	1184,9	2790	1604,6	2,976	5,930
6,0	275,56	0,0013185	0,03243	30,84	1213,9	2785	1570,8	3,027	5,890
6,5	280,83	0,0013347	0,02973	33,64	1241,3	2779	1537,5	3,076	5,851

$P,$ МПа	$t, ^\circ C$	$v',$ m^3/kg	$v'',$ m^3/kg	$\rho'',$ kg/m^3	$h',$ кДж/кг	$h'',$ кДж/(кг)	$r,$ кДж/кг	$s',$ кДж/(кг К)	$s'',$ кДж/(кг К)
7,0	285,80	0,0013510	0,02737	36,54	1267,4	2772	1504,9	3,122	5,814
7,5	290,50	0,0013673	0,02532	39,49	1292,7	2766	1472,8	3,166	5,779
8,0	294,98	0,0013838	0,02352	42,52	1317,0	2758	1441,1	3,208	5,745
8,5	299,24	0,0014005	0,02192	45,48	1340,8	2751	1409,8	3,248	5,711
9,0	303,32	0,0014174	0,02048	48,83	1363,7	2743	1379,3	3,287	5,678
9,5	307,22	0,0014345	0,01919	52,11	1385,9	2734	1348,4	3,324	5,646
10,0	310,96	0,0014521	0,01803	55,46	1407,7	2725	1317,0	3,360	5,625
11,0	318,04	0,001489	0,01598	62,58	1450,2	2705	1255,4	3,430	5,553
12,0	324,63	0,001527	0,01426	70,13	1491,1	2685	1193,5	3,496	5,492
13,0	330,81	0,001567	0,01277	78,30	1531,5	2662	1130,8	3,561	5,432
14,0	336,63	0,001611	0,01149	87,03	1570,8	2638	1066,9	3,623	5,372
15	342,11	0,001658	0,01035	96,62	1610	2611	1001,1	3,684	5,310
16	347,32	0,001710	0,009318	107,3	1650	2582	932,0	3,746	5,247
17	352,26	0,001768	0,008382	119,3	1690	2548	858,3	3,807	5,177
18	356,96	0,001837	0,007504	133,2	1732	2510	778,2	3,871	5,107
19	361,44	0,001921	0,00668	140,7	1776	2466	690	3,938	5,027
20	365,71	0,00204	0,00585	170,9	1827	2410	583	4,015	4,928
21	369,79	0,00221	0,00498	200,7	1888	2336	448	4,108	4,803
22	373,7	0,00273	0,00376	272,5	2016	2168	152	4,303	4,591

ВОДА И ПЕРЕГРЕТЫЙ ПАР (числа слева от ступенчатой линии относятся к воде)

P , МПа	t , °C	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
0,004	v	0,001002	36,12	38,45	40,75	43,07	45,39	47,69	50,01	52,31	54,63
	i	83,7	2574	2612	2650	2688	2726	2764	2803	2841	2880
	s	0,964	8,537	8,651	8,762	8,867	8,966	9,060	9,150	9,238	9,321
0,008	v	0,001002	0,001008	19,19	20,34	21,50	22,66	23,82	24,97	26,13	27,20
	i	83,7	167,5	2612	2650	2688	2726	2764	2802	2841	2880
	s	0,2964	0,5715	8,331	8,441	8,546	8,645	8,740	8,830	8,917	9,000
0,010	v	0,001002	0,001008	15,35	16,27	17,20	18,13	19,06	19,98	20,90	21,83
	i	83,7	167,5	2611	2640	2688	2726	2764	2802	2841	2879
	s	0,2964	0,5715	8,227	8,337	8,442	8,542	8,636	8,727	8,814	8,897
0,012	v	0,001002	0,001008	12,78	13,55	14,33	15,10	15,87	16,64	17,42	18,19
	i	83,7	167,5	2611	2649	2687	2725	2764	2802	2841	2879
	s	0,2964	0,5715	8,143	8,253	8,358	8,457	8,552	8,643	8,730	8,813
0,014	v	0,001002	0,001008	10,95	11,61	12,27	12,94	13,60	14,26	14,92	15,58
	i	83,7	167,5	2611	2649	2687	2725	2763	2802	2840	2879
	s	0,2964	0,5715	8,071	8,181	8,287	8,386	8,481	8,572	8,659	8,742

P , $МПа$	t , $^{\circ}C$	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
0,016	v	0,001002	0,001008	9,573	10,160	10,740	11,320	11,899	12,478	13,057	13,635
	i	83,7	167,5	2610	2649	2687	2725	2,763	2802	2840	2879
	s	0,2964	0,5715	8,009	8,120	8,225	8,324	8,419	8,510	8,597	8,680
0,02	v	0,001002	0,001008	0,001017	8,119	8,584	9,049	9,513	9,977	10,441	10,905
	i	83,7	167,5	251,1	2648	2687	2725	2763	2801	2840	2879
	s	0,2964	0,5715	0,8307	8,015	8,120	8,220	8,315	8,406	8,493	8,576
0,03	v	0,001002	0,001008	0,001017	5,400	5,713	6,025	6,335	6,645	6,955	7,264
	i	83,7	167,5	251,1	2646	2685	2724	2762	2801	2839	2878
	s	0,2964	0,5715	0,8307	7,825	7,931	8,031	8,126	8,217	8,304	8,388
0,1	v	0,001002	0,001008	0,001017	0,001029	1,695	1,795	1,889	1,984	2,078	2,172
	i	83,9	167,5	251,1	334,9	2676	2717	2757	2796	2835	2875
	s	0,2964	0,5715	0,8307	1,0748	7,361	7,465	7,562	7,654	7,743	7,828

P , МПа	t , °C	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
0,12	v	0,001002	0,001008	0,001017	0,001029	0,00104	1,491	1,572	1,650	1,729	1,807
	i	83,9	167,5	251,1	334,9	3	2715	2755	2795	2834	2874
	s	0,2964	0,5715	0,8307	1,0748	419,0 1,3067	7,475	7,475	7,668	7,657	7,742
0,6	v	0,001002	0,001008	0,001017	0,001029	0,00104	0,00106	0,00108	0,3167	0,3348	0,3520
	i	84,3	167,9	251,5	335,2	3	503,1	589,1	2759	2805	2849
	s	0,2964	0,7516	0,8302	1,0744	419,1 1,0744	1,5265	1,738	6,767	6,869	6,963
0,8	v	0,001002	0,001008	0,001017	0,001029	0,00104	0,00106	0,00108	0,00110	0,2473	0,2609
	i	84,5	168,1	251,7	335,3	3	503,8	589,1	2	2792	2839
	s	0,2962	0,5714	0,8300	1,0742	419,2 1,3060	1,5263	1,737	675,3 1,941	6,715	6,814
1,0	v	0,001001	0,001008	0,001017	0,001029	0,00104	0,00106	0,00107	0,00110	0,1949	0,2060
	i	84,7	168,3	251,8	335,4	3	503,9	9	2	2778	2827
	s	0,2960	0,5712	0,8298	1,0740	419,3 1,3058	1,5261	589,2 1,737	675,4 1,941	6,588	6,692
1,2	v	0,001001	0,001007	0,001017	0,001023	0,00104	0,00106	0,00107	0,00100	0,1645	0,1690
	i	84,9	168,5	251,9	335,5	2	504,0	9	2	2790	2816
	s	0,2959	0,5711	0,8297	1,0738	419,4 1,3056	1,5259	589,3 1,737	675,5 1,940	6,534	6,588

$P,$ $МПа$	$t,$ $^{\circ}C$	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
1,4	v	0,001001	0,001007	0,001016	0,001028	0,001043	0,00106	0,00107	0,00110	0,00112	0,1429
	i	85,1	168,7	252,1	335,7	419,6	0	9	2	7	2803
	s	0,2958	0,5710	0,8296	1,0736	1,3054	504,2 1,5257	589,5 1,736	675,7 1,940	763,2 2,137	6,497
1,6	v	0,001001	0,001007	0,001016	0,001028	0,001043	0,00106	0,00107	0,00110	0,00112	0,00115
	i	85,3	168,8	252,2	335,8	419,7	0	9	1	7	7
	s	0,2958	0,5710	0,8296	1,0735	1,3052	504,3 1,5256	589,6 1,736	675,7 1,940	763,2 2,137	852,4 2,329
1,8	v	0,001001	0,001007	0,001016	0,001028	0,001043	0,00105	0,00107	0,00110	0,00112	0,00115
	i	85,5	169,0	252,4	336,0	419,9	9	9	1	7	7
	s	0,2957	0,5709	0,8295	1,0733	1,3050	504,5 1,5254	589,8 1,736	675,8 1,939	763,2 2,136	852,4 2,328
2	v	0,001001	0,001007	0,001016	0,001028	0,001042	0,00105	0,00107	0,00110	0,00112	0,00115
	i	85,7	169,2	252,6	336,2	420,1	9	9	1	7	6
	s	0,2957	0,5708	0,8294	1,0731	1,3048	504,7 1,5252	589,9 1,736	675,9 1,939	763,2 2,136	852,4 2,328
3	v	0,001000	0,001007	0,001016	0,001028	0,001042	0,00105	0,00107	0,00110	0,00112	0,00115
	i	86,7	170,1	253,5	337,0	420,9	9	8	0	6	5
	s	0,2956	0,5707	0,8290	1,0726	1,3038	505,4 1,5244	590,6 1,735	676,4 1,938	763,7 2,134	852,6 2,326

$P,$ $МПа$	$t,$ $^{\circ}C$	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
8	v	0,000983	0,001004	0,001013	0,001025	0,001040	0,001056	0,001075	0,001097	0,001122	0,001150
	i	91,3	174,6	257,8	341,2	424,9	509,1	593,9	679,6	766,7	855,0
	s	0,2943	0,5686	0,8260	1,0689	1,2996	1,5198	1,730	1,931	1,126	2,317
9	v	0,000998	0,001004	0,001013	0,001025	0,001039	0,001056	0,001075	0,001097	0,001121	0,001150
	i	92,3	175,5	258,7	342,1	425,7	509,8	594,6	680,3	767,4	855,5
	s	0,2941	0,5681	0,8253	1,0682	1,2988	1,5189	1,729	1,930	2,125	2,316
10	v	0,000998	0,001003	0,001013	0,001025	0,001039	0,001055	0,001074	0,001096	0,001120	0,001148
	i	93,2	176,9	259,6	342,9	426,5	510,5	595,3	681,0	768,0	856,0
	s	0,2939	0,5674	0,8247	1,0676	1,2982	1,5182	1,728	1,929	1,123	2,314
12	v	0,000997	0,001002	0,001012	0,001024	0,001038	0,001054	0,001073	0,001095	0,001119	0,001162
	i	95,1	178,2	261,4	344,6	428,1	512,0	596,7	682,4	769,1	901,5
	s	0,2935	0,5668	0,8236	1,0662	1,2967	1,5165	1,727	1,927	2,121	2,404
13	v	0,000996	0,001002	0,001011	0,001023	0,001037	0,001054	0,001073	0,001094	0,001118	0,001146
	i	96,0	179,0	262,2	345,4	428,9	512,7	597,4	683,0	769,7	857,4
	s	0,2931	0,5664	0,8230	1,0655	1,2959	1,5156	1,726	1,926	2,119	2,309

P , МПа	t , °C	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
14	v	0,000996	0,001002	0,001011	0,001023	0,001037	0,001053	0,001072	0,001093	0,001117	0,001145
	i	96,9	179,9	263,0	346,2	429,6	513,4	598,0	683,6	770,2	857,9
	s	0,2930	0,5660	0,8224	1,0648	1,2951	1,5148	1,724	1,925	2,118	2,308
16	v	0,000995	0,001001	0,001010	0,001022	0,001036	0,001052	0,001071	0,001092	0,001116	0,001143
	i	98,9	181,7	264,7	347,9	431,2	514,9	599,4	684,9	771,3	858,8
	s	0,2925	0,5653	0,8212	1,0634	1,2937	1,5131	1,722	1,922	2,116	2,305
24	v	0,000991	0,000997	0,001007	0,001018	0,001032	0,001048	0,001066	689,9	0,001110	0,001136
	i	106,4	188,8	271,5	354,3	437,2	520,80	604,9	1.915	775,7	862,6
	s	0,2911	0,5625	0,8169	1,0582	1,2881	1,5062	1,715		2,108	2,295
30	v	0,009886	0,000995	0,001004	0,001016	0,001029	0,001045	0,001063	0,001083	0,001105	0,001131
	i	112,0	194,1	276,5	359,1	441,9	525,1	609,0	693,6	779,1	865,4
	s	0,2902	0,5603	0,8140	1,0545	1,2834	1,5024	1,709	1,908	2,100	2,287

Продолжение прил. 12

P , МПа	t , °C	220	240	260	280	300	350	400	450	500	600
0,004	v	56,93	59,24	61,56	63,87	66,18	71,96	77,73	85,31	89,28	100,84
	i	2918	2958	2997	3037	3077	3177	3280	3384	3490	3707
	s	9,402	9,479	9,554	9,627	9,698	9,866	10,024	10,174	10,317	10,585
0,008	v	28,44	29,60	30,75	31,90	33,06	35,94	38,84	41,72	44,61	50,38
	i	2918	2957	2997	3037	3077	3177	3280	3384	3490	3707
	s	9,081	9,159	9,234	9,306	9,377	9,546	9,704	9,854	9,997	10,265
0,010	v	22,76	23,68	24,60	25,53	26,46	28,76	31,08	33,39	35,70	40,32
	i	2918	2957	2997	3037	3077	3177	3280	3384	3490	37,07
	s	8,978	9,056	9,131	9,203	9,274	9,443	9,601	9,751	9,895	10,162
0,012	v	18,96	19,73	20,50	21,27	22,04	23,96	25,89	27,82	29,74	33,60
	i	2918	2957	2996	3036	3077	3177	3280	3384	3490	3707
	s	8,894	8,972	9,047	9,119	9,190	9,359	9,517	9,667	9,810	10,078
0,014	v	16,24	16,90	17,56	18,22	18,88	20,53	22,18	29,83	25,49	28,79
	i	2918	2957	2997	3037	3077	3177	3280	3384	3490	3707
	s	8,823	8,900	8,975	9,048	9,119	9,288	9,446	9,596	9,739	10,007

Продолжение прил. 12

P, МПа	t, °C	220	240	260	280	300	350	400	450	500	600
0,016	v	14,213	14,700	15,367	15,943	16,52	17,96	19,41	20,85	22,20	25,18
	i	2918	2957	2997	3037	3077	3177	3280	3384	3490	3707
	s	8,761	8,838	8,913	8,986	9,057	9,226	9,384	9,534	9,678	9,945
0,02	v	11,369	11,832	12,295	12,758	13,220	14,376	15,530	16,68	17,82	20,15
	i	2918	2957	2996	3036	3077	3177	3280	3384	3490	3707
	s	8,657	8,735	8,810	8,883	8,954	9,123	9,281	9,431	9,575	9,842
0,03	v	7,573	7,882	8,191	8,500	8,809	9,580	10,351	11,121	11,891	13,430
	i	2917	2956	2996	3036	3076	3177	3280	3384	3490	3707
	s	8,469	8,547	8,622	8,695	8,766	8,935	9,093	9,244	9,388	9,655
0,1	v	2,266	2,359	2,452	2,545	2,638	2,871	3,102	3,334	3,565	4,028
	i	2914	2954	2993	3033	3074	3175	3278	3382	3488	3706
	s	7,910	7,988	8,064	8,139	8,211	8,381	8,541	8,690	8,833	9,097
0,12	v	1,886	1,964	2,042	2,120	2,197	2,391	2,584	2,777	2,970	3,357
	i	2913	2953	2993	3033	3073	3174	3278	3382	3488	3705
	s	7,824	7,903	7,979	8,053	8,126	8,296	8,456	8,606	8,749	9,013

P, МПа	t, °C	220	240	260	280	300	350	400	450	500	600
0,6	v	0,3688	0,3855	0,4019	0,4181	0,4342	0,4741	0,5136	0,5528	0,5919	0,6697
	i	2891	2933	2975	3017	3059	3164	3270	3376	3483	3701
	s	7,051	7,135	7,215	7,292	7,366	7,541	7,704	7,857	8,001	8,266
0,8	v	0,2739	0,2867	0,2993	0,3118	0,3240	0,3542	0,3842	0,4137	0,4432	0,5018
	i	2883	2926	2969	3011	3054	3160	3267	3373	3481	3699
	s	6,905	6,991	7,073	7,151	7,226	7,404	7,568	7,722	7,866	8,132
1,0	v	0,2169	0,2274	0,2377	0,2478	0,2578	0,2822	0,3065	0,3303	0,3539	0,4010
	i	28,74	2918	2962	3005	3048	3156	3263	3370	3479	3698
	s	6,788	6,877	6,961	7,040	7,116	7,296	7,461	7,615	7,761	8,027
1,2	v	0,1788	0,1879	0,1967	0,2054	0,2139	0,2343	0,2547	0,2747	0,2944	0,3339
	i	2865	2911	2955	2999	3042	3151	3260	3368	3477	3696
	s	6,688	6,780	6,866	6,947	7,025	7,026	7,373	7,529	7,674	7,942
1,4	v	0,1515	0,1596	0,1673	0,1748	0,1823	0,2001	0,2176	0,2349	0,2520	0,2858
	i	2855	2902	2948	2992	3036	3147	3256	3365	3474	3695
	s	6,602	6,697	6,784	6,867	6,945	7,130	7,299	7,455	7,601	7,870

P, МПа	t, °C	220	240	260	280	300	350	400	450	500	600
1,6	v	0,1309	0,1382	0,1452	0,1519	0,1585	0,1743	0,1899	0,2051	0,2201	0,2499
	i	2844	2893	2940	2986	3030	3142	3253	3363	3472	3693
	s	6,524	6,622	6,711	6,796	6,877	7,063	7,233	7,890	7,537	7,806
1,8	v	0,1149	0,1216	0,1280	0,1341	0,1401	0,1545	0,1683	0,1819	0,1953	0,2219
	i	2833	2884	2932	2979	3025	3138	3249	3360	3470	3691
	s	6,452	6,554	6,646	6,732	6,814	7,003	7,175	7,333	7,480	7,750
2	v	0,1021	0,1084	0,1143	0,1200	0,1255	0,1384	0,1511	0,1634	0,1755	0,1995
	i	2821	2875	2924	2972	3019	3134	3246	3357	3468	3690
	s	6,385	6,491	6,585	6,674	6,757	6,049	7,122	7,282	7,429	7,701
3	v	0,001189	0,06826	0,07294	0,07720	0,08119	0,9051	0,09929	0,1078	0,1161	0,1325
	i	943,5	2823	2882	2937	2988	3111	3229	3343	3456	3682
	s	2,514	6,225	6,337	6,438	6,530	6,735	6,916	7,080	7,231	7,506
8	v	0,001183	0,001222	0,001269	0,001328	0,02429	0,03003	0,03438	0,03821	0,04177	0,04844
	i	945,1	1037,9	1134,4	1235,4	2784	2985	3135	3270	3397	3640
	s	2,504	2,688	2,873	3,059	5,788	6,126	6,358	6,552	6,722	7,019

P, МПа	t, °C	220	240	260	280	300	350	400	450	500	600
260	9	v 0,001182 945,2 2,502	0,001221 1038,1 2,686	0,001267 1134,2 2,870	0,001325 1234,9 3,056	0,001402 1344,3 3,249	0,02586 2954 6,033	0,03001 3114 6,280	0,03354 3254 6,481	0,03680 3386 6,656	0,04285 3631 6,957
	10	v 0,001181 945,8 2,500	0,001219 1038,3 2,684	0,001265 1134,1 2,868	0,001322 1234,5 3,053	0,001397 1342,2 3,244	0,02247 2920 5,940	0,02646 3093 6,207	0,02979 3239 6,416	0,03281 3372 6,596	0,03837 3621 6,901
	12	v 0,001179 946,6 2,497	0,001216 1038,7 2,680	0,001261 1133,9 2,863	0,001316 1233,7 3,046	0,001389 1340,0 3,235	0,01726 2844 5,755	0,02113 3049 6,071	0,2414 3206 6,298	0,02681 3347 6,487	0,03163 3603 6,803
	13	v 0,001178 946,9 2,495	0,001215 1038,9 2,678	0,001259 1133,8 2,860	0,001314 1233,3 3,043	0,001385 1339,0 3,230	0,01514 2799 5,657	0,01905 3026 6,006	0,02197 3189 6,243	0,02450 3334 6,438	0,2003 3594 6,758
	14	v 0,001177 947,3 2,493	0,001214 1039,1 2,676	0,001258 1133,8 2,858	0,001311 1232,9 3,04	0,001309 1338,0 3,226	0,01325 2750 5,55	0,01726 3000 5,942	0,02010 3172 6,190	0,02252 3321 6,390	0,02683 3585 6,716

P, МПа	t, °C	220	240	260	280	300	350	400	450	500	600
16	v	0,001174	0,001211	0,001254	0,001306	0,001374	0,00978	0,01429	0,01704	0,01930	0,02322
	i	948,0	1039,5	1133,7	1232,2	1336,2	2612	2945	3137	3294	3567
	s	2,489	2,672	2,853	3,035	3,218	5,302	5,816	6,090	6,303	6,640
24	v	0,001166	0,001200	0,001240	0,001288	0,001348	0,001612	0,00676	0,00977	0,01174	0,02322
	i	950,9	1041,3	1134,0	1230,3	1331,2	1625	2638	2971	3174	3567
	s	2,477	2,657	2,835	3,011	3,190	3,684	5,236	5,723	5,999	6,640
30	v	0,001160	0,001193	0,001231	0,001277	0,001331	0,001156	0,00283	0,00672	0,00869	0,01144
	i	953,3	1042,9	1134,7	1229,0	1329,0	1608	2155	2816	3073	3434
	s	2,468	2,647	2,822	2,996	3,171	3,640	4,476	5,446	5,799	6,242

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ЧАСТЬ 1 Теоретические и методологические основы взаимодействия дисциплины «Эксплуатация теплоэнергетических установок» с дисциплинами профессионального цикла.....	5
Глава 1 Теоретические и методологические основы взаимодействия с дисциплиной «Теплотехника».....	5
1.1 Свойства реальных газов.....	5
1.2 Второй закон термодинамики.....	7
1.3 Водяной пар.....	10
1.4 Термодинамика потока. Истечение водяного пара.....	15
1.5 Дросселирование газов.....	19
1.6 Теория теплообмена.....	23
1.7 Паросиловые установки.....	30
1.7.1 Устройство и классификация паровых турбин.....	31
1.7.2 Принцип действия паросиловых установок.....	35
1.7.3 Цикл Ренкина.....	36
1.7.4 Влияние основных параметров на термический КПД цикла Ренкина.....	38
1.7.5 Пути повышения экономичности теплосиловых установок.....	40
Контрольные вопросы.....	46
ЧАСТЬ 2 Теоретические и методологические основы взаимодействия с дисциплиной «Топливо и смазочные материалы».....	47
2.1 Состав и характеристика топлива.....	47
2.2 Горение топлива. Физический процесс горения топлива.....	52
2.3 Расчеты процессов горения топлива.....	54
2.3.1 Расход воздуха, необходимого для горения.....	54
2.3.2 Состав и объем продуктов сгорания.....	55
2.3.3 Энтальпия продуктов сгорания и воздуха.....	56
Контрольные вопросы.....	57

ЧАСТЬ 3 Краткий лекционный курс дисциплины «Эксплуатация теплоэнергетических установок»	58
3.1 Принципиальные схемы энергетических установок	58
3.1.1 Принципиальная схема котельной установки	58
3.1.2 Тепловой баланс теплоэнергетической установки	60
3.1.3 Принципиальная схема ТЭЦ	62
3.1.4 Принципиальная схема АТЭЦ	63
3.2 План размещения топливного хозяйства	65
3.3 Подготовка топлива к сжиганию.....	66
3.4 Котельные установки	67
3.4.1 Классификация и назначение топок	67
3.4.2 Характеристика топок.....	67
3.4.2.1 Слоевые топки	67
3.4.2.2 Факельно-слоевые топки.....	74
3.4.2.3 Камерные топки.....	75
3.4.3 Котлы	81
3.4.3.1 Основные элементы котлоагрегата	81
3.4.3.2 Классификация котлов	81
3.4.3.3 Основные типы паровых котлов, устанавливаемых в производственных и отопительных котельных.....	83
3.4.3.4 Основные типы водогрейных котлов, устанавливаемых в производственных и отопительных котельных.....	87
3.4.4 Вспомогательные поверхности нагрева котлов	93
3.4.4.1 Пароперегреватели.....	93
3.4.4.2 Экономайзеры.....	95
3.4.4.3 Воздухоподогреватели	97
3.4.5 Вспомогательные устройства котельного агрегата	99
3.4.5.1 Тяговые и дутьевые устройства	99
3.4.5.2 Золоулавливающие устройства и устройства для удаления золы и шлака	103
3.4.6 Докотловая подготовка воды	108
3.4.7 Внутрикотловая обработка воды	111
3.5 Защита окружающей среды от отходов производства, имеющих вредные компоненты.....	111
ЧАСТЬ 4 Практические задания	113
Практическое занятие №1 «Тепловой баланс котла».....	113

Практическое занятие №2 «Топливное хозяйство».....	122
Практическое занятие №3 «Состав и теплота сгорания топлива».....	144
Практическое занятие №4 «Топочные устройства»	152
Практическое занятие №5 «Устройство, классификация и принцип работы горелочных устройств»	159
Практическое занятие №6 «Подбор котлов».....	174
Практическое занятие №7 «Защита окружающей среды».....	180
Практическое занятие №8 «Пути экономии энергоресурсов»	183

**ЧАСТЬ 5 Пример оформления контрольной работы для студентов
заочной формы обучения направления 35.03.06 (110800.62)
«Агроинженерия»..... 194**

5.1 Принципиальная схема теплоэнергетической установки.....	194
5.1.1 Принципиальная схема котельной установки хозяйства.....	194
5.1.2 Назначение и принцип действия отдельных составляющих котельной установки.....	195
5.1.3 Тепловой баланс котельной установки хозяйства	196
5.1.4 Выводы (в сравнении с типовой котельной)	196
5.2 Топливное хозяйство.....	196
5.2.1 План размещения топлива на территории хозяйства (для использования в котельной установке)	196
5.2.2 Подготовка топлива к сжиганию в котельной установке	197
5.2.3 Транспортировка и подача топлива в топку.....	197
5.2.4 Вывод (в сравнении с типовым)	198
5.3 Топки.....	198
5.3.1 Классификация и назначение топок.....	198
5.3.2 Топка, установленная в котельной хозяйства	199
5.3.3 Рассчитать характеристику топки	200
5.3.4 Вывод (в сравнении с типовой)	200
5. 4 Котлы.....	201
5.4.1 Котел, установленный в котельной хозяйства	201
5.4.2 Схема организации движения воды, пароводяной смеси и пара в котельной установке	202
5.4.3 Вывод (в сравнении с типовым)	202
5. 5 Вспомогательные устройства котельного агрегата	202
5.5.1 Тягодутьевое устройство.....	202

5.5.2 Пароперегреватель	204
5.5.3 Водяной экономайзер.....	204
5.5.4 Воздухоподогреватель	205
5.5.5 Очистка котловой воды	206
5.5.6 Питательные устройства.....	206
5.5.7 Трубопроводы и арматура. Контрольно-измерительные приборы и системы автоматического регулирования котельной установки	207
5.5.8 Выводы (в сравнении с типовым	208
Часть 6 Индивидуальное задание для студентов очной формы обучения	209
6.1 Вопросы индивидуального задания	209
6.2 Пример выполнения индивидуального задания.....	214
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	219
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	221

*Щитов Сергей Васильевич,
Стириданчук Наталья Викторовна,
Панова Елена Владимировна,
Колесникова Ольга Алексеевна*

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДИСЦИПЛИНЫ

Учебное пособие

Редакторы А.И. Казимова, Н.П. Власевская

Лицензия ЛР 020427 от 25.04.1997 г.
Подписано к печати 11.03.2015 г. Формат 60×90/16.
Уч.-изд.л. – 12,4. Усл.-п.л. – 16,8.
Тираж 50 экз. Заказ 60.

Отпечатано в отделе оперативной полиграфии издательства ДальГАУ
675005, г. Благовещенск, ул. Политехническая, 86

