

**С.Н. Смородин
В.Н. Белоусов**

**ОБОРУДОВАНИЕ
ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ТЭС**

Учебное пособие

Санкт-Петербург
2021

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна»
Высшая школа технологии и энергетики**

**С.Н. Смородин
В.Н. Белоусов**

**ОБОРУДОВАНИЕ
ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ТЭС**

Учебное пособие

Утверждено Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД

Санкт-Петербург
2021

УДК 621.311(075)
ББК 31.37я7
С 516

Рецензенты:

Генеральный директор ООО «АДИН»

В.И. Петров;

кандидат технических наук, доцент Высшей школы технологии и энергетики
Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна,
зав. кафедрой ТСУ и ТД

В.Г. Злобин

Сморозин С.Н., Белоусов В.Н.

С516 Оборудование энерготехнологических ТЭС: учеб. пособие / С.Н. Смородин,
В.Н. Белоусов. – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2021. – 123 с.

ISBN 978-5-91646-256-2

Учебное пособие соответствует программе и учебному плану дисциплины «Оборудование энерготехнологических ТЭС» для студентов, обучающихся по направлению подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника». В учебном пособии рассмотрены конструкции корьевых и содорегенерационных котлоагрегатов, конструкции отдельных узлов и вспомогательного оборудования.

Пособие предназначено для подготовки студентов очной и заочной форм обучения. Отдельные разделы пособия могут быть полезны магистрам, аспирантам и специалистам, работающим в области промышленной энергетики.

УДК 621.311(075)

ББК 31.37я7

ISBN 978-5-91646-256-2

© ВШТЭ СПбГУПТД, 2021

© Смородин С.Н., Белоусов В.Н., 2021

Предисловие

Основой экономики России являются предприятия энергоемких отраслей промышленности. Их работа в значительной степени зависит от надежного и эффективного обеспечения топливно-энергетическими ресурсами теплоэнергетической системы промышленных предприятий, и поэтому рациональное построение и эксплуатация этих систем имеет большое значение.

Учебное пособие «Оборудование энерготехнологических ТЭС» предназначается для студентов всех форм обучения по направлению подготовки (специальность) 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника».

В учебном пособии рассматриваются назначение, состав и структура теплоэнергетической системы промышленных предприятий, конструкции корьевых и содорегенерационных котлоагрегатов, а также отдельных узлов и вспомогательного оборудования.

Учебное пособие сопровождается большим числом иллюстраций и принципиальных схем для лучшего усвоения материала.

Отдельные разделы пособия могут быть полезны магистрам, аспирантам и специалистам, работающим в области промышленной энергетики.

1. Общая характеристика теплоэнергетической системы промышленного предприятия

Современные крупные заводы энергоемких отраслей промышленности состоят из значительного числа различных технологических и энергетических установок, образующих совместно производственный комплекс.

Теплоэнергетической системой промышленного предприятия (ТЭС ПП) называют систему, объединяющую на предприятии все источники различных энергоресурсов (ЭР), включая технологические агрегаты, а также всех потребителей энергоресурсов. Задачей рационального построения ТЭС ПП является организация оптимального распределения и использования различных ЭР. При этом необходимо учитывать реальные (вплоть до часовых) графики и режимы работы всех агрегатов, как генерирующих, так и потребляющих ЭР в целях балансирования различных видов ЭР в любой отрезок времени для обеспечения надежной и экономичной работы как отдельных агрегатов, так и предприятия в целом, определения характера и мощности необходимых резервных источников ЭР.

От совершенства построения ТЭС ПП зависят эффективность использования энергоресурсов на предприятии и их потери, а также потребность во внешних ЭР, капиталовложения, влияние предприятия на окружающую среду и др. Оптимальное построение ТЭС ПП — сложная и многоплановая задача, так как при этом должны рационально организовываться и увязываться многочисленные потоки различных ЭР, характеристики и графики выхода и потребления которых диктуются технологическими процессами и, как правило, не могут быть изменены.

К энергоресурсам, охватываемым ТЭС ПП, относятся все их виды, имеющиеся на предприятиях, в том числе:

- водяной пар различных параметров от разных источников и горячая вода;
- горючие газы — доменный, коксовый, конвертерный, нефтеперерабатывающих агрегатов и др.;

- физическая теплота отходящих газов различных технологических агрегатов, а также остывающей продукции;
- теплота охлаждения конструктивных элементов технологических агрегатов;
- теплота расплавленных шлаков;
- горючие нетранспортабельные отходы производства;
- различные газы и жидкости с избыточным давлением;
- сжатый воздух для технологических процессов и производственных нужд;
- кислород технический (содержание O₂ не менее 99,5 %) и технологический (O₂ не менее 95 %), газообразный и жидкий.

Абсолютный и относительный (сравнительный) выходы и потребления перечисленных видов ЭР могут сильно различаться на разных предприятиях, так же как и реальные графики их выходов и потреблений. Поэтому для правильного построения и организации эксплуатации ТЭС ПП необходимо знать энергетические характеристики технологических агрегатов, а также основы соответствующих технологических процессов.

Назначение, состав и структура ТЭС ПП

Целью функционирования любого промышленного предприятия является передел исходного сырья и комплектующих в товарную продукцию в ходе реализации ряда технологических процессов. Их осуществление практически всегда связано с потреблением энергоресурсов. Кроме того, энергия необходима для обеспечения жизнедеятельности персонала промышленного предприятия и поддержания температурно-влажностного режима в цехах и административно-бытовых зданиях. Последнее особенно актуально для промышленных предприятий России, многие из которых расположены в регионах с самыми суровыми в мире климатическими условиями.

Задача ТЭС ПП – снабжение технологических процессов и комплекса жизнеобеспечения промышленного предприятия энергией строго определенного качества и с заданным уровнем надежности. На предприятиях энергоемких отраслей промышленности энергия для технологических

процессов подводятся с помощью энергоносителей, основными из которых являются:

- органическое топливо (твердое, жидкое или газообразное);
- тепловая энергия (технологический пар, горячая вода);
- сжатый воздух;
- электроэнергия.

Кроме того, в задачу ТЭС ПП входит и обеспечение технологических процессов средами, которые хотя и не являются собственно энергоносителями, но производятся внутри ТЭС ПП. Основными из них являются:

- охлаждающая вода;
- химически очищенная вода и конденсат.

Большинство энергоносителей (кроме органического топлива) могут либо производиться на собственных энергогенерирующих мощностях промышленного предприятия, либо закупаться на стороне исходя из показателей технико-экономической эффективности.

Системы производства, транспортировки и распределения вышеуказанных энергоносителей являются подсистемами общей ТЭС ПП предприятия. Они подразделяются на следующие подсистемы:

- паро- и теплоснабжения;
- газоснабжения;
- воздухо- и кислородоснабжения;
- водоснабжения.

Структура и состав оборудования этих подсистем определяются рядом базовых параметров, таких как расчетная нагрузка потребителей соответствующего энергоносителя, годовой объем его потребления, термодинамические показатели и др. Например, подсистема пароснабжения может содержать ТЭЦ, паропреобразовательные установки, разветвленные паровые сети, котлы-утилизаторы, парораспределительные пункты, конденсатопроводы с несколькими ответвлениями и др. Принципиальная схема ТЭС ПП представлена на рис. 1.

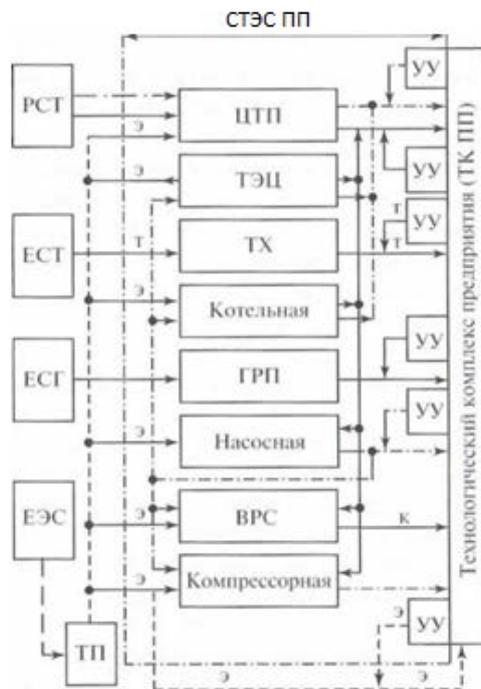


Рис. 1. Принципиальная схема ТЭС ПП:

ЦТП – центральный тепловой пункт; ТХ – топлиохранилище;

ГРП – газорегуляторный пункт; ТП – трансформаторная подстанция;

ВРС – воздуходелительная (кислородная) станция; УУ – утилизационная установка; СТЭС ПП – система теплоэнергоснабжения промышленного предприятия;

ЕСТ, ЕСГ, ЕЭС – единые системы соответственно топливоснабжения, газоснабжения и электроснабжения;

ТЭЦ – теплоэлектроцентраль; РСТ – районная система теплоснабжения;

э, т, к – потоки соответственно электроэнергии, теплоты и кислорода

Оптимизация построения ТЭС ПП необходима для решения следующих задач:

- обеспечения бесперебойного снабжения потребителей всеми требующимися видами энергоресурсов нужных параметров в любой отрезок времени;

- максимального и наиболее эффективного использования всех внутренних энергоресурсов, определения оптимального направления их использования;

- обеспечения балансирования приходов и расходов энергоресурсов в любой отрезок времени с учетом реальных графиков работы производственных

агрегатов в целях снижения, а в пределе и исключения потерь различных энергоресурсов из-за дисбалансов;

- наиболее экономичного резервирования источников энергоресурсов по предприятию;

- оптимального выбора энергоносителей для тех или иных производств, в частности оптимального распределения различных видов топлива по потребителям в зависимости от его пирометрических и других характеристик;

- возможности комплексной оптимизации как энергохозяйства предприятий в целом, так и отдельных установок по типам и параметрам;

- выявления наиболее вероятных и длительных режимов работы тех или иных установок и агрегатов, что важно для правильного выбора их типоразмеров, режимных характеристик и др.;

- определения наиболее экономичных и эффективных связей ТЭС ПП с другими предприятиями и установками, а также центральными источниками энергоснабжения района.

Существует ряд путей экономии топлива на предприятиях:

- внедрение новых энергосберегающих технологий и агрегатов в основных производствах и ТЭС ПП, что при том же энергетическом эффекте в 3—4 раза дешевле, чем разработка новых нефтяных и газовых месторождений;

- повышение КПД (снижение удельных расходов топлива) энергетических установок и агрегатов, как генерирующих, так и потребляющих различные энергоресурсы, например КПД котлов, турбин, компрессоров, кислородных установок, оборудования утилизационных установок и т.п.;

- оптимальное построение ТЭС ПП.

Указанные пути экономии топлива не являются изолированными, и их не следует противопоставлять друг другу. Наоборот, их совместное рассмотрение с учетом взаимного влияния (обратной связи) дает наибольший эффект.

Правильно разработанная ТЭС ПП является, кроме того, базой для оптимального построения топливно-энергетического баланса региона. Сейчас

общепризнано, что любую оптимизацию сложных комплексов необходимо вести на основе системного подхода.

Графики потребления и генерации энергоресурсов (ЭР) технологическими агрегатами определяются технологией производства и режимом работы этих агрегатов, поэтому даже при нормальной их работе выход и потребление ЭР могут колебаться в значительных пределах. Кроме того, технологические агрегаты останавливаются на кратковременные (минуты, часы, сутки) и длительные ремонты, по разным причинам изменяются их производительности, характеристики выдаваемых ЭР и т.п.

Технологические агрегаты, как правило, потребляют одни, а генерируют другие виды ЭР, которые могут быть использованы только другими агрегатами, работающими по своему графику. Поэтому балансирование всех видов энергоресурсов при значительной степени «неуправляемом» их выходе требует специальных мероприятий и установок на ТЭС ПП.

Одним из недостатков при построении ТЭС ПП является то, что оно ведется большей частью только по средним (в основном годовым) значениям приходов и расходов различных ЭР, тогда как рекомендуется определять приходы и расходы ЭР для построения их балансов по нормативным их значениям в расчете на единицу продукции. Но для большинства технологических агрегатов как потребление, так и выходы ЭР, целиком диктуемые условиями и режимами их работы, могут в течение большей части года, суток, часа существенно отличаться от нормативных. В результате этого при построении балансов по средним (нормативным) значениям наблюдаются периодические, иногда крупные, дисбалансы тех или иных ЭР, что приводит к нарушениям бесперебойного энергоснабжения технологических агрегатов и снижению их производительности (возможна и порча продукции), а также к периодическим потерям избытков некоторых ЭР из-за отсутствия в данный момент потребителя.

В итоге при «среднем проектном благополучии» (сходимости балансов по средним значениям) имеют место все недостатки, связанные с частыми

дисбалансами ЭР, что, как показала практика, весьма отрицательно сказывается на производительности и экономичности работы предприятий. Действительная потребность завода в топливе в различные периоды в течение года оказывается иной, чем определенная по средним значениям.

Для составления энергетических балансов промышленных предприятий учет реальных графиков приходов и расходов ЭР (часовых, суточных, сезонных) и возможных их нарушений в должной мере в практику еще не вошел в значительной степени из-за большой сложности этого вопроса и отсутствия инженерной методики необходимых расчетов. Не учитывается в должной мере и неизбежная неоднозначность (неопределенность) исходной информации, которая может быть значительной и существенно влиять на выбор решений.

По существу, пока нет полноценного критерия степени совершенства (рациональности) построения ТЭС ПП. Следует подчеркнуть, что отсутствие или минимум прямых потерь ЭР (сброса в окружающую среду и т.п.) не является достаточным критерием, так как не учитывает степень эффективности способа использования того или иного энергоресурса с народнохозяйственной точки зрения. Какая-либо ТЭС ПП может не иметь прямых потерь по всем энергоресурсам, но быть далеко неоптимальной, так как, например, расходует высококачественное дефицитное горючее или высокотемпературную теплоту для покрытия потребностей в низкотемпературной теплоте.

Расходы производственного пара почти на всех предприятиях характеризуются существенной сезонной неравномерностью, в том числе и на предприятиях, работающих по непрерывной технологии. На рис. 2 показаны усредненные годовые графики расхода производственного пара по некоторым отраслям промышленности, полученные путем усреднения графиков группы заводов данной отрасли.

Помимо тепловых технологических нагрузок на промышленных предприятиях всегда имеются тепловые нагрузки на отопление и горячее водоснабжение зданий цехов и административно-бытовых корпусов (АБК).

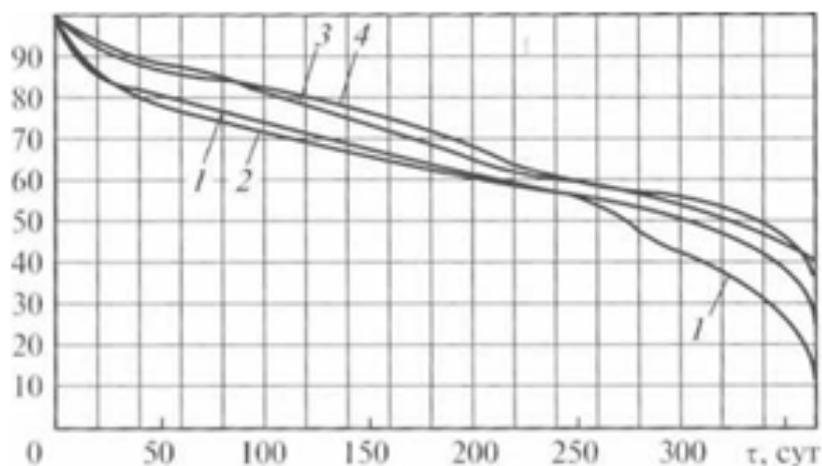


Рис. 2. Усредненные годовые графики расходов производственного пара по некоторым отраслям промышленности:

- 1 – машиностроительные заводы; 2 – целлюлозно-бумажные комбинаты;
3 – химические комбинаты; 4 – нефтеперерабатывающие заводы

Тепловая схема и особенности промышленных ТЭС (ТЭЦ)

На крупных промышленных предприятиях с тепловой нагрузкой более 500 ГДж/ч в качестве энергоисточников используют паротурбинные ТЭС или ТЭЦ, генерирующие несколько видов энергетической продукции: электроэнергию, теплоту в виде технологического пара и горячей воды с требуемыми параметрами, дутье и химочищенную воду.

Паротурбинные ТЭС (ТЭЦ) промышленных предприятий имеют ряд существенных отличий от электростанций в составе энергосистем.

Выбор установленной мощности котельного и турбинного оборудования осуществляется исходя из задач, решаемых ТЭС или ТЭЦ промышленного предприятия.

Минимальная установленная тепловая мощность котлов должна быть достаточна:

- для утилизации буферных сбросов горючих ВЭР технологических газов, которые не могут быть использованы в основных производствах;
- для обеспечения расчетных тепловых нагрузок предприятия в виде технологического пара и горячей воды за вычетом нагрузок, покрываемых ВЭР,

и выработки соответствующей электрической мощности на тепловом потреблении.

Максимальная установленная тепловая мощность котлов выбирается из условия покрытия всей электрической нагрузки предприятия от собственной ТЭС или ТЭЦ.

Основные достоинства паротурбинных ТЭС (ТЭЦ) следующие:

- возможность сжигания практически любого вида топлива в различных сочетаниях;
- большая тепловая экономичность, в особенности при работе по теплофикационному циклу;
- высокая надежность, большой срок службы и стабильность рабочих параметров.

Основными недостатками паротурбинных ТЭС (ТЭЦ) являются:

- большие капиталовложения и сроки (более 4 – 5 лет) строительства основных и вспомогательных цехов, в том числе тепловых сетей;
- значительные эксплуатационные расходы энергии на собственные нужды (3 – 6 % в зависимости от сжигаемого топлива), на потери теплоты в тепловых сетях (5 – 15 % в зависимости от сохранности изоляции), заработную плату персонала, химводоочистку и др.

Присоединенная к паротурбинной ТЭЦ тепловая нагрузка составляет не менее 800 – 1000 ГДж/ч.

Целлюлозно-бумажная промышленность относится к числу энергоемких отраслей промышленности.

Анализ структуры топливопотребления на предприятиях ЦБП показывает, что для покрытия тепловых нагрузок, в основном, используются энергетические виды топлива: газ, мазут, реже уголь.

В первую очередь это связано с тем, что предприятия ЦБП являются градообразующими и обеспечивают тепло- и электроснабжение населения.

Как показывает опыт финских предприятий ЦБП, они могут обеспечить энергопотребление за счет использования только собственных вторичных

энергоресурсов (кородревесные отходы, щелок). Это касается предприятий, работающих по сульфат-целлюлозному циклу.



Рис. 3. Структура топливопотребления на предприятиях ЦБП

Особенность энерготехнологических ТЭС как промышленных – это обеспечение технологических процессов тепловой и электрической энергией с использованием оборудования, являющегося составной частью технологического процесса (например, содорегенерационные котлоагрегаты).

Принципиальная тепловая схема энерготехнологической ТЭС целлюлозно-бумажного комбината показана на рис. 4.

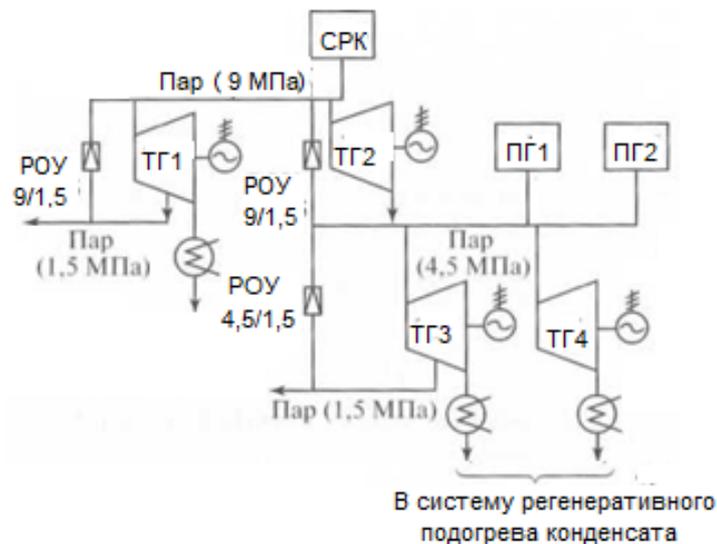


Рис. 4. Тепловая схема энерготехнологической ТЭС:

СРК – содорегенерационный котлоагрегат; ПГ1, ПГ2 – корьевые котлы; ТГ1, ТГ2 — турбогенераторы высокого давления; ТГ3, ТГ4 — турбогенераторы среднего давления; РОУ — редукционно-охладительная установка

Контрольные вопросы

1. Что входит в состав теплоэнергетической системы промышленного предприятия (ТЭС ПП)?
2. Какие основные пути экономии топлива на предприятиях?
3. Какие основные отличия имеют паротурбинные ТЭС (ТЭЦ) промышленных предприятий от электростанций, входящих в составе энергосистем?
4. Какие энергоносители используются на предприятиях для обеспечения технологических процессов?
5. Какие вторичные топливные и энергетические ресурсы образуются на промышленных предприятиях?

2. Общая характеристика процесса сульфатного производства

Природная целлюлоза, или клетчатка, является основным веществом, из которого построены стенки растительных клеток. Поэтому растительное сырье разных видов служит единственным источником промышленного производства целлюлозы. Из древесных пород наибольшее применение имеют: *хвойные* – ель, сосна, пихта и *лиственные* – тополь, осина, береза, бук. Процесс производства сводится к химической обработке растительного сырья, целью которой является отделение целлюлозы от других содержащихся в растительной ткани веществ – лигнина, гемицеллюлоз, смол, жиров, танинов и т.п. При промышленном производстве наибольшее распространение получили ***сульфитный*** и ***сульфатный*** способы получения целлюлозы.

В ***сульфитном*** способе в качестве реагента используется так называемая сульфитная варочная кислота. Она представляет собой раствор сернистой кислоты H_2SO_3 , содержащей некоторое количество бисульфитов кальция, магния, натрия или аммония. Небеленая и беленая сульфитная целлюлоза является одними из главнейших полуфабрикатов для получения искусственного

волокна и выработки газетных, типографских, писчих и целого ряда других видов бумаги.

При **сульфатном** способе реагентом является смесь едкого натра NaOH и сульфида натрия Na_2S . В настоящее время этот способ самый распространенный из всех промышленных способов получения целлюлозы. Сульфатным способом можно перерабатывать любые древесные породы и растения. По всем показателям механической прочности сульфатная целлюлоза превосходит сульфитную, полученную из той же древесины.

Жесткая сульфатная целлюлоза из хвойной древесины за свою чрезвычайно высокую механическую прочность получила название *крафт-целлюлозы*.

Сульфатная целлюлоза труднее отбеливается и размалывается, но легче проклеивается и характеризуется более высокой термостойкостью и долговечностью, чем сульфитная. Однако выход сульфатной целлюлозы из древесины при варке оказывается на 3 – 4 % ниже, чем сульфитной, и это обстоятельство является существенным недостатком этого способа.

Общая схема производства целлюлозы из древесины по сульфатному способу (рис. 5, б) на современных предприятиях складывается из следующих отдельных стадий:

1. **Подготовка древесины** состоит из операций по выгрузке и хранению древесины, очистке ее от коры, распиловке и измельчению в щепу. Древесные отходы для утилизации направляются в *корьевого котел*.

2. **Варка щепы**. Варка происходит в периодически или непрерывно действующих варочных котлах под давлением 0,8 – 1,2 МПа и при температуре 170 – 180 °С. В котел подается щепа и варочный *белый щелок*, содержащий в качестве активного реагента смесь едкого натра и сульфида натрия ($\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{S}$). После варки полученная масса направляется на *промывку* (на рис. 5 не показана), где происходит отделение от сваренной целлюлозы отработанного *черного щелока*. Целлюлозная масса затем проходит стадии

очистки (от непровара и минеральных загрязнений), *облагораживания*, *отбели*ки, *обезвоживания* и *сушки*.

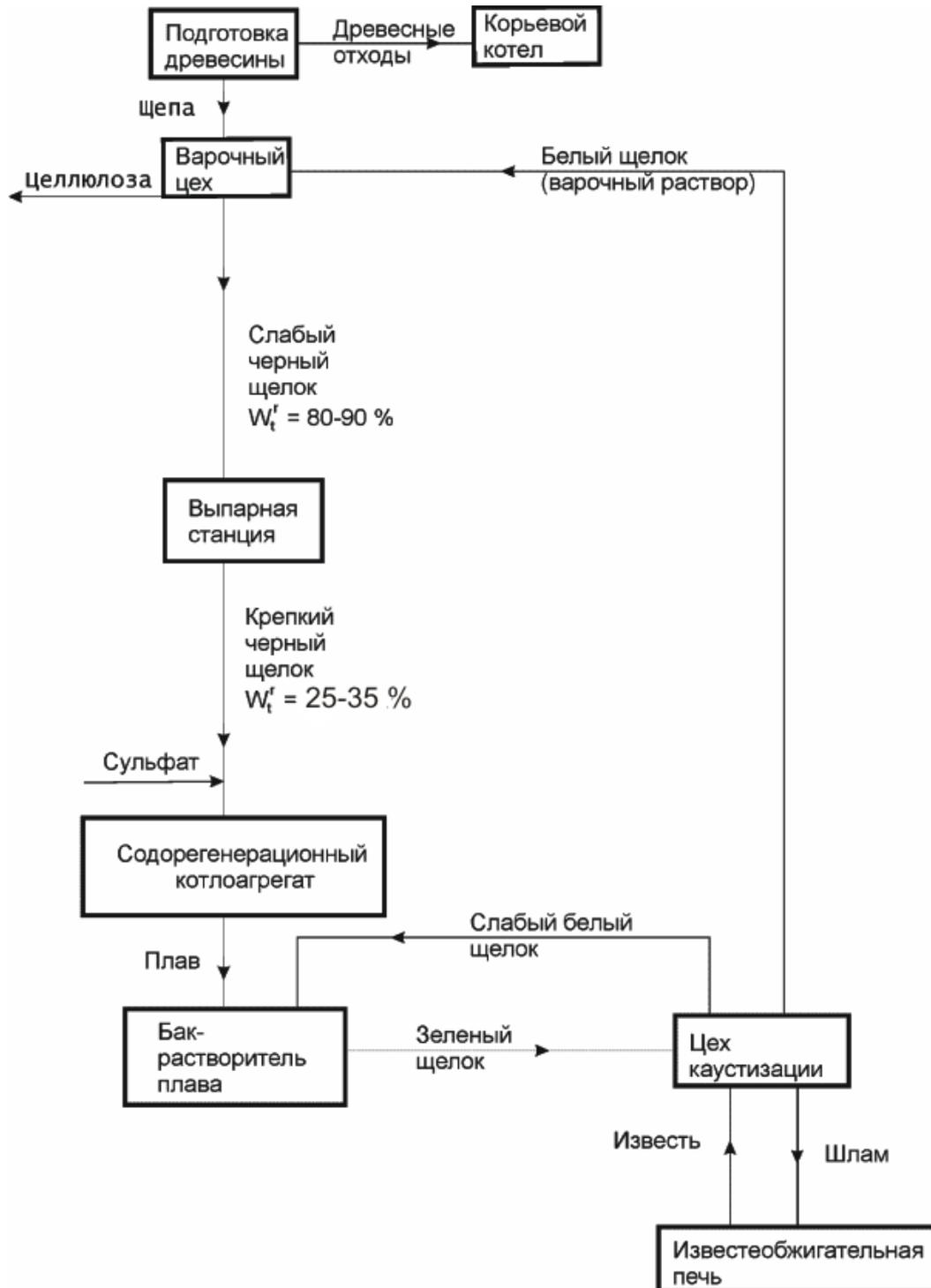


Рис. 5. Схема производства сульфатной целлюлозы

Отбелка целлюлозы проводится только в тех случаях, когда вырабатывается беленая целлюлоза, а облагораживание – только при

производстве специальных видов целлюлозы, предназначенных для химической переработки.

Если целлюлозный завод входит в состав целлюлозно-бумажного комбината, то отпадает необходимость в обезвоживании и сушке целлюлозы, поскольку она в этом случае передается для переработки на бумажную или картонную фабрику в виде жидкой массы.

3. Кроме того, неотъемлемой составной частью сульфатного производства является *регенерация* щелочи из отработанных черных щелоков. Организация этого процесса является значительным шагом в развитии сульфатного производства целлюлозы, так как происходят утилизация сточных вод и контроль над ними, повышается экономичность производства за счет регенерации химикатов и использования теплоты органических компонентов черного щелока в содорегенерационном котлоагрегате (СРК).

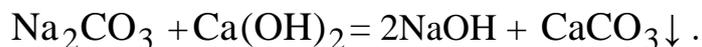
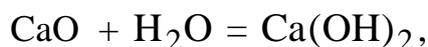
СРК – это основной объект системы регенерации, поэтому решение вопросов, связанных с его надежной, экономичной и экологически чистой работой, является важнейшей задачей.

Процесс регенерации щелочи состоит из трех операций:

1. *Выпаривание* черного щелока до концентрации 45 – 60 % сухого вещества в многокорпусных выпарных аппаратах и до 70 – 80 % при использовании концентраторов.

2. *Сжигание сгущенного щелока* в содорегенерационных котлах с получением регенерированного минерального продукта в виде плава. При сжигании щелока происходят реакции карбонизации едкого натра (NaOH) и сульфида натрия (Na_2S) и восстановления сульфата натрия (Na_2SO_4), которые входят в состав минеральной части черного щелока. Поэтому плав состоит в основном из карбоната (Na_2CO_3 – 70 %) и сульфида натрия (Na_2S – 20 – 25 %). Из СРК плав поступает в бак-растворитель, где растворяется слабым белым щелоком, образуя *зеленый щелок*.

3. **Каустизация** раствора плава (зеленого щелока) осуществляется известью (CaO) с целью перевода карбоната натрия в едкий натр. При этом протекают следующие химические реакции:



Полученный в каустизационных установках крепкий белый щелок откачивается в варочный цех, а образовавшийся шлам (CaCO₃) направляется в известеобжигательную печь для регенерации извести.

В процессе регенерации щелоков производится возмещение потерь щелочи за счет добавки в щелок перед его сжиганием сульфата натрия (Na₂SO₄).

Таким образом, при производстве сульфатной целлюлозы образуются вторичные топливные ресурсы – это кородревесные отходы и черный щелок, который представляет собой раствор различных органических веществ и натриевых соединений.

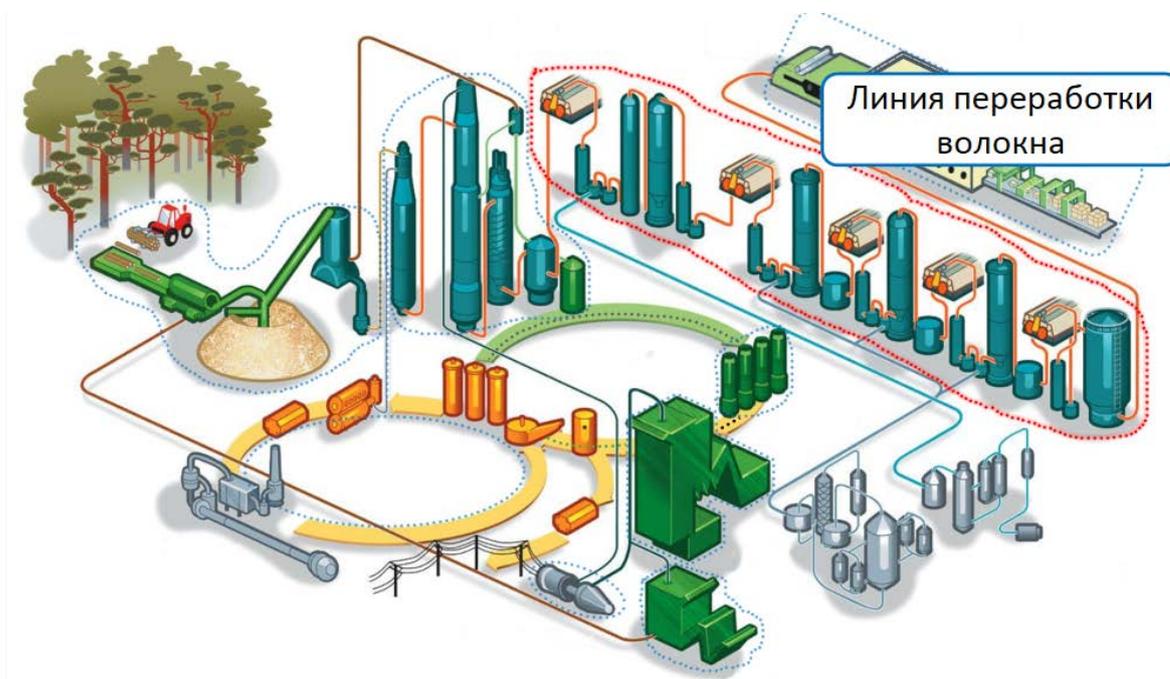


Рис. 6. Технологическая схема производства сульфатной целлюлозы

Контрольные вопросы

1. Какие основные стадии производства сульфатной целлюлозы?

2. Как утилизируются кородревесные отходы после подготовки древесины?
3. Какие основные этапы регенерации щелочи?
4. Где происходит восстановления сульфата натрия (Na_2SO_4)?
5. Какие вторичные топливные ресурсы образуются при производстве сульфатной целлюлозы?

3. Корьевые котлы

3.1. Котел КМ-75-40

В период 1966 – 1974 гг. «Белгородский котлостроительный завод» поставил на предприятия целлюлозно-бумажной промышленности более 40 котлов КМ-75-40, предназначенных для сжигания смеси различных видов топлива: кородревесных отходов (КДО) на механической колосниковой решетке и дополнительного топлива (мазута или природного газа), подаваемого через горелки. Однако опыт эксплуатации этих котлов показал, что топочное устройство с механической решеткой отличается низкой эксплуатационной надежностью и требует большой доли подсветки дополнительным топливом. Котлы КМ-75-40 у большинства заказчиков работают не на полную мощность и имеют проблемы в обслуживании.

Котел КМ-75-40 (рис. 7) обеспечивает производительность по пару на КДО без подсветки газом или мазутом 53 т/ч, давление перегретого пара 3,9 МПа, температура перегретого пара 440 °С, при влажности КДО 60 %. Расход КДО порядка 26 т/ч.

Каркас котлоагрегата

Каркас представляет собой металлическую конструкцию с колоннами, идущими от отметки зольного помещения. Каркас служит для установки и закрепления узлов котлоагрегата.

Топочная камера котлоагрегата

Топка котла состоит из предтопка, предназначенного для сжигания КДО, и камеры догорания. Предтопок состоит из неподвижной решетки,

выполненной из труб, включенных в циркуляционный контур, и двух чугунных цепных решеток прямого хода.

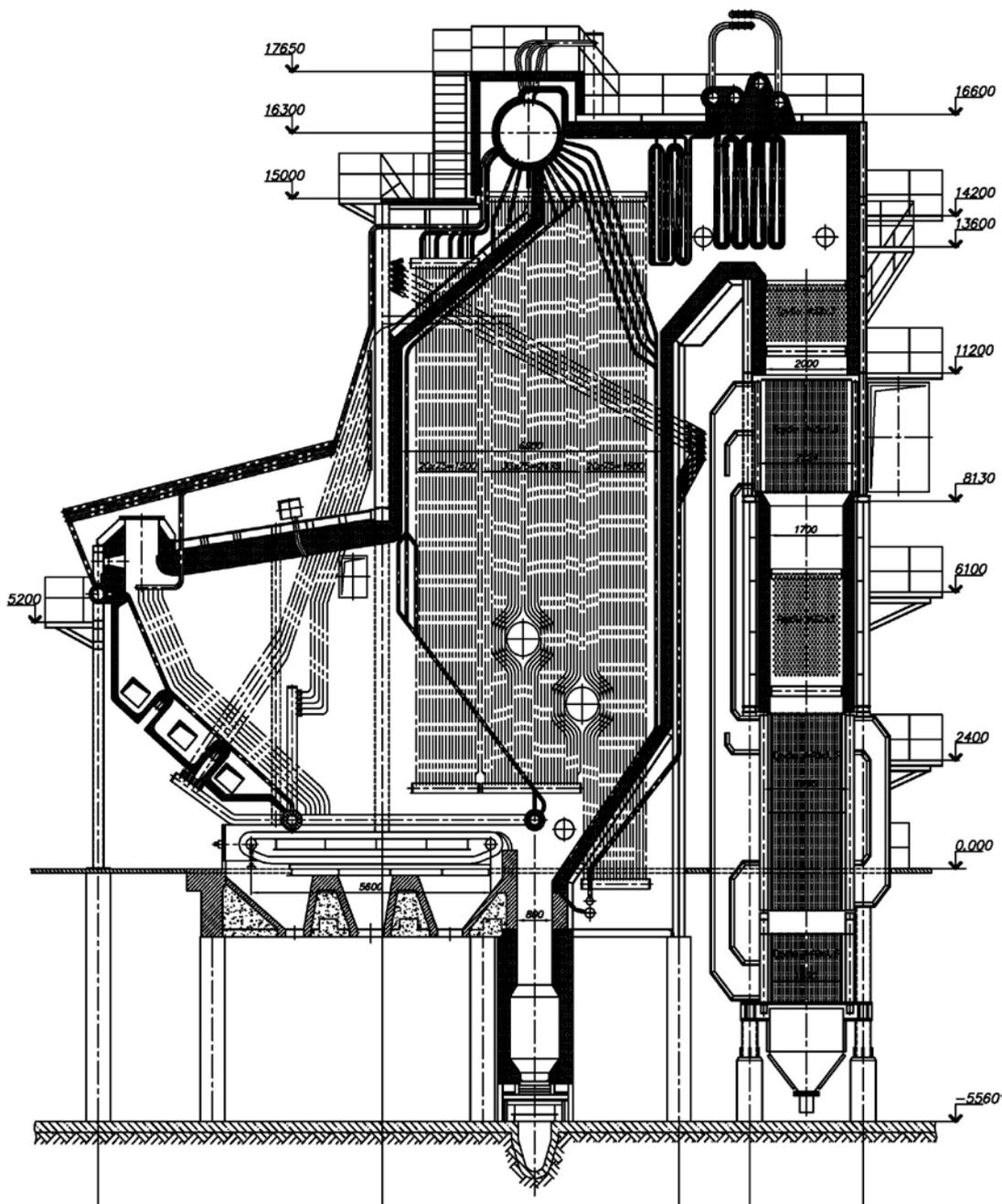


Рис. 7. Котел КМ-75-40

Барaban котла

Котел снабжён барабаном, вынесенным за пределы обогреваемой зоны. Диаметр барабана 1500 мм, толщина стенки 40 мм, длина 9410 мм. Барабан лежит на двух опорах, допускающих его спокойное перемещение при

нагревании. Материал – Ст.20к. Присоединение экранов, водоопускных и пароподводящих труб к барабану выполнено на сварке. Экраны котла, внутрибарабанное устройство, выносные циклоны выполнены по схеме трёхступенчатого испарения с восемью самостоятельными контурами циркуляции.

Испарительные поверхности нагрева

Котёл работает по схеме с естественной циркуляцией. Движение воды в циркуляционных контурах происходит из-за разности плотностей воды в водоопускных трубах и пароводяной смеси в подъёмных трубах. В схеме циркуляции имеется восемь самостоятельных контуров, включающих в себя водное пространство барабана, опускные (необогреваемые) трубы и водное пространство выносных циклонов.

Питательная вода после подогревателя высокого давления проходит через узел питания котла, смешивается с водой из пароохладителя, поступает во входной коллектор первой ступени экономайзера. После труб первой ступени вода поступает в выходную камеру, откуда по шести трубам переводится во входную камеру второй ступени. Пройдя вторую ступень и нагревшись до температуры 269 °С, питательная вода поступает в две входные камеры (по одной с каждой стороны опускной шахты) второй ступени экономайзера и поступает в чистый отсек барабана котла.

Контуров первой ступени испарения:

- водное пространство барабана – опускные трубы – коллектора переднего и заднего экранов – экранные трубы – водное пространство чистого отсека барабана;
- водное пространство чистого отсека барабана – водоопускные трубы – нижние коллектора передних правого и левого боковых экранов – экранные трубы – верхние коллектора – водное пространство чистого отсека барабана.

Контуров второй ступени испарения:

- водное пространство чистого отсека барабана – водоопускные трубы – нижние коллектора средних боковых экранов – экранные трубы – верхние коллектора – водное пространство солёных отсеков барабана.

Контуры третьей ступени испарения:

- водное пространство солёных отсеков барабана – опускные трубы – коллектора нижних задних боковых экранов – экранные трубы – верхние коллектора – выносные циклоны – паровое пространство солёных отсеков барабана.

Пароперегреватель

Пароперегреватель котла состоит из вертикально подвешенных змеевиков и выполнен из двух ступеней. Обе ступени по ходу пара двухходовые, прямоточно-противоточные. Поверхность нагрева первой ступени 400 м², второй 620 м². В промежуточный коллектор между ступенями включён поверхностный пароохладитель площадью 17,7 м². Охлаждающей средой является питательная вода (после регулирующего клапана узла питания котла). Выходной коллектор оборудован предохранительными клапанами Ду-50 в количестве трёх штук.

Водяной экономайзер

Водяной экономайзер котла гладкотрубный, змеевиковый, выполнен из двух ступеней. Поверхность нагрева первой ступени 490 м², второй 320 м².

Воздухоподогреватель

Воздухоподогреватель трубчатого типа, двухступенчатый, четырёхходовой по воздуху. Первая ступень состоит из восьми кубов секций, вторая из четырех. Поверхность нагрева первой ступени 2600 м², второй 1600 м². Воздухоподогреватель установлен в рассечку, между ступенями расположена первая ступень водяного экономайзера. Тепловое расширение секций направлено вверх и воспринимается компенсаторами.

Для исключения высокотемпературной сернокислой коррозии труб воздухоподогревателя холодный воздух, поступающий в первую ступень,

подогревается в паровых калориферах КФБ-10. Калориферы расположены в воздушном коробе на входе воздуха в воздухоподогреватель.

Обмуровка котла

Обмуровка котла выполнена преимущественно в виде обмуровочных плит. Каждая плита имеет три слоя теплоизолирующего материала (шамотобетон – диатанобетон – минеральная вата). Обмуровка РКС выполнена специальным составом, стойким к высоким температурам и абразивному действию материала слоя.

Основные проблемы, возникающие при работе котла:

- при повышении влажности КДО свыше 60 % для стабилизации процесса горения необходима подсветка газом или мазутом;
- значительный химический и механический недожог;
- наличие цепной решетки вызывает проблемы с ее эксплуатацией при снижении влажности КДО.

3.2. Котлы с кипящим слоем

Применение технологии сжигания топлива в кипящем слое (КС) инертного материала дало новый импульс к созданию котлов, сжигающих кородревесные отходы.

Процесс в кипящем слое

Стационарный котел с кипящим слоем – котел для сжигания топлива в псевдооживленном слое инертного материала.

Кипящий, или псевдооживленный, слой – это состояние слоя зернистого сыпучего материала, при котором под влиянием проходящего через него потока газа или жидкости (сжижающих агентов) частицы твёрдого материала интенсивно перемещаются одна относительно другой. В этом состоянии слой напоминает кипящую жидкость, приобретая некоторые её свойства, и его поведение подчиняется законам гидростатики.

Основными, присущими только кипящему слою, особенностями сжигания топлива являются:

- интенсивное перемешивание частиц топлива газовыми пузырями, позволяющими избежать появления в слое существенных температурных перекосов, и как следствие, шлакования;
- интенсификация теплоотдачи от кипящего слоя к теплопередающим поверхностям (частица твердого материала, охлаждаясь у поверхности трубы, омываемой рабочим телом, из-за различия плотностей отдает на несколько порядков теплоты больше, чем такая же по объему частица газа, охлаждающаяся до той же температуры; коэффициент теплоотдачи к погруженным в кипящий слой трубам составляет в современных топках $\sim 250 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$;
- интенсификация горения твердого топлива (объясняется увеличением удельной поверхности окисления и постоянным «обновлением» его поверхности благодаря интенсивной пульсации, вращению, соударениям, дроблению и истиранию).

Топки с кипящим слоем занимают промежуточное положение между топками слоевого сжигания и факельными. Со слоевыми топками их объединяет, прежде всего, возможность сжигания "дробленки" с размером кусков до 10 – 20 мм и наличие решетки, через которую в слой подается воздух. При повышении скорости воздуха, продуваемого через слой, наступает момент, когда аэродинамическая сила, действующая на каждую частицу топлива, преодолевает силы взаимного трения частиц. Дальнейшее увеличение расхода воздуха приводит к псевдооживлению частиц топлива, слой как бы кипит (отсюда название "кипящий слой"), высота и пористость его увеличиваются (рис. 8).

Минимальную скорость, при которой начинается псевдооживление, называют *первой критической скоростью* $W_{кр1}$; при *второй критической скорости* $W_{кр2}$ аэродинамическая сила становится равной силе тяжести частиц топлива, и начинается их интенсивный вынос из слоя. Оба эти параметра имеют строго определенные значения только для монодисперсного материала с

постоянной плотностью, а слой, как известно, состоит из полифракционного инертного материала и частиц топлива разной плотности.

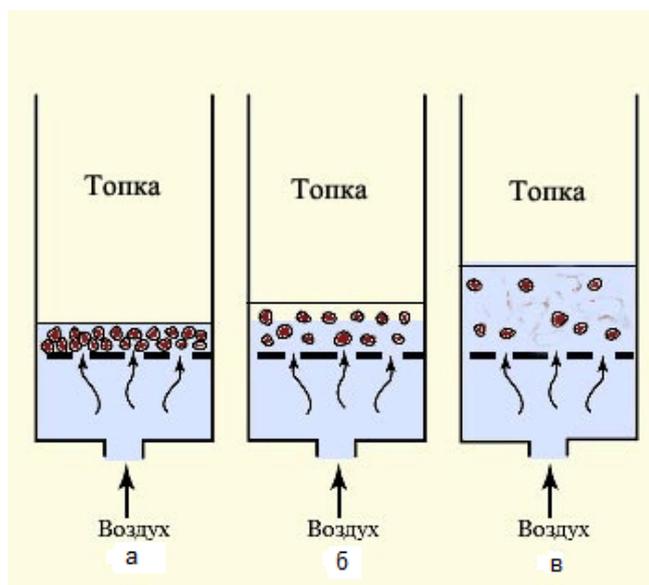


Рис. 8. Изменение слоя топлива при различных скоростях нижнего дутья:

а – плотный слой; б, в – кипящий слой

Реальные топочные устройства с кипящим слоем работают со скоростями от $W_{кр1}$ до $W_{кр2}$.

Под первой критической скоростью воздуха $W_{кр1}$ понимают скорость начала оживления, которая может быть определена следующим образом:

Критерий Архимеда

$$Ar_{\epsilon} = \frac{g \cdot d_{\epsilon}^3 (\rho - \rho_{\epsilon})}{\nu_{\epsilon}^2 \cdot \rho_{\epsilon}},$$

Критерий Рейнольдса

$$Re_{кр1} = \frac{Ar_{\epsilon}}{1400 + 5,22 \sqrt{Ar_{\epsilon}}}.$$

Первая критическая скорость воздуха

$$W_{кр1} = \frac{Re \cdot \nu_{\epsilon}}{d_{\epsilon}},$$

где d_{ϵ} – эквивалентный диаметр частицы;

ρ, ρ_v – плотность частицы и воздуха;

ν_v – кинематическая вязкость воздуха;

g – ускорение свободного падения.

Вторая критическая скорость воздуха $W_{кр2}$ – это скорость уноса частиц песка, определяемая из критерия Рейнольдса:

$$Re_{кр2} = \frac{Ar_g}{18 + 0,61\sqrt{Ar_g}},$$

Вторая критическая скорость воздуха

$$W_{кр2} = \frac{Re_{кр2} \cdot \nu_g}{d_g}.$$

Различают топки с обычным, или стационарным кипящим слоем (когда скорость в нем близка к $W_{кр1}$) и топки с циркулирующим кипящим слоем (когда скорость близка к $W_{кр2}$). В последнем случае из слоя выносятся значительная часть недогоревшего топлива, которое затем улавливается в горячих циклонах и возвращается для дожигания.

Важно отметить, что в топках с кипящим слоем количество горючего материала составляет обычно небольшую долю от массы слоя, основу его составляет инертный материал. Интенсивное перемешивание твердых частиц под воздействием сжижающего воздуха, проходящего через слой зернистого материала, обеспечивает повышенный тепло- и массообмен в слое.

Применяемые в таких топках воздухораспределительные решетки увеличивают затраты на изготовление, а значительное аэродинамическое сопротивление газоздушного тракта является причиной относительно высоких затрат на собственные нужды. Вследствие постоянного выноса воздухом материала из слоя и низкой зольности древесных отходов необходимо периодическое добавление песка в слой.

При увеличении скорости дутья развиваемый потоком динамический напор может достигнуть значения, равного силе тяжести частиц, и устойчивость частиц в слое нарушается; соответствующая этому скорость дутья

называется *критической*. С дальнейшим увеличением интенсивности дутья начинается «кипение» слоя, состоящее в том, что основная масса топливных частиц поднимается над решеткой и совершает возвратно-поступательное движение вверх и вниз; при этом происходит интенсивное перемешивание топлива с окислителем.

Процесс горения твердого топлива в топочных устройствах состоит из трех основных фаз.

Первая фаза процесса горения заключается в подогреве топлива и испарении из него влаги, на что расходуется тепло, выделяемое при сжигании ранее введенным топливом. После нагревания топлива до температуры 300 – 400 °С из него начинают выделяться летучие горючие вещества.

Вторая фаза – топливо воспламеняется по достижении определенной температуры, которая зависит от вида топлива: торф – 225 °С, дрова – 300 °С, бурый уголь – 300 °С, каменный уголь – 325 °С, антрацит – 700 °С. В первую очередь воспламеняются газообразные летучие горючие вещества, затем твердая часть топлива.

Третья фаза является основной – в ней завершается окончательный процесс газификации и горение твердого остатка топлива (кокса) с выделением наибольшего количества тепла.

Процесс горения заканчивается выделением негорючего остатка (золы и шлака). Одним из направлений совершенствования слоевого способа сжигания является использование топок с кипящим слоем.

В кипящем слое скорость дутья превышает предел устойчивости плотного слоя, однако средняя скорость газов в топке над слоем далека от скорости витания основной массы частиц, т.е. скорости, при которой частицы оказываются взвешенными в потоке.

По сравнению с исходным (плотным) слоем при «кипении» слой увеличивается в объеме в 1,5 – 2 раза. Частицы топлива совершают в слое возвратно-поступательные движения до тех пор, пока их масса не уменьшится настолько, что они выносятся из слоя газовым потоком.

На практике процессы в кипящем слое осуществляются для материалов с возможно более равномерным составом мелких частиц. Топки с кипящим слоем применяются для парогенераторов малой и средней мощности.

Топка с кипящим слоем выполняется с вертикальными стенками и подом в виде горизонтальной решетки (рис. 9). Технология основана на сжигании топлива в объеме раскаленных частиц инертного материала, «кипящих» в восходящем потоке воздуха, подаваемого через сопла первичного дутья (рис. 10).

В качестве инертного материала обычно используется фракционированный песок с размером фракций 0,5–2 мм.

Кипящий слой характеризуется скоростью дутья, превышающей предел устойчивости плотного слоя, однако не достигающей скорости витания средних частиц.

Скоростью витания называется скорость среды, при которой частица находится в состоянии динамического равновесия.

При этих условиях все частицы песка в слое интенсивно перемешиваются, двигаясь колебательно вверх и вниз, причем в целом слой имеет относительно четкую верхнюю границу.

Небольшое процентное отношение массы подаваемого топлива к инертной массе кипящего слоя (2 – 3 %) и интенсификация процесса горения обеспечивают эффективное сжигание КДО с влажностью до 65 % и других низкосортных топлив, сжигание которых традиционными способами затруднительно.

Размеры частиц топлива, предназначенного для сжигания в КС, средние между размерами частиц топлива для пылевидного сжигания и для механических топок. Максимальный размер зависит от реакционной способности топлива и составляет от 6 до 25 мм. В котлах с КС характерная плотность слоя составляет 750 кг/м³. Благодаря длительному времени пребывания топлива в слое и высокой интенсивности процессов

теплообмена эффективность сжигания в топке с КС довольно велика, несмотря на относительно низкую температуру процесса 800 – 900 °С.

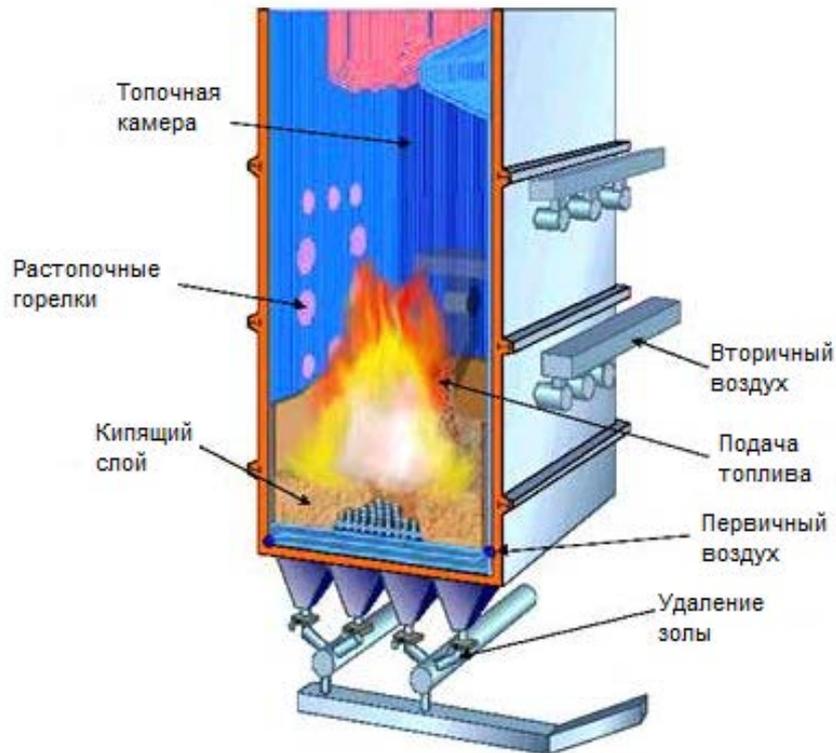


Рис. 9. Топка котла с кипящим слоем



Рис. 10. Сопла первичного воздуха

В пузырьковом слое наблюдается незначительный вынос частиц из топки. Время пребывания крупных кусков топлива велико, а мелких частиц – примерно соответствует расчетному по скорости газа. Это зачастую приводит (по крайней мере, для низкорреакционных топлив) к повышенному содержанию

углерода в слое и уносе и, соответственно, к увеличению механического недожога. Для его уменьшения вынесенные из топки частицы улавливаются и возвращаются в слой.

Технология КС обеспечивает:

- полный отказ от каких бы то ни было механически движущихся узлов топочного устройства, что значительно увеличивает его надежность;
- эффективное сжигание самых разнообразных низкосортных видов топлива;
- достижение паспортной производительности котла, при необходимости – его форсировки, даже при использовании низкосортного топлива;
- эффективную внутритопочную нейтрализацию оксидов серы (при работе на высокосернистых топливах) и азота за счет организации двухступенчатого горения топлива;
- высокую степень автоматизации технологического процесса.

Необходимым условием организации КС является установка высоконапорного вентилятора с мощным электродвигателем для преодоления сопротивления колпачковой воздухораспределительной решетки (см. рис. 10) и самого кипящего слоя.

Мелкие фракции древесных отходов (опилки и стружка) требуют организации сжигания их в топке над слоем за счет направленной подачи вторичного воздуха (рис. 9).

Снижение уровня выбросов NO_x в топках с кипящим слоем происходит благодаря низкой температуре горения, эффективной ступенчатой подаче воздуха, высокой степени смешения и низкому коэффициенту избытка воздуха. Использование добавок (например, известняка, добавляемого для связывания серы) дает хорошие результаты благодаря эффективному смешению, обеспечиваемому в псевдооживленном слое.

Надежная подача топлива вместе с оптимизированной воздушной системой обеспечивают эффективное горение с небольшим избытком воздуха.

При многоярусной воздушной системе уровень выбросов NO_x остается низким, а дальнейшее снижение может быть достигнуто вторичными методами, например, впрыскиванием аммиака или мочевины в топку.

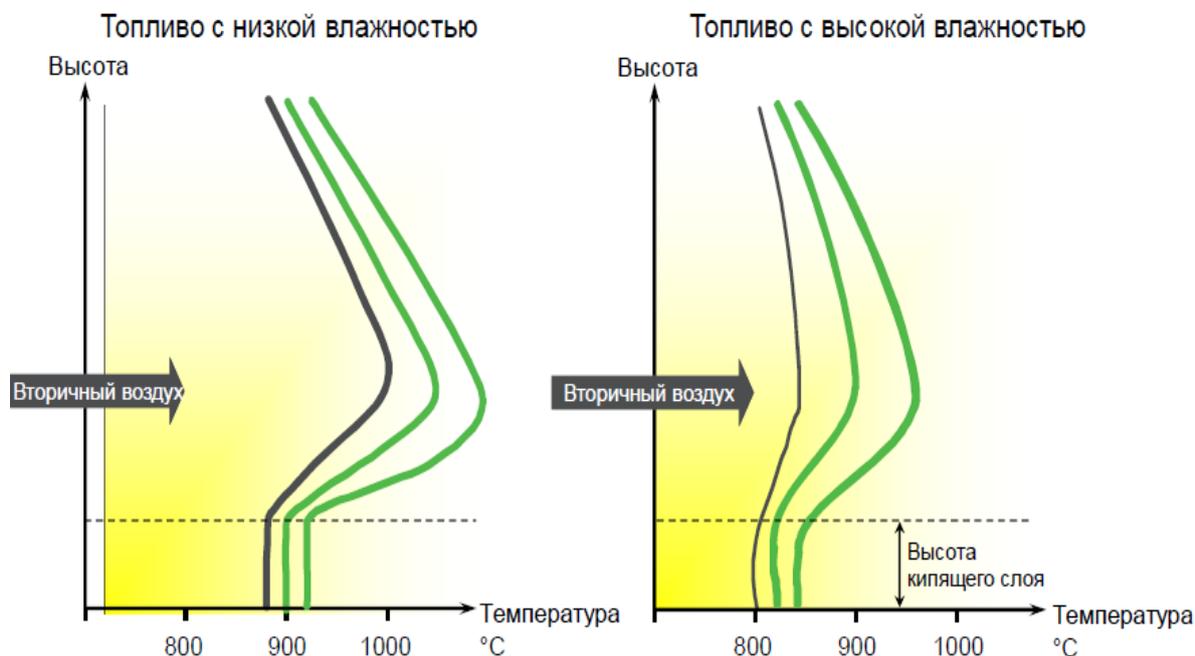


Рис. 11. Профиль температуры газов по высоте топки

Малое содержание серы в древесном топливе и довольно высокое самовосстановление золы являются причинами низких выбросов сернистых соединений, и вторичные методы обычно не нужны для улавливания SO_2 .

Для очистки дымовых газов от летучей золы используется электрофильтр.

Увеличение скорости потока воздуха до 5 – 10 м/с и использование более мелких фракций топлива позволяет создать циркулирующий кипящий слой (ЦКС). Частицы топлива, увлекаемые топочным газом, улавливаются в горячем циклоне и подаются обратно в камеру сгорания (рис. 12).

Недостатками топок с ЦКС являются их большие размеры и, соответственно, более высокая стоимость по сравнению с установками со стационарным КС. Для этих топок также характерны унос большего количества пыли с топочными газами и большие потери материала слоя. Кроме того,

необходимость использования мелких частиц топлива часто увеличивает затраты на предварительную подготовку топлива.

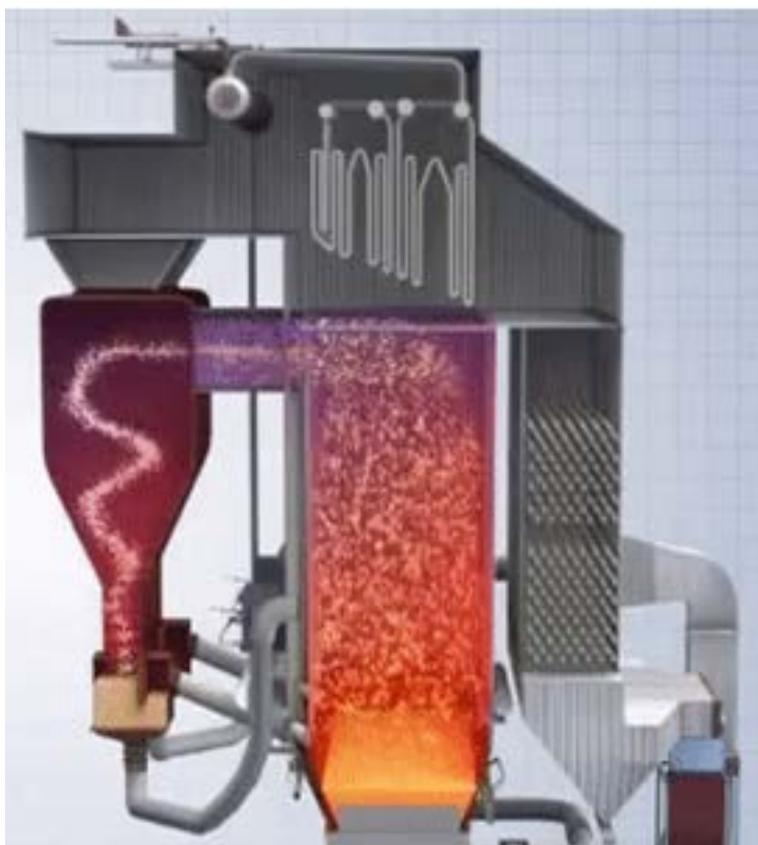


Рис. 12. Котел с циркулирующим кипящим слоем

3.3. Конструкция котла с кипящим слоем

Пароводяной тракт

Пароводяной тракт включает:

- клапаны питательной воды;
- подогреватель питательной воды (эжектор);
- экономайзер, три секции;
- конденсатор пресной воды;
- барабан с циклонами и каплеотделителями для отделения воды из пара;
- испарительные поверхности нагрева (экраны топки и кипяtilьный пучок второго газохода);

- соединительные и циркуляционные трубы;
- выпускные и дренажные трубы;
- бак продувки;
- бак непрерывной продувки;
- первичный и вторичный пароперегреватели;
- пароохладитель;
- соединительные трубы;
- предохранительные клапана для барабана и главного паропровода.

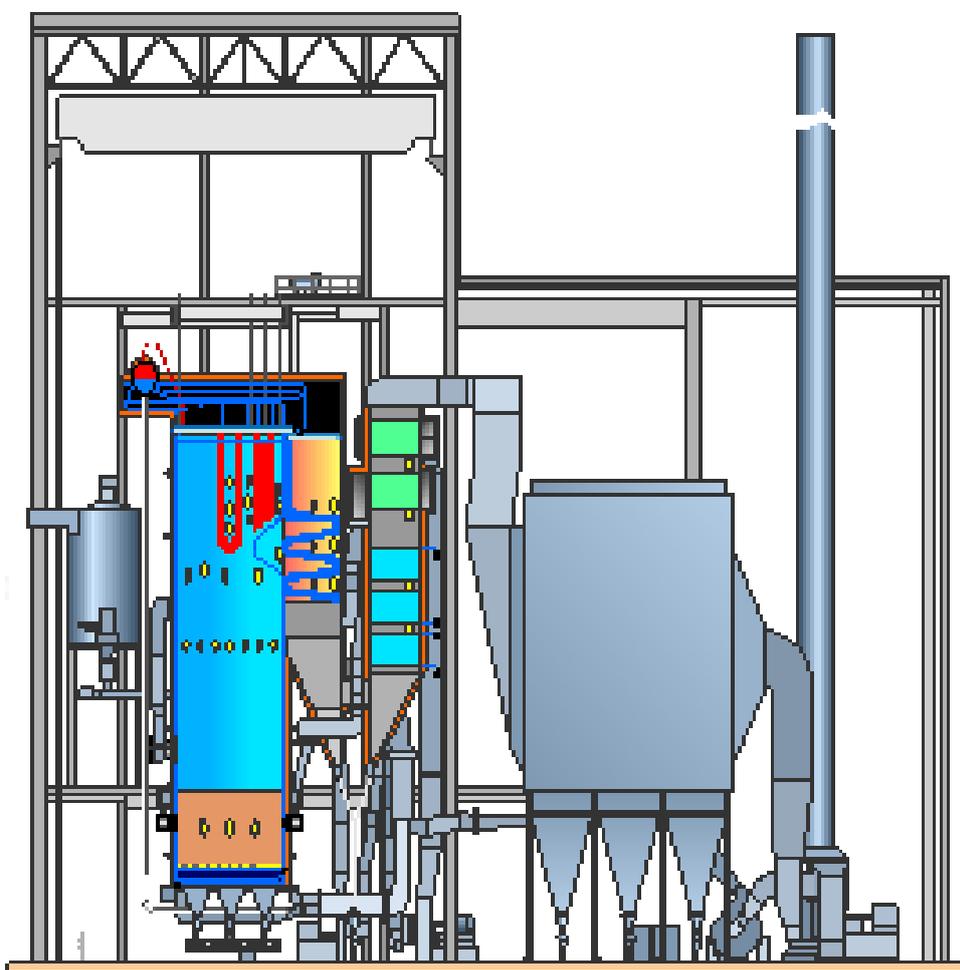


Рис. 13. Котел с кипящим слоем

Схема пароводяного тракта представлена на рис. 14.

Экономайзер. Назначение экономайзера – предварительный подогрев теплоносителя за счёт получения тепла от газообразных продуктов горения. Первые две секции экономайзера работают по противоточной схеме, а третья

секция функционирует по принципу прямотока. Экономайзер находится в третьем газоходе (см. рис. 13). Секции экономайзера изготовлены из гладких труб диаметром 38 мм.

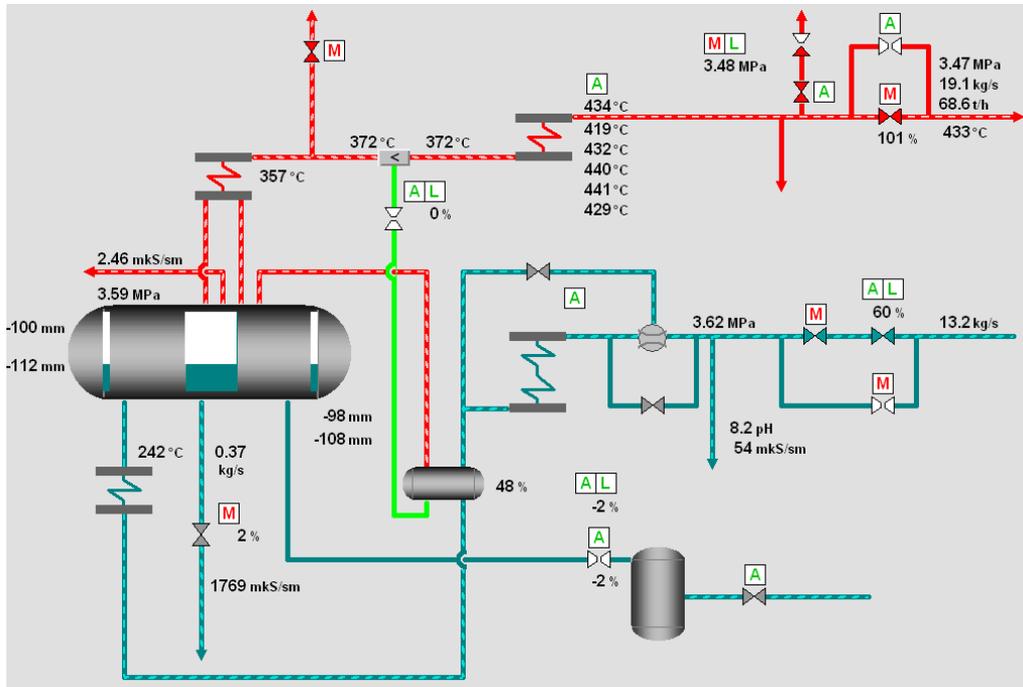


Рис. 14. Схема пароводяного тракта котла

Питательная вода через регулировочный клапан на узле питания поступает в первую секцию экономайзера, проходя последовательно сверху вниз (противоток дымовым газам) через две секции экономайзера, которые последовательно соединены, так что питательная вода входит в самую верхнюю секцию экономайзера и выходит из средней секции. Из второй секции питательная вода направляется в конденсатор, а затем входит в самую нижнюю, третью секцию экономайзера. В третьей секции вода течет вверх, т.е. параллельно потоку дымовых газов. Из экономайзера вода направляется в барабан котла.

Барабан. Назначением барабана в котле с естественной циркуляцией является разделение пароводяной смеси на пар и воду с разделённым их выводом по трубам, соответственно, к пароперегревателю или в опускные трубы контуров циркуляции.

Внутреннее оснащение барабана включает в себя (рис. 15): распределительную трубу питательной воды, оборудование для сепарации пара, в которое входят циклоны и пластинчатые каплеотделители.

Распределительная труба расположена в нижней части барабана. Сепарация пара осуществляется во внутрибарабанных циклонах, расположенных в два ряда по обеим стенкам барабана.

В котлах с естественной циркуляцией движение воды и пара по трубам экранной поверхности происходит вследствие разности плотностей воды и пара.

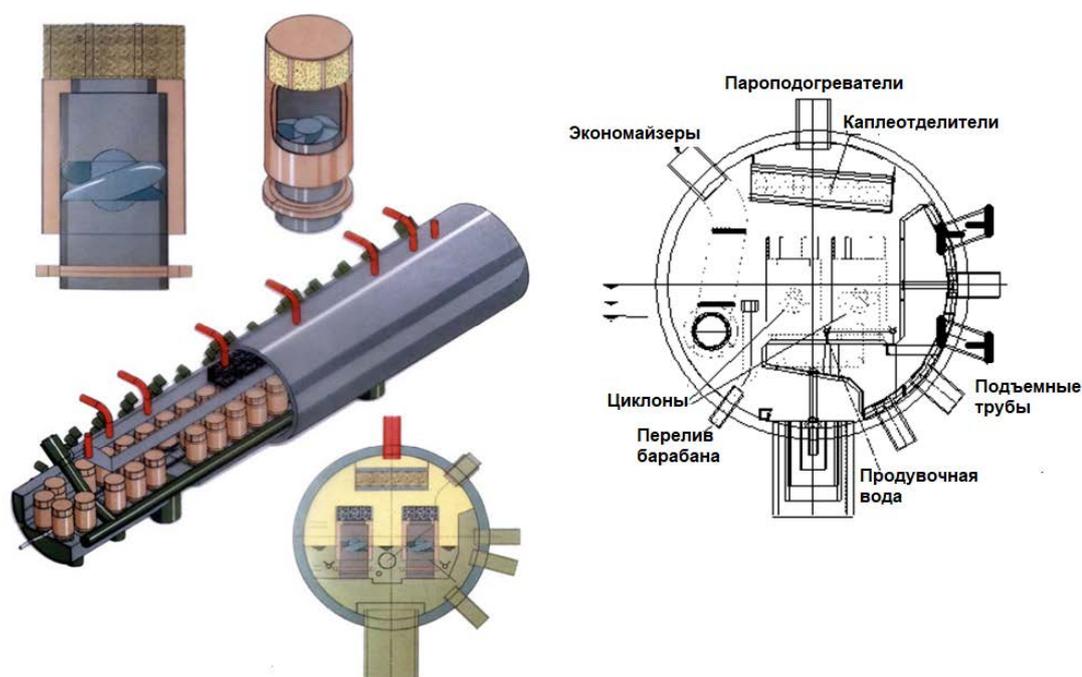


Рис. 15. Устройство барабана котла

Питательная вода подаётся в нижнюю часть барабана, где распределяется при помощи перфорированной распределительной трубы по всей поверхности дна барабана. В барабане питательная вода перемешивается с котловой водой.

Через опускные трубы, начинающиеся с днища барабана, котловая вода поступает в нижние коллектора экранов топки и в кипяtilьный пучок. Через верхние циркуляционные трубы смесь воды и пара из испарительных секций котла возвращается в барабан. В барабане пароводяная смесь проходит через сепарирующие циклоны, где капельки воды выделяются из насыщенного пара.

Вода собирается на внутренних поверхностях циклона и стекает в барабан, а сухой и чистый насыщенный пар, проходя первичный и вторичный пластинчатый каплеотделители, поступает в паропроводы.

Топка и кипятельный пучок. Размер топки определяется расчетным топливом и требуемой паропроизводительностью. Выделившаяся в топке теплота эффективно переносится в экранные трубы топки посредством радиационного теплообмена. Использование достаточного количества циркуляционных труб, распределительных и выпускных коллекторов обеспечивает надежную циркуляцию воды в экранах топки. Циркуляция воды в парогенераторе происходит при помощи естественной циркуляции. Топка оснащена герметичными инспекционными смотровыми лючками для наблюдения горелок, пода, зоны пароперегревателя. Для техобслуживания и ремонта котел оснащен плотно закрывающимися лазами.

Пароперегреватель. Пароперегреватель разделен на две ступени. Первой ступенью является пароперегреватель конвективного типа (первичный пароперегреватель), а второй – пароперегреватель радиационного типа (вторичный пароперегреватель).

Из барабана насыщенный пар направляется через соединительные трубы в потолочную часть топки и второго газохода, затем в экранные трубы второго газохода. Крыша топки, крыша и экраны второго газохода составляют первую часть первичного пароперегревателя. Пар направляется через крышу и трубы заднего экрана второго газохода в трубы боковых экранов и коллектор второго газохода. Из этого коллектора пар через соединительные трубы подводится к первичному пароперегревателю.

Первичный пароперегреватель расположен за аркой, между топкой и вторым газоходом. В трубах пароперегревателя пар протекает по противоточной схеме. Первичный пароперегреватель опирается на подвески опорных балок котла.

Из коллектора первичного пароперегревателя пар направляется в пароохладитель. Назначением пароохладителя является поддержание

постоянной и требуемой температуры пара после котла. Пароохладитель впрыскивающего типа состоит из камеры впрыскивания, впрыскивающего сопла и внутренней вентиляционной трубы. Конденсат, полученный путем конденсации насыщенного пара в конденсаторе, впрыскивается в пар.

Вертикальный вторичный пароперегреватель расположен в верхней части топки. Он является пароперегревателем радиационного типа и действует по прямоточной схеме. Из коллектора вторичного пароперегревателя пар направляется в главный паропровод.

Газовый тракт котла

Газовый тракт котла состоит из:

- топки;
- второго и третьего газоходов;
- газоходов и заслонок;
- дымососа с регулировочным оборудованием;
- вентилятора рециркуляции газов с регулировочным оборудованием;
- электрофилтра;
- дымовой трубы.

Топка котла является камерой сгорания, где высвобождается тепловая энергия. Количество образовавшихся в процессе сгорания дымовых газов зависит от вида используемого топлива.

Экраны второго газохода охлаждаются перегретым паром, который течёт в трубах экранов. За кипяtilьным пучком стены изготовлены из металлических листов.

Изнашивающее влияние летучей золы на поверхности нагрева минимизируется низкой расчётной скоростью дымовых газов.

Поднимающиеся из топки дымовые газы вначале направляются во вторичный пароперегреватель радиационного типа и потом вводятся в секцию первичного пароперегревателя. Во втором газоходе дымовые газы протекают

вниз через секцию кипятильного пучка и потом вверх через секции экономайзера и воздухоподогревателя в третьем газоходе.

Летучая зола удаляется из дымовых газов в электрофилт্রে, расположенном на выходе из котла после воздухоподогревателя (рис. 16).

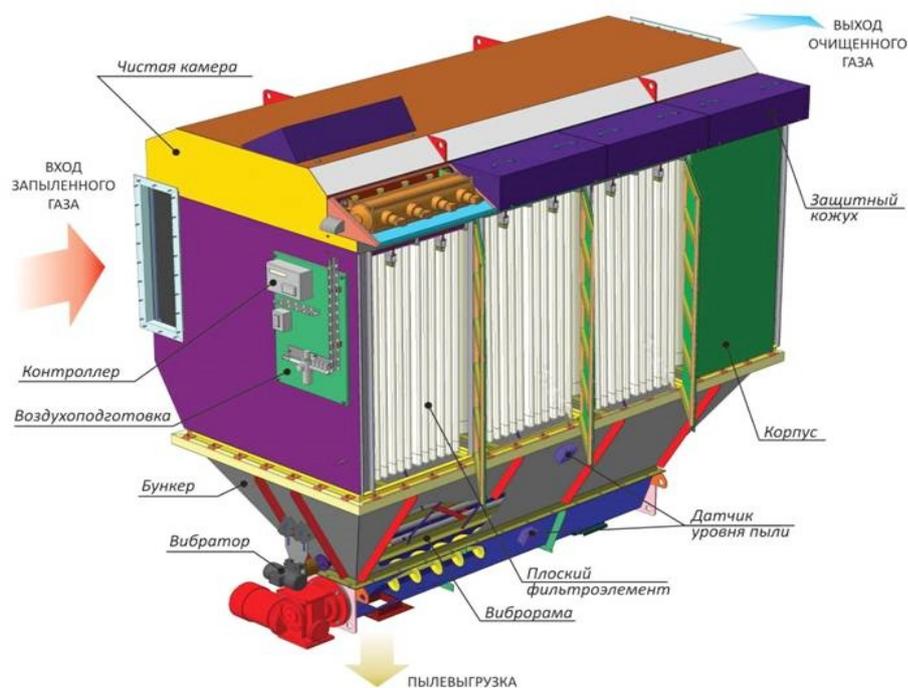


Рис. 16. Электрофилтър

Дымосос радиального типа, расположенный после электрофилтра, создаёт тягу, требуемую для транспортировки дымовых газов из топки на выход в дымовую трубу. Давление в верхней части топки, перед вторичным пароперегревателем, регулируется частотным преобразователем дымососа. Разрежение в верхней части топки поддерживается примерно в диапазоне 0,1–0,2 кПа. После дымососа давление дымовых газов близко к атмосферному.

Часть дымовых газов может быть направлена после дымососа обратно во всасывающий канал первичного воздуха (рециркуляция) с целью регулировки температуры слоя за счёт снижения содержания кислорода в слое. Количество рециркулируемых дымовых газов контролируется элементом, измеряющим расход, и регулируется заслонкой.

Схема газовоздушного тракта представлена на рис. 17.

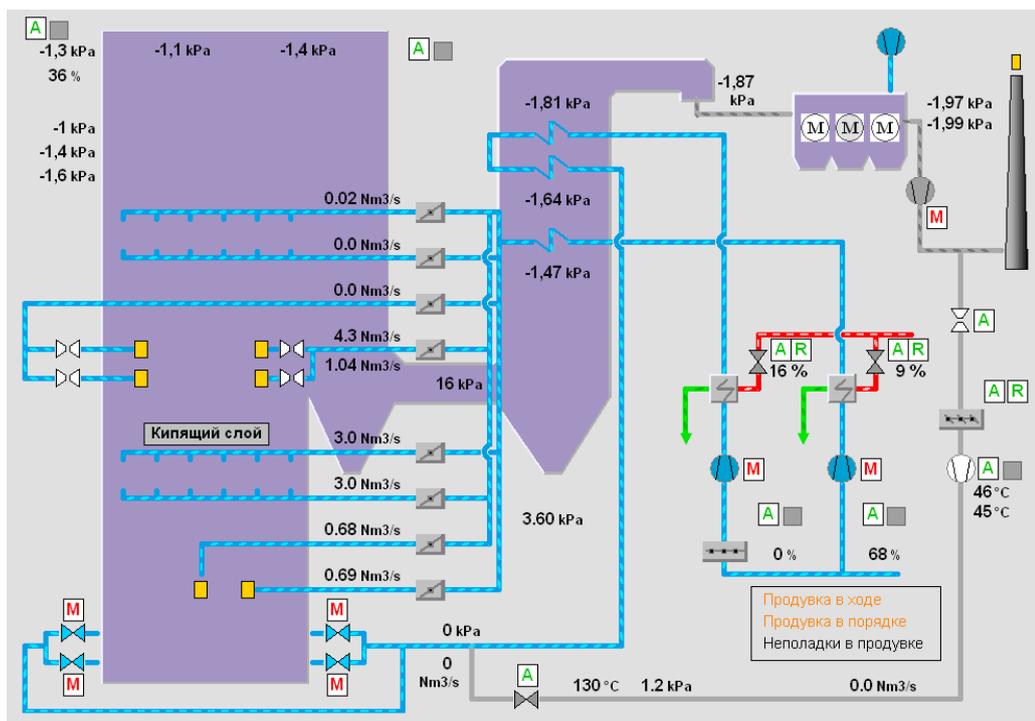


Рис. 17. Принципиальная схема газоздушного тракта

Воздушный тракт

Воздушный тракт котла включает в себя:

- воздуховоды с заслонками;
- вентилятор воздуха на горелки / вторичного воздуха;
- вентилятор воздуха ожигения (первичного воздуха);
- паровые воздухоподогреватели для первичного воздуха и для вторичного воздуха;
- сопла первичного и вторичного воздуха.

Вентиляторы первичного (на псевдоожигение) и вторичного воздуха оснащены общим всасывающим каналом с глушителем.

Воздух в топку котла с кипящим слоем подается ступенчато (рис. 18).

Песочный слой пода топки поддерживается в кипящем состоянии вентилятором первичного воздуха при всех рабочих условиях и, одновременно, часть нужного для горения воздуха вводится в песочный слой.

Для первичного и вторичного воздуха добавлены предварительные паровые калориферы для подогрева воздуха, поступающего в

воздухоподогреватель, изготовленный из труб с плавниками, что способствует интенсификации теплообмена.

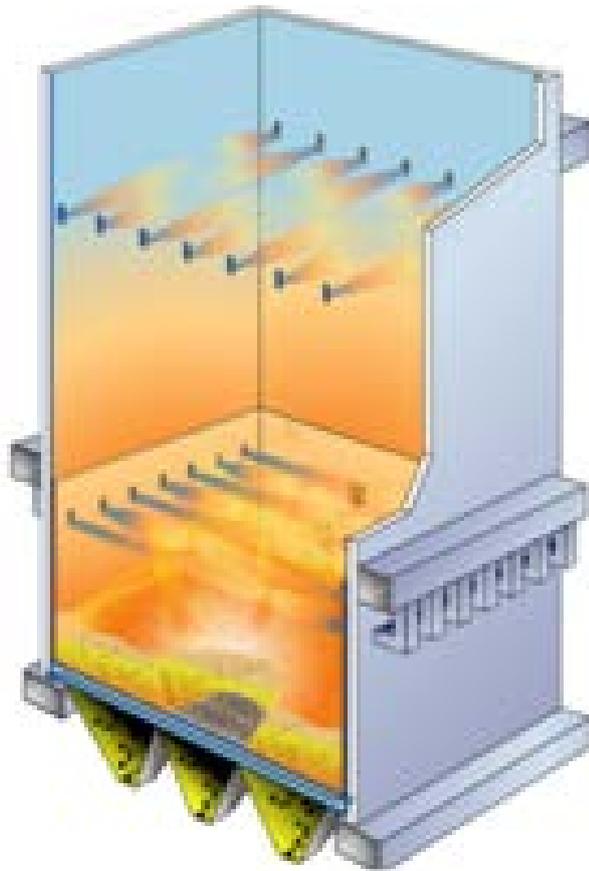


Рис. 18. Ступенчатая подача воздуха в топку котла

Первичный воздух вводится высоконапорным вентилятором первичного воздуха, расположенным на нулевой отметке. Расход первичного воздуха составляет примерно 30 – 50 % от всего воздуха, регулируется системой входных поворотных лопаток вентилятора первичного воздуха и измеряется расходомером. Первичный воздух используется также для подачи твердого топлива.

Воздух на горение вводится в топку через так называемые «гидробалки», охлаждаемые водой, и через сопла воздуха на псевдоожижение, которые расположены на «гидробалках» на равном расстоянии друг от друга.

Вентилятор вторичного воздуха подаёт воздух в сопла вторичного воздуха и на горелки. Вторичный воздух направляется в открытое пространство

прямо над слоем, а также используется в качестве уплотняющего воздуха для сажеобдувочных аппаратов.

Оптимальное количество воздуха на горение в кипящем слое достигается регулировкой расхода вторичного воздуха. Вентилятор вторичного воздуха является вентилятором радиального типа, и давление вторичного воздуха регулируется частотным преобразователем вентилятора. Потоки воздуха на уровень вторичного воздуха и горелки регулируются отдельно регулировочными заслонками.

Обе пусковые горелки имеют свои отдельные измерители и регулировочные устройства количества воздуха. Четыре нагрузочных горелки подразделены на две группы так, что горелки 1 и 3 и, соответственно, горелки 2 и 4 имеют общие измерители и регулировочные устройства количества воздуха.

Система сжигания природного газа

Газ используется в пусковой горелке во время пуска котла для нагревания песчаного слоя до температуры воспламенения твёрдого топлива и, на непродолжительное время, для поддержания горения в кипящем слое в тех случаях, когда твёрдое топливо имеет высокую влажность.

Газ используется в нагрузочных горелках для производства части или всего максимально допустимого количества пара на котле.

Газовое оборудование состоит из:

- двух пусковых горелок со вспомогательным оборудованием;
- четырёх нагрузочных горелок со вспомогательным оборудованием;
- газопроводов, оснащенных оборудованием и фильтрами.

Пусковые горелки рассчитаны так, что их мощность достаточна для нагревания слоя материала до температуры горения твёрдого топлива.

Нагрузочные горелки спроектированы так, что их мощность достаточна для производства полного расхода пара котла с использованием только природного газа в качестве топлива.

Пусковые горелки имеют общее устройство для измерения расхода газа и общий регулировочный клапан. Нагрузочные горелки 1 и 3, как и нагрузочные горелки 2 и 4, имеют общие устройства для измерения расхода газа и общие регулировочные клапаны.

Система подачи топлива и песка

Назначением *системы подачи топлива* является транспортировка твёрдого топлива в бункеры и подача требуемого расхода топлива из бункеров в котёл.

Основным топливом для сжигания в котле с кипящим слоем является биотопливная смесь из коры, опилок, ила и древесных отходов. Фракция топлива смешивается с корой в соответствии с пропорциями фракций.

Размер частиц топливной смеси должен отвечать показателям:

Измерение	Размер частиц	Содержание	Значение (макс.)
Длина, Д	<100 мм	90 %	150 мм
Ширина, Ш	<50 мм	70 %	70 мм
Толщина, Т	<15 мм	70 %	50 мм

Смесь топлива поставляется в бункер топлива без камней, земли, частиц металла или другого несгораемого материала.

Температура плавления золы топлива должна быть выше 1100 °С. Состав и свойства топлива приведены в таблице.

Элементный состав и свойства топлива

Состав и свойства	Ил	Кора	Опилки
Углерод, C^d , %	45,0	50,00	50,00
Водород, H^d , %	5,7	6,00	6,00
Кислород, O^d , %	37,6	38,66	38,66
Азот, N^d , %	0,4	0,30	0,3
Сера, S^d , %	0,1	0,02	0,02
Хлор, Cl^d , %	0,2	0,02	0,02
Зольность, A^d , %	11,0	5,00	5,00
Влажность, W^r , %	70	55	40
Низшая теплота сгорания, Q_i^r , МДж/кг	2,8	7,1	10

Размер частиц

< 1,200 мм

< 0,700 мм

< 0,500 мм

Порция

100 %

40 %

10 %

Качество

Температура точки размягчения

>1100 °С

Количество кварца как минерала

< 70 %

Физические свойства

- Песок должен быть сухим
- Насыпная плотность (примерно) 1500 кг/м³
- Твердость материала слоя (МОН шкала) 6,0 – 7,0

Система подачи топлива (рис. 19) состоит из:

- распределительного скребкового конвейера;
- двух бункеров для топлива, заключающих в себя делители и разгружающие шнеки;
- скребковых конвейеров из бункеров в котел – по 2 на каждой стороне топливоподачи;
- труб для подачи топлива со шлюзовыми питателями – по 2 на каждой стороне топливоподачи;
- системы пара среднего давления для защиты от пожара.

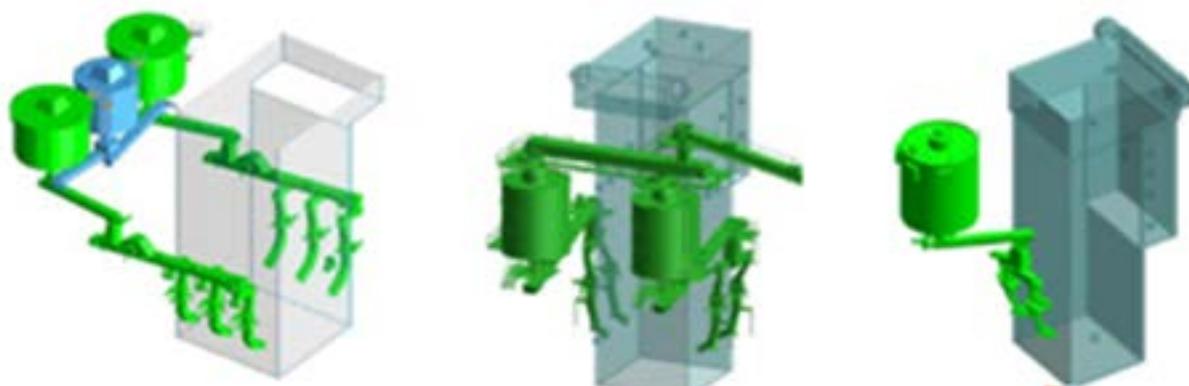


Рис. 19. Система подачи топлива

Конструкция подачи топлива зависит от производительности котла. В малых котлах подача топлива производится через 1 – 3 точки расположенные на фронтальном экране (рис. 20). В котлах большой производительности – через 4 или 6 точек, расположенных на боковых экранах.

Система подачи топлива спроектирована для обработки видов топлива, основным материалом которых является дробленая древесина.

Котел оснащен двумя линиями для подачи топлива, каждая с производительностью 70 % от общей производительности котла, для обеспечения высокой надежности котельной установки.

При нормальной работе топливо подается в топку через обе линии с боковых экранов топки. Все трубы, подающие топливо, оснащены шлюзовыми питателями для предотвращения хода дымовых газов из топки. Трубы, подающие топливо, оснащены системой инжестирующего воздуха. Эта система улучшает подачу и распределение топлива.



Рис. 20. Точки для подачи топлива

Бункеры для топлива котла оснащены шнековыми питателями с регулировкой частоты. Эти питатели с установленной скоростью подводят твердое топливо из бункеров к шнековым питательным конвейерам, подающим топливо на шлюзовые питатели в котел.

Назначением *системы подачи песка* является складирование подпиточного песка и подача подпиточного песка в котел при нормальной работе котла.

Система подачи песка состоит из:

- бункера для песка с питательной пневматической трубой;
- разгружающих труб;
- шлюзового питателя.

Песок из автоцистерны подается пневматически в бункер подпиточного песка, а затем гравитационным способом – из бункера в котел через шлюзовый питатель и трубу для подачи песка.

Принципиальная схема подачи топлива и песка представлена на рис. 21.

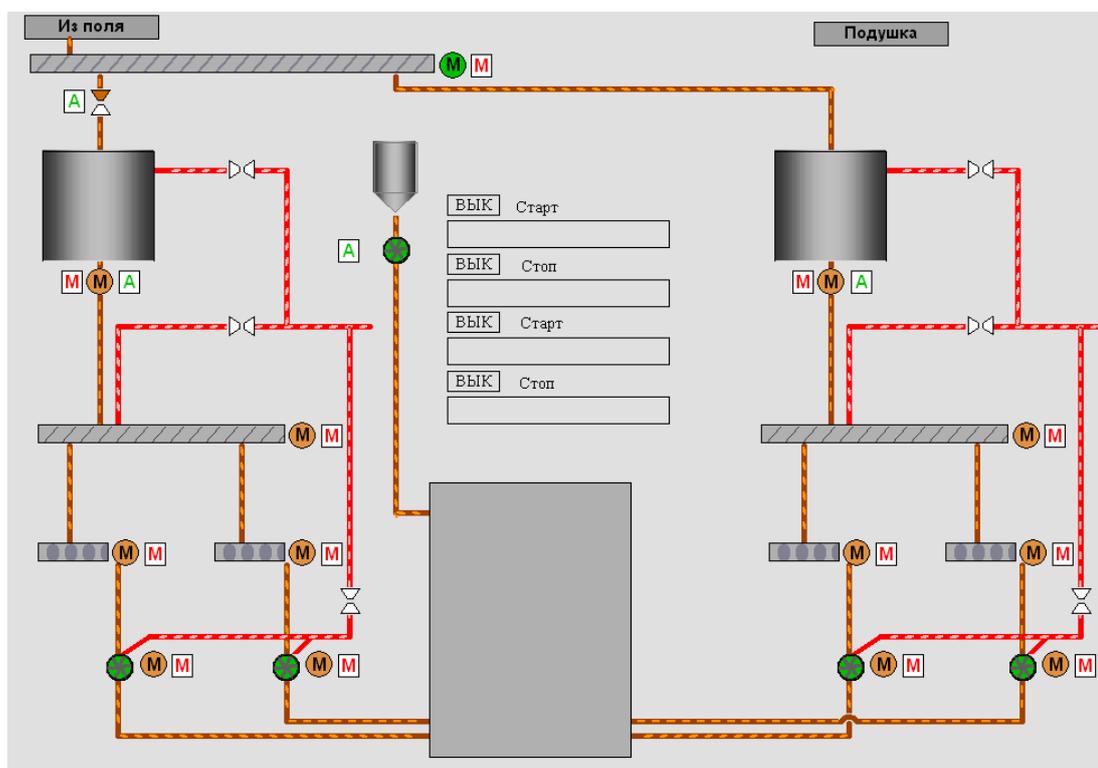


Рис. 21. Схема подачи топлива и песка

При работе котла высота слоя регулируется способом измерения перепада давлений в зоне слоя. Когда перепад давления превышает допустимые пределы, песок должен быть или удален из слоя, или же добавлен в слой. При нормальной работе требуется добавлять небольшое количество подпиточного песка.

Используемые скорости псевдооживления обеспечивают минимальные потери песка с дымовыми газами. Зато количество загрязнений во входящем топливе имеет большое значение, так как возникает необходимость удаления крупного материала, и увеличивается расход подпиточного песка.

Недостатком установок, предназначенных для сжигания топлива в кипящем слое, является унос большого количества пыли с топочными газами, что делает необходимым использование эффективных золоуловителей и регулярную чистку систем котлоагрегата. Материал псевдооживленного слоя также теряется с золой, что требует регулярного пополнения материала.

Кипящий слой

Назначением системы сжигания в кипящем слое является как можно более эффективное горение разных топлив. Стабильное горение достигается даже при сжигании топлива с высокой влажностью. Это достигается благодаря высокой теплоемкости материала слоя. Маленькие частицы горят быстро над кипящим слоем, а более крупные частицы проваливаются в слой, где они высушиваются и газифицируются. Остаточный уголь сжигается в основном в кипящем слое, тогда как летучий материал сжигается и в кипящем слое, и над ним (рис. 22).

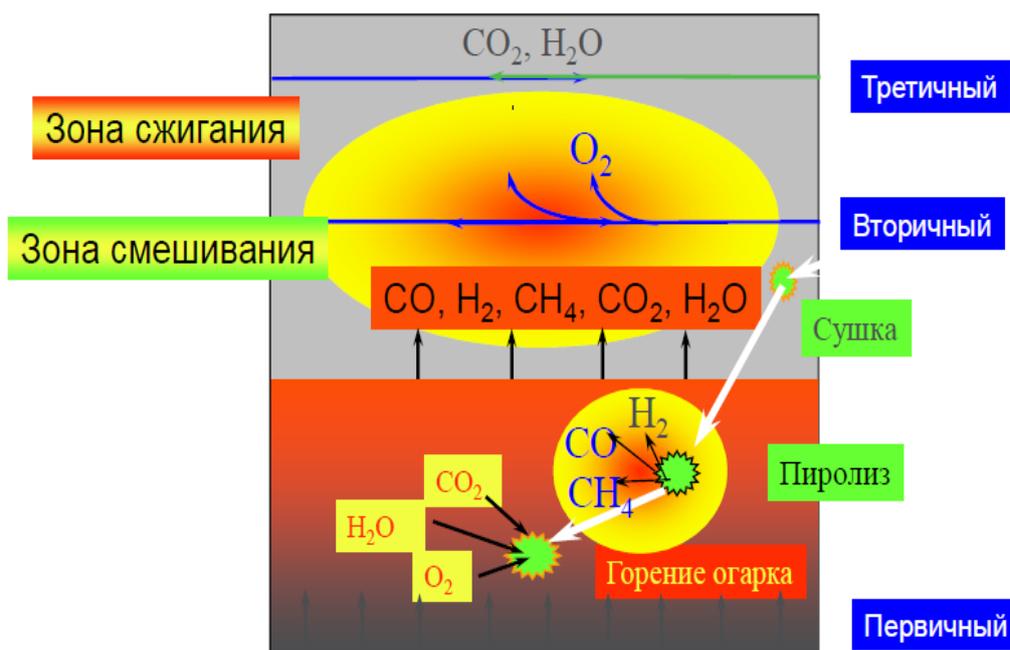


Рис. 22. Схема сжигания топлива в кипящем слое

Система сжигания в кипящем слое (рис. 23, 24) включает:

- решетку кипящего слоя;
- распределительные коллектора воздуха для гидробалок;
- песочного кипящего слоя.

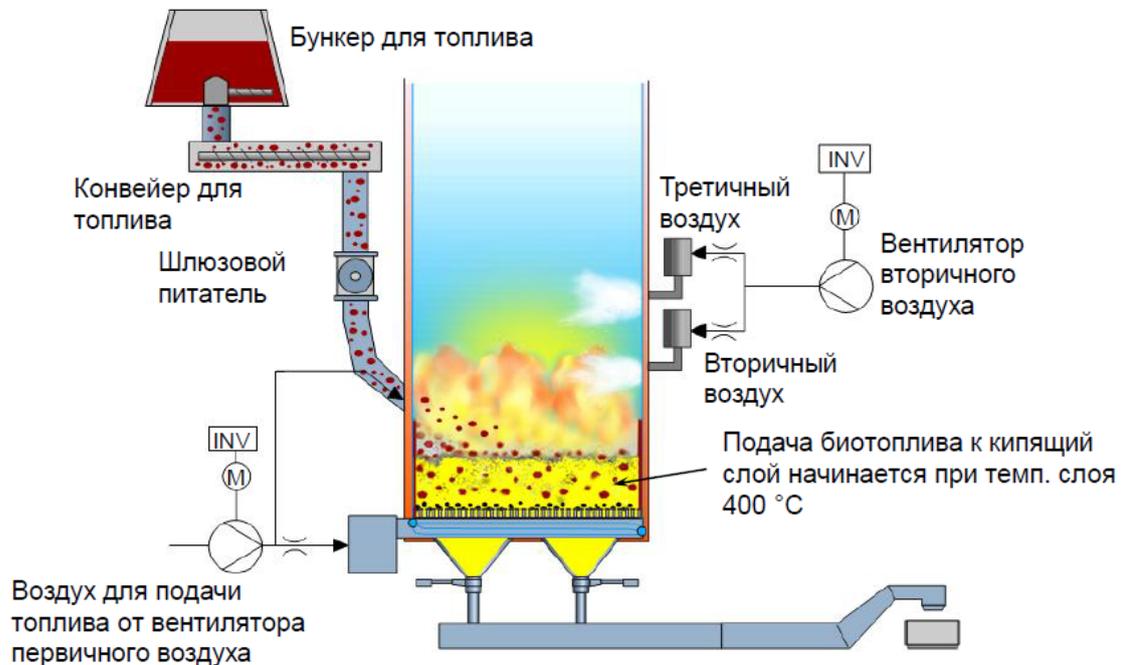


Рис. 23. Система сжигания топлива

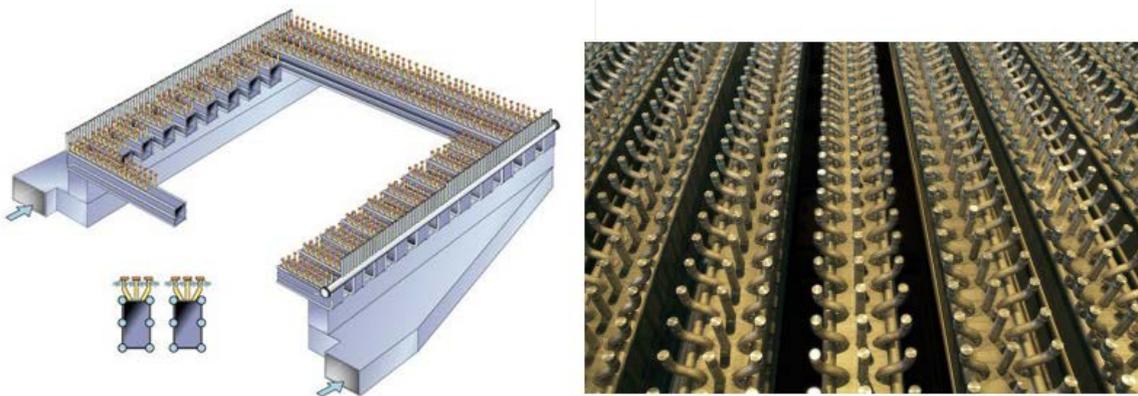


Рис. 24. Решетка кипящего слоя

Слой состоит из песка, топлива и золы. В качестве песка используется просеянный натуральный песок (крупность частиц от 0,5 до 1,2 мм), который «кипятится» первичным воздухом и, если требуется регулировка температуры слоя, то отчасти также рециркуляционными газами. Первичный воздух вводится в топку вентилятором высокого давления через сопла, расположенные

в гидробалках решетки. Это ведет к расширенной зоне горения топлива, к высокой теплопередаче в слое. Нижние экраны топки защищены футеровкой с низким содержанием цемента. Футеровка защищает трубы от эрозии.

Вторичный и третичный воздух вводятся в топку с разных уровней над слоем, где происходит конечное сжигание и регулирование содержания кислорода в дымовых газах. Распределение воздуха определяется в соответствии с качеством топлива, производительностью котла и температурой слоя.

Температура слоя зависит от качества и количества топлива в слое и измеряется в шести разных местах. Оптимальная температура находится между 750 °С и 950 °С. Регулировка температуры слоя выполняется системой рециркуляции газов, которая перемешивает дымовые газы с первичным воздухом и одновременно снижает содержание кислорода в слое.

Во время работы котла высота слоя регулируется способом измерения перепада давлений в зоне слоя. Когда перепад давлений превышает допустимые пределы, песок должен быть удален из слоя или добавлен в слой. Потеря давления является пропорциональной статической высоте слоя песка, которая может изменяться от 0,4 до 0,6 м.

Высокий слой расходует больше электроэнергии, но низкий слой может причинить помехи при «кипячении». Работа слоя наблюдается способом измерений температуры.

Изменения в гранулометрическом составе песка во время работы. Материал слоя становится крупнее в течение работы. Это происходит из-за того, что топливо всегда содержит немного песка и щебня. С другой стороны, слой мельчает до тех пор, пока диаметр частицы не становится около 0,3 мм и частица не выведена из слоя.

Если значения температуры слоя начинает заметно колебаться, значит, материал слоя становится слишком крупным. Крупность материала слоя может регулироваться путем периодического удаления крупного материала. Материал

слоя является оптимальным, если удаленный песок содержит меньше чем 10 – 15 % частиц размером 1,2 мм.

Достоинства топок с кипящим слоем:

- низкая температура сгорания 600-1000 °С – зола не расплавляется;
- высокая теплоемкость компенсирует содержание влажности в топливе;
- высокая мощность сгорания при использовании топлива, основным материалом которого является древесина, топливо не скапливается в слое;
- топливо эффективно измельчается и смешивается;
- почти вся зола выходит из слоя в виде летучей золы (кроме очень больших частиц, а также камней);
- в слое ровная температура; возможность наблюдения за процессом ожигения;
- высокая скорость регулирования подачи топлива;
- состояние слоя регулируется с помощью измерения температуры слоя, потери давления в слое, расхода газа на ожигение и содержания кислорода в дымовых газах.

Система удаления летучей золы и золы с пода

Назначением системы удаления золы с пода и золы второго газохода является удаление крупного материала из слоя и удаление летучей золы, а также транспортировка этих материалов в бак.

Назначением системы удаления летучей золы является удаление летучей золы из второго и третьего газоходов и из воронок электрофилтра, транспортировка этой золы и складирование в бункере летучей золы.

Система удаления золы с пода состоит из:

- труб для удаления золы с пода, включая пневматические заслонки;
- шнековых конвейеров, охлаждаемых водой, 2 шт.;
- скребкового конвейера;
- оборудования для охлаждения шнековых конвейеров.

Система удаления летучей золы состоит из:

- шнеков для золы в воронках второго и третьего газоходов;
- пневматической системы транспортировки летучей золы из воронок второго и третьего газоходов;
- пневматической системы транспортировки летучей золы из воронок электрофильтра;
- бункера летучей золы;
- устройства для сухой разгрузки бункера летучей золы;
- устройства для влажной разгрузки бункера летучей золы.

Собственная зола из топлива размалывается практически совершенно в мелкую пыль, которая удаляется из топки в форме летучей золы. С другой стороны, камни и прочий, с точки зрения кипячения, слишком крупный материал остается на дне решетки и должен удаляться отдельно сквозь решетку.

Система удаления золы с пода

Крупный материал удаляется с пода топки через свободное пространство между гидробалками (рис. 25). Примерно 30 % общей открытой площади поперечного разреза топки обеспечивает удаление крупных частиц.



Рис. 25. Система удаления несгоревшего остатка

Под балками находятся шесть воронок, в которые собирается удаленный крупный материал, и два шнековых конвейера, охлаждаемых водой. Под каждой воронкой крупного материала находится труба, оснащенная задвижкой с пневматическим приводом. Шнековые конвейеры сбрасывают охлажденную, удаленную с пода золу в скребковый конвейер, который удаляет золу в контейнер, расположенный снаружи котельного здания. Конвейеры работают периодически (несколько минут в час) для удаления крупного материала в контейнер крупного материала (рис. 26).



Рис. 26. Система удаления крупного материала

Под шнековыми конвейерами крупный материал немного охлаждается первичным воздухом и котловой водой, когда он проходит мимо гидробалок.

Система удаления золы из второго и третьего газоходов

Летучая зола состоит из золы, содержащейся в топливе, не сгоревшего угля и из мелких фракций песка. Из второго и третьего газоходов летучая зола транспортируется пневматически в бункер летучей золы.

Система удаления летучей золы

Летучая зола собирается из дымовых газов в электрофилт্রে. Из воронок электрофилтра летучая зола переводится в бункер летучей золы тремя пневматическими конвейерами. Бункер летучей золы оснащен оборудованием для сухой и влажной разгрузки. Система сухой разгрузки состоит из заслонки, управляемой вручную, заслонки с пневмоприводом и шлюзового питателя. Кроме управляемой вручную заслонки, заслонки с пневмоприводом и шлюзового питателя, система для влажной разгрузки оснащена также увлажнительной машиной. Увлажненный шнек включает в себя трубы, клапаны и сопла для увлажняющей воды. Шлюзовый питатель регулирует расход золы в увлажнительную машину, которая загружает влажную золу в грузовик. «Кипячение» летучей золы происходит всегда автоматически во время разгрузки бункера для летучей золы. Летучая зола «кипятится» сжатым воздухом периодически во время разгрузки бункера, для предотвращения сводообразования золы в бункере.

Система сажеобдувки

Назначением системы сажеобдувки является очистка поверхностей нагрева пароперегревателя, кипяточного пучка, экономайзера и воздухоподогревателей паром высокого давления.

Система сажеобдувки состоит из:

- выдвигных сажеобдувочных аппаратов в зоне пароперегревателей;
- многосопловых сажеобдувочных аппаратов с коротким ходом, расположенных в зоне кипяточного пучка, экономайзера и воздухоподогревателя;
- трубопроводов для пара на сажеобдувку.

Система предназначена для удаления остатков золы с поверхностей нагрева. Загрязненные поверхности нагрева уменьшают теплопередачу и могут стать причиной забивания труб. Поэтому поверхности нагрева должны периодически очищаться.

Необходимость в сажеобдувке очень сильно зависит от свойств топлива и от нагрузки котла. Рост сброса тяги и повышение температуры дымовых газов после котла указывают на то, что поверхности нагрева должны очищаться чаще.

В котле есть всего тринадцать сажеобдувочных аппаратов. Пароперегреватель оснащен пятью аппаратами, оставшиеся восемь являются аппаратами с коротким ходом, включая три сажеобдувочных аппарата для кипятильного пуска, три для экономайзера и два для секций воздухоподогревателя.

Сажеобдувочные аппараты являются паровыми. Пар отбирается после первичного пароперегревателя. Перед входом в аппарат давление пара снижается примерно до 25 бар.

Конструктивная схема сажеобдувочного аппарата приведена на рис. 27.

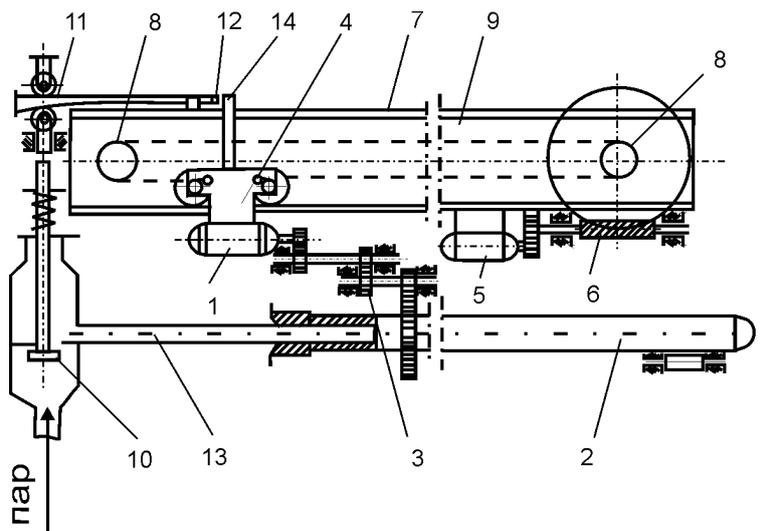


Рис. 27. Сажеобдувочный аппарат:

1, 5 – электродвигатель; 2 – обдувочная труба; 3, 6 – редуктор; 4 – каретка;
7 – монорельс; 8 – звездочка; 9 – бесконечная цепь; 10 – запорный клапан;
11 – клин; 12 – рычаг; 13 – неподвижный паропровод; 14 – стержень

При получении импульса от предыдущего обдувочного аппарата, закончившего свою работу, пускатель включает электродвигатели 1 и 5. При этом включается сигнальная лампа, расположенная на щитке программного управления обдувкой. Каретка 4, перемещаясь по монорельсу, вводит

обдувочную трубу 2 в газоход. Когда обдувочная труба выходит на позицию обдувки, стержень 14, воздействуя на рычаг, увлекает при помощи тяги клин 11, который через толкатель отжимает запорный паровой клапан, открывающий доступ пара в обдувочную трубу. Пар из обдувочной трубы выходит через сопла, обдувая поверхность нагрева. При поступательно-вращательном движении трубы 2 обдувка производится по винтовой линии.

После полного ввода обдувочной трубы внутрь газохода штифт, установленный на приводной цепи 9, воздействуя на концевые выключатели электродвигателя 5, переключает прибор на обратный ход. При этом обдувка поверхности нагрева производится так же, как и при движении обдувочной трубы внутрь газохода.

До того, как сопловая головка будет выведена из газохода, стержень 14, воздействуя через рычаг 12 на клин 11, выведет его в исходное положение, и запорный паровой клапан под действием пружины закроется, прекратив доступ пара в обдувочную трубу.

С возвратом обдувочной трубы в исходное положение штифт, установленный на приводной цепи 9, воздействуя на концевые выключатели, отключает электродвигатели 1 и 5, после чего следующий по схеме прибор получает импульс на включение.

Паропроводы на сажеобдувку спроектированы так, что они сами дренируются в бак продувки и предотвращают входа конденсата в сажеобдувочные аппараты.

3.4. Опыт эксплуатации котлов с кипящим слоем

В настоящее время котлы с кипящим слоем находят широкое применение. С 1974 г. установлено более 160 котлов со стационарным кипящим слоем теплопроизводительностью от 23 до 300 МВт и более 60 котлов с циркулирующим кипящим слоем теплопроизводительностью до 600 МВт.

На ряде предприятий целлюлозно-бумажной промышленности выполнена модернизация котлов КМ-75-40, связанная с реконструкцией топочной камеры с переводом на сжигание в кипящем слое.

Кондопожский ЦБК

- Дата постройки котлоагрегатов КМ-75-40 – 1976 г.
- Дата реконструкции – 1991 г., 1994 г.
- Проект реконструкции – финская фирма АО «Outokumpu» в сотрудничестве с ПО «Сибэнергомаш».
- Конструкция котла – вертикально-водотрубный, с естественной циркуляцией.
- Производительность – 75 т/ч; давление в барабане – 44 ати; давление пара за ГПЗ – 40 ати; температура перегретого пара – 440 °С.

В процессе реконструкции были произведены следующие изменения:

- цепные решетки, предтопок, холодная воронка были демонтированы;
- наружные водоспускные и подъемные трубы наклонной решетки демонтированы и заглушены у барабана;
- в нижней части котла смонтирован реактор кипящего слоя (рис. 28);



Рис. 28. Нижняя часть топки

- смонтированы: оборудование первичного (высоконапорного) воздуха, оборудование подачи топлива бункер-накопитель со шнековыми разгрузчиками, запорные питатели, питательные рукава, оборудование обработки колосникового песка, бункер песка, шнековый разгрузчик песка, сливная труба для использованного песка.

Однако, при эксплуатации возникли следующие проблемы:

- спекание песка;
- большой унос песка;
- высокая температура перегретого пара;
- устаревшее оборудование;
- повышенная окорка по сравнению с расчетными данными (на 30 %) и, как следствие, перегруз дымососа, увеличение давления в топке, загазованность в цеху.

В 2000 г. в ОАО «Белэнергомаш» разработан проект реконструкции котла КМ-75-40, ст. № 2 (рис. 29), установленного на **Архангельском ЦБК**.

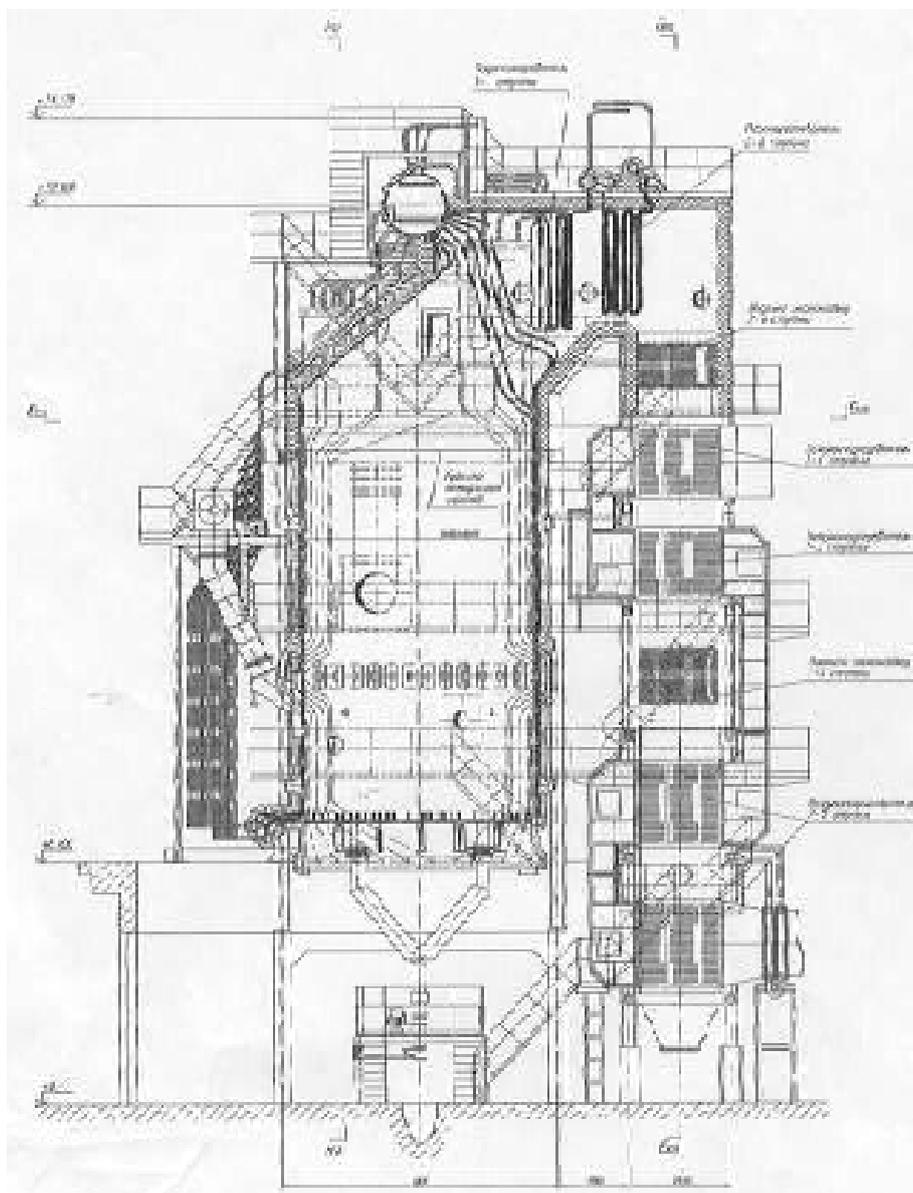


Рис. 29. Реконструкция котла КМ-75-40

В объем реконструкции вошли:

- газоплотная топка, выполненная из мембранных панелей;
- решетка кипящего слоя, расположенная в плоскости подового газоплотного экрана;
- мембранные экономайзеры;
- воздухоподогреватели с горизонтальным расположением труб, с движением газов между трубами и воздуха в трубах;
- высоконапорный вентилятор.

Поверхности нагрева были поставлены ОАО «Белэнергомаш», за исключением решетки кипящего слоя, которая была изготовлена финской фирмой «Kvaerner Power». С октября 2000 г. реконструированный котел вошел в эксплуатацию, работает по настоящее время.

В период наладки на данном котле работали специалисты АООТ ВТИ. Были проведены исследования эффективности работы кипящего слоя, поверхностей нагрева котла, выполнили анализ донной и летучей золы, определили характер влияния качества топлива на характеристики котла.

Итоги эксплуатации модернизированного котла КМ-75-40М

1. Решетка кипящего слоя позволяет сжигать кородревесные отходы хвойных и лиственных пород деревьев влажностью от 40 до 60 %. Заказчик полностью отказался от использования мазута на подсветку, расход мазута идет только на растопку котла. Котел набирает нагрузку при сжигании коры выше проектных значений.

2. В связи с высокой шлакующей способностью летучей древесной золы (содержание СаО до 45 %, MgO до 7 %) поверхности пароперегревателя и шахматного экономайзера II ступени заносятся рыхлыми отложениями. Необходима установка очистных устройств по газоходу котла как в районе пароперегревателя, так и в конвективной шахте.

3. При разработке новых проектов котлов с кипящим слоем для стабилизации режима подачи первичного воздуха под решетку и вторичного – в сопла над решеткой рекомендуется установка отдельных вентиляторов на

каждом воздушном потоке, что позволяет регулировать воздушный режим в топке.

4. Целесообразно устанавливать по тракту дымовых газов котла конвективные испарительные поверхности нагрева, которые позволят поддерживать температуру дымовых газов на выходе из котла близкой к расчетным значениям и иметь более стабильную статическую характеристику регулирования температуры пара на выходе из пароперегревателя.

На основании опыта эксплуатации модернизированного котла заказчик подготовил техническое задание на замену котла КМ-75-40, ст. № 1 новым котлом для сжигания смеси кородревесных отходов и осадка сточных вод со следующими техническими характеристиками:

- паропроизводительность – 75 т/ч;
- температура перегретого пара на выходе из котла – 440 °С;
- давление перегретого пара на выходе из котла – 3,9 МПа;
- расход КДО – 34,5 т/ч.

При проектировании нового котла применена провальная решетка КС фирмы «Kvaerner Power» типа «Hybex», горизонтальные воздухоподогреватели, КПД котла не менее 85 %. Котел полностью автоматизирован, разработана АСУ ТП совместно с фирмой «Metso Automation», установлен электрофильтр фирмы «Alstom Stavan», обдувочные аппараты «Clyde Bergemann». Рабочий проект котла разработан ЗАО СО "Белэнергомашпроект", изготовлен котел на ОАО "Белэнергомаш".

В октябре 2005 г. котел прошел гарантийные испытания и вышел на проектные параметры. В процессе отладки была испытана возможность увеличения количества сжигаемого осадка сточных вод. Примененная решетка «кипящего слоя» позволяет сжигать вместо 4 – 5 т до 15 т осадка в час.

На **Сыктывкарском ЛПК** выполнена реконструкция котла КМ-75-40 с установкой предтопка кипящего слоя для сжигания КДО с повышением номинальной паропроизводительности котла до 90 т/ч.

Поставщиком основного оборудования является компания ООО «ИНЭКО». Котел после реализации проекта продолжает работу, сжигая кородревесные отходы, опилки, отсев технологической щепы и биологически активный ил.

В отличие от традиционной технологии кипящего слоя оригинальная технология фирмы «ИНЭКО» предусматривает организацию кипящего слоя не в топке котла, а в специальном предтопке (рис. 30).

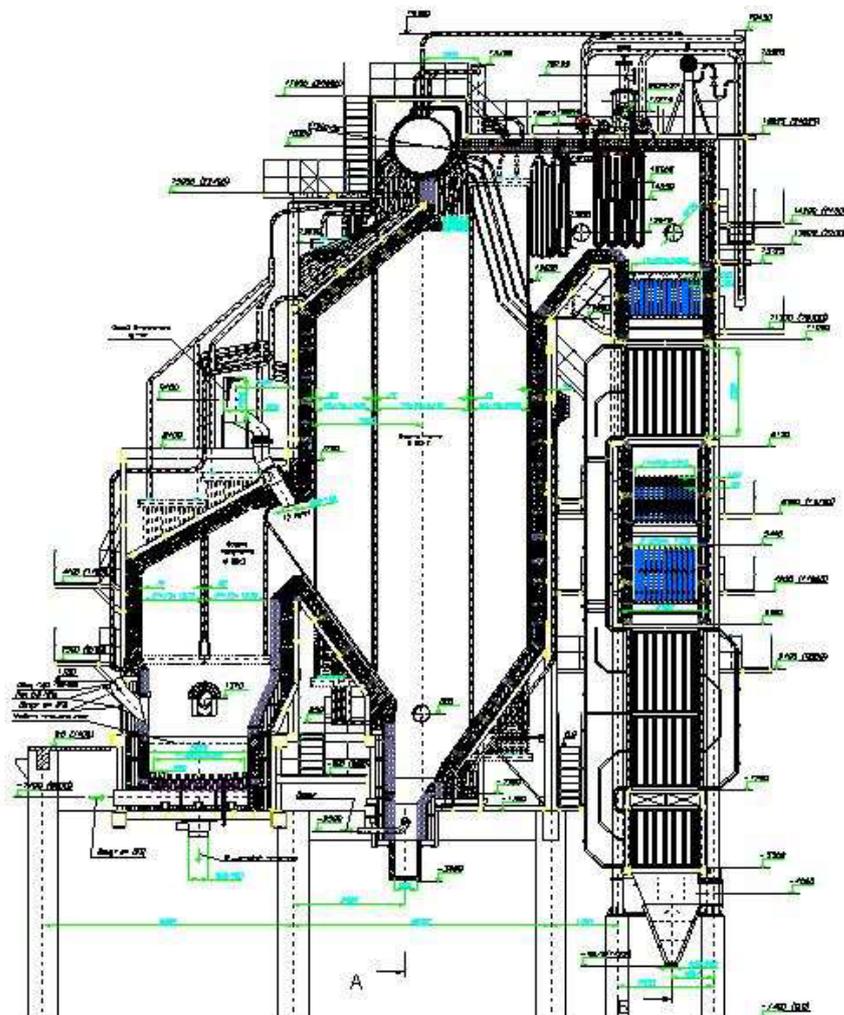


Рис. 30. Модернизация котла КМ-75-40 с предтопком «ИНЭКО»

Конструкция «предтопок - топка» обеспечивает большую продолжительность пребывания топлива в зоне активного горения в сравнении с традиционными котлами с кипящим слоем, что особенно важно при сжигании опилка и других мелких древесных отходов в смеси с корой.

В котлоагрегате реализуется двухстадийная технология сжигания КДО. Первая стадия сжигания отходов (газификация) осуществляется в экранированном предтопке в кипящем слое инертного наполнителя (кварцевого песка фракционным составом 0,8 – 2,0 мм) при температуре 650 – 750 °С. Дожигание продуктов газификации и уноса мелочи древесного полукокса (вторая стадия) осуществляется в объеме топки котла за счет организации острого дутья (вторичное и третичное дутье). Это повышает КПД котла за счет уменьшения потерь с химическим и механическим недожогом.

При сжигании отходов в кипящем слое обеспечивается эффективное, экономичное и экологически безопасное сжигание высоковлажных и низкокалорийных видов топлива. Кипящий слой создается из просеянного кварцевого песка, приводимого в состояние кипения путем подвода первичного воздуха. Воздух подается высоконапорным вентилятором через сопла, установленные под решеткой. Подогрев слоя песка до температуры, требуемой для начала сжигания твердого топлива и стабилизации процесса горения, обеспечивается пусковыми горелками.

Сжигание КДО в кипящем слое приводит к увеличению выброса золы и инертного материала с дымовыми газами, поэтому на котле было смонтировано золоулавливающее оборудование – электрофильтр, что позволило снизить запыленность очищенных дымовых газов до величины 100 мг/м³.

На **Светогорском ЦБК** в 2001 г. установлен многотопливный котел МТК-350 с кипящим слоем (рис. 31).

Основные расчетные значения котла:

- Максимальная непрерывная нагрузка (МНН)
при использовании твердых топлив 31,7 кг/с
- Максимальная непрерывная нагрузка (МНН)
при использовании природного газа 41,7 кг/с
- Давление перегретого пара на выходе из котла 39 бар
- Температура перегретого пара 440 °С
- Температура питательной воды перед экономайзером 130 °С

- Температура питательной воды перед эжектором 105 °С

Котел с пузырьковым кипящим слоем фирмы «Kvaerner Power» является однобарабанной установкой, которая состоит из газонепроницаемой топки мембранной конструкции и из горизонтального экономайзера с увеличенной поверхностью.

Котел с кипящим пузырьковым слоем и реактором НУВЕХ[®], поставки Kvaerner Power

ОАО Светогорск
в составе **International Paper**
Россия

Пар **119 МВт**
 42 кг/сек
 39 бар
 440 °С

Топливо **Кора,**
 Опилки,
 Обезвоженный
 ил,
 Природный газ

Ввод в
эксплуатацию **2001 г**

Модернизация
котла **2007 г**

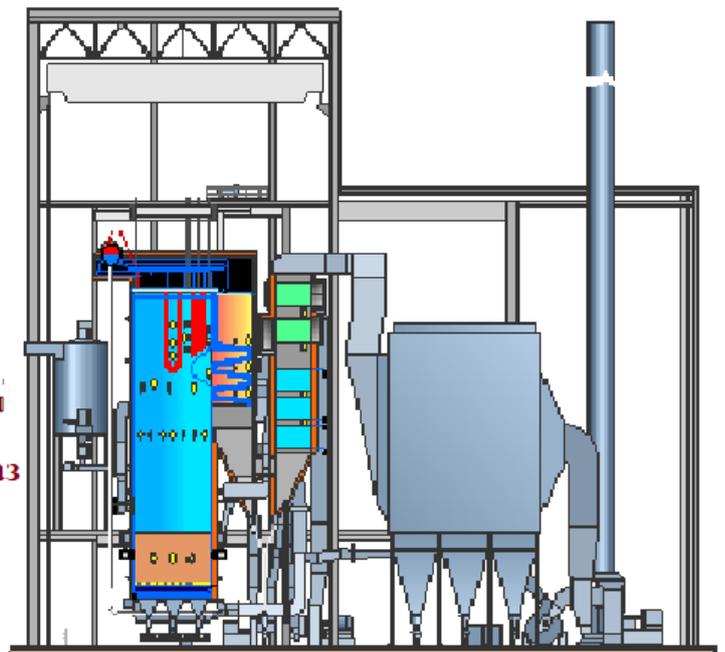


Рис. 31. Многотопливный котел МТК-350

Контрольные вопросы

1. Как организован процесс сжигания топлива в топке котла КМ-75-40?
2. Что такое скорость витания, первая и вторая критическая скорости?
3. Что такое кипящий слой?
4. В чем преимущества и недостатки топок с кипящим слоем?
5. В чем преимущества и недостатки топок с циркулирующим кипящим слоем?
6. С чем связано снижение уровня выбросов NO_x в топках с кипящим слоем?
7. Как происходит подача топлива в топочную камеру котла?

8. Для чего предназначен вентилятор рециркуляции газов?
9. Каким образом происходит удаления летучей золы и золы с пода?
10. Какое оборудование предусматривается для очистки поверхностей нагрева? Принцип его работы.

4. Содорегенерационные котлоагрегаты

4.1. Теплофизические свойства черного щелока

С энергетической точки зрения черный щелок следует рассматривать как низкокалорийное, влажное, высокосольное топливо. Особенно важными характеристиками для организации процессов его горения и восстановления являются: плотность, вязкость, теплота сгорания, теплоемкость.

Состав щелока. Сульфатный щелок представляет собой раствор различных органических веществ и натриевых соединений. Органическая часть включает преимущественно щелочной лигнин, имеющий полидисперсный состав, и продукты разрушения углеводов. Минеральная часть сухого остатка включает свободный гидроксид натрия (едкий натр) NaOH и натриевые соли (сульфид Na_2S , сульфат Na_2SO_4 и карбонат Na_2CO_3), а также натриевую щелочь, преобладающую в минеральной части щелока и химически связанную с органическими веществами.

Состав сухого остатка черного щелока зависит от вида перерабатываемого сырья, выхода целлюлозы, расхода щелочи на варку и ее потерь в цикле.

Элементный состав *органической* части сухого остатка (в % от массы):

– углерод	C^d	–	35 – 40;
– водород	H^d	–	1,6 – 4,5;
– сера органическая	S_o^d	–	0,4 – 1,5;
– кислород	O^d	–	16 - 21;
– азот	N^d	–	0,1 – 0,3 .

Состав *минеральной* части (в % от массы сухого остатка):

– едкий натр, связанный с органической частью	NaOH^{*d}	–	15 – 24;
– карбонат натрия	Na_2CO_3^d	–	7 – 19;
– сульфид натрия	Na_2S^d	–	1,5 – 7,5;
– сульфат натрия	Na_2SO_4^d	–	1,2 – 6,5;
– едкий натр	NaOH^d	–	0,5 – 3.

Таким образом, в состав сухой массы черного щелока входит 37 – 44 % *минеральных* и 56 – 63 % *органических* веществ.

Теплота сгорания щелока. Теплота сгорания щелока, как и других органических топлив, определяется с помощью калориметрической установки, где щелок сжигается в атмосфере кислорода.

Теплота сгорания щелока меняется в широком диапазоне, что вызвано влиянием на нее таких факторов, как породный состав древесины, режим варки, качество щепы, расход химикатов, соотношение в щелоке лигнина и продуктов разрушения углеводов, величина потерь органических компонентов в цикле и других, которые могут меняться в течение времени случайным образом. При таком подходе становится ясным разброс данных, полученных на различных предприятиях при определении теплоты сгорания щелоков.

Поскольку на теплоту сгорания оказывает влияние множество случайных факторов, эффект которых по отдельности учесть сложно, то представляется возможным рассматривать изменение теплоты сгорания щелока как совместный эффект действия указанных факторов и применять к изучению этого вопроса метод математической статистики. В результате статистического анализа отработанного сульфатного щелока среднее значение низшей теплоты сгорания сухой массы сульфатного щелока, которое следует применять для расчетов при проектировании СРК, составляет $Q_i^d = 13250$ кДж/кг.

Плотность. Упрощенно можно представить черный щелок как механическую смесь воды и сухого остатка, поэтому достаточно просто

аналитически описать зависимость плотности щелока от содержания в нем сухого остатка:

$$\rho = \frac{\rho_{\text{В}}}{1 - \left(1 - \frac{\rho_{\text{В}}}{\rho_{\text{С}}}\right) \frac{b}{100}}, \text{ кг/м}^3,$$

где ρ , $\rho_{\text{В}}$, $\rho_{\text{С}}$ – плотность соответственно щелока, воды, сухого остатка, кг/м^3 ;
 b – концентрация сухого остатка щелока, %.

Плотность сухого остатка изменяется в пределах 1800 – 2100 кг/м^3 . В реальных условиях даже при одинаковой плотности щелока содержание сухих веществ может быть различным в зависимости от жесткости получаемой целлюлозы. Содержание сухих веществ зависит от вида сырья, условий варки и других факторов.

Связь между содержанием сухих веществ и плотностью достаточно надежно описывается линейными уравнениями. Для щелока, полученного при варке древесины хвойных пород с концентрацией 50 – 60 % при 90 °С, уравнение для определения содержания сухих веществ имеет вид $b = 1,46\rho - 1,343$, а при варке древесины лиственных пород $b = 0,963\rho - 0,708$.

Вязкость. Общей закономерностью для всех целлюлозных щелоков является резкое увеличение их вязкости при переходе к высоким концентрациям. Существенное различие в значениях вязкости щелоков в зависимости от вида сырья и условий варки появляется лишь при концентрации сухого остатка выше 30 %. При одном и том же содержании сухих веществ черный сульфатный щелок, образующийся при варке древесины хвойных пород, имеет более высокую вязкость, чем щелок, образующийся при варке лиственных пород.

При высоких концентрациях и низких температурах черный щелок представляет собой чрезвычайно вязкую, слаботекучую жидкость, поэтому его

следует подогревать. Положительные результаты при транспортировке и подаче щелока в топку достигаются при следующих соотношениях:

концентрация	температура
60 %	– 110 °С;
65 %	– 115 °С;
70 %	– 120 °С.

Теплоемкость. Теплоемкость черного сульфатного щелока слабо зависит от температуры при значениях $t_{щ} < 100$ °С. При этом с достаточной для инженерных расчетов точностью изобарная теплоемкость может быть вычислена по уравнению:

$$C_p = 4,1 - 0,027b, \text{ кДж/(кг}^\circ\text{С)},$$

где b – концентрация сухого остатка, % по массе.

При температуре щелока выше 100 °С рекомендуется вычислять изобарную теплоемкость по следующему эмпирическому уравнению:

$$C_p = 4,1 - 0,017b, \text{ кДж/(кг}^\circ\text{С)}.$$

4.2. Организация топочных процессов в СРК

Содорегенерационный котлоагрегат (СРК) является энерготехнологическим агрегатом, основной задачей которого является высокоэффективная регенерация химикатов при условии экономичного сжигания щелока.

В связи с этим схема организации топочного процесса основана на сочетании факельного и слоевого способов сжигания, и в объеме топки, и на подду, в слое огарка.

Впрыскивание черного щелока с использованием специальных форсунок, расположенных на высоте 5 – 7 м, может производиться в объем топочной камеры (способ Комбашн – *от англ. combustion*) или непосредственно на стены топки (способ Томлинсона).

Диспергирование (распыливание) щелока должно соответствовать принципу факельно-слоевого сжигания. Размеры капель должны быть достаточно крупными для того, чтобы они не выносились из топки потоком дымовых газов. Вместе с тем, каплям щелока необходимо высохнуть за время пребывания в топочном объеме и иметь влажность не выше 3 – 5 % при падении в «подушку» огарка.

Распыл щелока оказывает существенное влияние на топочный процесс, а также в значительной мере определяет условия сушки и формирование горящего слоя огарка на поду. Ухудшение распыла и образование струй щелока приводит к ухудшению горения, снижению температуры в топке, росту «подушки» огарка, забиванию первичных воздушных сопел. Слишком тонкое диспергирование щелока ускоряет сушку и выгорание капель в объеме, увеличивает механический унос, затрудняет формирование «подушки» огарка.

Колебания в самом составе щелока, связанные с изменяющимся во времени содержанием влаги, органики и сульфата, вызывают колебания топочного процесса. В этих условиях представляется возможным говорить об оптимальном диапазоне размеров капель щелока на выходе из форсунки, который составляет 3 – 8 мм.

Столь грубый распыл щелока достигается применением механических форсунок, оснащенных соплами с отбойными щитками и работающих при давлении щелока в диапазоне 1 – 3 бар.

При *способе Комбаши* впрыскивание производится в объем топочной камеры. Мелкие частицы щелока диаметром до 2 мм под действием восходящего потока газов увлекаются в верхнюю часть топочного объема. Основная масса частиц с диаметром более 2 мм подсушивается и воспламеняется в топочном объеме и падает на под топки, образуя слой огарка – так называемую «подушку». В слое огарка происходит выгорание коксового остатка, сопровождаемое химическими преобразованиями (рис. 32).

Для каждого способа процессы, происходящие в топке при сжигании черного щелока, условно делятся на три стадии.

Первая стадия – *подсушка щелока под действием горячих топочных газов* – осуществляется после впрыскивания щелока в топку. Одновременно с подсушкой щелока происходит взаимодействие щелока с кислыми компонентами дымовых газов.

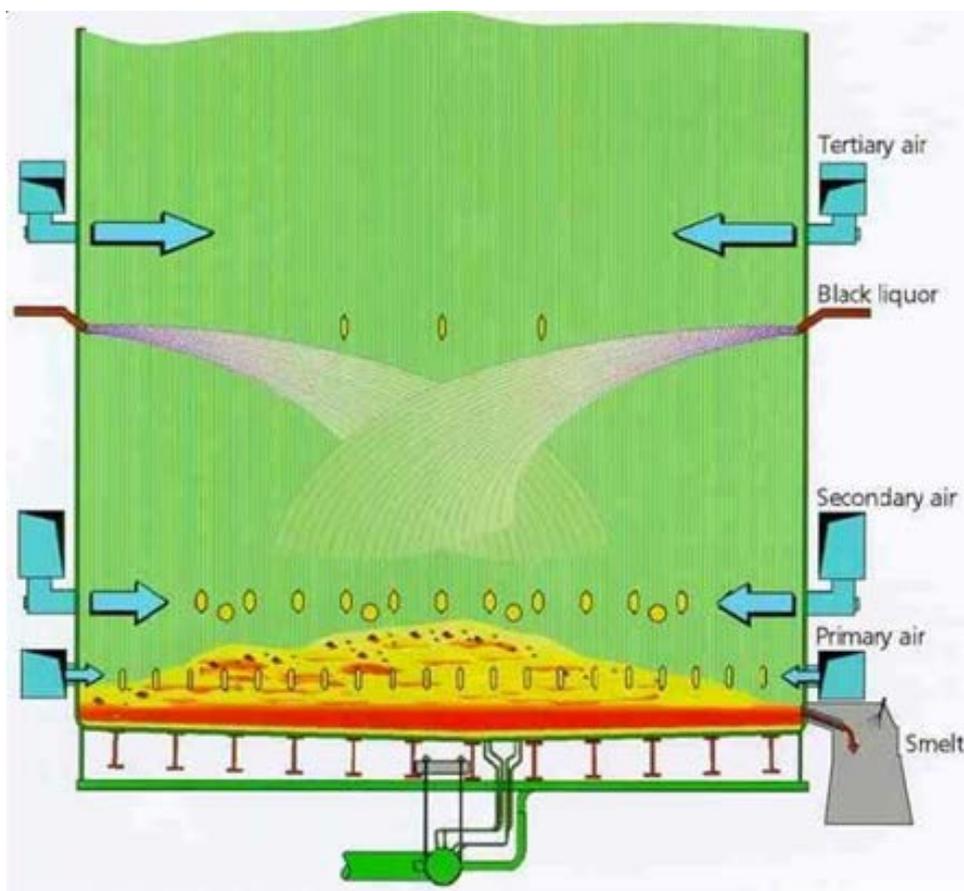


Рис. 32. Организация топочного процесса

Вторая стадия – *пиролиз и коксование органической части щелока* – начинается при влажности меньше 15 % в объеме топочной камеры. При пиролизе выделяется значительное количество летучих органических веществ, в том числе и соединений восстановленной серы (сероводород H_2S , метилмеркаптан CH_3SH , диметилсульфид $(CH_3)_2S$ и др.). С удалением остатков влаги скорость пиролиза органической части щелока увеличивается, и к началу третьей стадии примерно половина начального количества углерода присутствует в виде кокса.

Во время **третьей стадии** на поду топки происходит *выжигание кокса и расплавление всех оставшихся минеральных солей*. В этой стадии осуществляется восстановление сульфата натрия, добавляемого в щелок для возмещения производственных потерь химикатов. Расплавленные минеральные соли по *лёткам* выводятся в бак-растворитель плава.

Восстановление сульфата требует соответствующей восстановительной атмосферы, в связи с чем в нижнюю часть топочной камеры подается только часть воздуха, необходимого для горения (до 60 %). Остальной воздух вводится в среднюю часть топки, где формируется окислительная зона, необходимая для дожигания летучих органических соединений, образующихся в процессе пиролиза. Схема организации воздушного дутья показана на рис. 33.

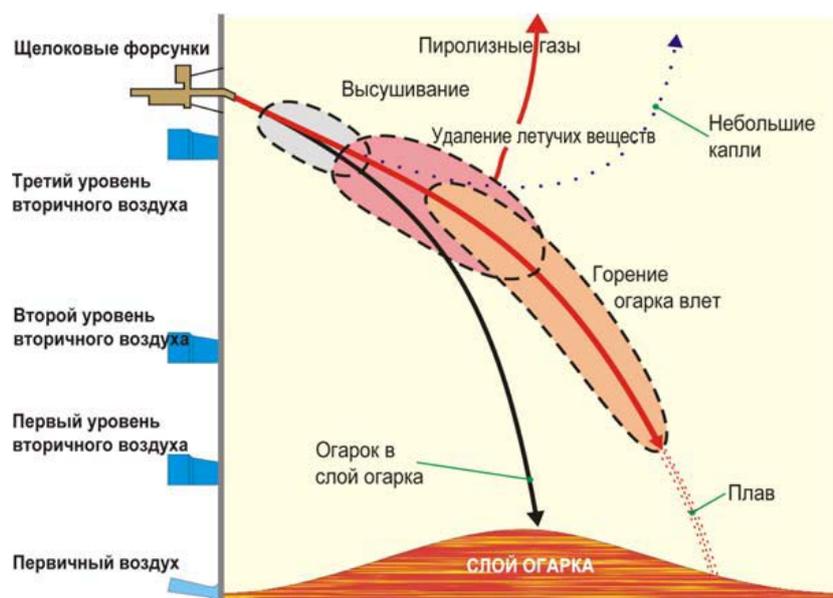


Рис. 33. Организация воздушного дутья

Исходя из стадийности и ступенчатости процесса сгорания и регенерации щелока во всех агрегатах, принята следующая *схема организации топочного процесса*.

- Воздух подводится ступенчато.
- Процесс горения протекает в основном в активной зоне топочного объема, расположенной в пределах от пода топки до уровня форсунок. При этом движение распыленного топлива и воздуха оказывается

противоточным: капли щелока падают вниз навстречу восходящему потоку воздуха и продуктов сгорания.

- При испарении влаги из капель образуются хлопья сухого щелока.
- Наиболее мелкие частицы уносятся газовоздушным потоком в верхнюю часть топочной камеры и далее в газоходы котла. Более крупные частицы падают на под и сгорают в нижней части топки и в слое огарка.

Теоретическая температура горения жидкого щелока и стабильность факела зависят в основном от температуры воздуха, влажности щелока и коэффициента избытка воздуха. В большинстве современных агрегатов коэффициент избытка воздуха в активной зоне топочного объема близок к единице, а температура воздуха, поступающего в топку, находится в пределах 130 – 160 °С. Содержание сухих веществ в щелоке перед форсунками должно быть не менее 65 %.

Средняя расчетная температура газов на выходе из зоны активного горения (примерно на уровне щелоковых форсунок) равна 1050 – 1100 °С. В области распыления и подсушки жидкого щелока имеет место дополнительное локальное снижение температуры, обусловленное испарением влаги. При снижении температуры горения, вследствие увеличения влажности щелока и избытка воздуха, может произойти потухание факела, что является одной из причин топочных взрывов.

Нарушение устойчивости процесса горения может произойти как при колебаниях расхода, так и при полном временном прекращении подачи щелока или воздуха. Особенно опасной является эксплуатация агрегата при заносе поверхностей нагрева минеральными солями, вызывающем резкое нарушение аэродинамики топочного процесса.

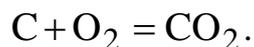
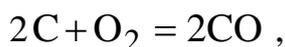
Отрицательной особенностью организации топочного процесса при сжигании сульфатного щелока в СРК является отдельная подача в топку влажного щелока и воздуха. Вследствие этого ухудшаются условия воспламенения распыленного щелока, и снижается интенсивность процесса горения. Периферийная подача воздуха с низкими скоростями посредством

сопел малого сечения обуславливает слабое проникновение воздуха в центральную часть, где интенсивность процесса горения оказывается особенно низкой.

Большинство отечественных и зарубежных авторов определяют следующие основные реакции, протекающие в топке СРК.

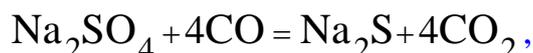
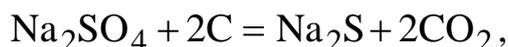
На поду, в слое огарка (зона восстановления) происходит:

– горение коксового остатка в слое с образованием CO и CO₂:



(Как показали исследования, количество сгоревшего полностью углерода должно составлять порядка 30 %).

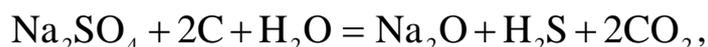
– восстановление сульфата натрия:



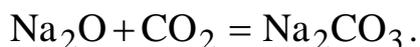
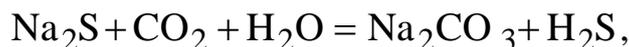
– карбонизация едкого натра:



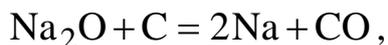
– разложение сульфатов и карбонатов с образованием Na₂O:

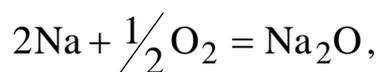


В **топочном объеме** (зона сушки) до уровня вторичного дутья происходит в основном горение летучих соединений, выделяющихся при пиролизе частиц щелока, а также реакции карбонизации сульфида натрия и оксида натрия:

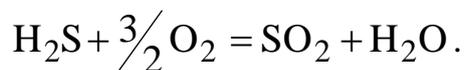
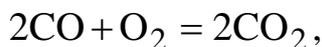


Кроме этого, происходит восстановление оксида натрия, окисление паров натрия и образование едкого натра:

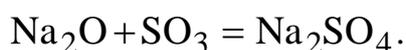
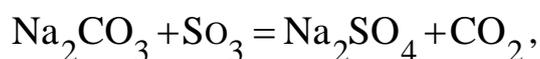
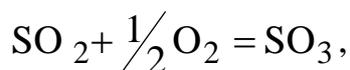




В *зоне окисления* происходит догорание газообразных горючих веществ:

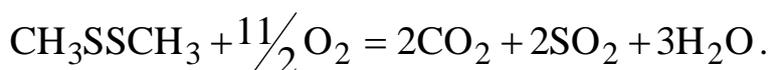
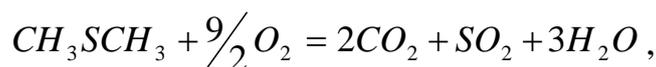


Здесь также происходит образование серного ангидрида и сульфата натрия:



В процессе варки целлюлозы образуются летучие высокотоксичные метилсернистые соединения: метилмеркаптан CH_3SH , диметилсульфид CH_3SCH_3 и диметилдисульфид CH_3SSCH_3 .

Эти соединения выделяются при сушке и пиролизе щелока и сгорают в зоне окисления по реакциям:



Недостаток кислорода или ухудшенное смесеобразование приводит к неполному сгоранию соединений восстановленной серы и наличию в дымовых газах высокотоксичных дурнопахнущих соединений.

Поступающий из СРК в бак-растворитель плав состоит в основном из карбоната натрия (Na_2CO_3) – 60 – 80 %, сульфида натрия (Na_2S) – 10 – 30 %, сульфата натрия (Na_2SO_4) – 10 – 15 %, едкого натра (NaOH) – 2 – 4 %. Кроме этого, в состав плава могут входить тиосульфат натрия ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$), который образуется при увеличении температуры в присутствии соды, хлорид

натрия (NaCl) и силикат натрия (Na_3SiO_3), содержащийся в качестве примеси в природном и техническом сульфате, добавляемом в черный щелок для восполнения потерь натрия.

Как показывает анализ химических реакций, протекающих при сжигании и регенерации щелока, сложная организация топочного процесса способствует образованию вредных серосодержащих газов (сероводорода, метилмеркаптана, диметилдисульфида) и образованию паров натриевых соединений. Увлекаемые потоком дымовых газов из топочного объема, они в значительной мере влияют на загрязнение поверхностей нагрева СРК и снижают эффективность его работы.

4.3. Технологическая схема

Для обеспечения устойчивого и экономичного сжигания щелока в топках содорегенерационных котлоагрегатов необходимо довести содержание сухих веществ в щелоке как минимум до 65 %, а потери тепла и химикатов с уходящими дымовыми газами свести к минимуму. Для этого применяют различные схемы СРК, которые увязывают с производительностью выпарных установок по количеству испаряемой влаги и содержанию сухих веществ в черном щелоке.

Выпаривание черного щелока, удаление из него избытка влаги, необходимо для его эффективного сжигания в СРК. Оно осуществляется в многокорпусных выпарных установках.

На рис. 34 изображена принципиальная технологическая схема щелокопроводов СРК. Из выпарной станции черный щелок поступает в бак упаренного щелока, оборудованный мешалкой и паровым змеевиковым подогревателем. Из бака транспортным насосом черный щелок подается в бак-смеситель сульфата, который также оборудован подогревателем и мешалкой. В бак-смеситель системой транспортеров направляются зола, осажденная в бункерах-зольниках котла, и унос, уловленный в электростатическом фильтре.

Далее черный щелок, перемешанный с уносом, возвращается в бак упаренного щелока и насосом подается в суперконцентратор, где упаривается до 70 – 75 % а.с.в. (влажность – 25 – 30 %) и собирается в расходный бак крепкого щелока и далее поступает к подогревателям смешивающего типа, где он подогревается до температуры 120 – 130 °С.

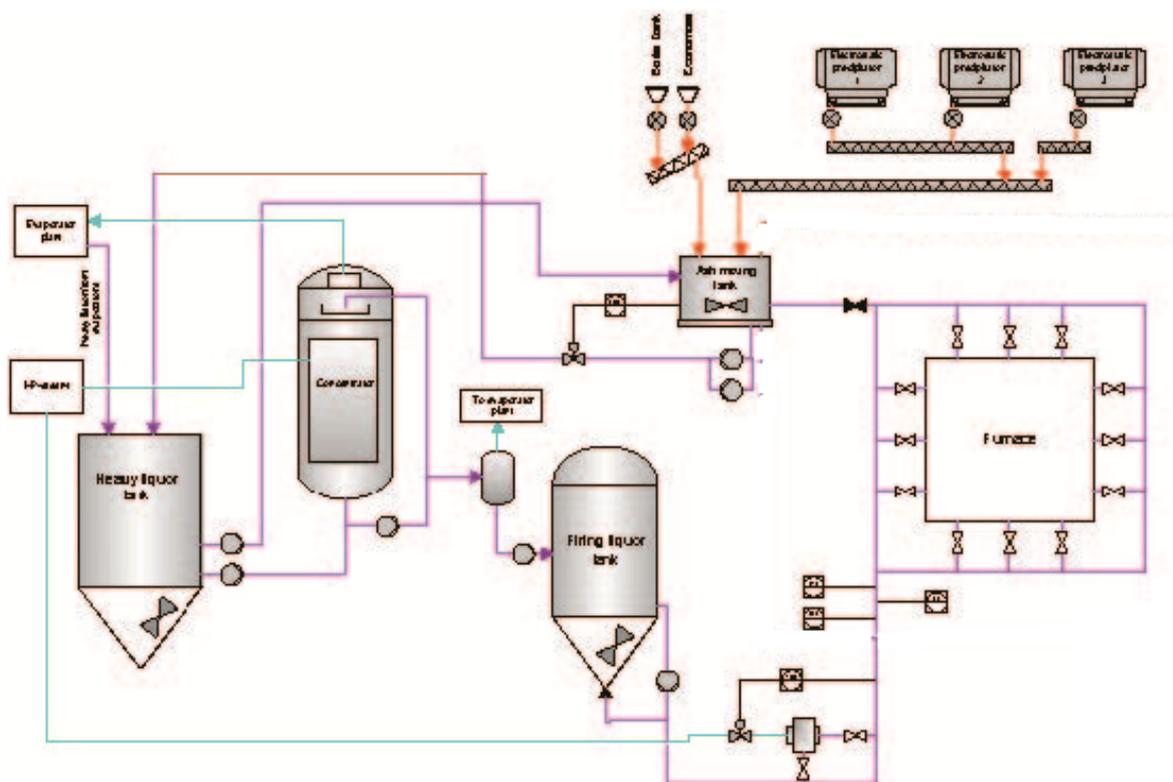


Рис. 34. Схема щелокопроводов СРК

От подогревателей щелок поступает в распределительный коллектор, расположенный по всему периметру вокруг топки котла, из которого форсунками впрыскивается в топочную камеру. Часть щелока по линии рециркуляции сбрасывается в бак-смеситель сульфата. На прямой и обратной линиях установлены расходомеры. Температура щелока перед форсунками регулируется автоматически за счет изменения подачи пара в подогреватели. Щелоковые емкости снабжены регуляторами уровня.

Смеситель сульфата

Бак-смеситель служит для смешивания золы из зольных бункеров экономайзера и кипяточного пучка и золы из электрофилтра с черным

щелоком (рис. 35). Если установлена система для удаления хлора и калия из золы, то зола из центрифуги направляется в бак-смеситель. Бак-смеситель снабжен лопастной мешалкой.

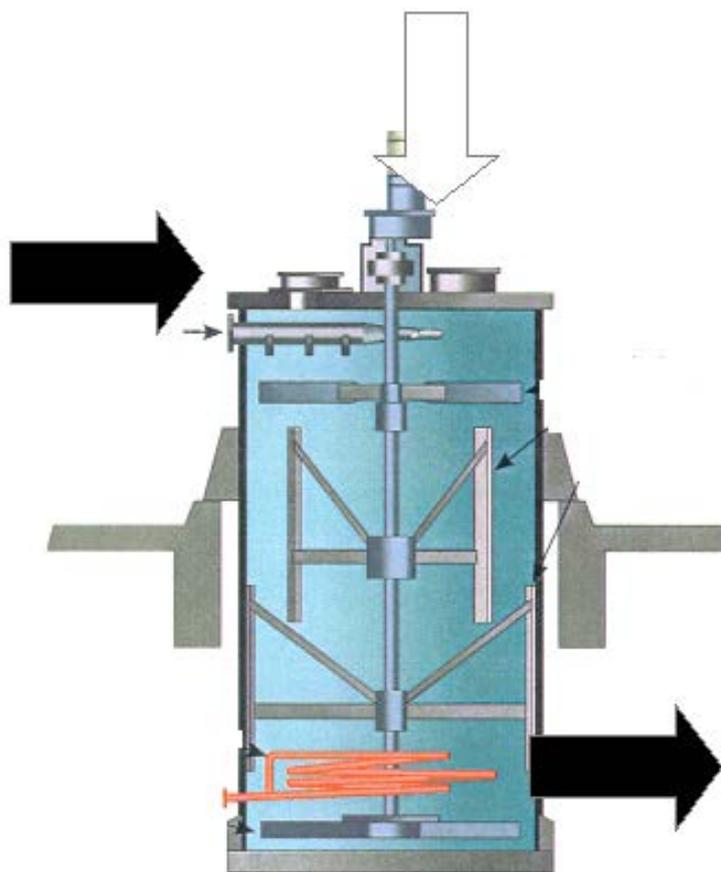


Рис. 35. Смеситель сульфата

Бак-смеситель представляет собой металлический резервуар со змеевиком для подогрева щелока. Для улучшения смешения сульфата со щелоком смеситель оборудован вертикальной мешалкой, состоящей из вала с насаженными на него лопастями. Мешалка приводится во вращение от электродвигателя через редуктор, который, как правило, монтируется на верхней крышке бака. Щелок в баке подогревается паром низкого давления. Образующийся конденсат отводится через конденсационный горшок.

Щелок поступает на перфорированное промежуточное днище, расположенное внутри смесителя, растворяет сульфат натрия и стекает через отверстие в нижнюю часть резервуара.

Смеситель сульфата имеет соответствующие патрубки для приема щелока, отвода в щелоковые насосы, опорожнения, перелива, а также для отвода образующихся газов и паров в атмосферу. Выходной штуцер для черного щелока располагается за дырчатой ситовой пластиной во избежание забивания трубопровода, подогревателя и щелоковой форсунки частицами золы.

Линия подачи щелока

Черный щелок, который откачивается от расходного бака, направляется через подогреватель в кольцевой коллектор черного щелока. Перед подводом черного щелока в кольцевой коллектор (вокруг стен топки) проводятся измерения, в частности, расхода, температуры и содержания сухого вещества (рефрактометром, который определяет содержание сухого вещества в черном щелоке) в главном трубопроводе сжигаемого щелока. Линия для рециркуляции черного щелока возвращает щелок в бак-смеситель сульфата. Для перекачки черного щелока используются центробежные насосы с крыльчатками, изготовленными из кислотоупорной стали. Подшипники и сальники щелоковых насосов охлаждаются водой.

Напор насосов для подачи щелока составляет 4 – 6 бар, а производительность всегда превышает потребность содорегенерационного котла, благодаря чему обеспечивается рециркуляция излишнего щелока в смеситель во избежание повышения в щелокопроводе вязкости щелока из-за его охлаждения. Давление черного щелока в щелоковом коллекторе регулируется насосами сжигаемого черного щелока с частотным приводом. Давление щелоковых форсунок регулируется клапанами регулирования давления, по одному на каждой стене топки.

В отдельных случаях регулирование давления и количества щелока, подаваемого в форсунки, достигается изменением положения вентиля на линии рециркуляции.

Поскольку температура щелока определяет его вязкость, следует большое внимание уделять поддержанию нужной температуры щелока перед

форсунками, что обеспечивает необходимую подготовку щелока к распыливанию и своевременному превращению его в огарок, а также устойчивость горения огарка на поду топки.

Для подогрева щелока используются подогреватели смешивающего типа (рис. 36).

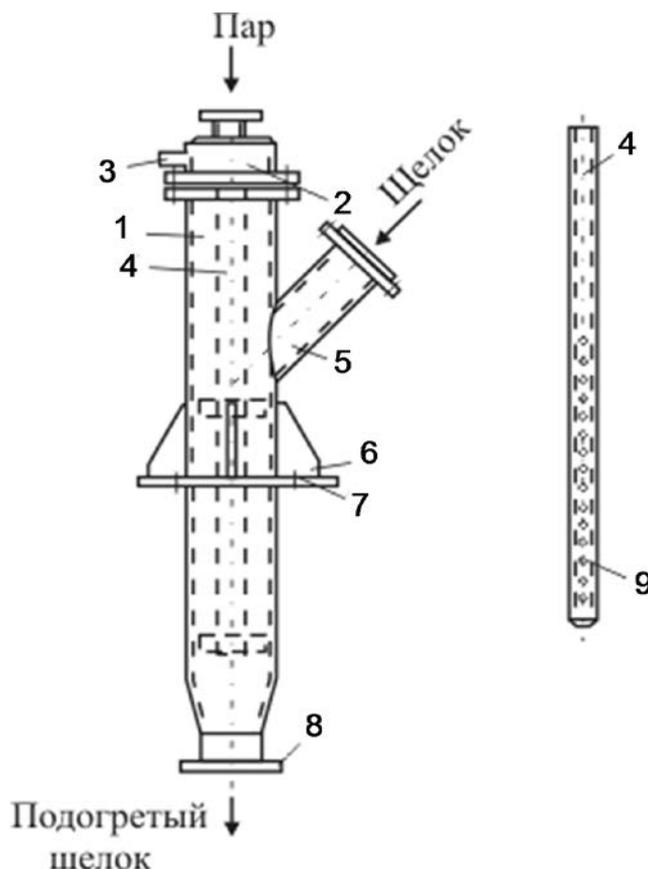


Рис. 36. Общий вид и детали подогревателя смешивающего типа:

- 1 – корпус подогревателя; 2 – головка подогревателя; 3 – штуцер;
- 4 – перфорированная паровая труба; 5 – патрубок с фланцем; 6 – ребра жесткости;
- 7 – опора; 8 – фланец; 9 – отверстия \varnothing 3 мм

Подогреватель смешивающего типа представляет собой цилиндр с патрубком для ввода щелока 5. Пар в подогреватель вводится при помощи двух перфорированных труб. Отверстия в них просверлены под углом, поэтому струи пара, выходящие из них по касательной к цилиндрической поверхности труб, совершают вращательное движение и хорошо перемешиваются со

щелоком, что способствует быстрой конденсации пара в нем. Патрубок для отвода подогретого щелока расположен в нижней части подогревателя. Расход пара на подогрев щелока составляет примерно 42 кг на 1 т а.с.в. щелока. При этом концентрация щелока в результате смешения с конденсатом пара снижается приблизительно на 1 – 2 %.

Распыление черного щелока в топочном объеме СРК осуществляется с помощью механических форсунок грубого распыла (рис. 37). Дисперсность капель щелока определяется вязкостью, плотностью, давлением щелока и диаметром сопел.

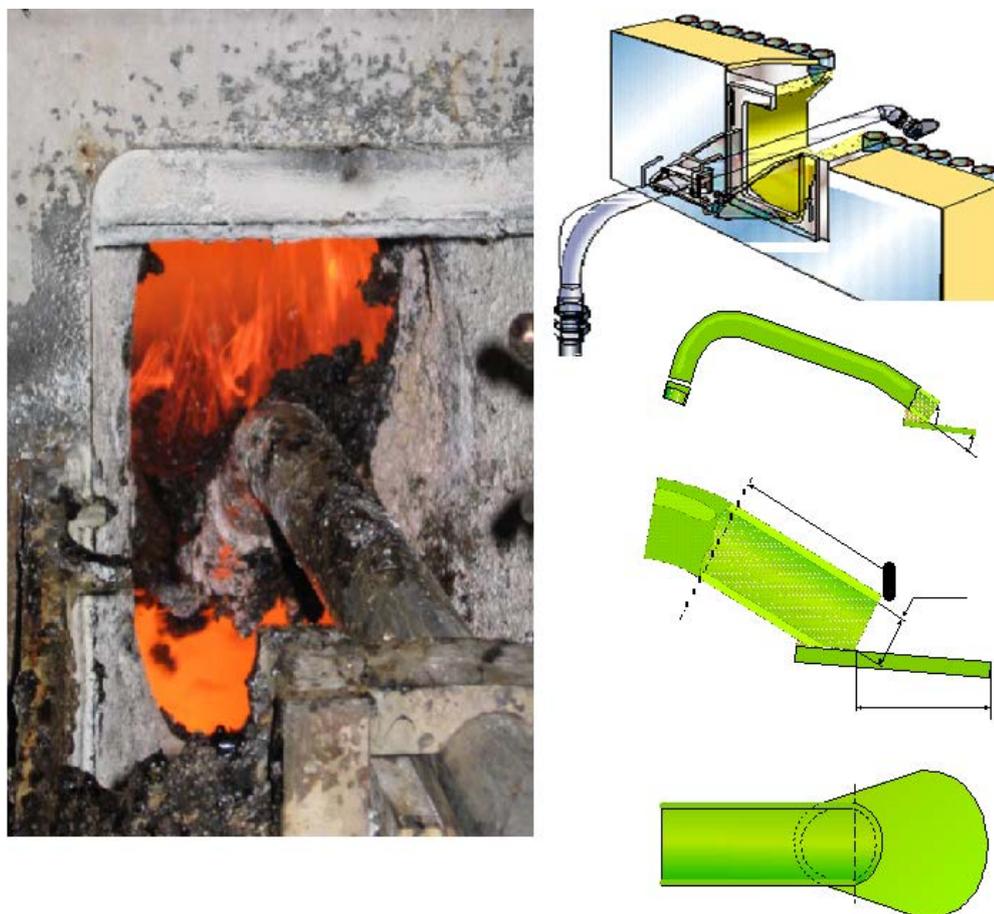


Рис. 37. Щелоковая форсунка

Головка форсунки оборудована соплом, на конце которого установлен щиток под углом 135 – 150°. Нормальное дробление щелока происходит при давлении 1 – 2 бар за счет кинетической энергии струи, направленной на

наклонный щиток. Такие форсунки организуют плоскую струю неоднородных капель щелока, характер дисперсности которых представлен на рис. 38.

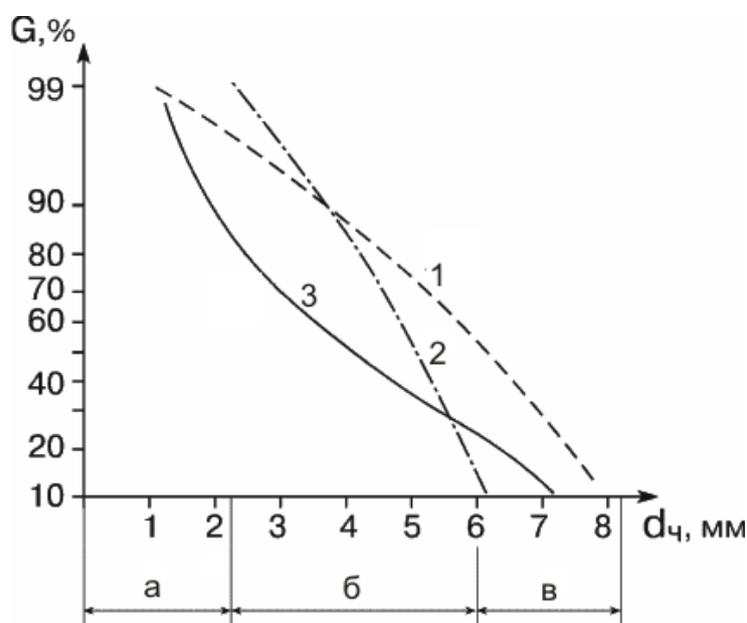


Рис. 38. Распределение размеров капель в зависимости от диаметра сопла:

1, 2, 3 – диаметры сопел соответственно 16, 20, 24 мм;

а – капли, сгорающие во взвешенном состоянии; **б** – капли, воспламеняющиеся при падении на под; **в** – капли, требующие время на подсушку при падении на под;

$d_{ч}$ – диаметр частиц, мм; G – массовая доля частиц, %

4.4. Конструкции содорегенерационных котлоагрегатов

Конструкция современного СРК обусловлена спецификой процесса регенерации химикатов и свойствами золы черного щелока, имеющей низкую температуру плавления и сильные адгезионные (*от лат. adhaesio* – прилипание) характеристики (рис. 39).

Значительный унос и низкая температура плавления золы, частично уносящейся с дымовыми газами и состоящей в основном из сульфата и карбоната натрия, являются причинами загрязнения поверхностей нагрева, большая часть которых работает в условиях жидкоплавкой и размягченной золы.



Рис. 39. Содорегенерационный котлоагрегат:

1 – конденсатор; 2 – паровой барабан; 3 – впрыскивающие пароохладители (2 шт.); 3 – пароперепускные трубы верхних коллекторов экранов; 5 – верхние коллекторы экранов; 6 – защитный экран; 7 – экраны конвективной шахты; 8 – нижние коллекторы конвективной шахты; 9 – коллекторы защитного экрана; 10 – перепускные трубы защитного экрана; 11 – водяной барабан; 12 – опускные трубы с нижними распределительными коллекторами; 13 – плавниковые экранные трубы

Поэтому конструкции современных СРК по сравнению с котлами, работающими на обычных энергетических топливах, имеют ряд специфических особенностей, характерных для всех типов выпускаемых в настоящее время СРК.

Основными из них являются:

- большая высота топок;

- низкие скорости газов на выходе из топки (до 3 м/с);
- сравнительно низкие тепловые напряжения топочного объема ($q_v = 90 - 110 \text{ кВт/м}^3$);
- выполнение фестона и пароперегревателя в виде ширмовых поверхностей с большим поперечным шагом (300 – 460 мм);
- применение двухбарабанных конструкций с высокоразвитыми котельными пучками;
- устройство горизонтальных сжижающих подов, охлаждаемых слабонаклонными участками труб переднего или заднего экранов топки;
- выполнение водяного экономайзера с вертикальным расположением труб;
- наличие большого числа мощных паровых глубоководных обдувочных аппаратов для очистки поверхностей нагрева, включая поверхность водяного экономайзера;
- подогрев воздуха в калориферах.

Современные СРК относятся к типу СЕ оборудованы топкой Комбашн, имеющей горизонтальный под декантирующего типа (*декантация* – технический способ отделения жидких веществ от твердых сливанием), трех- или четырехъярусную схему подачи воздуха с вводом воздуха как по всему периметру, так и через четыре группы тангенциальных сопел, равномерное распределение щелоковых форсунок по периметру топочной камеры. Щелок в топках этого типа разбрызгивается в топочный объем форсунками грубого распыла.

Большая высота топки, небольшие тепловые напряжения и низкая скорость движения дымовых газов обеспечивают максимальное осаждение золы из газового потока на слой огарка до ее соприкосновения с поверхностями нагрева, расположенными над топкой. Выполнение фестона и пароперегревателя в виде ширмовых поверхностей нагрева снижает величину заноса их золой и облегчает их очистку.

Двухбарабанная конструкция СРК с мощными конвективными пучками труб позволяет снизить температуру газов перед экономайзером до 400 - 430 °С, при которой зола не спекается.

Подогрев воздуха производится в паровых или водяных калориферах, так как в случае установки воздухоподогревателя в газовом тракте его поверхность подвергается усиленному загрязнению и коррозии.

Защита пароперегревателей фестоном от непосредственного радиационного тепловосприятия из топки снижает температуру и выравнивает скорость потока газов на входе в пароперегреватель, что облегчает условия его работы.

Топочное устройство. Топка содорегенерационного котла обычно прямоугольного или квадратного сечения, внизу ограничена подом, вверху – потолочными трубами, по сторонам – боковыми, передними и задними трубами экранов. Трубы переднего или заднего экранов являются продолжением труб, экранирующих под топку.

Активный объем топки образован фронтным, задним и боковыми экранами, в нижней части – трубами пода, а в верхней части – поверхностью, проходящей через первый ряд труб защитного пучка.

Основными расчетными характеристиками топки СРК являются: массовая нагрузка пода (массовой расход сухого вещества щелока на 1 м² пода в час); тепловое напряжение топки по объему и сечению.

Указанные расчетные характеристики современных агрегатов, безотносительно к их конструкции, находятся примерно на одном уровне. Так, массовая нагрузка пода составляет $b_F = 500 - 600 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, теплонапряжение топочной камеры по объему $q_V = 90 - 110 \text{ кВт}/\text{м}^3$, теплонапряжение топочной камеры по сечению $q_F = 1,7 - 2,0 \text{ МВт}/\text{м}^2$.

Теплонапряжения СРК в 1,5 – 2 раза ниже допустимых значений, принимаемых для топок на угольном топливе, и в 3 – 4 раза ниже допустимых величин, принимаемых для газомазутных топок. По значению теплонапряжений топки СРК близки к топкам для сжигания горючих сланцев.

В котельно-топочной технике теплонапряжение топки по объему рассматривается как допустимое по условиям горения. Такой подход правомерен для топок содорегенерационных котлоагрегатов лишь отчасти, так как есть возможность обеспечить горение щелока с минимальными тепловыми потерями и при малых значениях q_v . Дополнительным фактором, влияющим на величины q_v , является высота топки, которая обусловлена необходимостью охлаждения дымовых газов на выходе из топки до температуры 880 – 900 °С, а также значительным загрязнением экранов (коэффициент тепловой эффективности экранов $\psi = 0,3 - 0,4$).

Тепловое напряжение топки по сечению, рассматриваемое для энергетических котлов с целью предотвращения усиленного шлакования экранов (сжигание твердого топлива) и снижения тепловых нагрузок на них (сжигание мазута), применительно к содорегенерационным котлоагрегатам, наряду с удельной нагрузкой пода, характеризует условия формирования слоя огарка. В этом отношении топка СРК подобна слоевой.

Рассматривая такой важный показатель работы топки, как доля золы, уносимой газами ($a_{ун} = 0,05$), можно сделать вывод, что топка СРК по этому показателю на порядок превосходит камерные топки.

Таким образом, топка содорегенерационного котлоагрегата занимает промежуточное положение между камерной и слоевой топками. Как и при камерном сжигании, в топке СРК обеспечиваются распыление топлива, минимальные избыток воздуха и потери тепла от химического и механического недожога, и, как при слоевом сжигании – формируется слой топлива, и минимизируется унос золы, при этом по степени осаждения золы топка СРК превосходит все известные типы слоевых топок.

Факельно-слоевой способ сжигания щелока удовлетворяет условиям регенерации щелока, а габаритные размеры топки СРК обеспечивают применение этого способа.

На всех СРК предусматривается возможность сжигания мазута или газа в качестве резервного или вспомогательного топлива. Необходимость

использования мазута или газа возникает при растопке котла, в случаях недостатке щелока, а также для выжигания огарка при остановке котла. Пусковые (подовые) горелки устанавливаются, как правило, на уровне или несколько выше уровня первичного дутья по всему периметру топки, а нагрузочные – на уровне сопел вторичного дутья.

Конструкция экранов. Топочная камера СРК полностью экранирована – степень экранирования равна 1. Развитие конструкций экранов осуществлялось в следующей последовательности:

- плавниковые трубы,
- гладкие трубы, расположенные с тесным шагом ($S = d+1$, мм),
- цельносварные газоплотные панели.

Развитие конструкций экранов СРК происходило под влиянием общей тенденции в развитии технологии котлостроения и учитывало постоянно накапливающийся опыт эксплуатации СРК.

Топки современных содорегенерационных котлоагрегатов представляют собой газоплотные конструкции в виде цельносварных панелей или гладкотрубных экранов с обшивкой стальным листом по трубам. В настоящее время для экранов применяются только цельносварные панели, что обеспечивает существенные преимущества при изготовлении и монтаже СРК.

У ряда СРК, прошедших модернизацию, в верхних частях топок еще сохранены плавниковые трубы диаметром 76 – 83 мм, расположенные с шагом 130 – 154 мм. Практика эксплуатации СРК с цельносварными газоплотными панелями подтвердила их механическую прочность и надежность.

Конструкция пода топки. Содорегенерационные котлы имеют различное устройство пода топки и его обмуровки (рис. 40).

Динамика развития содорегенерационных котлоагрегатов различных фирм показывает, что по мере увеличения мощности котлов совершенствовалась и их конструкция. Наклонный под топки и изоляция труб экранов на значительную высоту с целью защиты их от наружной коррозии, вызываемой воздействием плава и огарка, сменились, соответственно, подом в

форме горизонтальной чаши с приподнятой лёткой и изоляцией труб экранов до лётки. Изоляция вертикальной части пода топки быстро разрушается почти на всех СРК, имеющих низкое расположение лётки и высокую изоляцию ошипованных труб экранов.

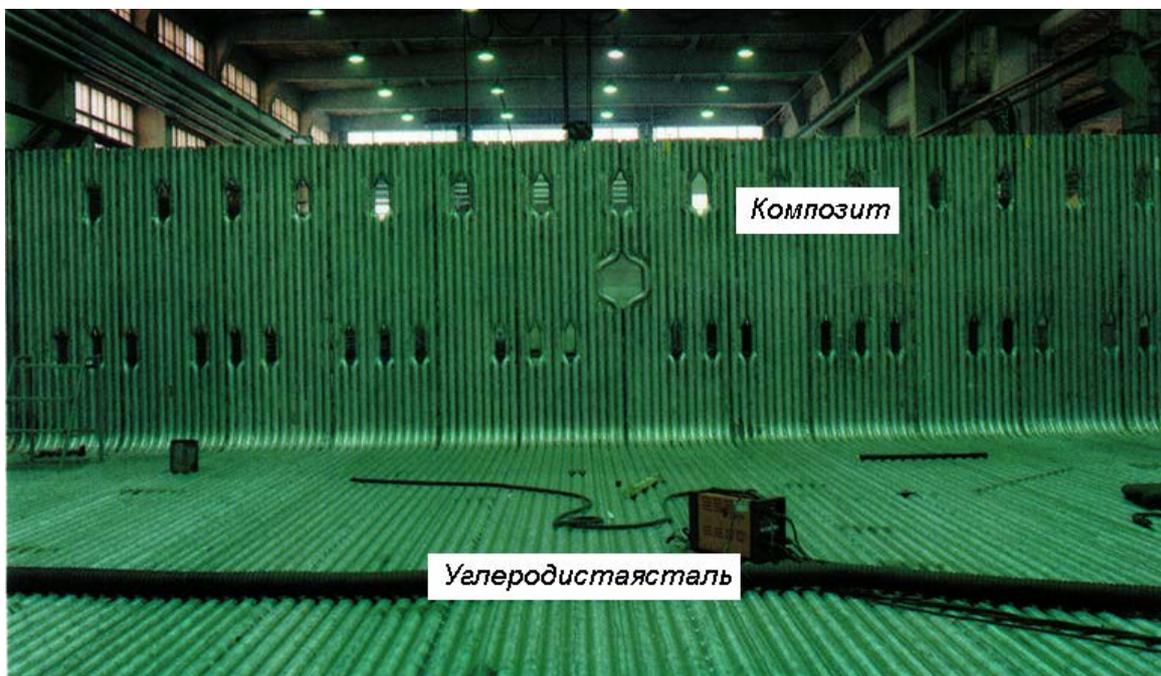


Рис. 40. Подовая часть топкиЗЗ

На содорегенерационных котлоагрегатах, имеющих наклонный под и низко расположенную лётку, часто наблюдается образование трещин в изоляции пода и течь плава мимо лётки.

Опыт показывает, что изоляция пода не разрушается там, где горизонтальная и вертикальная части пода, имеющего сплошное экранирование из сваренных между собой труб, изолированы на небольшую высоту (до лётки плава).

Существуют три типа конструкции пода топки: *наклонный*, *горизонтальный* и *слабонаклонный*.

Наклонный под применяется в агрегатах, работающих по принципу набрызгивания щелока на стенки топочной камеры. Трубы пода располагаются с уклоном до 5° в сторону лётки плава, ошиповываются, и по шипам наносится слой пластичной огнеупорной хромистой массы. Опыт работы таких агрегатов

показал, что на поверхности огнеупорной массы не образуется защитный слой застывшего плава, поэтому поверхностный слой огнеупорной массы находится в контакте с движущимся жидким плавом. В связи с этим даже при правильно подобранных массе и технологии укладки практически ежегодно требуется замена набивки пода.

Горизонтальный и слабонаклонный поды используются в агрегатах, работающих по принципу впрыскивания щелока в топочную камеру. В горизонтальной конструкции лётки плава приподняты над плоскостью огнеупорной массы примерно на 90 – 100 мм. Собственно огнеупорная масса наносится непосредственно на трубы, как правило, не имеющие ошиповки, с изоляцией вертикальных участков экранов до нижней кромки лёток.

Горизонтальный под с приподнятой лёткой (декантирующий) образует неподвижный слой плава, который затвердевает и предохраняет огнеупорную массу от разрушения (рис. 41). Агрегаты с декантирующим подом эксплуатируются в течение длительного времени без замены огнеупорной массы.

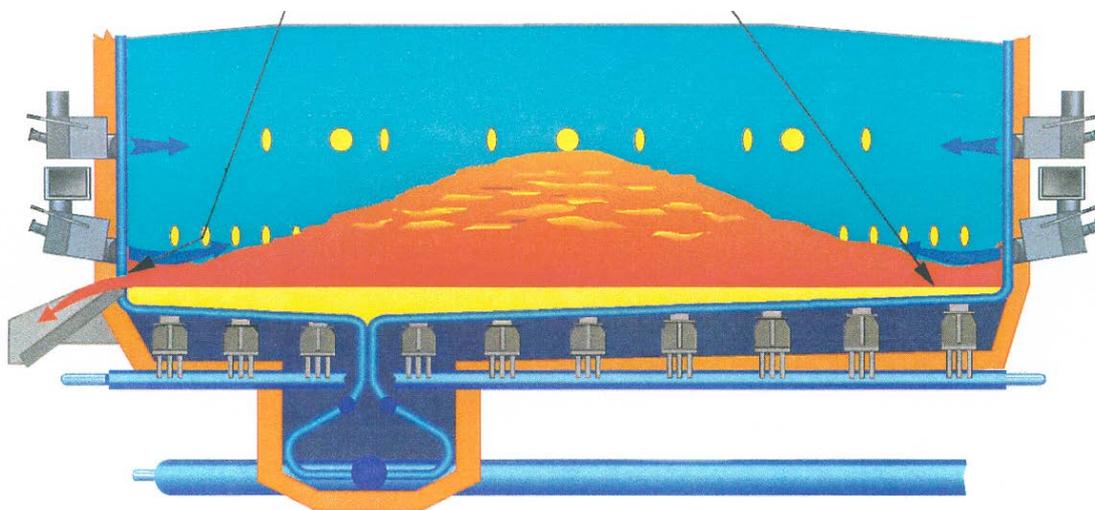


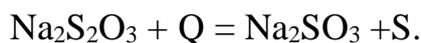
Рис. 41. Горизонтальный под с приподнятой лёткой

В *слабонаклонной конструкции пода* трубы находятся под углом до 2° , а уровень лётки устанавливается таким образом, чтобы поверхность огнеупорной массы была горизонтальной и покрывалась слоем застывшего плава.

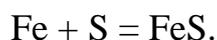
Слабонаклонный под рассматривается как потенциально надежная конструкция, чтобы при возможном закипании воды в трубах пода исключить возможность образования паровых мешков.

Покрытие нижней части экранов на высоту примерно до уровня вторичного дутья с огневой стороны специальной набивной массой на основе хромита или хромомагнетита связано с наличием в нижней части топки восстановительной атмосферы. Назначение защитной массы – предохранить трубы, находящиеся в зоне воздействия жидкого плава и газообразных соединений восстановленной серы, от коррозионного разрушения. Опыт эксплуатации показал, что набивная масса на вертикальных стенках разрушается в короткий срок. Восстановление защитного слоя является трудоемкой и нецелесообразной операцией. Однако регулярные осмотры СРК других конструкций, не имеющих защиты нижней части топки, выявили, что скорость коррозии труб в этой зоне сравнительно низка. В то же время, коррозия экранных труб является серьезной проблемой, с которой пришлось столкнуться при повышении давления в СРК до 6,4 МПа и выше. Ввод в эксплуатацию СРК, работающих под давлением 6,4 – 8,4 МПа, сопровождался серьезными коррозионными повреждениями экранных труб, захватывающими, в основном, восстановительную часть топки. Опыт работы СРК, эксплуатирующихся при давлении 6,4 МПа, показывает, что в случае применения труб из углеродистой стали с ошиповкой нижней части экрана замена труб необходима через 4 – 6 лет.

Коррозия зависит от состава топочных газов, химического состава и физического состояния отложений на трубах. Из образующихся на поверхности труб продуктов коррозии наибольшую опасность представляет сульфид железа FeS, так как он не защищает металл от дальнейшего поражения. Усиление коррозии наблюдается при содержании в газовой фазе сероводорода и кислорода в соотношении 1:1. Любые условия, приводящие к образованию свободной серы, вызывают значительную коррозию. Наиболее вероятны следующие реакции, приводящие к образованию свободной серы:



Свободная сера непосредственно взаимодействует с железом по реакции



Температура стенки труб в наибольшей мере определяет скорость коррозии. Для труб из углеродистой стали потери металла достигают недопустимо больших значений при температуре стенки трубы 320 – 330 °С и выше.

На рис. 42 показана зависимость расчетной температуры стенки труб топочной камеры от давления пара в СРК. При давлении 4 МПа расчетная температура стенки трубы на несколько десятков градусов ниже температуры, при которой начинается усиленное разрушение углеродистой стали.

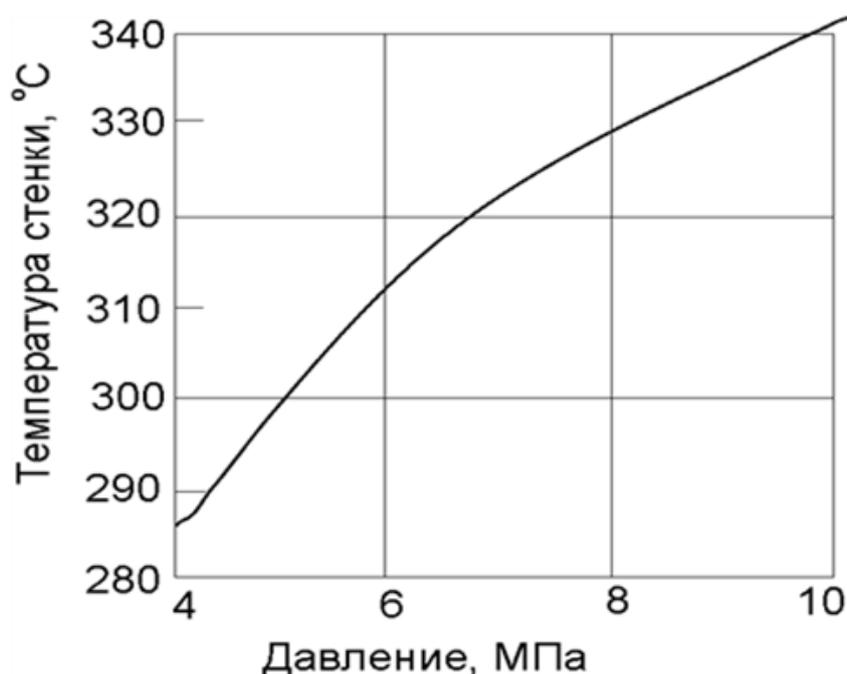


Рис. 42. Зависимости расчетной температуры стенки трубы от давления пара

В отечественной промышленности СРК работают, в основном, при давлении 4 МПа, поэтому коррозионные явления в топке проявляются в отдельных случаях и носят локальный характер (зона лёток плава, фурмы первичного дутья), вызванный спецификой эксплуатации СРК.

Однако специальные методы защиты труб топок (увеличение толщины стенки углеродистых труб, наварка на трубы высоколегированной стали, использование биметаллических труб) находят применение на практике. Так, совместное сжигание сульфатного и сульфитного щелоков в силу высокой сульфидности плава (до 60 %) делает обязательным применение коррозионной защиты труб топочной камеры при давлении 4 МПа. Эксплуатация СРК при совместном сжигании сульфатных и сульфитных щелоков целесообразна при биметаллическом выполнении экранов в нижней части топки и кислотоупорной металлизации труб в ее верхней части.

Биметаллические (компаундные) трубы применяются почти без исключения для обеспечения надежности работы нижней части топочной камеры для СРК с давлением выше 6 МПа. Внутренний слой этих труб выполняется из углеродистой стали, причем толщина слоя выбирается, исходя из расчета на прочность, а наружный слой – из стали аустенитного класса типа X18H9, толщина которого определяется запасом на коррозию. Изготовление труб производится горячим прессованием при температуре 1200 °С.

Высота компаундной части в различных котлах меняется в широких пределах. Теоретически компаундная нижняя часть необходима лишь в восстановительных условиях, несколько выше зоны подачи вторичного воздуха.

Фестон (защитный пучок). Фестон предназначен для защиты ширмовых поверхностей пароперегревателя от теплового излучения из топки. В однобарабанных котлах фестон имеет независимый циркуляционный контур. Часть фестона располагается непосредственно в топочной камере, а другая часть – перед кипяtilьным пучком. Ширмы фестона, расположенные над топкой, той же мембранной конструкции, как и экраны топки. Количество ширм фестона соответствует количеству ширм радиационного пароперегревателя. Ширмы находятся на одной линии с ширмами пароперегревателя, что обеспечивает эффективную защиту нижних гибов труб ширм пароперегревателя от излучения из топки.

Для защиты фестона от механических повреждений к самой верхней трубе фестона может прикрепляться мембранное ребро, чтобы разбивать крупные куски шлака, падающие из пароперегревателя.

Пароперегреватели. Пароперегреватели содорегенерационных котлоагрегатов работают в напряженных условиях, вызванных тем обстоятельством, что адгезионные свойства пылевого уноса наиболее сильно проявляются в интервале температур от 600 до 850 °С. В этой температурной зоне унос, состоящий преимущественно из сульфата и карбоната натрия, находится в размягченном состоянии и образует на трубах липкие отложения. Именно необходимость надежной очистки труб от наружных загрязнений вызвала применение на СРК ширмовых пароперегревателей (рис. 43).



Рис. 43. Ширмовый пароперегреватель

Металл поверхности нагрева пароперегревателя имеет наивысшую в котельном агрегате температуру. Это обусловлено высокой температурой пара

и относительно большими удельными тепловыми нагрузками. Поэтому для выходной ступени пароперегревателя применяются легированные стали.

Отложения на трубах при определенных условиях могут быть коррозионно-опасными, в результате чего даже незначительное повышение температуры пара в отдельных трубах выше среднего значения может привести к недопустимому, по условиям коррозии, повышению температуры стенки трубы, а с развитием и углублением коррозии – к потере прочности трубы. В этой связи конструктивные мероприятия, направленные на уменьшение температурной развертки труб, приобретают исключительное значение. Основным мероприятием в этом плане является разделение всей поверхности пароперегревателя на последовательно включенные по пару части с перемешиванием его перед поступлением в каждую из них.

Подвесной пароперегреватель, как правило, состоит из трех ступеней. Пар течет противотоком в первой ступени и параллельно во второй и третьей ступенях. Такая схема обеспечивает наибольший запас прочности и самую экономичную конструкцию поверхности. Коллектора пароперегревателя опираются самостоятельно к точке выше потолка топки. Места прохода ширм пароперегревателя через потолок выполнены газоплотными при помощи уплотняющих коробок. Ширмы пароперегревателя являются подвесными для обеспечения самостоятельного движения ширм без образования напряжения, которое вызывает старение и разрушение металла труб.

Ширмы выполнены из труб диаметром 42 – 54 мм с толщиной стенки 4,5 – 6,3 мм с шагом 364 – 434 мм ($S_1/d = 7,5 - 8$). Ширмовые пароперегреватели, хорошо komponующиеся с глубоководными обдувочными аппаратами, благодаря большому поперечному шагу менее подвержены заносу и при правильном подборе давления обдувки (не менее 1,6 – 2 МПа) делают возможной длительную эксплуатацию СРК на номинальной нагрузке.

В трехступенчатых пароперегревателях некоторых СРК первая ступень выполнена в виде змеевиковой поверхности с коридорным расположением змеевиков. Относительный поперечный шаг труб $S_1/d = 4,5 - 5$, продольный –

$S_2/d = 2,7 - 5$. Змеевиковые поверхности достаточно разрежены и размещены в зоне температур дымовых газов $550 - 650$ °С. Применение змеевиков с разреженным расположением труб для первой ступени пароперегревателя СРК является компромиссом между снижением металлоемкости конструкции, с одной стороны, и необходимостью ограничения заносов поверхности – с другой.

Сжигание сульфатного щелока с высоким содержанием щелочных соединений приводит к их налипанию на поверхность и образованию легкоплавких эвтектик (расплавов). Поэтому более предпочтительным является применение ширмовых поверхностей нагрева, расположенных с большими поперечными шагами. В то же время, с теплотехнической точки зрения, использование ширмовой поверхности в зоне температур $550-650$ °С менее эффективно по сравнению со змеевиковой, поскольку конвективный теплообмен превалирует над излучением. Практика показывает, что при работе СРК с нагрузками, близкими к номинальной, возникают затруднения в очистке разреженных змеевиковых пароперегревателей, так как с возрастанием уноса и температуры по газоходам начинает проявляться склонность разреженной змеевиковой поверхности к заносу, причем в большей степени для пучка с меньшим продольным шагом.

Регулирование температуры пара производится с использованием впрыскивающих пароохладителей, расположенных в две ступени (рис. 44, 45).

Котельные пучки. Большая часть находящихся в эксплуатации СРК выполнена по двухбарабанной схеме и имеет развитые котельные пучки (рис. 46).

Наличие котельного пучка позволяет снизить температуру газов перед экономайзером до $400 - 420$ °С, что имеет важное значение особенно для экономайзеров с горизонтальным расположением труб по условиям их очистки от наружных загрязнений. Безотносительно к типоразмеру конструкция котельного пучка сохраняется традиционной для каждого типа СРК.

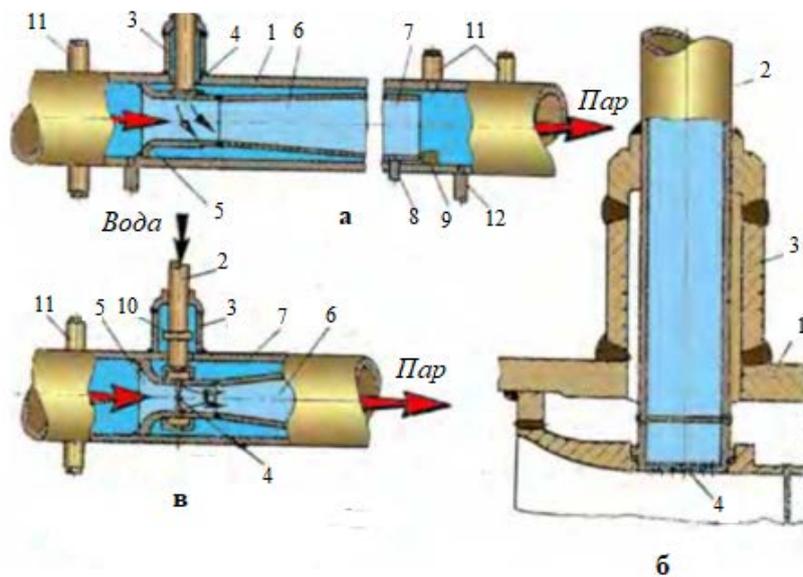


Рис. 44. Впрыскивающий пароохладитель:

а и б - общий вид пароохладителя и его впрыскивающее устройство при одностороннем вводе воды в пар; в - общий вид пароохладителя с кольцевым вводом воды в пар:

- 1 – корпус пароохладителя; 2 – водоподводящая труба; 3 – защитный патрубок водоподводящей трубы; 4 – отверстия для распыления воды в паре; 5 – сопло; 6 – диффузор; 7 – цилиндрическая часть защитной рубашки; 8 – одна из шпилек, удерживающих защитную рубашку в заданном положении; 9 – упор; 10 – компенсатор на водяной линии; 11 – лючок для измерительного прибора; 12 – дренаж, открываемый при остановке котла

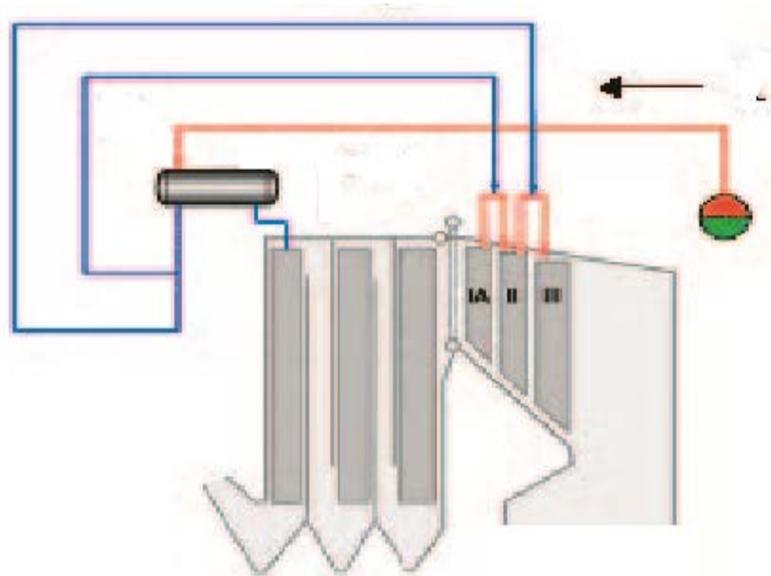


Рис. 45. Схема включения пароохладителей

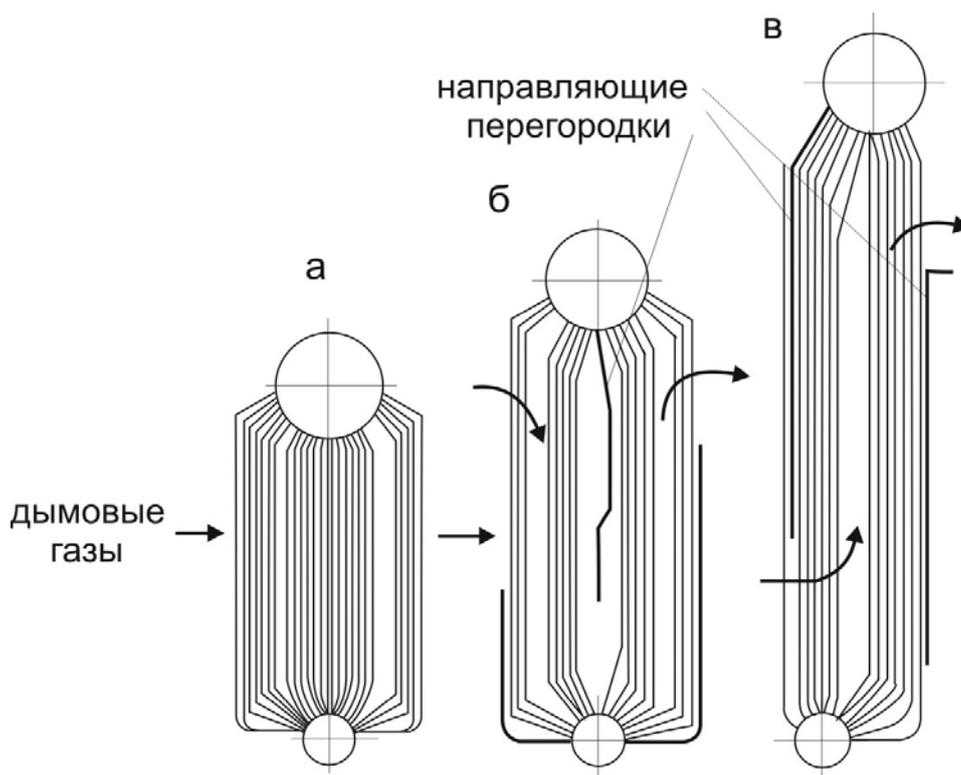


Рис.46. Котельные пучки СРК:

а - тип СЕ; б - тип БВ; в - конструкции «Тампелла»

В двухбарабанных агрегатах котельный пучок выполнен относительно коротким и широким с поперечным омыванием газами (рис. 46а). В некоторых СРК котельный пучок имеет продольное омывание нисходящим и восходящим газовыми потоками с устройством специальной газовой перегородки (рис. 46б), также он может выполняться в виде длинного пучка труб с организацией продольного омывания основной поверхности восходящим потоком газов (рис. 46в).

В современных однобарабанных СРК котельный пучок – узел с продольным обтеканием и одним газоходом, выполненный из плавниковых труб. Плавники труб кипяточного пучка располагаются на фронтальной и задней сторонах труб, и они приварены друг к другу, образуя ширмы (рис. 47). Поток дымовых газов идет вниз, противоточно к пароводяной смеси. В среднем пространстве имеется необходимое количество сажеобдывочных аппаратов для обеспечения чистоты газохода. Там нет поперечных перегородок.

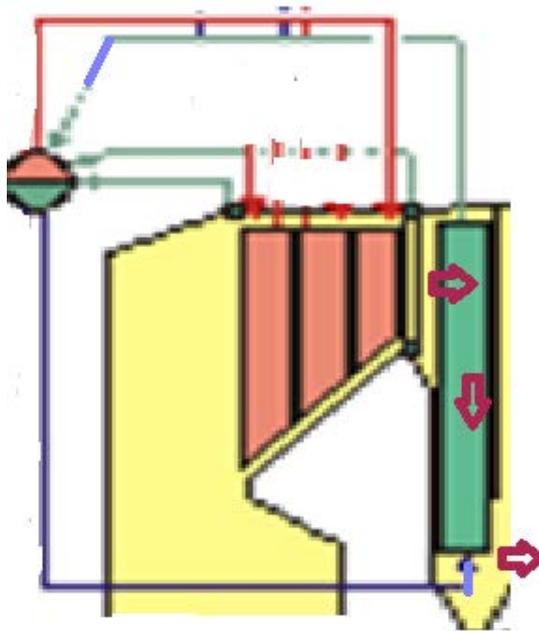


Рис. 47. Схема движения газов в котельном пучке
однобарабанного СК

Рассмотрим работу котельных пучков с точки зрения отложения золы на трубах (рис. 48).

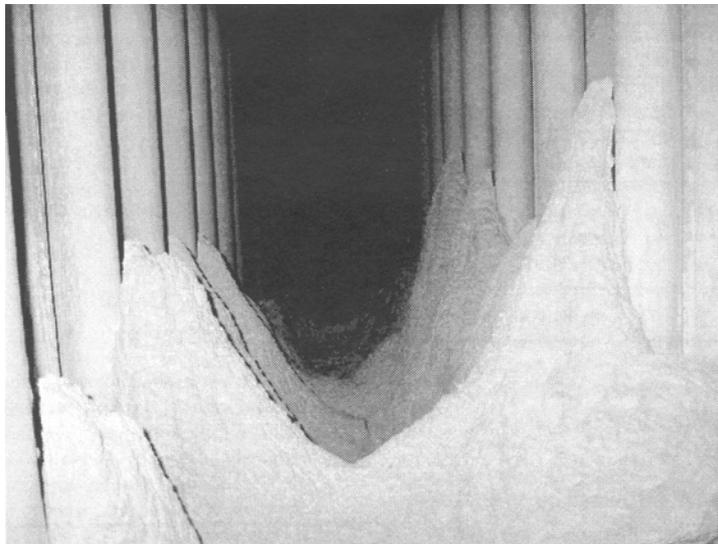


Рис. 48. Образование отложений в котельном пучке

При продольном обтекании осаждение частиц происходит вследствие турбулентных пульсаций в потоке дымовых газов в направлении к поверхности нагрева, а при поперечном обтекании – вследствие прямого набегания потока

на лобовые участки труб и турбулентных пульсаций на кормовых участках труб.

При поперечном омывании трубы наиболее вероятным является осаждение золы в кормовой области, в которую крупные кусочки золы не попадают, а мелкие частички, склонные к прилипанию, приносятся вихревыми токами.

В трубном пучке омывание зависит от взаимного расположения труб. В СРК применяются котельные пучки только с коридорным расположением труб, имеющим преимущество по сравнению с шахматным в отношении заносов.

В коридорных пучках при поперечном омывании зона прямого набегания и вихреобразования расположена в промежутках между трубами продольного ряда, а на изменение аэродинамического сопротивления коридорного пучка оказывает влияние главным образом нарастание отложений золы на боковых образующих труб, причем этот процесс протекает достаточно медленно. Поэтому можно считать, что относительный продольный шаг S_2/d практически не влияет на величину отложений, а увеличение относительного поперечного шага S_1/d следует рассматривать как положительный фактор. Последнее обстоятельство тем более существенно, что температура газов на входе в котельный пучок превышает $500\text{ }^\circ\text{C}$, а при этой температуре адгезионные свойства уноса могут проявляться в большей степени.

Практика показывает, что трубы котельных пучков с продольным омыванием в меньшей степени подвержены заносам, чем котельные пучки с поперечным омыванием. Однако слабым местом в продольно омываемых пучках является зона, расположенная над нижним барабаном, в которой газовый поток совершает поворот на 180° , переходя от опускного к подъемному движению. В этой зоне происходит сепарация крупных фракций золы с перекрытием части живого сечения газохода.

Эффективным методом борьбы с отложениями этого типа может быть рациональная компоновка обдувочных аппаратов с их размещением непосредственно в зоне вероятного осаждения золы.

Занос поперечно оmyваемых пучков, особенно в начальной их части, может являться фактором, ограничивающим продолжительность непрерывной рабочей кампании СРК, и вызвать необходимость в проведении периодических ручных расшлаковок пучка.

Экономайзеры. Содорегенерационные котлоагрегаты оборудованы водяными экономайзерами, являющимися хвостовыми (низкотемпературными) поверхностями. В экономайзере температура металла имеет наименьшее значение из всех поверхностей, находящихся под давлением. При низкой температуре поверхности стенки могут возникнуть условия для коррозионного повреждения металла вследствие конденсации влаги из дымовых газов. Водяной экономайзер в большой степени подвержен отложениям летучей золы на трубах. Характерным для хвостовой поверхности является низкий температурный напор, особенно на входе в экономайзер.

Технологическая схема СРК в значительной мере определяет размеры и металлоемкость экономайзера. В схемах СРК с концентрированием щелока до заданного значения на выпарной станции температура газов за экономайзером составляет 165 – 185 °С. В этом случае требуется существенное развитие поверхности экономайзера с соответствующим увеличением его габаритных размеров и металлоемкости.

Для обеспечения циркуляции воды и ее надежного опускного движения в последних по ходу газа рядах труб котельного пучка необходимо исключить кипение воды в экономайзере и обеспечить гарантированный недогрев до кипения питательной воды, поступающей в барабан. В связи с этим в агрегатах без газоконтактного испарителя применяется метод промежуточного охлаждения питательной воды в воздушно-водяных теплообменниках, суть которого заключается в использовании части тепла воды для нагрева дутьевого воздуха.

Водяные экономайзеры с *вертикальным* расположением труб и паровой обдувкой были сконструированы и применены на СРК как альтернатива экономайзерам горизонтального типа (рис. 49, 50).



Рис. 49. Вертикальный экономайзер современного СРК

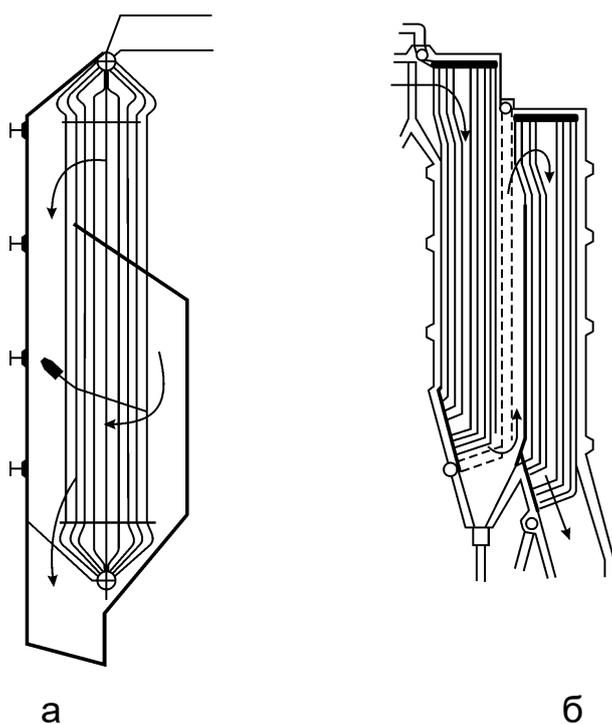


Рис. 50. Вертикальные экономайзеры СРК:
а – «Стейн»; б – «Тампелла»

Эксплуатационные преимущества вертикальных экономайзеров оказались столь значительными, что в современных СРК применяются только экономайзеры с вертикальным расположением труб, несмотря на увеличенные габаритные размеры и металлоемкость. Многолетний опыт эксплуатации СРК с

экономайзерами вертикального типа подтвердил их надежность и высокую эффективность очистки от загрязнений при использовании паровой обдувки. В конструкциях вертикальных экономайзеров используются плавниковые трубы, расположенные в коридорном порядке с относительным поперечным шагом $S_1/d \geq 2$.

По условиям очистки конструкция вертикального экономайзера с продольным омыванием (рис. 50б) предпочтительней конструкции вертикального экономайзера с наклонными газовыми перегородками (рис. 50а), за счет которых характер омывания становится ближе к поперечному. Водяной экономайзер современных СРК состоит из двух ступеней продольного обтекания с противотоком дымовых газов и питательной воды. Все ступени экономайзера выполнены в виде ширм из плавниковых труб.

Поток дымовых газов в экономайзере идет вниз, и там нет поперечных перегородок, которые могли бы вызывать отложения летучей золы. Фронтные и задние трубы каждой ступени образуют водоохлаждаемую газовую направляющую перегородку для ступеней путем установки плавников этих труб под углом 90° по отношению к другим плавникам секции. Верхние коллектора ширм образуют потолок экономайзера. Газоплотность потолка экономайзера обеспечивается обечайкой из углеродистой стали, расположенной на верхних коллекторах ширм экономайзера. Конструкция боковых стен и задней стены 1-й ступени экономайзера выполнена газоплотной при помощи внутренней облицовки из углеродистой стали.

В среднем пространстве имеется необходимое количество сажеобдувочных аппаратов для обеспечения чистоты газоходов.

Для уменьшения поверхности экономайзера целесообразным является и обоснованное снижение начальной температуры питательной воды до $105 - 120^\circ\text{C}$, что позволяет увеличить температурный напор и, соответственно, тепловосприятие экономайзера.

Возможность снижения температуры питательной воды подтверждается как практикой работы ряда СРК, так и фактической температурой точки росы

продуктов сгорания сульфатного щелока, составляющей, по данным испытаний, 85 – 95 °С.

4.5. Гидравлические схемы СРК

В СРК повреждения парообразующих поверхностей, связанные с неудовлетворительной циркуляцией воды, маловероятны, что объясняется достаточной степенью надежности высоких циркуляционных контуров СРК.

На рис. 51 представлена традиционная схема циркуляции двухбарабанного СРК, из которой видно, что вода из верхнего барабана 8 поступает в нижний 9 по обогреваемым последним рядам труб котельного пучка 1. Из нижнего барабана по необогреваемым опускным трубам 3 (или по стоякам большего диаметра) она проходит в главный распределительный коллектор 10, из которого осуществляется питание фронтального, заднего и боковых экранов. Пароводяная смесь из фронтального и заднего экранов 5 непосредственно вводится в верхний барабан.

Из боковых экранов пароводяная смесь направляется в верхние коллекторы 11, а из них по пароводящим трубам 7 – в верхний барабан. Трубы защитного пучка пароперегревателя (фестона) 6 питаются водой также из нижнего барабана по необогреваемым опускным трубам 4. Пароводяная смесь, образующаяся в трубах фестона, отводится в верхний барабан. Передние ряды труб котельного пучка являются подъемными, их питание осуществляется из нижнего барабана. Циркуляционные контуры экранов, защитного фестона и котельного пучка имеют общий элемент – обогреваемые опускные ряды котельного пучка.

Таким образом, обеспечение надежного опускного движения воды в последних рядах котельного пучка является важным фактором, обуславливающим нормальное питание подъемных труб. Практически это достигается предотвращением кипения в обогреваемых опускных трубах. Котельные пучки размещаются в зонах относительно слабого обогрева, и их опускные ряды омываются газами с температурой 400-500 °С. Питательная

вода, поступающая в барабан после экономайзера с температурой на 20 – 30 °С ниже температуры кипения, равномерно распределяется через перфорированную трубу со сливом в сторону опускных труб. В результате достигаются гарантированный недогрев до кипения циркулирующей воды на входе в опускные трубы и отсутствие кипения в них.

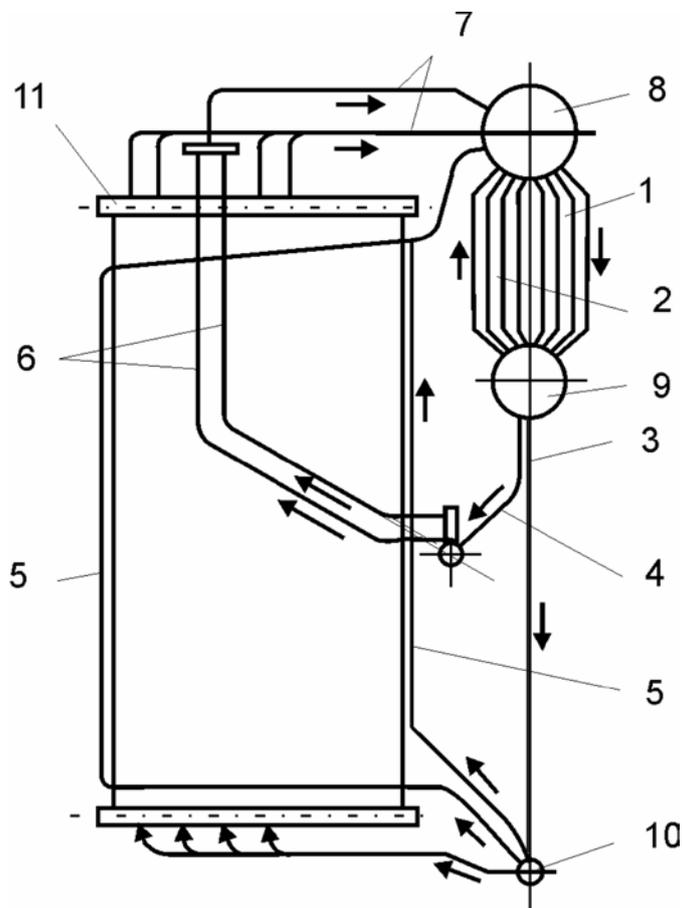


Рис. 51. Схема циркуляции двухбарабанного СРК:

1 – опускные трубы котельного пучка; 2 – подъемные трубы котельного пучка;
 3 – необогреваемые опускные стояки экранов; 4 – необогреваемые опускные стояки
 фестона; 5 – экраны; 6 – фестон; 7 – паропроводящие трубы боковых экранов и
 фестона; 8 – верхний барабан; 9 – нижний барабан; 10 – главный
 распределительный коллектор; 11 – верхний коллектор

В однобарабанной конструкции предусматриваются два или три отдельных контура циркуляции с индивидуальными внешними опускными трубами большого диаметра для подачи воды в нижние коллектора экранов топki, фестона и котельного пучка (рис. 52).

Опускные трубы экранов топки соединены с поперечным коллектором под подом топки. Питательные трубы идут от горизонтальной части опускных труб под подом топки до нижних коллекторов боковых экранов топки, а также от поперечного коллектора до нижних коллекторов фронтального и заднего экранов. Из нижних коллекторов вода поступает в экраны топки, в которых образуется пароводяная смесь. Она поступает в верхние коллекторы топки за счет естественной циркуляции, откуда по пароводящим трубам – обратно в барабан.

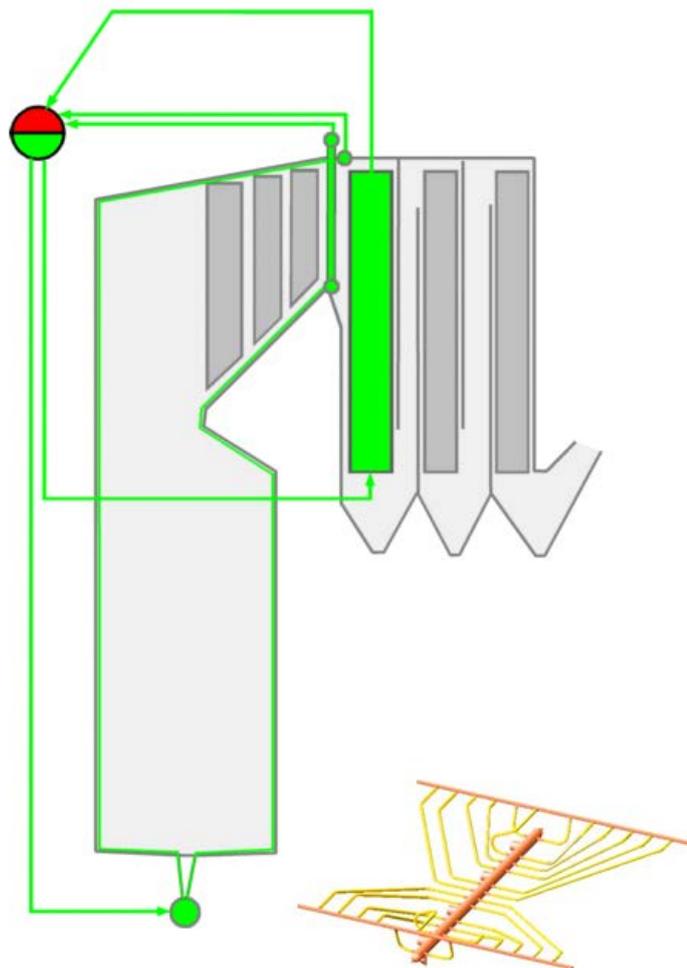


Рис. 52. Схема циркуляции однобарабанного СРК

Также в контуре циркуляции котельного пучка вода из барабана по опускным трубам поступает в нижний распределительный коллектор кипяточного пучка. Вода поднимается вверх через секцию труб кипяточного

пучка противоточно по отношению к дымовым газам. Затем пароводяная смесь возвращается в паровой барабан по подъемным трубам.

Для обеспечения максимальной надежности кратность циркуляции для экранов топки составляет 10 – 15, а для кипятильного пучка 30 – 40.

4.6. Подача и регулирование воздуха

Многоярусная система подачи воздуха на горение обеспечивает эффективное выгорание углерода, высокую степень восстановления, низкие выбросы, хорошую стабильность слоя огарка, а также равномерные скорости на выходе из топки для доведения до минимума высоких температур в пароперегревателе и испарительной секции и связанных с этим загрязнений.

Воздух, подаваемый на горение, вводится в топку СРК в три или четыре яруса.

Первичный воздух используется для обеспечения стабильности слоя огарка, эффективного выгорания углерода и высокой степени восстановления. Существенно, что первичный воздух распределяется равномерно на все четыре стены топки. Для формирования подушки огарка на поду топки большое значение имеют скорость истечения воздушных струй и возможность поддержания оптимальной скорости в рабочем интервале изменения нагрузки СРК.

Вторичный воздух состоит из нижнего и верхнего вторичного воздуха.

Назначением нижнего вторичного воздуха являются:

- сушка капель щелока;
- сжигание пиролизных газов;
- регулирование формы слоя огарка.

Нижний вторичный воздух вводится в топку над слоем огарка на фронтальной и задней стенах через маленькие и большие воздушные сопла. Шахматная схема установки воздушных сопел обеспечивает равномерный поток воздуха и эффективное смешивание воздуха и дымовых газов.

Назначением яруса верхнего вторичного воздуха являются:

- сушка капель щелока;
- сжигание пиролизных газов;
- регулирование верхнего уровня слоя огарка;
- снижение скорости вертикального потока газов;
- интенсификация смешивания воздуха и дымовых газов.

С верхним вторичным воздухом могут смешиваться слабые неконденсирующиеся газы и парогазовые выбросы из бака-растворителя. Сопла для ввода верхнего вторичного воздуха располагаются на фронтальной и задней стенах по той же схеме, как и сопла нижнего вторичного воздуха.

Третичный воздух используется для дожигания газов (H_2S и CO). Третичный воздух, подаваемый вентилятором третичного воздуха, не подогревается и вводится через несколько больших сопел на фронтальной и задней стенах. Большой размер сопел, их надлежащее размещение и использование холодного третичного воздуха обеспечивает эффективное проникновение в топочный объем и хорошее смешивание для дожигания газов, оставшихся после зоны вторичного воздуха.

Четвертый ярус воздуха может устанавливаться на несколько метров выше яруса третичного воздуха для доведения выбросов оксидов азота NO_x до минимума. Оксиды азота могут быть восстановлены до азота путем продления времени выдержки в субстехиометрической зоне восстановления в топке за пределами третичного воздуха.

Конструкция сопел оказывает существенное влияние на возможности эксплуатационного регулирования воздушного режима, так как определяет условия формирования и развития струй, истекающих из сопел.

Одной из важных характеристик струи является глубина ее проникновения в поток топочных газов. Глубина проникновения струи пропорциональна скорости истечения из сопла и его эквивалентному диаметру. Этим объясняется принципиальный характер отличий работы воздушных сопел с различным регулированием расхода воздуха.

Существует *дрессельный* способ регулирования первичного воздуха, при котором напор дресселируется на регулирующем органе (рис. 53а). При таком регулировании сечение сопла остается постоянным, поэтому изменение расхода воздуха всегда связано с изменением скорости.

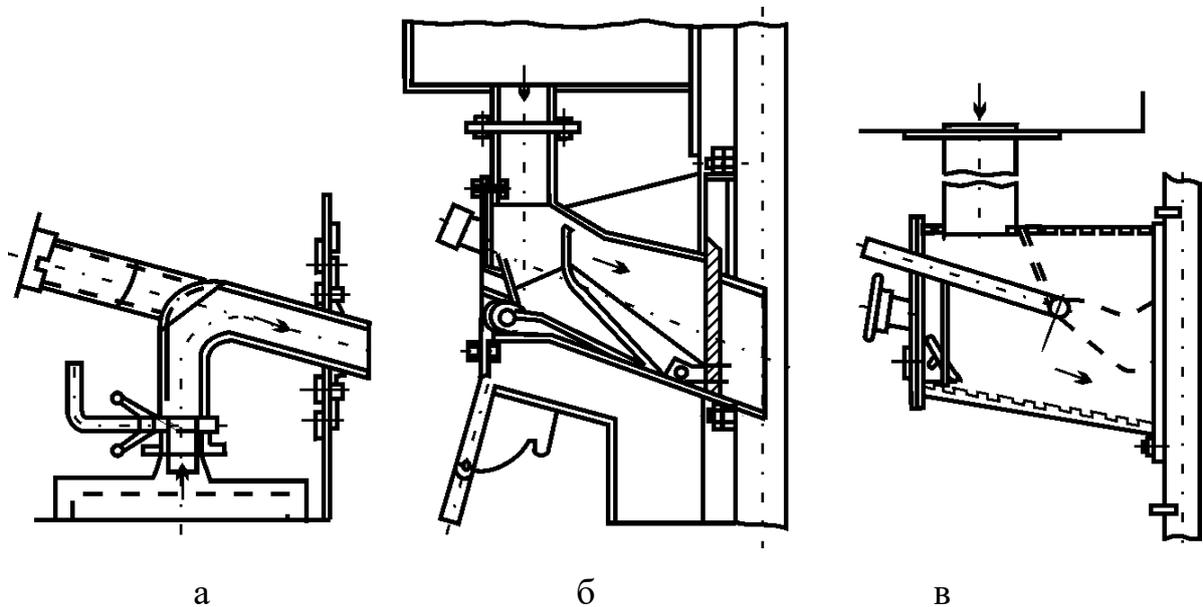


Рис. 53. Регулирование расхода воздуха первичного дутья:

а – дрессельное; б, в – сопловое

При *сопловом* регулировании (рис. 53б, в), позволяющем менять сечение сопла, практически удается поддерживать заданную скорость в широком диапазоне изменения расхода воздуха. Такие конструкции сопел первичного воздуха применены в агрегатах «Тампелла». Сопла с регулируемым сечением, обеспечивая большую глубину проникновения воздушной струи и более интенсивную турбулизацию потока, создают, как показывает опыт работы СРК, благоприятные условия для тонкого регулирования воздушного режима восстановительной зоны топки.

При двухъярусной схеме ввода воздуха в топку верхнее дутье может выполняться тангенциальным. Крутка потока существенно интенсифицирует процесс горения в окислительной зоне топки.

В случае изменения нагрузки котла и, следовательно, изменения расхода воздуха заданная скорость воздуха в соплах поддерживается за счет изменения суммарного сечения сопла путем перекрытия части его секций.

При эксплуатации СРК воздушные сопла, преимущественно сопла первичного дутья, требуют прочистки от огарка щелока. Для прочистки отверстий подвода воздуха используются стержни, установленные в соплах на ярусах первичного и вторичного воздуха. Обычно прочищающая система соединена с распределенной системой управления (РСУ), и последовательность операций осуществляется автоматически. Как правило, на ярусе первичного воздуха одновременно работают четыре или пять прочищающих стержней, а на ярусах нижнего и верхнего вторичного воздуха – два стержня.

Ручная прочистка производится периодически, поэтому в случае продолжительных промежутков между ними забивание сопел огарком щелока со стороны топки может существенно перекрывать сечение для прохода воздуха, что приводит к изменению его расхода. Чистка сопел с промежутками более одного часа вызывает увеличение эмиссии соединений восстановленной серы. Поэтому требуется более частая прочистка.

Подогрев воздуха производится в паровых или водяных калориферах. В паровых калориферах воздух подогревается насыщенным паром давлением 1,2 – 1,6 МПа до температуры 150 – 180 °С.

Воздух может подогреваться и в водовоздушных теплообменных аппаратах (ВВТО). Подогрев воздуха происходит за счет использования теплоты воды, проходящей через экономайзер, тем самым осуществляется промежуточное регулирование температуры воды, что позволяет предотвратить кипение воды в экономайзере, снизить его металлоемкость, обеспечив при этом подогрев воздуха до стандартной температуры 150 °С.

Водовоздушные теплообменники включаются в рассечку между первой и второй ступенями экономайзера.

Возможна комбинированная схема подогрева воздуха, где первой ступенью является ВВТО, в котором воздух подогревается до температуры 105 – 110 °С, а дальнейший подогрев воздуха происходит в паровом калорифере.

4.7. Загрязнение и очистки поверхностей нагрева

По данным Центрального котлотурбинного института, проделавшего ряд анализов плавкости золы, отобранной в различных местах содорегенерационных котлоагрегатов после их останова, усредненная температура начала деформации золы составляет 820 °С, плавления – 860 °С, а жидкоплавкого состояния – 900 °С. Температура плавления золы зависит от ее состава и при значительном содержании сульфида натрия может снижаться до 620 °С.

Отложения, образующиеся на трубах экранов топки, носят характер огарка, периодически отваливающегося с труб, или плава, стекающего по трубам на под топки. Поэтому отложения, образующиеся на экранах топки, не лимитируют длительность рабочей кампании содорегенерационных котлоагрегатов и не требуют устройства для их удаления.

Ширмовые поверхности пароперегревателя, конвективного пучка и экономайзера содорегенерационных котлоагрегатов очищаются от наружных загрязнений при помощи паровых сажеобдувочных аппаратов.

4.8. Бак-растворитель плава

Лётки плава. Плав течет из топки в бак-растворитель по лёткам плава из углеродистой стали, расположенным на задней стене топки. Лётки плава располагаются над подом топки, так что всегда имеется слой плава для защиты труб пода топки (рис. 54). Лётки плава не имеют переходников или крепежных деталей, как например, плит со шпильками или отливок. Конец лётки с коробкой прикрепления спроектирован в форме конуса так, что при ежегодной замене лётки она может быть легко снята.

Лётки плава охлаждаются для защиты их от сильного тепла плава и во избежание коррозии, вызываемой плавом. Для снижения сильного шума, вызываемого плавом, который входит в зеленый щелок в баке-растворителе, плавы дробятся индивидуальными паровыми струями на каждой лётке. Лётки плава покрыты небольшим кожухом из нержавеющей стали для обеспечения безопасности и защиты.



Рис. 54. Лётки плава

Во избежание отложения шлама и коррозии металла охлаждение лётки следует проводить химически очищенной деаэрированной водой или конденсатом. При этом охлаждение лётки наиболее целесообразно осуществить в замкнутом контуре циркуляции с автоматическим поддержанием уровня воды в расходных баках и автоматической регулировкой количества подпиточной воды. Использование неочищенной производственной воды приводит к

отложениям шлама в проточной части лётки и коррозии металла. Кроме того, отсутствие контроля температуры охлаждающей воды затрудняет регулирование количества охлаждающей воды. При недостатке охлаждающей воды перегорают лётки, а при избытке струя плава переохлаждается и вследствие повышения вязкости теряет текучесть. Применение лётки, у которых сторона, соприкасающаяся со струей плава, выполнена из нержавеющей стали, значительно увеличивает длительность их службы.

Как видно на схеме, представленной на рис. 55, деаэрированная химически очищенная вода поступает на охлаждение лётки самотеком из верхнего бака, расположенного выше уровня лётки.

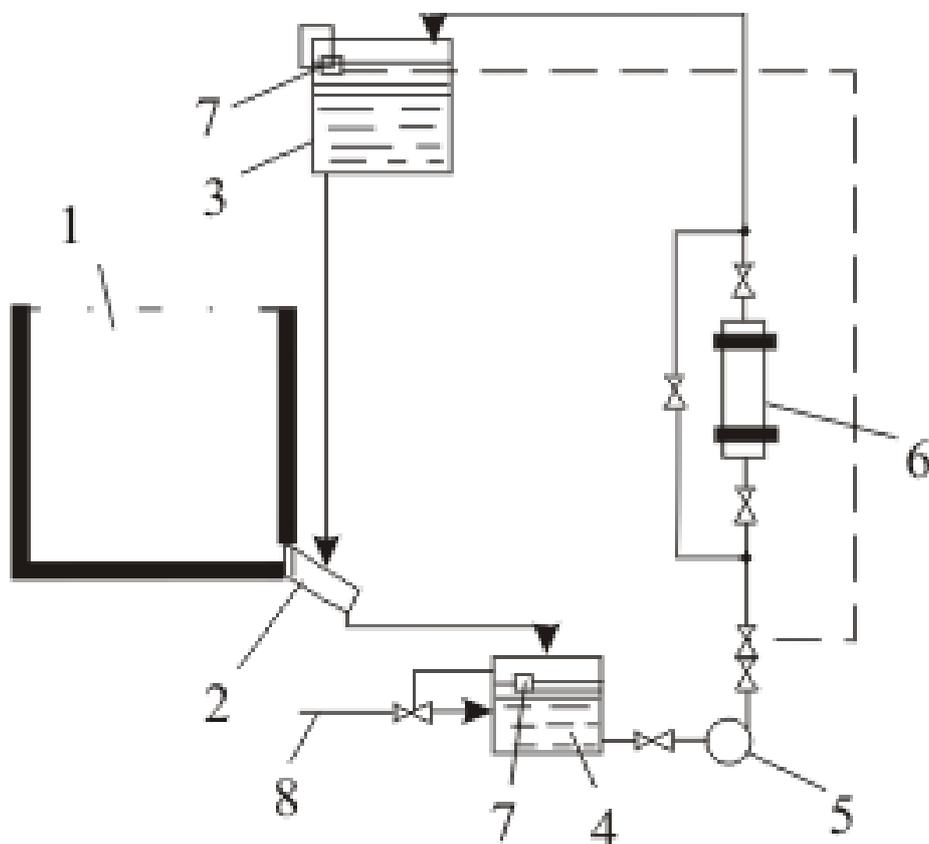


Рис. 55. Схема охлаждения лётки

- 1 – топка; 2 – лётка; 3 – верхний напорный бак; 4 – нижний бак; 5 – насос;
6 – теплообменник; 7 – регулятор уровня; 8 – подпиточная вода

Из кожуха лётки вода поступает в нижний бак, расположенный на нулевой отметке, откуда насосом через теплообменник перекачивается обратно в верхний бак. Температура воды, поступающей на охлаждение лётки, не

должна быть ниже 60-65 °С, а на выходе из летки 70 – 75 °С. При более низкой температуре охлаждающей воды в верхней части лётки, которая с одной стороны омывается плавом, а с другой – холодной водой, возникают большие напряжения, способствующие разрушению металла. Целесообразно при компоновке СРК с растворителем плава стремиться к установке лётки минимальной длины.

Дробление струи плава и использование его физического тепла

Во избежание хлопков и взрывов в растворителях плава необходимо дробление его струи, стекающей из лётки. На ряде комбинатов паропровод подводится под струю плава (как и трубопровод зеленого щелока), что не дает должного эффекта (рис. 56а, б). Наиболее правильно для дробления струи плава подводить пар так, как это показано на рис. 56в.

Дробление струи плава паром позволяет не использовать в ряде случаев рециркуляционные насосы зеленого щелока. Однако такое мероприятие может быть рекомендовано там, где имеются мешалки в растворителях, обеспечивающие хорошее перемешивание зеленого щелока. В этих случаях появляется возможность экономии электроэнергии и снижения затрат на ремонт насосов и рециркуляционных трубопроводов.

На некоторых предприятиях для дробления струи плава используется слабый белый щелок, непрерывно подаваемый в растворитель плава, что позволяет экономить электроэнергию, затрачиваемую на привод рециркуляционного насоса зеленого щелока. Однако, вследствие возможных перебоев в подаче слабого белого щелока при неравномерном режиме работы СРК, такое мероприятие не является достаточно надежным.

В баках зеленого щелока за счет физического тепла плава происходит интенсивное испарение воды и увлечение химикатов паром в атмосферу. Таким образом может теряться физическое тепло плава, которое составляет 4 – 5 % в тепловом балансе СРК. Поэтому на ряде предприятий тепло паров, испаряющихся из баков зеленого щелока, используется для нагрева воды в поверхностных теплообменниках.

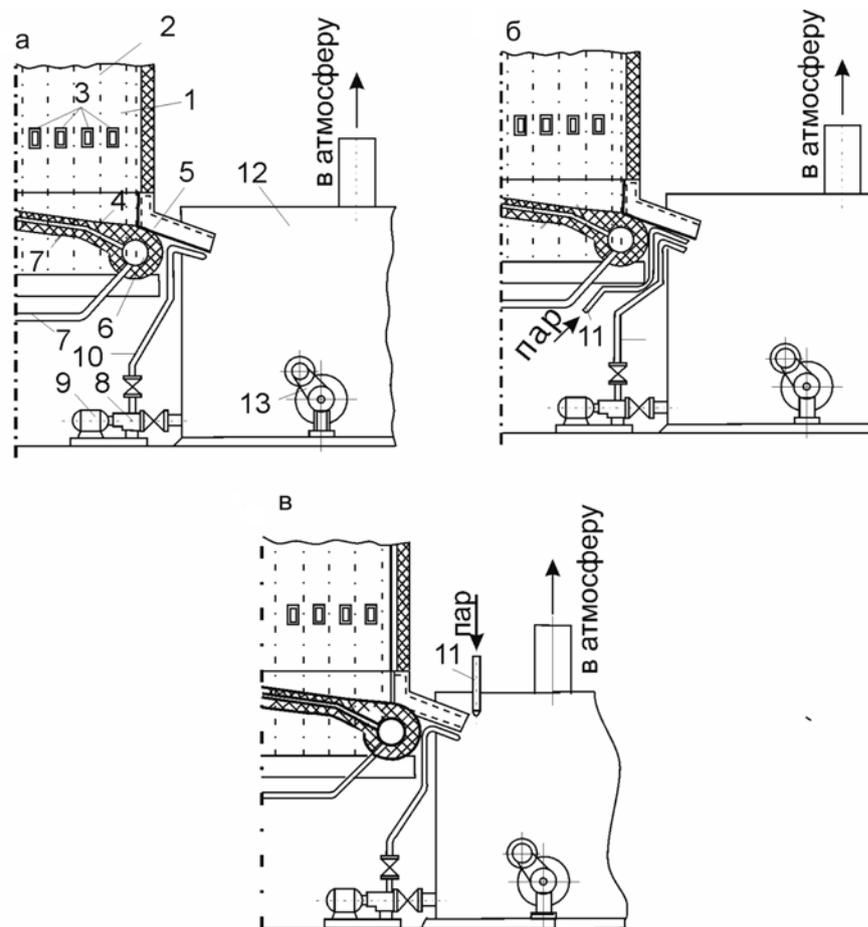


Рис. 56. Схемы дробления струи плава:

а – струей рециркулирующего зеленого щелока; б – струей рециркулирующего зеленого щелока и паром, подведенным под струю плава на выходе из лётки; в – струей рециркулирующего щелока и паром, подаваемым на струю плава сверху:

1 – топка; 2 – экранные трубы; 3 – фурмы первичного дутья; 4 – под топки; 5 – лётка; 6 – коллектор; 7 – водоподводящие трубы; 8 – рециркуляционный насос; 9 – электродвигатель; 10 – трубопровод подачи зеленого щелока для дробления струи плава; 11 – трубопровод подвода пара для дробления струи плава; 12 – бак-растворитель плава; 13 – привод горизонтальной мешалки растворителя плава

Бак-растворитель. Бак-растворитель имеет овальную форму с шириной, соответствующей ширине топки. Бак-растворитель снабжен мешалками для обеспечения эффективного перемешивания и растворения плава в слабом белом щелоке (промывном щелоке). На баке-растворителе размер отверстий для лёток плава доведен до минимума (рис. 57). Размер и размещение общей выхлопной трубы и выпуска газов при взрыве выбраны на основе того, что пары из бака вытягиваются в трубу, а не на рабочую площадку. Выпуск газов

при взрыве спроектирован для оказания помощи вытяжной трубе для понижения давления газов в случаях его резкого повышения. Бак-растворитель соединен с резервной водяной линией для аварийного использования. В случае отсутствия слабого щелока возможно растворение плава при помощи воды.

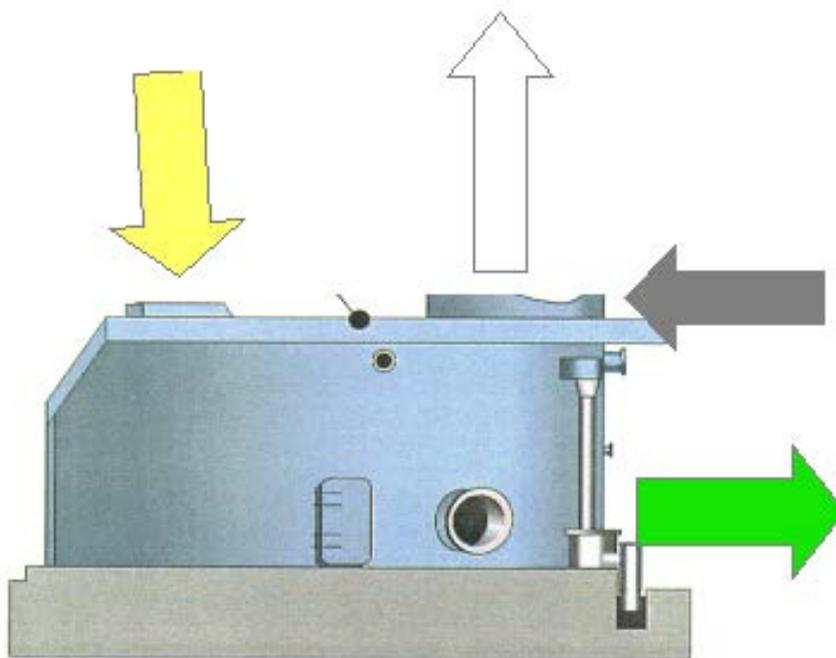


Рис. 57. Бак-растворитель плава

Расход зеленого щелока и уровень щелока в баке-растворителе регулируются насосами зеленого щелока или регулируемыми клапанами. Зеленый щелок перекачивается от бака-растворителя в цех каустизации при помощи одного из двух насосов для зеленого щелока. При использовании одной линии для зеленого щелока слабый белый щелок подается в бак-растворитель по другой линии. Путем смены этих двух трубопроводов и двух насосов в работе можно избежать внутренних отложений пирсонита ($\text{Na}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), которые образуются в линиях во время работы на зеленом щелоке.

Утилизация парогазовых выбросов из растворителя плава. Для СРК паропроизводительностью 100 т/ч величина потерь тепла с выпаром составляет примерно 3,5 – 4,1 МВт, или 0,59 – 0,67 ГДж/т вырабатываемой целлюлозы. Потери химикатов с выпаром для СРК указанной производительности составляет 15 – 25 кг/ч.

Утилизация парогазовых выбросов позволяет полезно использовать существенную долю тепла парогазов и резко сократить потери химикатов. Существуют различные системы утилизации. Достаточно распространены устройства, позволяющие одновременно утилизировать тепло и химикаты парогазовых выбросов.

Принципиальная схема таких устройств включает: теплообменник, омываемый парогазом с температурой 80 – 100 °С; отвод конденсата в бак-растворитель плава с целью возврата химикатов; вентилятор для усиления тяги (в некоторых установках используется только естественная тяга вытяжной трубы бака-растворителя) (рис. 58).

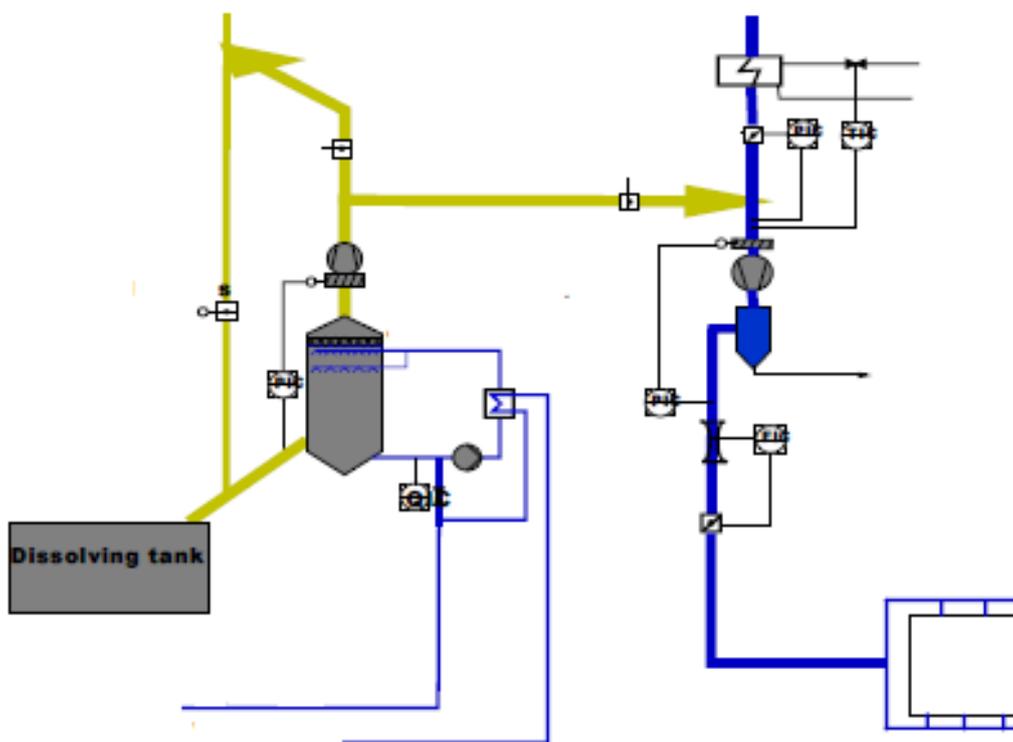


Рис. 58. Утилизация парогазовых выбросов из растворителя плава

В таких установках достигается сокращение потерь тепла с парогазами, при этом обеспечивается подогрев воды в теплообменниках до 50 – 55 °С. В отношении улавливания химикатов установки также достаточно эффективны (60 – 70 %).

В ряде СРК применено специальное газоочистное устройство, представляющее собой полый скруббер, в верхней части которого имеется

форсунка, разбрызгивающая орошающую жидкость. Скруббер высотой 5 м и диаметром 1,9 м устанавливается непосредственно в вытяжной трубе бака-растворителя плава.

Парогазовые выбросы образуются в баке-растворителе, когда плав, вытекающий из топки, упаривает воду, и воздух поступает в бак-растворитель. Во избежание утечки этих вредных парогазовых выбросов без обработки в атмосферу бак-растворитель имеет соединение со скруббером Вентури для очистки парогазовых выбросов и трубчатый конденсатором, после которых они используются в качестве воздуха на горение на ярусе верхнего вторичного воздуха. Труба парогазовых выбросов от дренажного бака соединяется с трубой от бака-растворителя, так что парогазовые выбросы обоих источников направляются в скруббер по одной общей трубе.

Основными компонентами парогазовых выбросов являются воздух и водяной пар. Кроме них, парогазовые выбросы содержат также пыль, соединения аммония и восстановленные сернистые соединения. Большинство пыли, содержащейся в парогазовых выбросах, вымываются промывным щелоком в скруббере Вентури. После скруббера газы направляются в трубчатый конденсатор. В конденсаторе парогазовые выбросы охлаждаются для удаления лишней влаги и снижения объема газов, подаваемых в котел. К тому же, работа котла и регулирование выбросов улучшаются за счет удаления влаги. Конденсирующая труба использует технологическую или охлаждающую воду и возвращает горячую воду. Вода, конденсировавшаяся из газов, направляется в бак-растворитель. Газы выходят из трубчатого конденсатора при температуре порядка 50 °С.

Каплеотделитель располагается после конденсатора. Он улавливает унесенные капли из газового потока. Из трубчатого конденсатора парогазовые выбросы направляются вентилятором в паровой теплообменник, в котором газы подогреваются до температуры порядка 80 – 90 °С. Подогретые газы смешиваются с воздухом на горение на ярусе верхнего вторичного воздуха. Если невозможно направлять парогазовые выбросы на СРК, они подаются по

обводной линии в трубу для отвода парогазовых выбросов. Обводная линия обычно закрыта шибером с весовой балансировкой. Шибер открывается только при сильных порывах газов из бака-растворителя. Для защиты бака-растворителя труба для отвода парогазовых выбросов и бак-растворитель снабжены редуционным шибером.

Система снабжена системой кислотной промывки, используемой для удаления возможных отложений CaCO_3 из конденсатора, газоходов и т.п. Кислотная промывка конденсатора должна проводиться примерно через каждые три месяца или при необходимости.

4.9. Очистка газовых выбросов СРК

Производство сульфатной целлюлозы связано с образованием значительных количеств газовых выбросов, содержащих токсичные и дурнопахнущие соединения. Один из основных источников выброса – СРК, хотя концентрации дурнопахнущих соединений в дымовых газах обычно невелики. Дурнопахнущие серосодержащие газы – сероводород H_2S , метилмеркаптан CH_3SH , диметилсульфид $(\text{CH}_3)_2\text{S}$, диметилдисульфид $(\text{CH}_3)_2\text{S}_2$ – образуются главным образом во время сушки и пиролиза черного щелока в топке СРК. Оптимальный топочный режим позволяет свести к минимуму выделение дурнопахнущих соединений из топки.

Очистка дымовых газов в электрофильтрах. Практически все СРК оборудованы электростатическими фильтрами, являющимися весьма надежными и эффективными устройствами для очистки (см. рис. 16).

Установка электрофильтров состоит из двух частей: из собственно электрофильтра, или осадительной камеры, через которую пропускается подлежащий очистке газ, и высоковольтной аппаратуры, предназначенной для питания электрофильтра выпрямленным током высокого напряжения.

Питающий электроагрегат состоит из регулятора напряжения, высоковольтного трансформатора, преобразующего переменный ток напряжением 220 – 380 В в ток напряжения до 10000 кВ, и механического

высоковольтного выпрямителя, преобразующего переменный ток в выпрямленный. Последний с помощью высоковольтного кабеля подается на электроды электрофильтра.

В осадительной части электрофильтра смонтированы *осадительные* и *коронирующие* электроды. Осадительные электроды как правило пластинчатые (из волнистой стали с выштампованными карманами, из угольных пластин и др.). Коронирующие электроды изготавливают из круглой профилированной проволоки.

Осадительные электроды соединены с положительным контактом механического выпрямителя и заземлены; коронирующие электроды изолированы от земли и соединены с отрицательным контактом механического выпрямителя. При пропускании через межэлектродное пространство электрофильтра очищаемого газа происходит зарядка частиц ионами, которые под действием электрического поля двигаются к электродам и оседают на них (рис. 59).

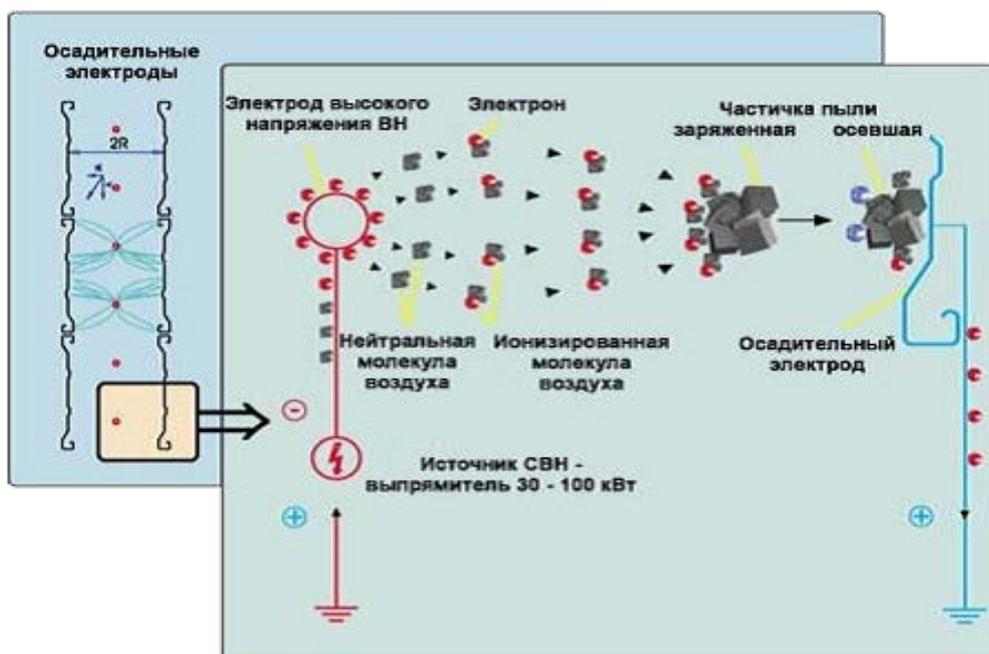


Рис. 59. Принцип работы электрофильтра

Основная масса взвешенных частиц оседает на осадительных электродах. При этом пылевидные частицы удаляют, встряхивая или обстучивая электроды.

Уловленные частицы собираются в установленном под электрофильтром бункере, откуда удаляются (рис. 60).

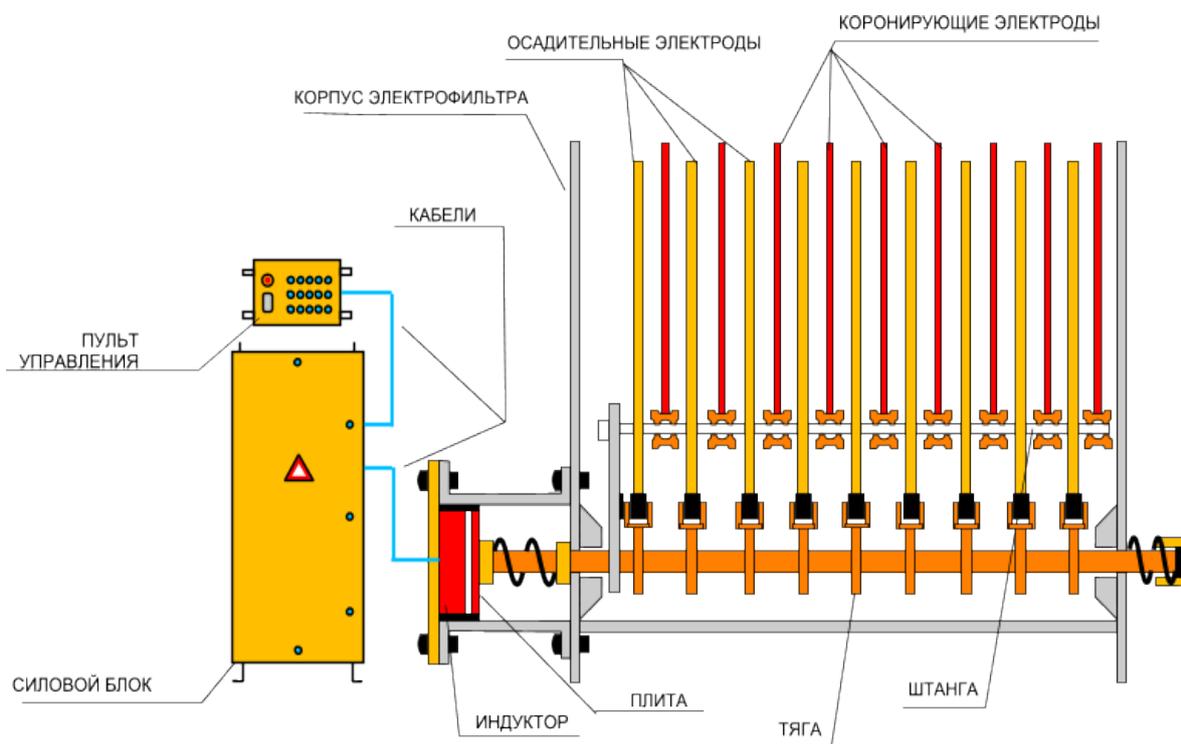


Рис. 60. Схема электрофильтра

Время пребывания газов в электрофильтре сильно влияет на качество очистки. Многолетний опыт работы показал, что скорость газов в электрофильтрах невелика (в пределах от 0,5 до 2 м/с), а время пребывания в фильтре значительно (от 2 до 9 с). Поэтому электрофильтры достаточно громоздки. Но гидравлическое сопротивление их невелико (от 50 до 200 Па). Коэффициент очистки, особенно при мелкой пыли, высок (95 – 99 %). Они хорошо улавливают частицы мельче 10 микрон.

По основным конструктивным признакам электрофильтры характеризуются:

- горизонтальным ходом газов;
- металлическим или железобетонным корпусом;
- очисткой электродов путем встряхивания ударно-молотковым механизмом;

- сухим, с использованием скребково-винтовых механизмов и шлюзовых затворов, способом удаления золы или мокрым – с применением смыва золы щелоком;
- осадительными электродами, представляющими собой пластины S-образного типа из углеродистой стали;
- пружинными или игольчатыми коронирующими электродами из высоколегированной стали.

Основные проблемы, возникающие при эксплуатации электрофильтра и приводящие к ухудшению его работы:

- загрязнение газораспределительных решеток;
- коррозия и загрязнение поверхности коронирующих электродов;
- коррозия осадительных электродов;
- недостаточно качественная центровка электродов;
- износ и неисправность механизмов встряхивания и транспортировки золы;
- неплотности в камерах электрофильтра.

Присосы холодного воздуха в камеры электрофильтра в совокупности с присосами в газоходы СРК отрицательно влияют на эффективность пылеулавливания, увеличивая скорость газового потока в активной зоне, а также вызывают коррозионный износ камеры. В отношении коррозии необходимо отметить, что в конструкциях электрофильтров с мокрым способом удаления золы коррозионный износ проявляется в большей степени из-за испарения влаги с поверхности мокрого дна.

Зола. Крупные фракции золы вместе с отложениями, удаленными с поверхностей нагрева при сажеобдувке, собираются в зольные бункера, расположенные под кипяильным пучком и секциями экономайзера. Летучая зола улавливается в электрофильтре.

Под каждым зольным бункером располагается скребковый цепной конвейер. Конвейеры транспортируют золу на выпускную трубу,

расположенную ниже привода в конце конвейера. Они имеют наклон вниз по направлению к приводной станции. На выходе каждой зольной трубы располагается шлюзовая питатель для подачи золы на сборный конвейер и для предотвращения выхода дымовых газов между бункером и сборным конвейером. Скребок цепной поперечный сборный конвейер имеет наклон для обеспечения того, чтобы вся промывная вода доходила до конца конвейера и далее в бак-растворитель. Поперечный сборочный конвейер транспортирует золу в трубу, через которую зола сбрасывается в бак-смеситель, где она смешивается с черным щелоком. Сбросная труба работает под давлением вторичного воздуха для предотвращения утечки парогазовых выбросов из бака-смесителя.

Летучая зола, уловленная из дымовых газов в электрофилт্রে, падает на плоское дно электрофилтра, откуда она удаляется скребками на скребок цепной сборный конвейер, расположенный под каждой камерой электрофилтра. Сборные конвейеры разгружают золу через шлюзовые питатели на главный сборный конвейер, который сбрасывает золу прямо в бак-смеситель.

4.10. Термическое обезвреживание вредных выбросов производства

СРК могут быть использованы для термического обезвреживания вредных выбросов производства.

Слабые неконденсирующиеся газы (низкой концентрации) из разных источников предприятия объединяются перед направлением их по общей трубе в здание СРК. В здании СРК они сначала направляются через комбинированный каплеотделитель –подогреватель, где температура газов повышается намного выше точки росы. После подогрева слабые неконденсирующиеся газы смешиваются с парогазовыми выбросами из бака-растворителя плава и необходимым количеством свежего воздуха и используются в качестве верхнего вторичного воздуха на горение.

Крепкие неконденсирующиеся газы (высокой концентрации) направляются на горелку СРК через каплеотделитель с помощью парового эжектора. В качестве вспомогательного топлива используется мазут или газ. Скипидар и метанол смешиваются на выпарной станции перед направлением на горелку СРК.

Контрольные вопросы

1. Какие основные теплофизические свойства черного щелока?
2. В чем основное назначение СРК?
3. Как организованы топочные процессы в СРК?
4. Какие основные реакции протекают в топке СРК?
5. Почему для подогрева щелока используется подогреватель смешивающего типа?
6. Почему для подачи щелока используют механические форсунки грубого распыла?
7. В чем особенности конструкции содорегенерационных котлоагрегатов?
8. Из каких труб выполняются экраны нижней части топки и почему?
9. Экономайзеры какого типа установлены в СРК и почему?
10. Как организована подача и регулирование воздуха?
11. Как утилизируются выбросы бака – растворителя плава?
12. Как происходит очистка дымовых газов в электрофильтрах?
13. Каким образом происходит термическое обезвреживание вредных выбросов производства?

Заключение

Котлы с кипящим слоем в последнее время находят все более широкое применение. Это связано с возможностью использования низкокалорийного и высоковлажного топлива (например, иловых осадков). Тепловая мощность единичной установки с кипящим слоем увеличилась до 300 МВт, а с циркулирующим кипящим слоем – до 600 МВт. За последние 30 лет было

установлено более 160 котлов с кипящим слоем, в том числе более 50 реконструировано. Котлов с циркулирующим кипящим слоем установлено более 60.

Развитие содорегенерационных котлоагрегатов идет в следующих основных направлениях:

- Увеличение производительности котлов по сжиганию шелока и параметров пара, что снижает капитальные затраты и уменьшает удельный расход топлива на выработку электроэнергии в паротурбинных установках, а при использовании пара как теплоносителя – интенсифицирует технологические процессы.
- Повышение концентрации черного шелока, что позволяет снизить высокотоксичные выбросы соединений восстановленной серы и увеличить паропроизводительность котлов.
- Применение высококачественных материалов при изготовлении СРК, совершенствование и модульная унификация элементов котлов и вспомогательного оборудования, что повышает надежность их работы и уменьшает капитальные затраты на оборудование.
- Применение рациональных конструкций топочных устройств и тягодутьевых установок, что снижает тепловые потери и расходы электроэнергии на собственные нужды.
- Использование более совершенных систем и установок для очистки продуктов сгорания, что дает возможность уменьшить вредные выбросы в атмосферу.
- Применение комплексной автоматизации работы СРК, что способствует повышению надежности и экономичности их работы.

Библиографический список

1. Сазонов, Б.В. Промышленные теплоэнергетические установки и системы [Текст] : учеб. пособие для вузов / Б.В. Сазонов, В.И. Ситас. – М.: Издательский дом МЭИ, 2014. – 275 с.
2. Глейзер, И.Ш. Котлы энерготехнологических и тепловых электростанций [Текст]/ И.Ш. Глейзер – М.: Энергосервис. – 2010. – 245 с.
3. Смородин, С.Н. Содорегенерационные котлоагрегаты [Текст] : учеб. пособие / С.Н. Смородин , А.Н. Иванов, В.Н. Белоусов/ СПбГТУРП. – СПб., 2010. – 164 с.
4. Производство целлюлозы, древесной массы, бумаги, картона [Текст] : информац.-техн. справочник по наилучшим доступным технологиям – М.: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2015.
5. Vakkilainen E., Kraft recovery boilers, Principles and practice, Picaset Oy, Helsinki, 2007.
6. Vakkilainen E., Evolution of recovery boiler design, Jaakko Pöyry Oy, 2003.
7. Fakhrai R., Black Liquor Combustion in Kraft Recovery Boilers-Numerical Modelling, Stockholm, May 2002.

Оглавление

Предисловие.....	3
1. Общая характеристика теплоэнергетической системы промышленного предприятия	4
Контрольные вопросы.....	14
2. Общая характеристика процесса сульфатного производства.....	14
Контрольные вопросы.....	18
3. Корьевые котлы	19
3.1. Котел КМ–75–40.....	19
3.2. Котлы с кипящим слоем	23
3.3. Конструкция котла с кипящим слоем	32
3.4. Опыт эксплуатации котлов с кипящим слоем.....	54
Контрольные вопросы.....	61
4. Содорегенерационные котлоагрегаты	62
4.1. Теплофизические свойства черного щелока.....	62
4.2. Организация топочных процессов в СРК.....	65
4.3. Технологическая схема.....	72
4.4. Конструкции содорегенерационных котлоагрегатов	78
4.5. Гидравлические схемы СРК	99
4.6. Подача и регулирование воздуха.....	102
4.7. Загрязнение и очистка поверхностей нагрева	106
4.8. Бак–растворитель плава.....	106
4.9. Очистка газовых выбросов СРК.....	114
4.10. Термическое обезвреживание вредных выбросов производства.	118
Контрольные вопросы.....	119
Заключение.....	119
Библиографический список.....	121

Учебное издание

**Сморodin Сергей Николаевич
Белоусов Владимир Николаевич**

**Оборудование
энерготехнологических
ТЭС**

Редактор и корректор Н.П. Новикова
Техн. редактор Л.Я. Титова

Темплан 2021 г., поз.21

Подписано к печати 22.04.21.	Формат 60x84/16.	Бумага тип № 1.
Печать офсетная.	Печ.л. 7,75.	Уч.-изд. л. 7,75.
Тираж 100 экз.	Изд. № 21.	Цена «С».
		Заказ №

Ризограф Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД,
198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4.