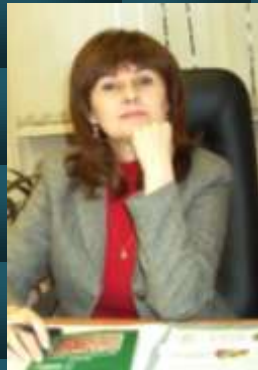




Сиваков Валерий Павлович,
доктор технических наук, профессор,
Почетный деятель высшей школы РФ,
профессор кафедры машин и оборудования
целлюлозно-бумажного производства
Уральского государственного
лесотехнического университета.
Автор и соавтор восьми книг,
двух монографических сборников,
более 200 статей и 30 изобретений.

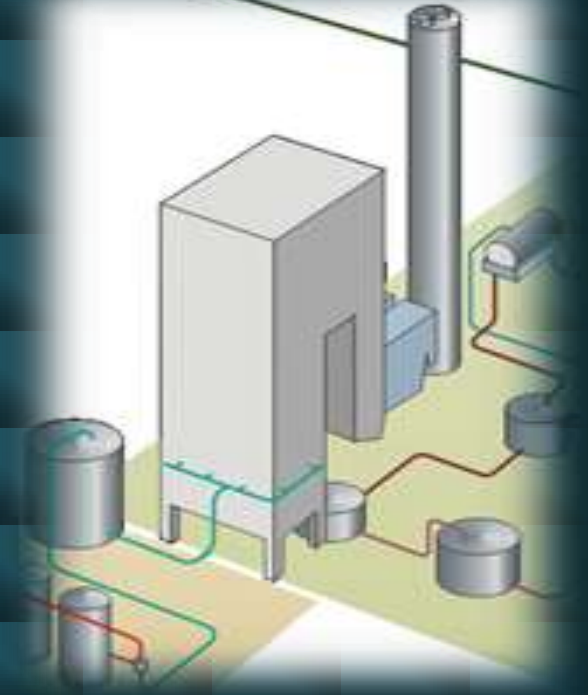


Вураско Алеся Валерьевна,
заведующая кафедрой химии древесины и
технологии целлюлозно-бумажных
производств Уральского государственного
лесотехнического университета, доктор
технических наук, профессор. Автор и
соавтор шести книг, в том числе автор
монографии «Применение антрахинона в
целлюлозно-бумажной промышленности»,
более 120 печатных трудов, 13 патентов в
области каталитического окисления
органических соединений
и каталитической делигнификации
растительного сырья.



Музыкантова Вера Ивановна – ведущий
инженер кафедры технической механики и
оборудования целлюлозно-бумажных
производств Уральского государственного
лесотехнического университета.
Опубликовано более 50 научных и
методических публикаций (в том числе 4
учебных пособия, 15 статей, 2 авторских
свидетельства) по направлению
технологические машины и оборудование.

В.П. Сиваков
А.В. Вураско
В.И. Музыкантова



**РЕГЕНЕРАЦИЯ ХИМИКАТОВ
И ТЕПЛА
В СОДОРЕГЕНЕРАЦИОННЫХ
КОТЛОАГРЕГАТАХ.
УСТРОЙСТВО
И ДИАГНОСТИРОВАНИЕ**

Электронный архив УГЛТУ

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВПО «УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

В.П. Сиваков
А.В. Вураско
В.И. Музыкантова

РЕГЕНЕРАЦИЯ ХИМИКАТОВ И ТЕПЛА
В СОДОРЕГЕНЕРАЦИОННЫХ
КОТЛОАГРЕГАТАХ.
УСТРОЙСТВО И ДИАГНОСТИРОВАНИЕ

Учебное пособие

Екатеринбург
2015

УДК 62-11-9
ББК 30.4
С 34

Рецензенты:

Кафедра полиграфии и web-дизайна ФГАУ ВПО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Е.Г. Смирнова – кандидат техн. наук, доцент ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова»

Сиваков В.П., Вураско А.В., Музыкантова В.И.

С 34 **Регенерация химикатов и тепла в содорегенерационных котлоагрегатах. Устройство и диагностирование:** учеб. пособие / В.П. Сиваков, А.В. Вураско, В.И. Музыкантова. Урал. гос. лесотехн. ун-т. – Екатеринбург, 2015. 141 с.

Ил. 17. Табл. 23. Библиограф.: 40 назв.
ISBN 978-5-94984-524-4

В учебном пособии систематизированы и изложены основные положения технологии регенерации химикатов, производства тепла, проектирования, модернизации и диагностирования машин и аппаратов котлоагрегатов.

Предназначено для обучающихся направлений 18.03.01 (240100.62); 18.04.01 (240100.68) «Химическая технология»; обучающихся направления 15.03.02; 15.04.02 (151000.62) «Технологические машины и оборудование»; для подготовки кадров высшей квалификации по направлениям: 18.06.01 «Химические технологии»; 35.06.04 «Технологии, средства механизации и энергетического оборудования в сельском, лесном и рыбном хозяйстве»

Печатается по решению Редакционно-издательского совета Уральского государственного лесотехнического университета.

УДК 62-11-9
ББК 30.4

ISBN 978-5-94984-524-4

© ФГБОУ ВПО «Уральский государственный лесотехнический университет», 2015

© Сиваков В.П., Вураско А.В.,
Музыкантова В.И., 2015

ВВЕДЕНИЕ

Содорегенерационное производство перерабатывает черный щелок с регенерацией химикатов и тепла при сульфатном способе варки целлюлозы. Содорегенерационное производство имеет непрерывный технологический цикл, в котором предусматривается восполнение потерь химикатов и подготовка крепкого белого щелока (варочного раствора). Основным агрегатом содорегенерационного производства является содорегенерационный котлоагрегат.

В учебной и технической литературе технология и оборудование содорегенерационных котлоагрегатов рассматриваются фрагментами в контексте изучения сульфатного производства. Отдельных изданий, учитывающих специфику технологии машин и оборудования содорегенерационного котлоагрегата, не имеется.

В учебном пособии систематизированы материалы по технологии, тепловым процессам, машинам и оборудованию содорегенерационного производства. Структурно материал изложен в соответствии с учебным планом университета. В начале рассматриваются химические и тепловые процессы, затем изложен материал по технологическому и конструктивному устройству, в конце приведен материал по производственно-техническому контролю, обслуживанию и диагностированию содорегенерационных котлоагрегатов.

Учебное пособие предназначено для обучающихся направлений 18.03.01 (240100.62); 18.04.01 (240100.68) «Химическая технология»; обучающихся направления 151000 «Технологические машины и оборудование»; для подготовки кадров высшей квалификации по направлениям 18.06.01 «Химические технологии»; 35.06.04 «Технологии, средства механизации и энергетического оборудования в сельском, лесном и рыбном хозяйстве», изучающих технологию, машины и оборудование целлюлозного производства.



1 КРУГООБОРОТ ЩЕЛОЧИ И СЕРЫ В НАТРОННО-ЦЕЛЛЮЛОЗНОМ И СУЛЬФАТЦЕЛЛЮЛОЗНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

1.1. Потери щелочи в производственном цикле

При регенерации щелоков, которая завершается каустизацией, затраченная на варку щелочь возвращается обратно в варочный котел в виде белого щелока. Часть щелочи теряется в производственном цикле. Эти потери возмещают постоянной добавкой химикатов (сода или сульфата). Потери щелочи можно разделить на *случайные* и на *технологически неизбежные* [1].

Случайные потери происходят при утечках и переливах щелоков в канализацию, чистке и промывке аппаратуры. Их необходимо снижать совершенствованием технологии и подъемом культуры производства.

Технологически неизбежные потери щелочи невозможно устранить полностью, но можно свести к минимуму совершенствованием технологии сульфатной варки и специальными мероприятиями.

Технологически неизбежные потери – это потери образующиеся:

- при сдувках и выдувках из котла;
- промывке целлюлозы с промытой массой;
- отделении сульфатного мыла из черного щелока с конденсатом и неконденсируемыми газами от корпусов выпарной станции;
- уносе с газообразными и пылевидными дымовыми газами от содорегенерационного котлоагрегата (СРК);
- уносе с парогазами из растворителя плава;
- промывке известкового шлама и с известковым шламом;
- промывке зеленого шлама, с зеленым шламом и другими отходами процесса каустизации.

Потери щелочи при сдувке и выдувке массы и при вскипании отбираемых в циклоны щелоков с парогазами относительно невелики. При соблюдении технологического регламента они составляют около 0,5 кг единиц (ед.) Na_2O на 1 т целлюлозы.

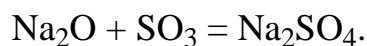
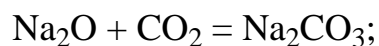
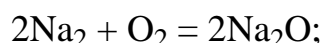
Потери щелочи при промывке целлюлозы наиболее значительны (8...12 кг/т в ед. Na_2O), так как часть щелочи (около 4,5 кг/т) удерживается волокном в адсорбированном виде, а остальные потери связаны с уходом

щелочи с водой от последней промывки целлюлозы. Случайные потери при промывке возникают за счет непогашенной пены и с переливами.

Потери щелочи при счерпывании сульфатного мыла из черного щелока перед подачей на выпарку происходят в виде натрия, присоединенного к смоляным и жирным кислотам, которые входят в состав мыла. С сульфатным мылом также увлекается 30...50 % щелочи, химически связанной со смоляными и жирными кислотами, поэтому при отсутствии цеха по переработке сульфатного мыла потери щелочи высоки и составляют 4...5 кг в ед. Na₂O на 1 т целлюлозы при варке хвойной древесины.

Основными причинами потерь щелочи при сжигании щелоков являются механическое увлечение легких частиц огарка и мелких капель щелока дымовыми газами и происходящие в печи химические реакции, приводящие к образованию возгоняющихся продуктов. Потери щелочи возникают за счет диссоциации карбоната при температурах выше 1000 °С. Диссоциация карбоната с выделением паров металлического натрия и оксида углерода протекает по уравнению $\text{Na}_2\text{CO}_3 = 2\text{Na} + \text{CO} + \text{O}_2$. На данной стадии процесса сжигания реакция диссоциации является преобладающей, причем натрий возгоняется как элементарный натрий.

В хвостовой части агрегата происходит конденсация паров щелочных соединений, и в результате вторичных реакций с компонентами дымовых газов возникает мелкодисперсная, летучая зола, частично осаждающаяся в дымоходах и зольниках, частично уходящая в дымовую трубу. Основными компонентами летучей золы являются карбонат и сульфат, образование которых проходит по следующей схеме:



Следует отметить, что не весь щелочной унос происходит из-за конденсации паров натриевых соединений. Часть уноса составляет механический унос огарка и сульфата, причем частицы огарка после сгорания в окислительной среде также образуют в основном карбонат и сульфат. Механический унос образует более крупную фракцию золы, частично оседающую в зольниках.

Общие потери при сжигании щелока составляют 5...30 кг Na₂O на 1 т целлюлозы. Мероприятиям по улавливанию уноса на современных СРК уделяется большое внимание. Потери с уносом снижают высокой степенью очистки газов в газо- или воздухоконтактных испарителях, электрофильтрах, скрубберах. Потери щелочи на 1 т целлюлозы с промытым каустизационным шламом при содержании щелочи в нем 0,7...1,0 % составляют 2,5...5 кг, с промытым шламом зеленого щелока – около 0,2 кг, с камнями и песком от гасителя-классификатора – около 0,1 кг в ед. Na₂O. Потери щелочи в цикле сульфатного производства приведены в табл. 1.

Таблица 1

Технологические потери щелочи при сульфатном способе
производства целлюлозы

Цех и процесс, связанные с потерями щелочи	Na ₂ O, кг/т в.с.ц. *	Потери щелочи, %
Варочный цех при выдуве или вымывке	0,7-2,0	0,23-0,55
Промывной отдел: щелочь, адсорбированная волокном щелочь с водой в промытой целлюлозе	5-15 1,5-3,0	1,5-4,5 0,5-1,0
Выпарной цех: со снятым сульфатным мылом с конденсатом сокового пара из выпарных аппаратов с соковым паром, направляемым в поверхностный и барометрический конденсатор	2,0-4,0 0,2-0,3 0,5-0,8	0,6-1,1 0,06-0,08 0,17-0,22
Содорегенерационный цех: с дымовыми газами в дымовую трубу уносятся ми- неральные частицы, несгоревшие частицы и газообраз- ные органические вещества из растворителя плава с парогАЗами	20-50 20-50	0,7-1,4 0,7-1,4
Каустизационный цех: в отвал с зеленым щелоком с песком и камнями из гасителя-классификатора с промытым известковым шламом	0,1-0,2 0,05-0,1 2,3-3,4	0,03-0,05 0,015-0,02 0,75-0,93
ИТОГО	15,8-28,3	5,25-7,15
Случайные потери щелочи с переливами, перебросами, с непогашенной пеной	2,6-4,0	0,85-1,10
ВСЕГО	18,4-32,3	6,1-8,25

Примечание. * в.с.ц. – воздушно-сухая целлюлоза

Сумма всех потерь щелочи восполняется свежим сульфатом. При установившемся процессе регенерации величина потерь щелочи и расход свежего сульфата равны между собой.

1.2. Круговой баланс и степень регенерации щелочи

Для характеристики кругооборота щелочи составляют *круговой баланс щелочи*, рассчитанный на 1 т целлюлозы в 1 кг всей Na_2O , или свежих химикатов (сода в натронно-целлюлозном или сульфата в сульфатцеллюлозном производствах). При составлении кругового баланса щелочи показывают не только безвозвратные потери, возмещаемые добавкой свежих химикатов, но и все количества щелочи, циркулирующие в производственном цикле. Результат расчета кругового баланса щелочи представляют графически (рис. 1).

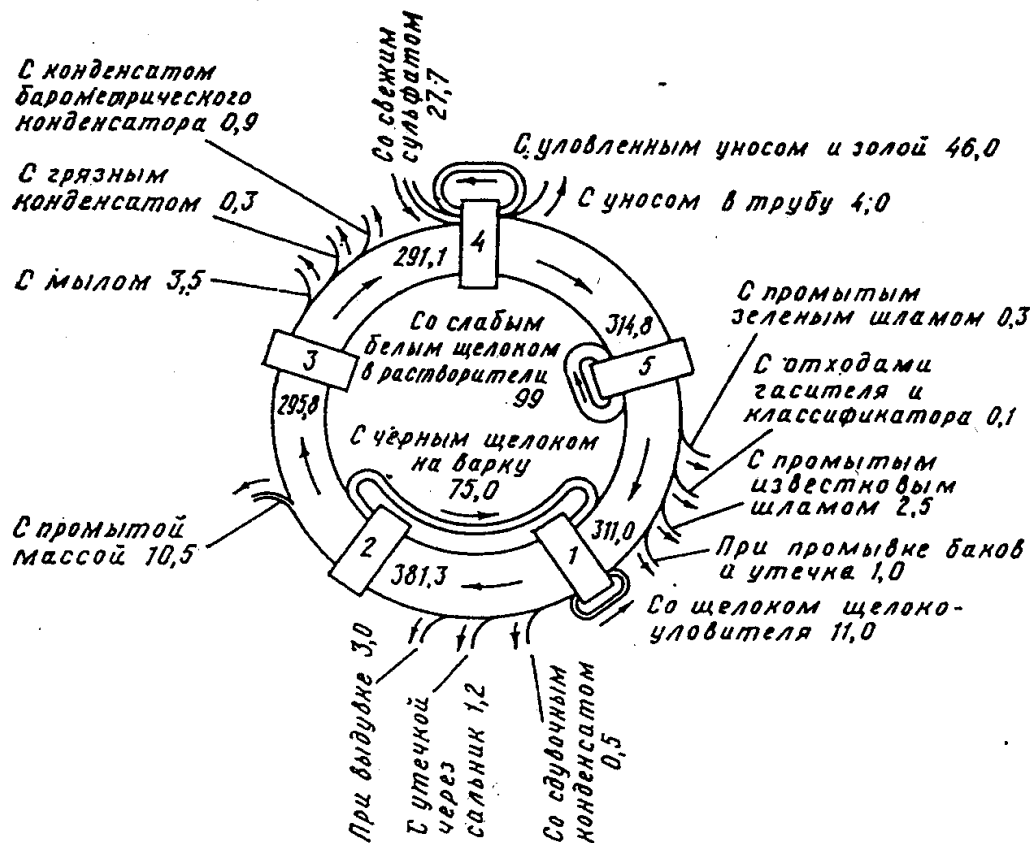


Рис. 1. Баланс щелочи по цехам сульфатцеллюлозного производства, 1 кг всей Na_2O на 1 т в.с.ц.:

- 1 – варочный; 2 – промывной; 3 – выпарной;
4 – содорегенерационный; 5 – каустизационный

Сумма всех потерь щелочи в приведенном примере составляет 27,7 кг всей Na_2O на 1 т целлюлозы, что соответствует расходу щелочи, вносимой в кругооборот со свежим сульфатом.

Для характеристики относительной величины потерь щелочи и расхода свежих химикатов пользуются понятием *степени регенерации щелочи* R_A , %, которая определяется по формуле

$$R_A = (1 - \frac{a}{A})100,$$

где a – абсолютные потери щелочи или расход свежих химикатов, 1 кг всей Na_2O на 1 т целлюлозы;

A – количество щелочи, поступающей с белым щелоком в варочный котел, 1 кг всей Na_2O на 1 т целлюлозы.

Степень регенерации показывает, какая часть щелочи по отношению к ее количеству, загруженному в котел с белым щелоком, возвращается обратно в котел при регенерации.

Абсолютные потери щелочи a , кг, определяются по формуле

$$a = \frac{100 - R_A}{100}.$$

Пример. Рассчитать для баланса (см. рис. 1) степень регенерации щелочи

$$R_A = (1 - \frac{27,1}{311})100 = 91,29 \%$$

Приведенный в примере расчет характерен для отечественных заводов, снабженных электрофильтрами для улавливания уноса из дымовых газов. На таких предприятиях степень регенерации составляет не более 95 %. На заводах с низкоэффективной улавливающей аппаратурой степень регенерации составляет 85...90 %.

Чем выше степень регенерации щелочи, тем меньше расход свежих химикатов сульфата, соды, едкого натра. Расход свежих химикатов зависит от марки вырабатываемой целлюлозы. С повышением расхода щелочи на варку увеличивается расход свежих химикатов при одной и той же степени регенерации щелочи.

Для устойчивой работы предприятия важно постоянно иметь в обороте большой запас щелочи, соответствующий 4-,5-суточному расходу

щелочи на варку. Запас создается в баках белого щелока, в баках-отстойниках черного щелока перед выпаркой, в баках сгущенного щелока перед содорегенерационным отделом и в запасных баках зеленого щелока перед каустизацией. Изменение запаса оборотной щелочи необходимо принимать во внимание при расчете степени регенерации.

Пример. Рассчитать степень регенерации щелока, если на 1 января текущего года запас щелочи в обороте составлял 1200 т всей Na_2O , а на 1 февраля он уменьшился до 1000 т.

В течение января на покрытие производственных потерь щелочи из оборота было израсходовано 200 т Na_2O . Расход свежих химикатов за тот же период в пересчете на Na_2O составил 750 т, а расход всей Na_2O (А) на варку был равен 7500 т. Следовательно, сумма абсолютных потерь щелочи а за месяц составила

$$a = 750 + 200 = 950 \text{ т,}$$

и степень регенерации будет равна

$$R_A = \left(1 - \frac{950}{7500}\right) 100 = 87,3 \text{ \%}.$$

Если вместо уменьшения оборотного запаса щелочи происходит его увеличение, то поправка вносится с отрицательным знаком.

В производственной практике расчет ведут не в единицах всей Na_2O , а в единицах общей титруемой Na_2O , что позволяет упростить анализ. Поэтому расход свежих химикатов при расчете степени регенерации следует выражать так же в единицах общей титруемой щелочи. Сода и каустик показывают титруемую щелочь полностью, а сульфат лишь в той степени, в какой он восстанавливается до сульфида. Поэтому при вычислении степени регенерации щелочи вводится поправка на степень восстановления сульфата

$$R_A = 100 - \frac{a P + b + (A - B)}{N} 100,$$

где а – расход сульфата в пересчете на Na_2O , кг;

Р – степень восстановления сульфата, % : 100;

б – расход свежих содопродуктов в пересчете на Na_2O , кг;

А, В – запас щелочи в обороте на начало и конец отчетного периода, соответственно, кг общей титруемой Na_2O ;

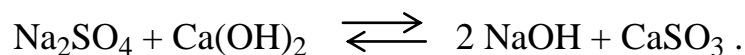
Н – расход щелочи на варку, кг общей титруемой Na_2O .

1.3. Потери серы в производственном цикле

В сульфатцеллюлозном производстве, где потери щелочи возмещаются сульфатом, вместе со щелочью в непрерывном производственном кругообороте циркулирует сера, которая после восстановления сульфата в топке СРК вступает в цикл в виде сульфида. В сульфате содержание эквивалентных количеств серы и щелочи одинаково, т.е. $S : Na_2O = 1 : 1$, поэтому потери серы и потери щелочи в пересчете на сульфат по *абсолютной* величине равны между собой. Однако по *относительной* величине, то есть по отношению к общим количествам серы и щелочи, циркулирующих в производственном цикле, потери серы всегда больше относительных потерь щелочи. Благодаря этому в производственном кругообороте щелочь теряет связь с серой, появляются натриевые соединения без серы – карбонат и едкий натр.

Относительные потери серы превышают относительные потери щелочи на тех участках производственного кругооборота, где выделяются газообразные сернистые соединения: во время варки целлюлозы, выпарки и сжигания щелоков. Рассмотрим потери серы по всему производственному циклу.

Потери серы в отделе каустизации в виде щелока, остающегося в шламе и теряемого со случайными утечками. Так, в зеленом щелоке небольшое количество серы содержится в виде сульфидов тяжелых металлов и элементарной серы, а сера, не связанная со щелочью, теряется со шламом при осветлении зеленого щелока. Если зеленый щелок не осветляется, то сера теряется с известковым шламом. Сера также теряется за счет незначительной каустизации сульфата натрия и перехода ее в осадок в виде сульфата кальция



Если в извести содержатся примеси в виде сульфидов, то во время каустизации эти сульфиды переходят в щелок из извести. Вследствие этого потери серы и щелочи при каустизации практически выравниваются.

Потери серы во время варки происходят при сдвухах со сдувочными и выдувочными парами в виде летучих сернистых соединений (сероводорода, меркаптана, диметилсульфида, диметилдисульфид). Частично эти соединения содержатся в конденсатах от терпентинного конденсатора

и в выбросах неконденсируемых газов в атмосферу. Потери серы при варке относительно невелики, они составляют 1...1,5 кг на 1 т целлюлозы.

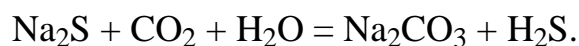
Потери серы со щелоком, который остается в целлюлозной массе при промывке такие же, как у щелочи.

Потери серы при счерпывании мыла составляют 0,3 % химически связанной серы от веса мыла. Сера, как и щелочь, теряется также со щелоком, который увлекается вместе с мылом. При счерпывании сульфатного мыла потери серы связаны с совместными потерями со щелочью. При среднем количестве снятого сульфатного мыла, составляющего около 60 кг на 1 т целлюлозы, потери серы могут составить 1,5...2 кг, а потери щелочи 10...12 кг в пересчете на сульфат. Но, если на сульфатном производстве имеется цех разложения мыла серной кислотой или бисульфитом, образующийся раствор сульфата натрия возвращается в баки черных щелоков. Приход серы с серной кислотой достаточен, чтобы восстановить соотношение серы и натрия до его значения в белом щелоке, поступающем на варку. В некоторых случаях количество серы становится даже более высоким, поэтому в производственном цикле от каустизации до счерпывания мыла относительные потери серы могут лишь незначительно превысить потери щелочи. Самые большие потери происходят при выпарке и сжигании щелоков.

Потери серы при выпарке щелоков происходят в виде газообразных соединений и составляют 3...20 кг в единицах сульфата натрия на 1 т целлюлозы, причем 80...90 % газообразных соединений составляют сероводород, который выделяется при гидролизе сульфида натрия и органических соединений черного щелока. Такие потери снижают соотношение серы и щелочи в сгущенном щелоке после выпарки по сравнению с черным щелоком после варки.

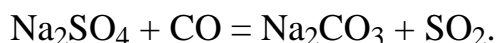
Потери серы при сжигании щелоков являются самыми значительными. Они превышают потери щелочи не только по относительному значению, но иногда даже по абсолютному, в пересчете на сульфат.

На первой стадии печного процесса при сушке щелоков при температуре 150...200 °С происходит выделение заметного количества сероводорода, как продукта карбонизации остаточного сульфида натрия дымовыми газами, и значительное количество углекислого газа и пара воды



На второй стадии во время пиролиза органических веществ щелока заканчивается выделение сероводорода. Происходит образование большого количества меркаптанов, органических сульфидов, которые за счет избытка кислорода в газах сгорают, как и сероводород, до сернистого и серного ангидридов.

На третьей стадии процесса сжигания щелоков в результате разложения сульфата могут образовываться газообразные сернистые продукты



Кроме газообразных соединений сера теряется в виде сульфата, который представляет собой основной компонент минерального уноса, а также в небольшом количестве в виде сульфита, сульфида и других минеральных соединений, увлекаемых из печей дымовыми газами.

Сера частично теряется в виде сульфата (минеральная сера), частично уходит в виде газообразных соединений, причем соотношение между этими двумя частями может быть различным и зависит от условий сжигания. В целом относительные потери за счет газообразных соединений всегда больше относительных потерь щелочи.

1.4. Круговой баланс и степень регенерации серы

Круговой баланс серы рассчитывается аналогично балансу щелочи. Круговой баланс серы для сульфатцеллюлозного производства изображен рис. 2.

В рассматриваемом примере разложение мыла серной кислотой не происходит, поэтому приход серы ограничивается тем количеством, которое вносится в топку СРК со свежим сульфатом (14,3 кг/т целлюлозы). Это количество сульфата равно сумме безвозвратных потерь серы по всему кругообороту, что и должно соблюдаться при установившемся процессе производства целлюлозы.

Если пересчитать суммарные потери щелочи (см. рис. 1) и суммарные потери серы (см. рис. 2.) на сульфат натрия (Na_2SO_4), то получатся одинаковые цифры:

$$27,2 \frac{142}{62} = 14,3 \frac{142}{32} = 63,4 \text{ кг/т.}$$

Для характеристики относительных потерь серы вводится понятие *степени регенерации серы* R_S , % [1]

$$R_S = \left(1 - \frac{m}{M}\right) 100,$$

где m – потери серы в производственном кругообороте в единицах серы или сульфата натрия, кг/т;

M – количество всей серы в белом щелоке, поступающем на варку в единицах серы или сульфата натрия, кг/т.

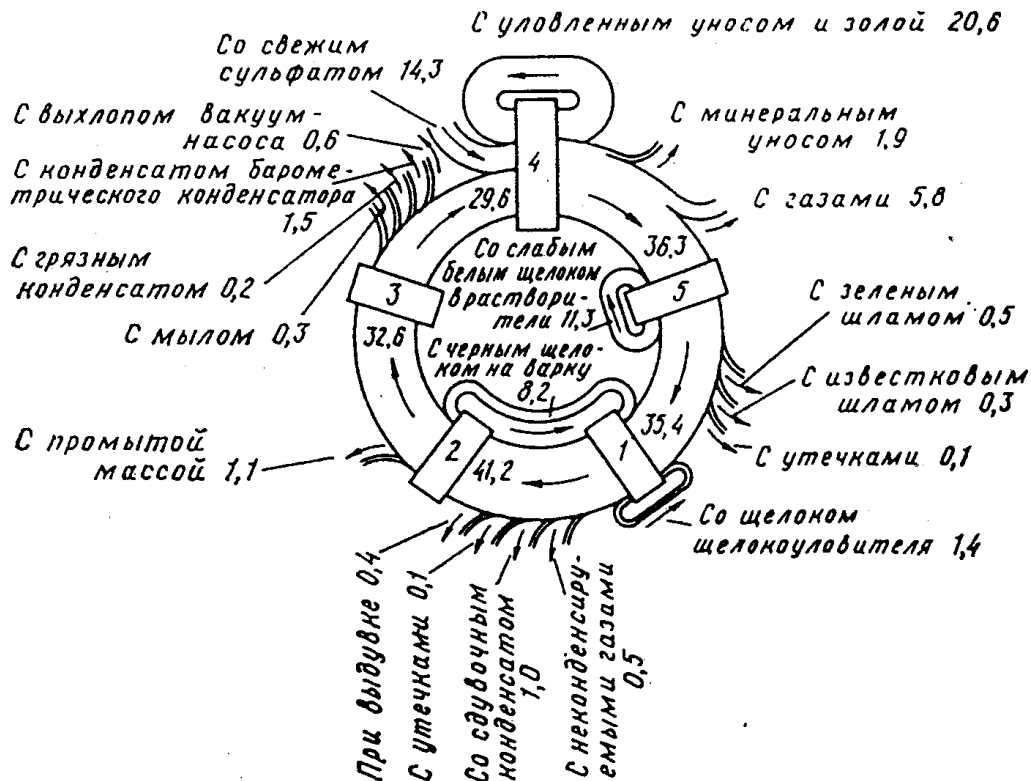


Рис. 2. Баланс серы сульфатцеллюлозного производства по цехам, 1 кг всей серы на 1 т в.с.ц.:

- 1 – варочный; 2 – промывной; 3 – выпарной;
- 4 – содорегенерационный; 5 – каустизационный

Степень регенерации серы показывает, какая часть серы после прохождения цикла регенерации возвращается в варочный котел с белым щелоком. Для баланса (см. рис. 2), степень регенерации серы будет равна

$$R_S = \left(1 - \frac{14,3}{35,4}\right) 100 = 59,6 \%$$

Абсолютные потери серы, кг, составят

$$m = \frac{100 - R_S}{100} M.$$

1.5. Взаимосвязь баланса серы с балансом щелочи

Абсолютные потери щелочи и серы, выраженные в эквивалентных единицах (например, Na_2SO_4) при возмещении потерь сульфатом натрия должны быть равны между собой:

$$(100 - R_S) M = (100 - R_A) A,$$

откуда эквивалентное соотношение количеств серы и щелочи в белом щелоке

$$\frac{S}{\text{Na}_2\text{O}} = \frac{M}{A} = \frac{100 - R_A}{100 - R_S}.$$

Отношение $S : \text{Na}_2\text{O}$ определяет возможную величину сульфидности белого щелока. Так как сульфидность, выраженная в относительных единицах, всегда меньше единицы, то степень регенерации серы всегда меньше степени регенерации щелочи или относительные потери серы всегда больше относительных потерь щелочи. Сульфидность белого щелока $C_{\text{ТС}}$ связана со степенью регенерации щелочи и серы:

$$C_{\text{ТС}} = \frac{C_{\text{ТВ}}(100 - R_A)}{C_{\text{ТА}}(100 - R_S)}.$$

Пример. Определить эквивалентное отношение $S : \text{Na}_2\text{O}$ с учетом вычисленных ранее значений степени регенерации щелочи ($R_A = 91,1 \%$) и серы ($R_S = 59,1 \%$)

$$\frac{S}{\text{Na}_2\text{O}} = \frac{100 - 91,1}{100 - 59,1} = 0,22.$$

Непосредственная проверка по количеству щелочи (см. рис. 1) и серы (см. рис. 2) в белом щелоке дает ту же величину:

$$\frac{S}{\text{Na}_2\text{O}} = \frac{35,4}{311} \cdot \frac{62}{32} = 0,22.$$

Для обеспечения высокой степени регенерации серы необходимо, чтобы сера, приходящая с черным щелоком, при сжигании щелоков переходила в плав в возможно большем количестве. Существуют три способа перехода в плав органической и минеральной серы черного щелока.

1. Образующиеся газообразные соединения серы сгорают до серного и сернистого ангидрида и улавливаются впрыскиваемым в агрегат черным

щелоком с образованием сульфита и сульфата натрия – прочных минеральных соединений, которые в зоне восстановления превращаются в сульфид натрия и переходят в плав.

2. Эти же SO_2 и SO_3 , находящиеся в газах, могут при температуре конденсации паров натрия реагировать с ним, образуя сульфат и сульфит, оседающие в зольниках и газоходах. Они собираются в виде золы и возвращаются в топку агрегата, где служат источником образования сульфида натрия в плаве.

3. Возможно непосредственное превращение органических натрий-сульфидных соединений в результате их термического разложения в минеральные сернистые соединения (сульфид, сульфат, сульфит), которые оказываются в плаве, пройдя зону восстановления.

При определении степени регенерации серы на действующем предприятии учитывают сульфидность и степень регенерации щелочи:

$$R_s = 100 - \frac{C_{TC} C_{ТВ}}{C_{ТА}} (100 - R_A).$$

При грубых расчетах степени активности и восстановления принято считать равными. При точных расчетах учитывают расход серосодержащих химикатов за определенный период (месяц) и снимают остатки серы, циркулирующей в производственном цикле, в начале и конце этого периода:

$$R_s = 100 - \frac{S_{Na_2SO_4} + S_{ПП} - (S_H - S_K)}{A_P C_{СТ}} C_{ТВ},$$

где $S_{Na_2SO_4}$ – расход свежего сульфата, кг Na_2SO_4 ;

$S_{ПП}$ – расход прочих серосодержащих химикатов (серной кислоты, бисульфита серы), кг Na_2SO_4 ;

S_H, S_K – количество серы в производственном цикле на начало и конец отчетного периода соответственно, кг Na_2SO_4 ;

A_P – расход активной щелочи на варку в пересчете на Na_2SO_4 , кг;

C_{TC} – сульфидность белого щелока, % : 100;

$C_{ТВ}$ – степень восстановления, %.

Расчет можно производить в килограммах серы или сульфата.

РЕГЕНЕРАЦИЯ ХИМИКАТОВ В СОДОРЕГЕНЕРАЦИОННЫХ КОТЛОАГРЕГАТАХ

Отработанный в варочных котлах черный сульфатный щелок подготавливают, выпаривают и сжигают в топках СРК, которые являются энергетическими установками.

Основными задачами процесса сжигания щелока являются:

- регенерация минеральной части черного щелока;
- восполнение производственных потерь в щелочи путем добавки свежего сульфата натрия;
- восстановление сульфата до сульфида натрия;
- получение пара за счет сгорания органической части.

2.1. Состав и количество сухого остатка, направляемого на сжигание

Под элементным составом черного щелока подразумевают химические элементы, составляющие соединения, вводимые в содорегенерационный котлоагрегат и образующиеся в процессе сжигания. Черный щелок представляет собой раствор продуктов реакции при варке в воде и содержит органическую и минеральную части. Сухой черный щелок содержит 65...70 % органических и 30...35 % минеральных веществ.

Органическая часть состоит из продуктов разложения лигнина (30...35 % от массы сухого остатка) и разрушения углеводов – органических кислот, оксикислот и т.п. (30...35 %). При сгорании органическая часть обеспечивает необходимую для реакций горения энергию и сгорает до простейших газообразных продуктов (CO_2 , H_2O). Для процесса горения важен элементный состав горючей массы органической части щелока. Горючая масса органической части щелока называется *горючей массой топлива* и состоит из углерода C_1 (40...45 %), водорода H (3...5 %), серы органической (2...4 %), кислорода O (15...20 %) [1]. Рабочий состав топлива выражается в процентах.

Минеральная часть состоит из натриевых соединений. Меньшую часть составляют свободный гидроксид натрия (1...2 % от сухого остатка) и натриевые соли – сульфид (1...3 %), сульфат (3...5 %), карбонат (7...10 %)

и другие, а большая часть представляет собой натриевую щелочь, химически связанную с органическими компонентами щелока (20...25 % в единицах NaOH). При сжигании неорганическая часть образует зольный или расплавленный остаток (подзол или плава), который служит основой для приготовления белого щелока, являющегося главным компонентом варочного раствора.

Для расчета количества образующегося при сжигании тепла, выхода и состава газов и плава надо знать количество и состав исходного сухого остатка сжигаемого щелока.

В расчете на 1 т в.с.ц. или 880 кг абсолютно сухой целлюлозы (а.с.ц.) количество органических веществ $G_{\text{ОРГ}}$, кг, переходящих в раствор при варке, составит

$$G_{\text{ОРГ}} = \frac{880(100-b)}{b}, \quad (1)$$

где b – выход целлюлозы из древесины, %.

Количество минеральных веществ $G_{\text{МИН}}$, кг, присутствующих в щелоке после варки, можно определить по формуле

$$G_{\text{МИН}} = 880 \frac{100}{b} \cdot \frac{A}{100} 1,5,$$

где A – расход активной щелочи (% Na₂O) на варку к массе абсолютно сухой древесины (а.с.д.);

1,5 – средний пересчетный коэффициент от единиц активной Na₂O к собственным единицам натриевых солей, составляющих минеральную часть.

Общее количество сухого остатка G , кг, в черном щелоке после варки составит

$$G = G_{\text{ОРГ}} + G_{\text{МИН}} = \frac{880}{b} (100 - b + 1,5A).$$

В топку на сжигание будет поступать несколько меньшее количество органических и минеральных веществ вследствие потерь при варке, промывке и выпарке. Потери органических веществ составляют в среднем 10 % (включая съем мыла), а минеральных – 5 %. Общее количество сухого вещества в сжигаемом черном щелоке для сульфатной целлюлозы из древесины сосны при различном выходе представлено в табл. 2 [1].

Таблица 2

Общее количество сухого вещества в черном щелоке для сульфатной целлюлозы из древесины сосны

Вид целлюлозы	Выход из древесины В, %	Расход активной щелочи А, % Na ₂ O к а.с.д.	Количество сухого остатка в черном щелоке на 1 т в.с.ц., кг			Состав сухого остатка, %	
			органических веществ	минеральных веществ	всего	органических веществ	минеральных веществ
Высокого выхода	55	12	648	274	922	70,3	29,7
Жесткая	48	15	859	392	1250	68,7	31,3
Среднежесткая	45	17	968	475	1443	67,1	32,9
Среднемягкая	40	19	1188	595	1783	66,6	33,4
Предгидролизная	35	18	1134	645	1779	63,8	36,2

Как видно из табл. 2, общее количество сухого вещества в сжигаемом черном щелоке составляет от 1250 до 1800 кг на 1 т воздушно-сухой целлюлозы нормального выхода. В составе сухого остатка содержится 65...70 % органических веществ и 30...35 % минеральных, причем по мере увеличения степени провара и уменьшения выхода целлюлозы соотношение это сдвигается в сторону увеличения доли минерального остатка.

2.2. Масса топлива и теплота сгорания щелока

При разработке конструкций котельных агрегатов, в теплотехнических расчетах и составлении теплового баланса используют понятия «рабочее топливо» и «рабочая масса».

Рабочим топливом называется топливо в том виде, в котором оно сжигается. Горючая масса топлива состоит из углерода С₁, водорода Н, азота N и серы S. Если количество этих элементов, находящихся в 1 кг рабочего топлива, выразить в килограммах, то они дадут *рабочий состав* горючей массы топлива. Рабочий состав горючей массы топлива выражается: С_Р = 100 С_Р, %; Н_Р = 100 Н_Р, %; О_Р = 100 О_Р, %; N_Р = 100 N_Р, %; S_Р = 100 S_Р, %.

Рабочая масса топлива без влаги и минеральной части носит название сухой органической. В щелоке содержится сера органическая, входящая в состав органических соединений, и сера минеральная, связанная с неорганическими соединениями Na₂S и Na₂SO₄.

Для определения элементного состава черного щелока навеску топлива сжигают в струе кислорода, а газообразные продукты сгорания пропускаются через раскаленную медную сетку для дожигания. Образующаяся вода поглощается крепкой серной кислотой, а углекислый газ – щелочью. По разности массы до и после поглощения по специальным таблицам рассчитывают содержание в щелоке углерода, водорода и серы. Элементный состав черного щелока приведен в табл. 3.

Таблица 3

Элементный состав черного щелока

Состав черного щелока	Обозначение	Значение величины от общего содержания, %
Зольность	Z	46,32
Сера общая	S _{ОБЩ}	3,02
Сера сульфатная	S _{СФА}	0,62
Сера сульфидная	S _{СД}	1,97
Сера органическая	S _{ОРГ}	0,43
Углерод	C	35,60
Водород	H ₂	3,78
Азот	N ₂	0,30
Сера в золе	S _А	1,88
Кислород	O ₂	10,48

Теплотой сгорания называется количество тепла, полученное от сжигания единицы массы топлива. Теплота сгорания щелока определяется в калориметрической бомбе. Эффективная теплота сгорания сухого остатка щелока в зависимости от породного состава исходной древесины и режима варки составляет 14 500...16 000 кДж/кг.

2.3. Теоретическая и практическая потребность в воздухе и полнота сгорания щелока

Для поддержания реакции горения или окисления в топке СРК необходимо определенное количество воздуха. Подача воздуха в реакционную зону котла является важным технологическим условием для управления процессом сжигания. Первичный воздух в топку современных СРК подается в зону, расположенную над поверхностью реакционной смеси. Вторичный

воздух подается через сопла, расположенные в один или два яруса выше или ниже форсунок, подающих щелок в топку. Первичный воздух составляет 55...60 % от общего расхода. Некоторые виды СРК снабжены угловыми соплами большего диаметра для подачи третичного воздуха, который подается перпендикулярно основному потоку газов, что вызывает их завихрения и способствует более полному сгоранию части углерода и газов, выносимых из активной зоны топки котлоагрегата.

При использовании воздуха для поддержания горения с каждым киломоном кислорода (32 кг) в топку подается примерно 3,76 кмоль азота ($3,76 \cdot 28$) = 105 кг [2]. Азот, не участвуя в реакции горения, увеличивает объем газообразных продуктов сгорания и является причиной потерь тепла при его нагреве и уносе газов из топки котлоагрегата. Расход реагентов на реакцию горения происходит по схемам [3], приведенным в табл. 4.

Таблица 4

Расход реагентов, необходимых для реакции горения

Реакции горения	Соотношения химических элементов, кмоль
$C + O_2 + 3,76 N_2 = CO_2 + 3,76 N_2$	$12 + 32 + 105 \cdot 3 = 44 + 105 \cdot 3$
$2H_2 + O_2 + 3,76 N_2 = H_2O + 3,76 N_2$	$4 + 32 + 105 \cdot 3 = 36 + 105 \cdot 3$
$S + O_2 + 3,76 N_2 = SO_2 + 3,76 N_2$	$32 + 32 + 105 \cdot 3 = 64 + 105 \cdot 3$
$2CO + O_2 + 3,76 N_2 = 2CO_2 + 3,76 N_2$	$56 + 32 + 105 \cdot 3 = 88 + 105 \cdot 3$

Приведенные данные служат основой для определения расхода воздуха на сжигание сгущенного черного щелока, для теплотехнических расчетов и определения количества газов, образующихся в топке котла. Зная содержание этих элементов в щелоке в расчете на килограмм, можно найти расход воздуха на сжигание этого количества, используя данные табл. 4.

Количество кислорода, необходимого для сжигания 1 кг соответствующего элемента, приведено в табл. 5.

Таблица 5

Расход кислорода на сжигание органической части

Сжигаемое вещество	Расход кислорода		Количество азота, поступающего с воздухом		Расход воздуха	
	кг	м ³	кг	м ³	кг	м ³
Углерод	2,67	1,68	8,80	7,00	11,47	8,66
Водород	7,95	5,60	26,20	20,90	34,20	26,50
Сера	1,00	0,69	3,30	2,62	4,30	3,31
Окись углерода	0,57	1,80	1,88	1,49	2,45	3,29
Метан	3,99	2,79	13,17	10,51	17,16	13,39

Например, для сжигания 1 кг углерода требуется 2,76 кг кислорода, так как в 1 кг щелока содержится около 420 г углерода, то на его сжигание потребуется кислорода

$$2,67 \cdot 420/1000 = 2,67 \cdot 42/100 = 1,12 \text{ кг.}$$

Здесь $42/100$ – удельное содержание углерода в щелоке ($C_{\text{и}}^{\text{P}}$).

Удельное содержание водорода обозначим $H_{\text{и}}^{\text{P}}$. Добавив к водороду и углероду сжигаемую серу, получим формулу, которая является основой для расчета потребности в кислороде и воздухе:

$$(2,67 C_{\text{и}}^{\text{P}} + 7,95 H_{\text{и}}^{\text{P}} + S_{\text{орг}}^{\text{B}})/100, \text{ кг/кг.}$$

С учетом кислорода, поступающего со щелоком, формула примет вид

$$2,67 C_{\text{и}}^{\text{P}} + 7,95 H_{\text{и}}^{\text{P}} + S_{\text{орг}}^{\text{B}} - O^{\text{P}}/100, \text{ кг/кг.}$$

С учетом углерода, израсходованного на восстановление сульфата натрия в сульфид, получится

$$(2,67 C_{\text{и}}^{\text{P}} + 7,95 H_{\text{и}}^{\text{P}} + S_{\text{орг}}^{\text{B}} - 0,02k_{\text{в}}(S_{\text{ст}}^{\text{P}})_{\text{об}} - O^{\text{P}})/100, \text{ кг/кг}$$

где $k_{\text{в}}$ – степень восстановления сульфата.

Для перевода кислорода в эквивалентное количество воздуха следует данное выражение умножить на 100 и поделить на 23, так как содержание кислорода в воздухе по массе составляет 23 %:

$$\begin{aligned} L_0^{\text{C}} &= 100/23 (2,67 C_{\text{и}}^{\text{P}} + 7,95 H_{\text{и}}^{\text{P}} + S_{\text{орг}}^{\text{B}} - 0,02k_{\text{в}}(S_{\text{ст}}^{\text{P}})_{\text{об}} - O^{\text{P}})/100 = \\ &= 0,115 C^{\text{P}} + 0,345 H^{\text{P}} + 0,043 (S_{\text{орг}}^{\text{B}} - O^{\text{P}}) - 0,00087 k_{\text{в}} (S_{\text{ст}}^{\text{P}})_{\text{об}}. \end{aligned}$$

Так как наиболее распространенной единицей измерения воздуха являются кубические метры, то, поделив данное выражение на γ_0^{C} (плотность воздуха при нормальных условиях), получим количество воздуха в кубических метрах:

$$\begin{aligned} V_0^{\text{C}} &= \frac{L_0^{\text{C}}}{\gamma_0^{\text{C}}} = \frac{L_0^{\text{C}}}{1,29} = \\ &= 0,089 C_{\text{и}}^{\text{P}} + 0,267 H_{\text{и}}^{\text{P}} + 0,0342(S_{\text{орг}}^{\text{B}} - O^{\text{P}}) - 0,00067 k_{\text{в}}(S_{\text{ст}}^{\text{P}})_{\text{об}}, \end{aligned}$$

где $(S_{\text{ст}}^{\text{P}})_{\text{об}}$ – суммарное количество серы, поступающей с сульфатом, содержащимся в щелоке, включая и добавляемый перед сжиганием.

В обычном воздухе содержится некоторое количество водяных паров, поэтому масса воздуха, подаваемого на поддержание горения щелока, составит:

$$L_0^{вл} = L_0^c (1 + d_{вл}/1000), \quad \text{кг/кг.}$$

Теоретический расход воздуха V_0^c , м³, для сжигания 1 кг черного щелока рассчитывают по эмпирической формуле:

$$V_0^c = a_0 \frac{Q_H^p + 6w^p}{1000},$$

где a_0 – коэффициент для щелока 1,05;

Q_H^p – теплотворная способность черного щелока;

w^p – влажность сжигаемого черного щелока.

Теоретический расход воздуха на сжигание щелока L_0 , кг/кг сухого остатка рассчитывают по упрощенной формуле:

$$L_0 = \frac{100}{23} \left(\frac{32}{12} C + \frac{16}{2} H + S - O \right) = 4,31 (2,67 C + 8 H + S - O),$$

где C, H, O, S – содержание элементов в сухом остатке в относительных долях (% : 100).

Пример. По лабораторному анализу получен элементный состав сухого вещества щелока, %: углерод $C = 38$, водород $H = 4$, сера $S = 2$, зола $A = 40$, кислород (по разности) $O = 16$.

Теоретический расход воздуха на сжигание 1 кг сухого вещества щелока составит

$$L_0 = 4,31 (2,67 \cdot 0,38 + 8 \cdot 0,04 + 0,02 - 0,16) = 5,15 \text{ кг.}$$

Величина L_0 составляет около 5 кг воздуха на 1 кг сухих веществ черного щелока. При теоретическом расходе воздуха добиться полного сгорания газообразных продуктов невозможно. Опытным путем установлено, что коэффициент избытка воздуха, подаваемого в топку котла, должен составлять 1,05...1,15, что способствует наиболее полному сгоранию органических веществ, содержащихся в щелоке, и в то же время обеспечивает решение основной задачи процесса – восстановление сульфата натрия в сульфид натрия. Практически на СРК поддерживают избыток воздуха 1,2...1,3, что обеспечивает полное сгорание дурнопахнущих сернистых соединений.

2.4. Основные химические процессы при сжигании сульфатных щелоков

Основной технологической задачей процесса сжигания упаренного черного щелока в СРК является восстановление сульфата натрия в сульфид, являющийся одним из основных компонентов варочного щелока, и перевод свободной и связанной щелочи в Na_2CO_3 [4].

В топке СРК под действием высокой температуры ($1050 \dots 1100 \text{ }^\circ\text{C}$) и избытка углерода протекают многочисленные физические и химические процессы. Сущность этих процессов определяется рядом особенностей топлива и условий горения. Упаренный щелок как топливо имеет неоднородный состав, высокую влажность, низкую калорийность и содержит минеральные соли. Наиболее целесообразным способом его сжигания является факельный. Этот способ определяет характер химических реакций, протекающих на разных стадиях подсушки и сгорания распыленных частиц.

Перед сжиганием к сульфатному черному щелоку добавляют свежий сульфат натрия для возмещения производственных потерь щелочи.

Процесс сжигания сульфатных щелоков можно разделить на три последовательных стадии (рис. 3).

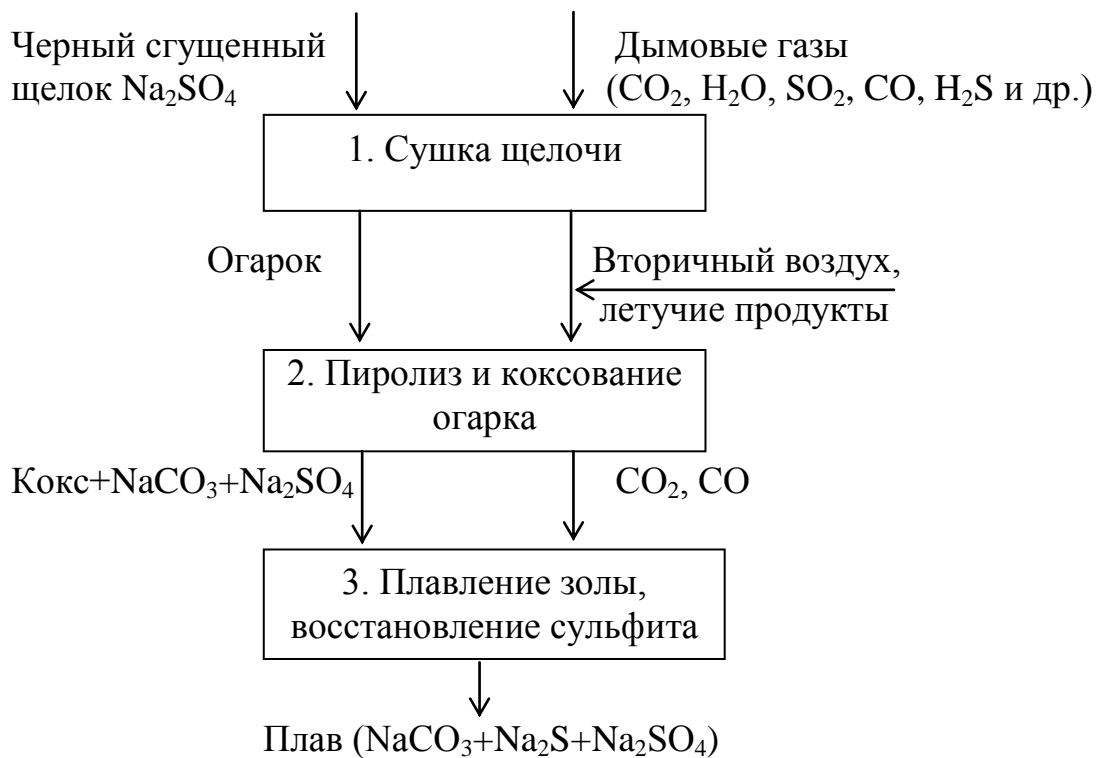
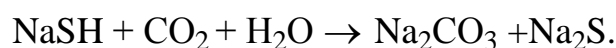
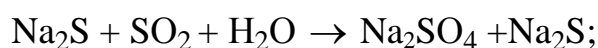
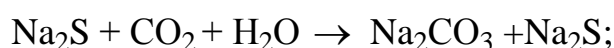
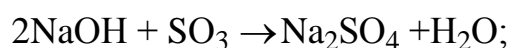
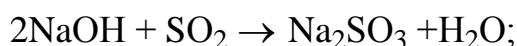
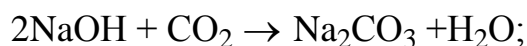


Рис. 3. Схема процессов, происходящих при сжигании сульфатного щелока

Первая стадия – сушка щелока. Период сушки черного концентрированного щелока начинается при поступлении его в топку котлоагрегата. Щелок подается для сжигания в камерные топки СРК через форсунки в распыленном виде. После испарения влаги мелкодисперсные частицы слипаются в ооксованные гранулы, которые падают на дно топки, образуя слой огарка, имеющего аморфную структуру и выгорающего под воздействием первичного дутья воздуха. Тонкодисперсные минеральные частицы увлекаются потоком воздуха в верхнюю часть топки и в газоходы котлоагрегата. Процесс горения протекает в активной зоне топочного пространства, включающей объем от пода топки до уровня установки форсунок вторичного воздуха и имеющей высоту 6...7 м. При этом схема движения распыленного щелока и воздуха оказывается противоточной – навстречу падающим вниз каплям жидкого щелока движутся воздух и газообразные продукты сгорания горючих веществ.

При взаимодействии дымовых газов и компонентов минеральной части щелоков протекают многочисленные реакции. Эти реакции относятся к типу гетерогенных, то есть протекающих на поверхности раздела фаз, где соприкасаются вещества, вступающие в химическое взаимодействие. Скорость гетерогенной реакции определяется количеством вещества, прореагировавшего на единице реакционной поверхности в единицу времени [кг/(м²·с)].

Во время первой стадии щелок взаимодействует с окислами, содержащимися в газообразных продуктах сгорания, в результате едкий натр, сульфид натрия, соли различных органических кислот переходят в карбонат, сульфит и сульфат натрия:



Вторая стадия – пиролиз и коксование органического остатка.

При пиролизе органической части сульфатного щелока выделяются летучие продукты (метан, фенол и др.), которые вместе с сернистыми соединениями воспламеняются за счет вторичного воздуха и сгорают с образованием CO , CO_2 , H_2 , H_2O , H_2S , SO_2 . Газы, уходящие из зоны пиролиза, при температуре огарка около $400\text{ }^\circ\text{C}$ содержат продукты неполного сгорания – сернистые соединения – и имеют следующий состав (табл. 6.).

Таблица 6

Состав газовой смеси в стадии пиролиза черного щелока в СРК

Компоненты газовой смеси	Содержание		
	от объема, %	в пересчете на серу, г/м ³	в пересчете на углерод, г/м ³
Сероводород H_2S	0,092	1,22	–
Метилмеркаптан CH_3SH	0,132	1,80	0,68
Диметилсульфид $(\text{CH}_3)_2\text{S}$	0,013	0,17	0,13
Диоксид углерода CO_2	10,8	–	52,8
Оксид углерода CO	18,0	–	88,0
Метан CH_4	3,4	–	16,6
Углеводороды C_nH_{2n}	0,6	–	5,9
Кислород O_2	2,4	–	–
Водород H_2	12,7	–	–
Азот N_2	50,0	–	–
ИТОГО	98,1	3,19	164,1

Из представленных данных видно, что даже незначительные количества сернистых соединений придают дымовым газам неприятный запах и являются токсичными для живой природы. Допустимое содержание сернистых соединений в дымовых газах строго нормируется. Продукт полного сгорания сернистых соединений – сернистый газ – также относится к числу вредных выбросов. Кроме того, дымовые газы в качестве побочного продукта содержат небольшие количества оксидов азота, относимых к очень опасным для окружающей среды веществам.

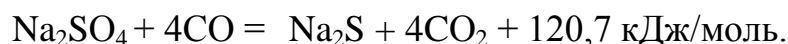
Одновременно происходит карбонизация щелочи, которая связана с органическими веществами. Конечным продуктом этой реакции является карбонат натрия. После стадии пиролиза черного щелока среди минеральных соединений основную часть составляют карбонат и сульфат натрия.

Третья стадия – выжигание кокса и расплавление оставшихся минеральных солей. Эта стадия характеризуется расплавлением минеральных солей, выжиганием углерода, сплавлением сульфата натрия с минеральным остатком щелока, восстановлением сульфата до сульфида натрия под воздействием высокой температуры и углерода, выделяющегося при термическом разложении органических веществ.

При сжигании сульфатных щелоков третья стадия технологически необходима, так как полное восстановление сульфата, добавляемого для производственных потерь щелочи, происходит только в жидком плаве. Для полного выжигания органического угля (кокса) требуется определенное количество воздуха. Часть воздуха (первичный воздух) подается непосредственно в зону горения и предназначается для выжигания органического угля. Другая часть воздуха (вторичный воздух) подается в верхнюю зону топки и предназначается для сжигания газообразных продуктов, выделяющихся во время пиролиза.

Основной реакцией, протекающей во время третьей стадии процесса сжигания сульфатных щелоков, является реакция восстановления сульфата до сульфида натрия за счет образовавшегося органического кокса.

При восстановлении сульфата углем теоретически возможны три реакции:



Две первые реакции, представляющие собой взаимодействие сульфата с твердым углеродом, протекают эндотермически; третья реакция – восстановление сульфата газообразным оксидом углерода, сопровождается выделением тепла. Тепловой эффект указанных реакций является результатом двух процессов: восстановления сульфата, т.е. превращения сульфата в сульфид, и окисления углерода за счет отщепления кислорода.

Из трех реакций, указанных выше, основную роль играет первая; вторая и третья при суммировании дают первую. С повышением температуры равновесие двух первых реакций, как эндотермических, смещается вправо, в сторону большей степени восстановления сульфата; равновесие третьей реакции сдвигается влево.

Реакция восстановления сульфата натрия начинается в твердой фазе при температуре 620 °С и протекает очень медленно. Температура плавления безводного сульфата натрия равна 880 °С, а действительная температура плава 850...900 °С. Полное восстановление сульфата натрия происходит только в плаве.

Тесный контакт между сульфатом и коксом в процессе реакции достигается при предварительном смешивании добавляемого в топку сульфата с жидким щелоком, как это принято в заводской практике. В производственных условиях степень восстановления сульфата, определяемая эквивалентным отношением

$\frac{\text{Na}_2\text{S}}{\text{Na}_2\text{S} + \text{Na}_2\text{SO}_4} \cdot 100$ в плаве, составляет 94...97 %.

На степень восстановления сульфата влияют следующие факторы [4].

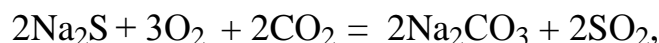
Температура среды. Чем она выше, тем быстрее протекает реакция восстановления. Оптимальной температурой, при которой восстановление происходит быстро (4 с), с минимальными потерями химикатов, является 1127 °С.

Мольное соотношение. Количественное соотношение между углеродом и сульфатом натрия в зоне реакции восстановления:

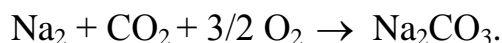
$$\frac{\text{C}}{\text{Na}_2\text{SO}_4} = \frac{3..5}{1}.$$

Площадь контактирующей поверхности. Необходимо хорошее перемешивание сульфата натрия и сухого остатка щелочи для увеличения площади контакта.

Количество первичного и вторичного воздуха. При протекании третьей стадии необходимо поддерживать восстановительную среду, которая создается при недостатке воздуха. При большом избытке воздуха в зоне восстановления протекают реакции, приводящие к потерям серы в виде SO₂:



и потери натрия в виде Na_2SO_3 :



Поэтому первичного воздуха подают 60...65 %, а вторичного – 35...40 % от общего расхода воздуха.

Сульфатный плав, вытекающий из печи, содержит в качестве основных компонентов карбонат и сульфид натрия. Обязательной составной частью плава является невосстановленный сульфат. Из прочих натриевых соединений в незначительных количествах содержатся: сульфит и тиосульфат; хлорид; силикаты, хроматы, алюминаты, получающиеся в результате побочных реакций плава с материалами, входящими в состав футеровки топок. В плаве имеются силикаты, алюминаты кальция, магния, железа, и сернистых соединений железа. В качестве органической примеси в плав могут попасть частички невыгоревшего угля.

Плав минеральных солей растворяют в воде, получая так называемый зеленый щелок. Зеленый щелок далее подвергается каустизации, где карбонат натрия переводится в активный едкий натр, используемый для получения белого щелока. Белый щелок направляется в варочный процесс. На этом этапе регенерация химикатов завершается. СРК позволяет замкнуть цикл кругооборота щелочи при производстве целлюлозы.

2.5. Химические процессы, происходящие при сжигании натронных щелоков

В составе сухого вещества натронного щелока отсутствуют сернистые соединения. При сжигании натронных щелоков в топку не добавляют сульфат, так как потери щелочи в производстве возмещают добавкой соды в процессе каустизации.

Процесс сжигания натронного щелока можно условно разделить на три последовательно протекающие стадии: сушку щелока (удаление остатка воды) за счет тепла дымовых газов; пиролиз и коксование органического

остатка, сопровождаемые карбонизацией щелочи; выжигание кокса и плавление карбонатной щелочной золы. При реальном процессе конец предыдущей и начало следующей стадии практически совпадают.

Уже во время сушки щелока начинается карбонизация свободной щелочи за счет углекислоты дымовых газов. Пиролиз органической части щелока начинается во влажном состоянии, когда огарок (остаток щелока) содержит еще 10...15 % воды и имеет температуру 150...200 °С. По мере удаления воды температура огарка возрастает, и скорость разложения органических веществ увеличивается. Все летучие продукты в газовой фазе во вторичной зоне топки воспламеняются и сгорают до простейших газов CO, H₂, CO₂, H₂O. По мере выделения летучих продуктов органический остаток щелока коксуется, т. е. превращается в уголь. Одновременно происходит карбонизация щелочи, связанной с органическими веществами. В результате вся органически связанная щелочь по окончании второй стадии сжигания превращается в карбонат.

Третья стадия – выжигание кокса – сопровождается значительным повышением температуры и плавлением минерального остатка (карбоната натрия). Точка плавления чистого карбоната натрия соответствует 850 °С. Температура в зоне горения в зависимости от количества подаваемого воздуха составляет 1200...1400 °С. Из побочных реакций, происходящих в третьей стадии сжигания, следует отметить взаимодействие жидкого содового плава с материалами футеровки топки. В результате этого взаимодействия в плаве присутствуют в небольших количествах силикаты, алюминаты, хроматы натрия. Также в плаве присутствуют: хлорид натрия, источником которого является зола древесины; соли кальция, попадающие в плав в результате применения извести в процессе каустизации; оксиды и соли двух- и трехвалентного железа (карбонаты, силикаты и другие), образующиеся при коррозии аппаратуры.



3 МАТЕРИАЛЬНЫЙ БАЛАНС

СОДОРЕГЕНЕРАЦИОННОГО КОТЛОАГРЕГАТА

3.1. Исходные данные для составления материального баланса

Балансом называется сравнительный расчет количества вещества или энергии, вступающих в процесс и выводимых из него, с учетом потерь и преобразований вещества или энергии, происходящих в ходе процесса.

Материальный баланс процесса содорегенерации рассчитывают на 1 т целлюлозы. Схема расчета на 1 т целлюлозы более наглядна и обладает достаточной степенью точности. Кроме того, используя известные соотношения между выходом целлюлозы и количеством сухого вещества, получаемого в процессе варки, можно пересчитать данные баланса на 1 т сухого или сгущенного черного щелока.

Для составления материального баланса щелочи в содорегенерационном цехе используются величины, полученные при расчете варочно-промывного и выпарного отделов, так как на сжигание поступает черный щелок после выпарки. При этом необходимо учесть, что величина сухого остатка в черном щелоке уменьшится на количество счерпываемого сульфатного мыла и на потери щелока с конденсатом сокового пара.

Для расчета примем следующие данные:

- производительность завода, $\Pi_{\text{СУТ}} = 600$ т/сутки;
- выход целлюлозы, $\mathbf{v} = 50$ % от а.с.д.;
- концентрация белого щелока $\mathbf{C}_{\text{АКТ}} = 110$ г/л в ед. Na_2O ;
- расход активной щелочи на варку, $\mathbf{A} = 12$ % в ед. Na_2O к массе а.с.д.;
- гидромодуль варки $\mathbf{\Gamma}$, $\text{м}^3/\text{т}$;
- эффективность промывки или степень отбора сухих веществ при промывке целлюлозы $\mathbf{\eta} = 0,97$;
- фактор разбавления при промывке целлюлозы $\mathbf{\Phi} = 2,14$ $\text{м}^3/\text{т}$;
- концентрация сухих веществ в упаренном черном щелоке $\mathbf{C}_{\text{УП}} = 62$ %.

Состав белого щелока:

- степень сульфидности $\mathbf{C}_{\text{ТС}} = 0,25$;
- степень каустизации $\mathbf{C}_{\text{ТК}} = 0,8$;
- степень восстановления $\mathbf{C}_{\text{ТВ}} = 0,95$.

При выполнении расчетов исходные данные выбирают в нормах технологического проектирования ЦБП или руководствуются табл. 7.

Таблица 7

Исходные данные для расчета количества сухих веществ в черном щелоке, направляемых в СРК на сжигание

Исходные данные	Величины, зависящие от выхода целлюлозы из древесины и породы древесины						
	Марка целлюлозы				Целлюлоза из лиственных пород		
	НС-1	НС-2	НС-3	ЭК-1, ЭИ-1	жесткая	средней жестко- сти	мягкая
Выход целлюлозы из древесины в , %	47–48	45–46	43–45	45–47	52–54	50–52	49–50
Расход активной щелочи на варку, % ед. Na ₂ O от массы а.с.д. А	15–16	16–17	17–19	16–17	13	14	15
Гидромодуль варки Г , м ³ /т: непрерывная варка, периодическая варка	2,9–3 4	3–3,1 4	3–3,2 4,5	– 4,5	2,7–2,9 –	2,8–3 –	3–3,1 –
Концентрация активной щелочи в белом щелоке С_{АКТ} , г/л ед. Na ₂ O	100–115	100–115	100–115	100–115	90–115	90–115	90–115
Состав белого щелока, %: сульфидность С_{ТС} , каустизация С_{ТК} , восстановления сульфата С_{ТВ}	30–50 80–90 90–95	25–30 80–90 90–95	22–25 80–90 90–95	29–32 85–90 90–95	25–30 80–83 90–95	25–27 80–85 90–95	20–25 80–90 90–95
Фактор разбавления при промывке целлюлозы после варки Ф , м ³ /т	2–2,5	2–2,5	2–2,5	2,5–3,2	2,5–3,0	2,5–3,0	2,5–3,0
Эффективность промывки, т. е. степень отбора сухих веществ черного щелока η	0,97– 0,99	0,97– 0,99	0,97– 0,99	0,98– 0,99	0,97–0,98	0,97– 0,98	0,97– 0,98
Потери сухих веществ черного щелока: при промывке целлюлозы Н , %, при съеме сульфатного мыла, кг/т, с конденсатом от выпарной станции, %	1–3 50–60 0,5–1	1–3 60–70 0,8–1,5	1–3 60–80 0,8–1,5	1–3 50–70 0,5	1–3 20–30 0,5–1,5	1–3 30–35 0,5–1,5	1–3 35–40 0,5–1,5

3.2. Выбор и обоснование технологической схемы

В настоящее время известно большое количество различных схем конструкций СРК [1, 2]. Для примера рассмотрим технологическую схему без каскадных испарителей, рассчитанную на сжигание щелоков, упаренных до 60...65 % абсолютно сухих веществ. Эта схема эффективна в сочетании с мокрыми скрубберами, которые на 80...90 % снижают остаточный унос химикатов после электрофильтров, абсорбируют 90...95 % серосодержащих газов и значительно снижают потери тепла с уходящими дымовыми газами. *Достоинствами* схемы СРК без каскадных испарителей являются простота и экономичность. *Недостатками* – усложнение и удорожание выпарной установки, повышение нагрузки на электрофильтр, увеличение содержания сернистого газа в уходящих дымовых газах.

Технологическая схема СРК без каскадных испарителей, представлена на рис. 4. Для нормальной работы этой схемы черный щелок выпаривается на выпарных станциях до 60...65 % сухого вещества.

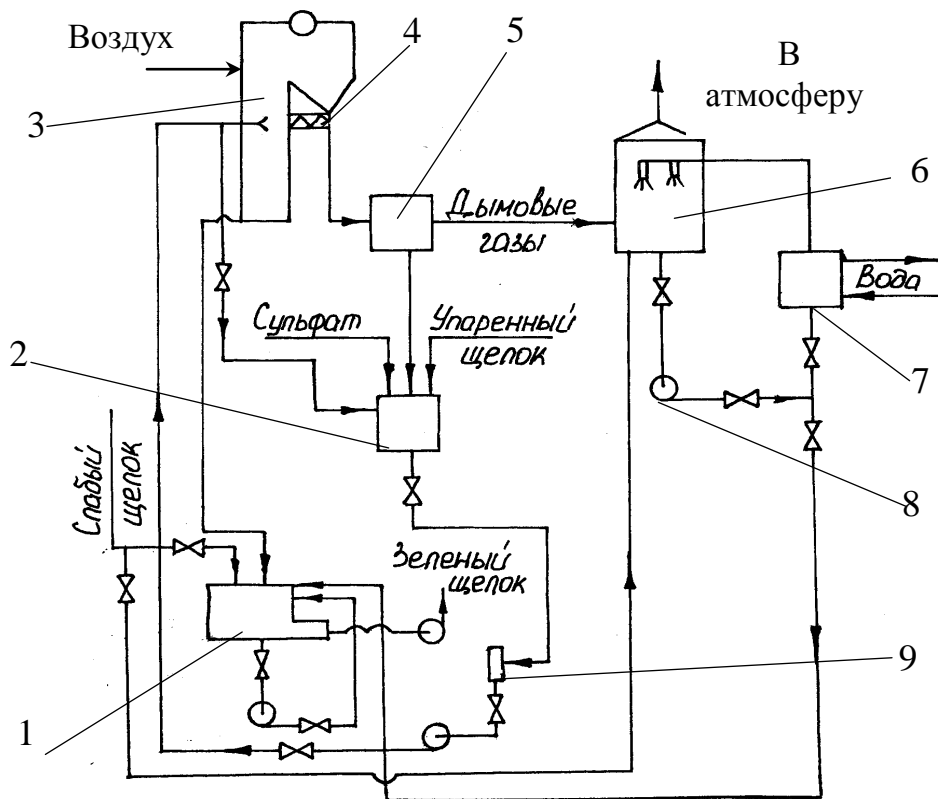


Рис. 4. Технологическая схема СРК без испарителей:

- 1 – растворитель плава; 2 – смеситель щелока с сульфатом; 3 – котлоагрегат;
 4 – винтовой конвейер; 5 – электрофильтр; 6 – скруббер; 7 – теплообменник;
 8 – насос; 9 – подогреватель щелока

Сгущенный черный щелок центробежным насосом непрерывно подается в смеситель 2 щелока с сульфатом. Смеситель оборудован лопастной мешалкой и обогревается паром. Щелок, смешанный с сульфатом, непрерывно подается центробежным насосом через подогреватель щелока 9 в топку котлоагрегата 3. Часть избыточного щелока возвращается в смеситель 2. При сгорании черного щелока в топке котлоагрегата образуются дымовые газы и жидкий плав. Дымовые газы поступают в электрофильтр 5 для улавливания щелочного уноса. Собранный в электрофильтре 5 сульфат натрия и сода подаются в смеситель щелока 2.

Для использования вторичного тепла и для улавливания остаточного уноса минеральных частиц и дурнопахнущих сернистых соединений дымовые газы после фильтров направляют в мокрый скруббер 6, который соединен с теплообменником 7. После скруббера дымовые газы выбрасываются в дымовую трубу. Образующийся в топке плав через специальные лотки непрерывно подается в бак-растворитель плава 1, который на 60 % заполнен слабым белым щелоком. Образующийся при растворении плава зеленый щелок насосом 8 перекачивается в цех каустизации.

3.3. Определение количества сухих веществ в черном щелоке

Определение количества сухих органических веществ образовавшихся от растворившейся в процессе варки древесины $G_{\text{ОРГ}}$ осуществляем по формуле (1). Если выход целлюлозы $v = 50 \%$, тогда расход древесины на варку 1 т в.с.ц. составит:

$$D = \frac{Ц \cdot 100}{v} = \frac{880 \cdot 100}{50} = 1760 \text{ кг/т,}$$

где Ц – количество а.с.ц., содержащейся в 1 т в.с.ц. при влажности 12 %.

$$Ц = 1000 \frac{100 - 12}{100} = 880 \text{ кг/т.}$$

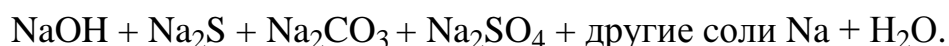
$$G_{\text{ОРГ}} = \frac{D(100 - v)}{v} = \frac{1760 (100 - 50)}{100} = 880 \text{ кг/т,}$$

где D – количество а.с.д., необходимой на варку 1 т в.с.ц., кг/т;
v – выход целлюлозы из древесины, %.

Определение количества минеральных солей в черном щелоке основано на пересчете компонентов, затраченных на варку белого щелока, из ед. Na_2O в собственных единицах в зависимости от степени сульфидности, каустизации и восстановления [5]. По нормам технологического проектирования ЦБП или табл. 7 выбирают расход активной щелочи на варку A в ед. Na_2O по отношению к а.с.д. Тогда расход активной щелочи в кг/т в.с.ц., будет равен

$$P_{\text{Na}_2\text{O}} = \frac{A \cdot Д}{100} = \frac{12 \cdot 1760}{100} = 211,2 \text{ кг/т.}$$

Необходимо рассчитать эту величину в собственных единицах компонентов белого щелока. Белый щелок имеет сложный состав:



Сопоставляя концентрации активной и общей щелочи в ед. Na_2O , определяют *коэффициент активности*, или *степень активности белого щелока* $C_{\text{ТА}}$ по табл. 8.

$$C_{\text{ТА}} = C_{\text{АКТ}} : C_{\text{O Na}_2\text{O}} = 110 : 132,08 = 0,83.$$

С помощью значения степени активности определяют *количество общей щелочи* $P_{\text{O Na}_2\text{O}}$ в растворе белого щелока, направляемого на варку 1 т целлюлозы:

$$P_{\text{O Na}_2\text{O}} = P_{\text{Na}_2\text{O}} : C_{\text{ТА}} = 211,2 : 0,83 = 254,46 \text{ кг/т.}$$

Сопоставляя концентрацию белого щелока в собственных единицах с концентрацией общей щелочи в ед. Na_2O , определяют *коэффициент пересчета щелочи* из ед. Na_2O в собственные единицы $K_{\text{ПР}}$:

$$K_{\text{ПР}} = C_{\text{СОБ}} : C_{\text{O Na}_2\text{O}} = 179,64 : 132,08 = 1,36.$$

Найденный коэффициент позволяет определить *количество минеральных солей* в белом щелоке $G_{\text{МИН}}$:

$$G_{\text{МИН}} = P_{\text{O Na}_2\text{O}} K_{\text{ПР}} = 254,46 \cdot 1,36 = 346,07 \text{ кг/т.}$$

Определение общего количества сухих веществ в черном щелоке после варки:

$$G = G_{\text{ОРГ}} + G_{\text{МИН}} = 346,07 + 880 = 1226,07 \text{ кг/т.}$$

Таблица 8

Расчет количества минеральных солей в белом щелоке для перевода щелочи из ед. Na₂O в собственные единицы входящих в состав белого щелока компонентов

Состав белого щелока	Молекулярная масса	Коэффициент перевода в ед. Na ₂ O данного соединения	Коэффициент перевода из ед. Na ₂ O в данное соединение	Состав белого щелока при C _{АКТ} , г/л	
				в ед. Na ₂ O, общая щелочь	в собственных единицах, общая щелочь
Na ₂ OH	40	$\frac{Na_2O}{2NaOH} = \frac{62}{80} = 0,777$	$\frac{2NaOH}{Na_2O} = \frac{80}{62} = 1,29$	$C_{АКТ} \frac{(100 - C_{ТК})}{100} = 82,5$	$82,5 \frac{80}{62} = 106,45$
Na ₂ CO ₃	106	$\frac{Na_2O}{Na_2CO_3} = \frac{62}{106} = 0,587$	$\frac{Na_2CO_3}{Na_2O} = \frac{106}{62} = 1,71$	$82,5 \frac{100 - C_{ТК}}{100 - (100 - C_{ТК})} = 9,16$	$9,16 \frac{106}{62} = 15,67$
Na ₂ S	76	$\frac{Na_2O}{Na_2S} = \frac{62}{78} = 0,795$	$\frac{Na_2S}{Na_2O} = \frac{78}{62} = 1,258$	$C_{АКТ} - 82,5 = 27,5$	$27,5 \frac{78}{62} = 34,59$
Na ₂ SO ₄	142	$\frac{Na_2O}{Na_2SO_4} = \frac{62}{142} = 0,437$	$\frac{Na_2SO_4}{Na_2O} = \frac{142}{62} = 2,29$	$27,5 \frac{100 - C_{ТБ}}{100 - (100 - C_{ТБ})} = 1,45$	$1,45 \frac{142}{62} = 3,32$
ВСЕГО				$C_{ONa_2O} = 112,42$	$C_{СОБ} = 149,72$

Процентное соотношение веществ в черном щелоке:

$$\text{минеральных} \quad \frac{G_{\text{МИН}}}{G} 100 = \frac{346,07}{1226,07} 100 = 28,23 \%;$$

$$\text{органических} \quad \frac{G_{\text{ОРГ}}}{G} 100 = \frac{G_{\text{МИН}}}{G} 100 = \frac{880}{1226,07} 100 = 71,77 \% .$$

Полученная величина G действительна только для варки без использования черного щелока. Так как обычно на варку используют оборотный черный щелок вместе с белым, то необходимо определить долю сухих веществ, вносимых вместе с затраченным черным щелоком.

Определение количества черного щелока, поступившего на варку с белым щелоком. Эта величина зависит от многих факторов и определяется по разности расчетных величин:

$$K_{\text{Щ}} = Ж - (V_{\text{ОБЩ}} + K_{\text{ВЛ}} + K_{\text{КОНД}}), \quad \text{л/т},$$

где $Ж$ – общее количество жидкости, равное произведению гидромодуля варки Γ , м³/т, и количества а.с.д. D , т, (см. табл. 7).

В примере $\Gamma = 2,843$, тогда $Ж = 2,843 \cdot 1760 = 5003,68$ л/т;

$V_{\text{ОБЩ}}$ – объем белого щелока:

$$V_{\text{ОБЩ}} = \frac{P_{\text{Na}_2\text{O}}}{C_{\text{АКТ}}} = \frac{211,2 \cdot 1000}{110} = 1920 \text{ л/т};$$

$K_{\text{ВЛ}}$ – количество влаги, содержащейся в древесине D , обычно влажность составляет 30...50 %; в примере $K_{\text{ВЛ}} = 36 \%$

$$K_{\text{ВЛ}} = D \frac{V_{\text{Л}}}{100 - V_{\text{Л}}} = 1760 \frac{36}{100 - 36} = 990 \text{ кг/т или л/т}$$

$K_{\text{КОНД}}$ – количество конденсата, образующееся при пропарке щепы паром низкого давления.

Количество конденсата в поступающей на пропарку щепе при ее средней температуре 10 °С за вычетом удаляемых парогазов из пропарочной камеры в терпентинный конденсатор после пропарки, составит:

$$K_{\text{КОНД}} = \frac{D C_{\text{Д}} (t_{\text{ПР}} - t_{\text{Щ}}) + K_{\text{ВЛ}} C_{\text{H}_2\text{O}} (t_{\text{ПР}} - t_{\text{Щ}})}{i_{\text{ПАР}} - t_{\text{ПР}} C_{\text{H}_2\text{O}}} - \frac{100(i_{\text{ПР}} - t_{\text{ПР}} C_{\text{H}_2\text{O}})}{i_{\text{ПАР}} - t_{\text{ПР}} C_{\text{H}_2\text{O}}} =$$

$$= \frac{1760 \cdot 1,34(118 - 10) + 990 \cdot 4,19(118 - 10) - 100(2705 - 118 \cdot 4,19)}{2740 - 118 \cdot 4,19} =$$

$$= \frac{254\,707,2 + 447\,994,8 + 221\,058}{2245} = 214,54 \text{ кг/т или } 214,54 \text{ л/т,}$$

где 100 – среднее количество парогазов, отбираемых из пропарочной камеры в терпентинный конденсатор на 1 т в.с.ц. по нормам проектирования, кг/т;

$t_{\text{ПР}}$ – температура пропарки щепы, $^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{ПР}} \approx 118 \text{ }^{\circ}\text{C}$;

$C_{\text{Д}}$ – теплоемкости древесины, $\text{Дж}/10^{-3} \text{ кг}\cdot\text{град}$;

$C_{\text{H}_2\text{O}}$ – теплоемкость воды, $\text{Дж}/10^{-3} \text{ кг}\cdot\text{град}$;

$i_{\text{ПР}}$ – теплосодержание отбираемых парогазов, при температуре $118 \text{ }^{\circ}\text{C}$ равно $2705 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{град})$;

$i_{\text{ПАР}}$ – теплосодержание пара на пропарку щепы, при давлении $0,4 \text{ МПа}$ $i_{\text{ПАР}} = 2740 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{град})$.

Определение расхода черного щелока на варку:

$$K_{\text{чщ}} = 5003,68 - (1920 + 990 + 214,54) = 1879,14 \text{ л/т.}$$

Проверка правильности расчета общего количества жидкости, соответствующего расходу древесины D на варку 1 т в.с.ц. при $\Gamma = 2,843$:

$$Ж = D \Gamma = 2,843 \cdot 1760 = 5003,68 \text{ л/т или}$$

$Ж = V_{\text{ОБЩ}} + K_{\text{ВЛ}} + K_{\text{КОНД}} + K_{\text{чщ}} = 1920 + 990 + 214,54 + 1879,14 = 5003,68 \text{ л/т}$, что соответствует величине $Ж$, рассчитанной по гидромодулю варки.

Определение количества сухого вещества q в черном щелоке, направляемом на варку вместе с белым щелоком,

$$q = K_{\text{чщ}} C_{\text{чщ}}, \text{ кг/т,}$$

где $C_{\text{чщ}}$ – концентрация используемого черного щелока, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Концентрацию используемого черного щелока определяют приближенно по степени отбора сухих веществ η при промывке целлюлозы. Обычно в систему регенерации и на варку используют черный щелок с первой ступени промывки целлюлозы. Отбираемый при промывке щелок значительно разбавлен водой, подаваемой на последнюю ступень промывки. Степень разбавления используемого щелока зависит от фактора разбавления Φ при промывке целлюлозы (см. табл. 7):

$$\Phi = W_0 Q_i, \text{ т/т или м}^3/\text{т,}$$

где W_0 – расход воды на промывку 1 т в.с.ц., $\text{м}^3/\text{т}$;

Q_i – влагосодержание массы на выходе из фильтра, %.

Для предварительного расчета допустим, что $C'_{\text{чщ}} = 170 \text{ кг/м}^3$, тогда

$$q' = K_{\text{чщ}} C'_{\text{чщ}} = 1879,14 \frac{170}{1000} = 319,45 \text{ кг/т},$$

а общее количество сухих веществ в черном щелоке с учетом оборотного черного щелока G' к концу варки составит:

$$G' = G + q' = 1226,07 + 319,45 = 1545,52 \text{ кг/т}.$$

Объем черного щелока к концу варки составит M_0 :

$$M_0 = Ж + \frac{G_{\text{ОРГ}}}{\gamma_c} = 5003,68 + \frac{880}{2} = 5443,68 \text{ л/т или } 5,444 \text{ м}^3/\text{т},$$

где γ_c – плотность сухого остатка черного щелока 1800...2100 кг/м³;
для целлюлозы средней жесткости $\gamma_c = 2000 \text{ кг/м}^3$ [1].

Концентрация сухих веществ в черном щелоке к концу варки:

$$C' = \frac{G'}{M_0} = \frac{1545,52}{5,444} = 283,91 \text{ кг/м}^3.$$

Объем используемого щелока, отбираемого с первой ступени промывки:

$$V_{\text{исп}} = M_0 + \Phi = 5,444 + 2,14 = 7,584 \text{ м}^3/\text{т}.$$

Количество сухих веществ в щелоке $G_{\text{исп}}$, отбираемом с первой ступени промывки, зависит от эффективности промывки η , т.е. степени отбора сухих веществ при промывке целлюлозы:

$$\eta = \frac{G_{\text{исп}}}{G} \approx 0,97 \dots 0,98,$$

где $G_{\text{исп}}$ – количество сухих веществ в используемом щелоке, кг/т;
 G – количество сухих веществ в черном щелоке к концу варки, кг/т.

Откорректированное количество сухого вещества G_0 в черном щелоке к концу варки:

$$G_0 = G_1 + q,$$

где q – количество сухих веществ в черном щелоке, направляемом на варку с белым щелоком.

Количество сухих веществ в используемом белом щелоке при степени отбора $\eta = 0,97$

$$G'_{\text{исп}} = G' \eta = 1545,52 \cdot 0,97 = 1499,15 \text{ кг/т}.$$

Концентрация используемого щелока

$$C_{\text{чщ}} = \frac{G'_{\text{исп}}}{V_{\text{исп}}} = \frac{1499,15}{7,584} = 197,67 \text{ кг/м}^3.$$

Корректировка количества сухого вещества в черном щелоке:

$$q = K_{\text{щц}} C_{\text{щц}} = 1879,14 \frac{197,67}{1000} = 371,45 \text{ кг/т};$$

$$G_0 = G + q = 1226,07 + 371,45 = 1597,52 \text{ кг/т};$$

$$C_0 = \frac{G_0}{M_0} = \frac{1597,52}{5,444} = 293,46 \text{ кг/м}^3;$$

$$G_{\text{исп}} = G_0 \eta = 1597,52 \cdot 0,97 = 1549,59 \text{ кг/т}.$$

Потери сухих веществ при промывке целлюлозы

$$N = G_0 - G_{\text{исп}} = 1597,52 - 1549,59 = 47,93 \text{ кг/т}.$$

Количество сухих веществ в черном щелоке, направляемом на выпарную станцию

$$G_{\text{вып}} = G_{\text{исп}} - q = 1549,59 - 371,45 = 1178,14 \text{ кг/т}.$$

Объем черного щелока, направляемого на выпарную станцию,

$$V_{\text{вып}} = V_{\text{исп}} - K_{\text{щц}} = 7584 - 1879,14 = 5704,86 \text{ л/т}.$$

Потери сухих веществ в системе выпарки составляют 1...1,5 %. Перед выпаркой необходимо удалить сульфатное мыло, концентрация которого C_M при варке хвойной древесины достигает 10...16 г/л черного щелока. При варке лиственной древесины эта величина значительно меньше.

Количество сухих веществ, направляемых на сжигание в СРК из системы выпарки,

$$G_{\text{сж}} = (G_{\text{вып}} - \frac{C_M V_{\text{вып}}}{1000}) \frac{100-1}{100} = (1178,14 - \frac{10 \cdot 5704,86}{1000}) \frac{99}{100} = 1109,88 \text{ кг/т},$$

где $\frac{C_M V_{\text{вып}}}{1000}$ – количество мыла, удаляемого перед выпаркой, кг/т;

$\frac{100-1}{100}$ – потери щелока с конденсатом в выпарных корпусах станций.

Определение количества минеральных и органических веществ в черном щелоке, направляемом на сжигание в СРК. Потери органических веществ (метиловый спирт, скипидар и сернистые дурнопахнущие соединения) при вскипании щелоков в испарительных циклонах № 1 и № 2 колеблются от 10 до 20 кг/т, следовательно, количество органических веществ в черном щелоке уменьшится на соответствующую величину.

Процентное соотношение минеральных и органических веществ в черном щелоке рассчитано ранее, поэтому можно пересчитать $G_{\text{СЖ}}$ на содержание минеральных и органических веществ:

$$G_{\text{СЖ МИН}} = G_{\text{СЖ}} \frac{28,23}{100} = 1109,88 \frac{28,23}{100} = 313,32 \text{ кг/т};$$

для примера содержание органических веществ составляет 69,84 % , тогда

$$G_{\text{СЖ ОРГ}} = G_{\text{СЖ}} \frac{71,77}{100} = 1109,88 \frac{71,77}{100} = 796,56 \text{ кг/т}.$$

Количество органических веществ уменьшится на величину летучих соединений с парогАЗами из циклонов. В примере эта величина составит 13 кг/т, тогда органических веществ на сжигание уйдет

$$G_{\text{СЖ ОРГ}} = 796,56 - 13 = 783,56 \text{ кг/т}.$$

Суммируем количество минеральных и органических веществ, поступающих на сжигание.

ИТОГО на сжигание поступит:

$$G''_{\text{СЖ}} = G_{\text{СЖ МИН}} + G'_{\text{СЖ ОРГ}} = \\ = 313,32 + 783,56 = 1096,88 \text{ кг сухих веществ на 1 т в.с.ц.}$$

Определим процентное содержание веществ для расчета баланса: минеральных

$$\frac{G_{\text{СЖ МИН}}}{G''_{\text{СЖ}}} 100 = \frac{313,32}{1096,88} 100 = 28,56 \%;$$

органических

$$\frac{G'_{\text{СЖ МИН}}}{G''_{\text{СЖ}}} 100 = \frac{783,56}{1096,88} 100 = 71,44 \%.$$

Для представления о процессах, происходящих при сжигании щелоков, необходимо рассчитать материальный баланс СРК. При сжигании черного щелока в СРК происходят различные реакции превращения химических соединений.

Элементный состав сухого остатка черного щелока зависит от факторов, действующих на данном предприятии. Средние значения по элементному составу черных щелоков различных отечественных предприятий по данным Энергобумпрома представлены в табл. 9.

Таблица 9

Состав сухого вещества черного щелока

Компоненты сухих веществ	Результаты измерений, %				
	H ^C	3,1	2,5	2,7	3,2
C ^C	36	35	30,8	33	31
Z _C (зольность)	47,53	44,2	44,5	38,78	47,4
S _{общ} ^C	4,43	2,85	3,32	3,81	3,49
Щ _O ^B	25,49	22,48	23,29	19,8	25,22
(NaOH) _{СВОБ}	–	0,93	0,59	2,37	0,75
(Na ₂ CO ₃) ^C	12,0	13,75	16,0	13,13	7,12
(Na ₂ S) ^C , %	3,18	3,24	4,24	2,26	5,25
(NaOH) _{ОРГ} ^C	20,62	14,39	13,35	13,48	20,2
(Na ₂ SO ₄) ^C	6,68	4,33	3,69	2,0	1,0
M ^C	42,48	36,64	37,87	32,28	39,98
S _{СД} ^C	1,04	1,05	1,35	0,93	1,7
S _{СТ} ^C	1,5	0,97	0,83	0,78	0,25
S _{ОРГ} ^C	1,84	0,83	1,14	1,09	1,86
S _A ^C	2,42	1,43	1,95	1,82	1,98
(CO ₂) _{РС}	5,53	11,42	10,95	8,39	8,4

3.4. Материальный баланс

Произведем расчет материального баланса на 1 т воздушно-сухой сульфатной целлюлозы для агрегата *производительностью* 600 т по целлюлозе в сутки. Щелок в агрегат поступает с концентрацией 60 % и содержит 1096,9 кг сухого остатка на 1 т целлюлозы. Состав сухого остатка черного щелока в данном балансе примем следующий:

	%	кг/т целлюлозы
Органическая часть:		
углерод С	38,56	423,00
водород Н	2,73	30,00
кислород О	27,87	305,56
сера органическая S _{ОРГ}	2,28	25,00
ИТОГО органических веществ, G_{СЖ орг}	71,44	783,56

Минеральная часть:		
свободная NaOH	2,28	25,00
органически связанная NaOH	18,24	200,16
Na ₂ S	3,48	38,16
Na ₂ CO ₃	3,65	40,00
Na ₂ SO ₄	0,91	10,00
ИТОГО минеральных веществ, $G_{СЖ\text{ мин}}$	28,56	313,32
ВСЕГО	$G_{СЖ}''$	100,00
		1096,88

Определение содержания всей Na₂O в черном щелоке

$$\begin{aligned}
 (Na_2O)_{щц} &= \left[(NaOH)_c^c + (NaOH)_{орг}^c \right] \frac{62}{80} + \\
 &+ (Na_2S)_c^c \frac{62}{78} + (Na_2CO_3)_c^c \frac{62}{106} + (Na_2SO_4)_c^c \frac{62}{142} = \\
 &= (25+200,16)0,775 + 38,18 \cdot 0,795 + 40 \cdot 0,585 + 10 \cdot 0,436 = 232,59 \text{ кг/т.}
 \end{aligned}$$

Определение содержания всей серы в черном щелоке в ед. S

$$\begin{aligned}
 S_{щц} &= S_{орг}^c + (Na_2S)_c^c \frac{32}{78} + (Na_2SO_4)_c^c \frac{62}{142} = \\
 &= 25 + 38,16 \frac{32}{78} + 10 \frac{32}{142} = 42,91 \text{ кг/т.}
 \end{aligned}$$

Определение количества потерь щелочи по циклам производства

- а) потери в варочном цехе составляют: 1 кг/т ед. Na₂O;
 б) в промывном отделе при степени отбора щелоков 97 % потери сухих веществ составляют 54,2 кг/т, или при пересчете в ед. Na₂O

$$54,2 \frac{28,56}{100 \cdot 1,64} = 9,44 \text{ кг/т,}$$

где 28,56 – процент минеральных веществ в сухом остатке черного щелока;

1,64 – коэффициент пересчета из собственных единиц в ед. Na₂O;

- в) в выпарном цехе потери сухих веществ составляют 1 % или

$$1096,88 \cdot 0,01 = 10,97 \text{ кг/т, а в ед. Na}_2\text{O потери составят}$$

$$10,97 \cdot \frac{28,56}{100 \cdot 1,64} = 1,91 \text{ кг/т,}$$

где 28,56 – процент минеральных веществ в сухом остатке черного щелока;

- г) в сорегенерационном цехе потери щелочи составляют 4 кг/т;

- д) в каустизационном цехе потери щелочи в ед. Na₂O равны 3 кг/т.

Сумма потерь щелочи:

- в ед. Na_2O $N_1=19,35$ кг/т;

- в ед. Na_2SO_4 $N_1'' = 19,35 \frac{142}{62} = 44,32$ кг/т.

Для восполнения потерь щелочи технического сульфата 95 % необходимо $N_1' = 44,32 \frac{100}{95} = 46,65$ кг/т.

При сжигании черного щелока унос щелочи с дымовыми газами из СРК данной конструкции составляет в среднем $n = 15$ % от общего количества Na_2O , поступающего в топку с черным щелоком и сульфатом натрия, поэтому дымовые газы подлежат очистке. Использование экономайзеров позволяет увеличить путь дымовых газов в котле и тем самым снизить их температуру и уловить около 20 % уноса, состоящего из осажденных частиц на поверхности труб экономайзера. Путем встряхивания и дробеочисткой, осадившиеся в зольниках частицы направляются в поток черного щелока. Выходящие из СРК, газы очищаются в электрофилтрах, где улавливается около 75 % уноса. Следовательно, *процент улавливания уноса* $m = 95$ % от n .

Составление уравнения баланса щелочи СРК и определение содержания всей Na_2O в плаве $(\text{Na}_2\text{O})_{\text{пл}}$

$$(\text{Na}_2\text{O})_{\text{чщ}} + N_1 = (\text{Na}_2\text{O})_{\text{пл}} + [(\text{Na}_2\text{O})_{\text{чщ}} + N_1] \frac{n}{100} (1 - \frac{m}{100});$$

$$232,59 + 19,35 = (\text{Na}_2\text{O})_{\text{пл}} + [232,59 + 19,35] \frac{15}{100} (1 - \frac{95}{100});$$

$$(\text{Na}_2\text{O})_{\text{пл}} = 232,62 + 19,35 - 1,89 = 250,05 \text{ кг/т},$$

где N_1 – сумма потерь щелочи в ед Na_2O , кг/т;

$$[(\text{Na}_2\text{O})_{\text{чщ}} + N_1] \frac{n}{100} (1 - \frac{m}{100}) - \text{потери } \text{Na}_2\text{O} \text{ с уносом, кг/т.}$$

Определение количества Na_2O , уходящего из СРК с уносом, и количества уловленного уноса в зольниках и электрофилтрах

а) общее количество Na_2O , уходящее из печи с уносом, $(\text{Na}_2\text{O})_y$:

$$(\text{Na}_2\text{O})_y = [(\text{Na}_2\text{O})_{\text{чщ}} + N_1] \frac{15}{100} = (232,59 + 19,35) \frac{15}{100} = 37,79 \text{ кг/т};$$

б) 20 % из общего количества уноса улавливаются в зольниках СРК:

$$(\text{Na}_2\text{O})_{y3} = (\text{Na}_2\text{O})_y \frac{20}{100} = 37,79 \cdot 0,2 = 7,56 \text{ кг/т};$$

в) 75 % общего количества уноса улавливается в электрофильтрах:

$$(\text{Na}_2\text{O})_{\text{УЭ}} = (\text{Na}_2\text{O})_{\text{У}} \frac{75}{100} = 37,79 \cdot 0,75 = 28,34 \text{ кг/т};$$

г) количество Na_2O , теряемое с безвозвратным уносом в трубу:

$$(\text{Na}_2\text{O})_{\text{ДЫМ}} = (\text{Na}_2\text{O})_{\text{У}} - (\text{Na}_2\text{O})_{\text{УЗ}} - (\text{Na}_2\text{O})_{\text{УЭ}} = 37,79 - 7,56 - 28,34 = 1,89 \text{ кг/т}.$$

Проверка баланса Na_2O

а) количество Na_2O , приходящее со щелоком и свежим сульфатом натрия $(\text{Na}_2\text{O})_{\text{ПР}} = (\text{Na}_2\text{O})_{\text{ЩЦ}} + N_1 = 232,59 + 19,35 = 251,94 \text{ кг/т};$

б) количество Na_2O , уходящее с плавом и с дымовыми газами в скруббер

$$(\text{Na}_2\text{O})_{\text{УХОД}} = (\text{Na}_2\text{O})_{\text{ПЛ}} + (\text{Na}_2\text{O})_{\text{ДЫМ}} = 250,05 + 1,89 = 251,94 \text{ кг/т};$$

$$(\text{Na}_2\text{O})_{\text{ПР}} = (\text{Na}_2\text{O})_{\text{УХОД}}.$$

Определение содержания всей серы в плаве

Условный состав плава Na_2CO_3 , Na_2S , Na_2SO_4 .

Из задания и расчетов:

- сульфидность белого щелока 25 %;
- степень восстановления сульфата до сульфида натрия 0,95;
- расход активной щелочи на варку $P_{\text{Na}_2\text{O}} = 211,2$ в ед. Na_2O на 1 т.

Определим:

а) количество сульфида натрия в плаве $(\text{Na}_2\text{S})_{\text{ПЛ}}$:

$$(\text{Na}_2\text{S})_{\text{ПЛ}} = P_{\text{Na}_2\text{O}} \frac{25}{100} = 211,2 \frac{25}{100} = 52,8 \text{ кг/т или в ед. Na}_2\text{O 66,43 кг/т};$$

б) количество сульфата натрия в плаве:

$$(\text{Na}_2\text{SO}_4)_{\text{ПЛ}} = (\text{Na}_2\text{S})_{\text{ПЛ}} \frac{0,05}{0,95} = 52,8 \frac{0,05}{0,95} = 2,78 \text{ в ед. Na}_2\text{O кг/т},$$

а в собственных ед. $\text{Na}_2\text{SO}_4 = 2,78 \frac{142}{62} = 6,36 \text{ кг/т}.$

в) количество серы в плаве:

$$(\text{Na}_2\text{S})_{\text{ПЛ}} + (\text{Na}_2\text{SO}_4)_{\text{ПЛ}} = 52,8 + 2,78 = 55,87 \text{ кг/т в ед. Na}_2\text{O};$$

г) количество соды в плаве в ед. Na_2O :

$$\begin{aligned} (\text{Na}_2\text{CO}_3)_{\text{ПЛ}} &= (\text{Na}_2\text{O})_{\text{ПЛ}} - (\text{Na}_2\text{S})_{\text{ПЛ}} - (\text{Na}_2\text{SO}_4)_{\text{ПЛ}} = \\ &= 250,05 - 52,8 - 2,78 = 194,47 \text{ кг/т в ед. Na}_2\text{O}, \end{aligned}$$

или собственных ед. $(\text{Na}_2\text{CO}_3)_{\text{ПЛ}} = 194,47 \frac{106}{62} = 332,48 \text{ кг/т}.$

Рассчитанные величины по количеству и составу плава заносим в табл. 10.

Таблица 10

Количество и состав плава, кг/т целлюлозы

Компоненты плава	Количество компонентов в плаве в		
	ед. (Na ₂ O) _{ПЛ}	собств. ед.	%
(Na ₂ CO ₃) _{ПЛ}	194,47	332,48	77,77
(Na ₂ S) _{ПЛ}	52,80	66,43	21,12
(Na ₂ SO ₄) _{ПЛ}	2,78	6,36	1,11
ВСЕГО плава	250,05	405,27	100,00

Полученные данные позволяют провести укрупненный материальный баланс СРК, так как по количеству плава можно рассчитать объем зеленого щелока, зная заданную концентрацию, и расход извести на каустизацию по количеству соды, содержащейся в плаве.

Определение компонентного состава пылевидного уноса

Пылевидный унос обычно состоит из 79 % пыли сульфата натрия Na₂SO₄ и 21 % пыли карбоната натрия Na₂CO₃.

а) уловленный пылевидный унос в зольниках содержит:

$$(\text{Na}_2\text{SO}_4)_з = (\text{Na}_2\text{O})_{уз} \frac{79}{100} = 7,56 \frac{79}{100} = 5,97 \text{ кг/т в ед. Na}_2\text{O}$$

$$\text{или в собственных ед. Na}_2\text{SO}_4 \quad 5,97 \frac{142}{62} = 13,68 \text{ кг/т;}$$

$$(\text{Na}_2\text{CO}_3)_з = (\text{Na}_2\text{O})_{уз} \frac{21}{100} = 7,56 \frac{21}{100} = 1,59 \text{ кг/т в ед. Na}_2\text{O}$$

$$\text{или в собственных ед. Na}_2\text{CO}_3 \quad 1,59 \frac{106}{62} = 2,71 \text{ кг/т.}$$

ИТОГО в собственных единицах пылевидного уноса в зольниках

$$(\text{Na}_2\text{O})'_{уз} = 16,39 \text{ кг/т.}$$

б) уловленный пылевидный унос в электрофилтрах содержит:

$$(\text{Na}_2\text{SO}_4)_э = (\text{Na}_2\text{O})_{уэ} \frac{79}{100} = 28,34 \frac{79}{100} = 22,39 \text{ кг/т в ед. Na}_2\text{O}$$

$$\text{или в собственных ед. Na}_2\text{SO}_4 \quad 22,39 \frac{142}{62} = 51,28 \text{ кг/т;}$$

$$(\text{Na}_2\text{CO}_3)_э = (\text{Na}_2\text{O})_{уэ} \frac{21}{100} = 28,34 \frac{21}{100} = 5,95 \text{ кг/т в ед. Na}_2\text{O}$$

$$\text{или в собственных ед. Na}_2\text{CO}_3 \quad 5,95 \frac{106}{62} = 10,17 \text{ кг/т.}$$

ИТОГО в собственных единицах (Na₂O)'_{уэ} = 61,45 кг/т.

в) безвозвратный пылевидный унос с дымовыми газами, поступающими в скруббер: $(\text{Na}_2\text{SO}_4)_{\text{дым}} = (\text{Na}_2\text{O})_{\text{дым}} \frac{79}{100} = 1,89 \frac{79}{100} = 1,49 \text{ кг/т в ед. Na}_2\text{O}$

или в собственных ед. $\text{Na}_2\text{SO}_4 \quad 1,49 \frac{142}{62} = 3,42 \text{ кг/т;}$

$(\text{Na}_2\text{CO}_3)_{\text{дым}} = (\text{Na}_2\text{O})_{\text{дым}} \frac{21}{100} = 1,89 \frac{21}{100} = 0,40 \text{ кг/т в ед. Na}_2\text{O}$

или в собственных ед. $\text{Na}_2\text{CO}_3 \quad 0,40 \frac{106}{62} = 0,68 \text{ кг/т.}$

ИТОГО в собственных единицах $(\text{Na}_2\text{O})'_{\text{дым}} = 4,099 \text{ кг/т.}$

Определение количества воды в упаренном черном щелоке

Концентрация сухих веществ $C_{\text{уП}}$ в упаренном черном щелоке 62 %, следовательно воды – 38 % или

$$(\text{H}_2\text{O})_{\text{чщ}} = G''_{\text{сж}} \frac{W}{C_{\text{уП}}} = 1096,88 \frac{38}{62} = 672,28 \text{ кг/т.}$$

3.5. Подготовка черного щелока перед подачей в содорегенерационный котлоагрегат

Черный упаренный щелок перед подачей в СРК смешивается в смесителе с сульфатом, уносом из зольников и электрофильтров, поэтому количество минеральных веществ в нем значительно увеличится и составит

$$\begin{aligned} G'_{\text{мин сж}} &= G_{\text{сж мин}} + N_1 + (\text{Na}_2\text{O})_{\text{уз}} + (\text{Na}_2\text{O})_{\text{уэ}} = \\ &= 313,32 + 46,65 + 16,39 + 61,45 = 437,81 \text{ кг/т.} \end{aligned}$$

Сухой остаток соответственно увеличивается и вместе с органическими веществами черного щелока составит

$$G'_{\text{сж}} = G'_{\text{мин сж}} + G_{\text{сж орг}} = 437,81 + 783,56 = 1221,37 \text{ кг/т;}$$

$$G_{\text{мин сж}} = \frac{G'_{\text{мин сж}}}{G'_{\text{сж}}} 100 = \frac{437,81}{1221,37} 100 = 35,85 \% ;$$

$$G_{\text{орг сж}} = \frac{G_{\text{орг сж}}}{G'_{\text{сж}}} 100 = \frac{783,56}{1221,37} 100 = 64,15 \% .$$

Концентрация щелока, направляемого из смесителя в СРК:

$$C_{\text{см}} = \frac{G'_{\text{сж}} 100}{G'_{\text{сж}} + (\text{H}_2\text{O})_{\text{чщ}}} = \frac{1221,37 \cdot 100}{1221,37 + 672,28} = 64,5 \% .$$

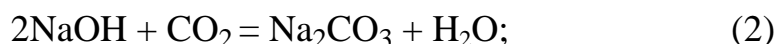
3.6. Баланс веществ по химическим реакциям

В дальнейших расчетах принимаются следующие упрощения реакций, происходящих в топке СРК:

- свободный и связанный NaOH, а также Na₂S, содержащиеся в черном щелоке, полностью карбонизируются (превращаются в соду);
- половина H₂S, образующегося при карбонизации Na₂S, и вся органическая сера сгорают до SO₂;
- регенерация серы, т.е. переход ее из черного щелока в плав, происходит в результате частичного окисления SO₂ в SO₃, который затем реагирует с Na₂CO₃ с образованием Na₂SO₄;
- 3 % сгорающего углерода образует CO.

Далее приводится расчет по основным химическим реакциям в соответствии с принятыми условиями и допущениями.

Реакция карбонизации гидроксида натрия



$$2 \cdot 40 + 44 = 106 + 18.$$

Из этой реакции видно, что при соединении 80 кг щелочи и 44 кг углекислого газа образуется 106 кг соды и 18 кг воды. На этом соотношении основываются дальнейшие расчеты.

По условиям баланса вступает в реакцию карбонизации свободный (NaOH)_с^с и органически связанный (NaOH)_{орг}^с, т.е.

$$(\text{NaOH})_{\text{с}}^{\text{с}} + (\text{NaOH})_{\text{орг}}^{\text{с}} = 25 + 200,17 = 225,16 \text{ кг NaOH.}$$

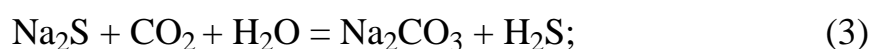
На это количество щелочи расходуется углекислого газа CO₂:

$$225,16 \frac{44}{80} = 123,84 \text{ кг.}$$

При этом образуется Na₂CO₃: $225,16 \frac{106}{80} = 298,34 \text{ кг;}$

$$\text{H}_2\text{O} \quad 225,16 \frac{18}{80} = 67,55 \text{ кг.}$$

Реакция карбонизации сульфида натрия



$$78 + 44 + 18 = 106 + 34.$$

Вступает в реакцию карбонизации сульфида натрия $(\text{Na}_2\text{S})^c$ из черного щелока 38,16 кг/т.

Количество CO_2 на карбонизацию $(\text{Na}_2\text{S})^c$:

$$38,16 \frac{44}{78} = 21,53 \text{ кг.}$$

Количество H_2O на реакцию карбонизации $(\text{Na}_2\text{S})^c$:

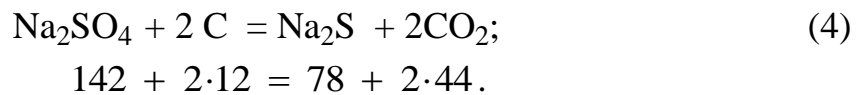
$$38,16 \frac{18}{78} = 8,81 \text{ кг.}$$

При карбонизации $(\text{Na}_2\text{S})^c$ образуется карбонат натрия Na_2CO_3 :

$$38,16 \frac{106}{78} = 51,86 \text{ кг;}$$

и сероводород H_2S : $38,16 \frac{34}{78} = 16,63 \text{ кг.}$

Реакция восстановления сульфата натрия до сульфида натрия



В плаве по данным баланса сульфида натрия образуется $(\text{Na}_2\text{S})_{\text{пл}}$ 52,8 кг/т в ед. Na_2O или 66,43 кг/т Na_2S . Для образования рассчитанного количества сульфида натрия в плаве в реакцию должно вступить

$$\text{Na}_2\text{SO}_4 \quad 66,43 \frac{142}{78} = 120,94 \text{ кг;}$$

$$\text{C} \quad 66,43 \frac{2 \cdot 12}{78} = 20,44 \text{ кг.}$$

При этом образуется углекислого газа CO_2 :

$$66,43 \frac{2 \cdot 24}{78} = 74,95 \text{ кг.}$$

Реакция сгорания углерода до CO



Количество углерода в черном щелоке по элементарному составу $\text{C}^c = 423 \text{ кг/т}$. На реакцию восстановления сульфата до сульфида натрия по расчету тратится 20,44 кг углерода (4), следовательно, углерода сгорает:

$$423 - 20,44 = 402,56 \text{ кг.}$$

Из него сгорает до CO 3 %: $402,56 \cdot 0,03 = 12,08$ кг.

На эту реакцию расходуется кислорода O₂: $12,08 \frac{32}{24} = 16,10$ кг.

При этом образуется окиси углерода CO: $12,08 \frac{2 \cdot 28}{2 \cdot 12} = 24,16$ кг.

Реакция сгорания углерода до CO₂



До углекислого газа CO₂ углерода сгорает:

$$C_{\text{сг}} - C_{\text{CO}} = 402,56 - 12,08 = 390,48 \text{ кг};$$

Расходуется кислорода O₂: $390,48 \frac{32}{12} = 1041,29$ кг.

Образуется при горении CO₂: $390,48 \frac{44}{12} = 1041,29$ кг.

Реакция сгорания водорода



Из элементного состава сухого остатка черного щелока водорода содержится H^C = 30 кг/т. Для сжигания этого количества водорода потребуется кислорода O₂: $30 \frac{2 \cdot 16}{2 \cdot 2} = 240$ кг.

При сжигании H^C образуется воды H₂O: $30 \frac{2 \cdot 18}{2 \cdot 2} = 270$ кг.

Реакция сгорания органической серы

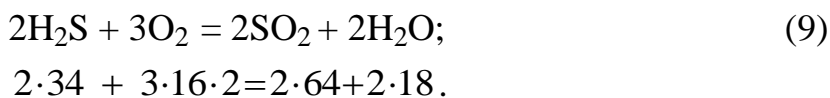


Из элементного состава сухого остатка органической части черного щелока S^C_{ОРГ} = 25 кг/т.

Для сжигания серы потребуется кислорода O₂: $25 \frac{2 \cdot 16}{32} = 25$ кг.

Образуется сернистого газа из S^C_{ОРГ} SO₂: $25 \frac{64}{32} = 50$ кг.

Реакция сгорания сероводорода



Сероводород образуется в результате реакции карбонизации $(\text{H}_2\text{S})^c$ (3) в количестве 16,64 кг/т, при этом $1/2 \text{H}_2\text{S}$ сгорает до SO_2 , т. е.

$$16,63 \cdot 0,5 = 8,32 \text{ кг } \text{SO}_2.$$

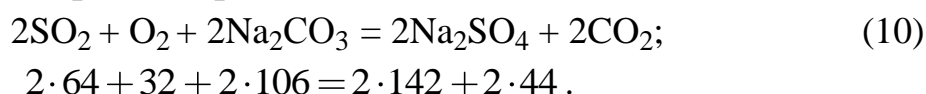
На реакцию горения $1/2 \text{H}_2\text{S}$ потребуется O_2 :

$$8,32 \frac{96}{2 \cdot 34} = 11,74 \text{ кг};$$

образуется SO_2 : $8,32 \frac{2 \cdot 64}{2 \cdot 34} = 15,65 \text{ кг};$

образуется воды H_2O : $8,32 \frac{2 \cdot 18}{2 \cdot 34} = 4,40 \text{ кг}.$

Реакция регенерации серы:



Эта реакция должна восполнять недостаток в сульфате натрия, необходимого для восстановления до сульфида натрия.

Приходит Na_2SO_4 с черным щелоком и свежим сульфатом:

$$(\text{Na}_2\text{SO}_4)^c + N_1'' = 10 + 44,32 = 54,32 \text{ кг в ед. } \text{Na}_2\text{SO}_4.$$

Уходит Na_2SO_4 с плавом, теряется с безвозвратным уносом и восстанавливается до Na_2S в количестве

$$\Sigma S = (\text{Na}_2\text{SO}_4)_{\text{пл}} + (\text{Na}_2\text{SO}_4)_{\text{дым}} + (\text{Na}_2\text{SO}_4)' =$$

$$= 6,34 + 120,94 + 3,42 = 130,72 \text{ кг/т в ед. } \text{Na}_2\text{SO}_4$$

Недостаток сульфата Na_2SO_4 в процессе, который должен образоваться в результате регенерации серы:

$$\Sigma S - (\text{Na}_2\text{SO}_4)^c - N_1'' = 130,72 - 10 - 44,32 = 76,4 \text{ кг/т}.$$

Вступает в реакцию (см. реакцию 9):

$$\text{SO}_2 \quad 76,4 \frac{2 \cdot 64}{2 \cdot 142} = 34,43 \text{ кг};$$

$$\text{O}_2 \quad 76,4 \frac{2 \cdot 16}{2 \cdot 142} = 8,62 \text{ кг};$$

$$\text{Na}_2\text{CO}_3 \quad 76,4 \frac{2 \cdot 106}{2 \cdot 142} = 57,03 \text{ кг};$$

$$\text{CO}_2 \quad 76,4 \frac{2 \cdot 44}{2 \cdot 142} = 23,67 \text{ кг}.$$

Для проверки сделанных стехиометрических расчетов по натриевым соединениям подведем баланс карбоната (Na_2CO_3).

Баланс соды

Приход, кг/т:

с черным щелоком	40,00
по реакциям карбонизации (2)	298,34
(3).....	51,88
ИТОГО: Na₂CO₃	390,20.

Расход, кг/т:

с плавом.....	332,48
с безвозвратным уносом.....	0,65
расходуется по реакции (10)	57,03
ИТОГО: Na₂CO₃.....	390,19.

Следовательно, произведенные расчеты верны.

Баланс серы

Приход, кг/т:

со свежим сульфатом Na ₂ SO ₄ в ед. S $44,32 \frac{32}{142}$	9,99
с черным щелоком	42,91
ИТОГО: $\Sigma S_{\text{ПРИХ}}$	52,90.

Расход, кг/т:

с уносом и газами в виде:

реакция (8) Na ₂ SO ₄ $3,42 \frac{32}{142}$	0,77
реакция (9) H ₂ S $8,32 \frac{32}{34}$	7,83
реакция (10) SO ₂ (50+15,65+34,43) $\frac{32}{64}$	15,61

ВСЕГО: $\Sigma S_{\text{ПОТ}}$ 24,21.

с плавом:

Na ₂ S, в ед. Na ₂ S	66,43
Na ₂ SO ₄ , в ед. Na ₂ SO ₄	6,36

$$\text{Na}_2\text{S, в ед. S } 66,43 \frac{32}{78} \dots\dots\dots 27,25$$

$$\text{Na}_2\text{SO}_4, \text{ в ед. S } 6,36 \frac{32}{142} \dots\dots\dots 1,43$$

$$\text{ВСЕГО: } \Sigma S_{\text{ПЛ}} \dots\dots\dots 28,68.$$

$$\text{ИТОГО: } \Sigma S_{\text{РАСХ}} \dots\dots\dots 52,89.$$

Из расчетов имеем равенство $\Sigma S_{\text{ПРИХ}} = \Sigma S_{\text{РАСХ}}$, следовательно, материальный баланс СРК рассчитан верно.

3.7. Определение объема газов при сжигании черного щелока

Количество кислорода, которое нужно подать в топку котла для поддержания процесса горения в реакциях (5, 6, 7, 8, 9):

$$\Sigma \text{O}_2 = 16,10 + 1041,29 + 240 + 25 + 11,74 + 8,61 = 1342,74 \text{ кг/т.}$$

Теоретический расход кислорода T_{O_2} с учетом содержащегося в сухом остатке щелока:

$$T_{\text{O}_2} = 1342,74 - 305,56 = 1037,18 \text{ кг/т.}$$

Теоретический расход воздуха J_0 при содержании в нем кислорода 22 %:

$$J_0 = 1037,18 \frac{100}{22} = 4714,45 \text{ кг/т}$$

или на 1кг сухого остатка черного щелока:

$$\frac{J_0}{G''_{\text{СЖ}}} = \frac{4714,45}{1092,88} = 4,298 \text{ кг/т.}$$

Принимаем коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,2$.

Фактический расход воздуха J составит:

$$J = J_0 \alpha = 4714,5 \cdot 1,2 = 5657,34 \text{ кг/т.}$$

Из них:

$$\text{O}_2 = 5657,34 \cdot 0,22 = 1244,61 \text{ кг;}$$

$$\text{N}_2 = 5657,34 \cdot 0,78 = 4412,73 \text{ кг.}$$

3.8. Составление сводной таблицы материального баланса

На основании сводной таблицы материального баланса выясняется состав газов, уходящих из топки (табл. 11). Состав уходящих газов вычисляют по разности приходной и расходной частей материального баланса. Содержание водяных паров в воздухе условно не учитывают. Данные по приходной и расходной части материального баланса заносят в таблицы (табл. 12, 13).

Для пересчета массового состава газов на объемный состав используют плотность компонентов при нормальных условиях (температура 0 °С и атмосферное давление 760 мм рт. ст.), кг/Н·м³:

H ₂ O (водяной пар) – 0,80;	SO ₂ – 2,93;
H ₂ S – 1,52;	N ₂ – 1,25;
CO – 1,25;	O ₂ – 1,43.
CO ₂ – 1,98;	

Таблица 11

Массовые и объемные составы сухих и влажных дымовых газов СРК, отнесенные к 1 т целлюлозы

Компонент	Влажные газы				Сухие газы			
	Массовый состав		Объемный состав		Массовый состав		Объемный состав	
	кг	%	нм ³	%	кг	%	нм ³	%
H ₂ O	1037,18	14,60	1296,48	22,72	-	-	-	-
H ₂ S	8,32	0,12	5,47	0,1	8,32	0,14	5,47	0,12
CO	24,15	0,34	19,32	0,34	24,15	0,40	19,32	0,44
CO ₂	1385,02	19,49	699,51	12,26	1385,02	22,82	699,51	15,86
SO ₂	31,22	0,44	10,66	0,19	31,22	0,51	10,66	0,24
N ₂	4412,73	62,10	3530,18	61,86	4412,73	72,71	3530,18	80,05
O ₂	207,43	2,92	145,06	2,54	207,43	3,42	145,06	3,29
ИТОГО	7106,05	100,0	5706,68	100,0	6068,87	100,0	4410,2	100,0

Приходная часть материального баланса

Компонент	Приход воздушно-сухой целлюлозы, кг/т														ИТОГО
	с черным стуженным щелоком	с сульфатом	с золой	с возвращаемым уносом	с воздухом	Образовалось по реакциям									
						$2\text{NaOH}+\text{CO}_2 = \text{Na}_2\text{CO}_3+\text{H}_2\text{O}+\text{H}_2\text{S}$	$\text{Na}_2\text{S}+\text{CO}_2+\text{H}_2\text{O} = \text{Na}_2\text{CO}_3+\text{H}_2\text{S}$	$2\text{Na}_2\text{S}+2\text{C} = \text{Na}_2\text{S}+2\text{CO}_2$	$2\text{C}+\text{O}_2=2\text{CO}$	$\text{C}+\text{O}_2=\text{CO}_2$	$2\text{H}_2+\text{O}_2=2\text{H}_2\text{O}$	$\text{S}+\text{O}_2=\text{SO}_2$	$2\text{H}_2\text{S}+3\text{O}_2 = 2\text{SO}_2+\text{H}_2\text{O}$	$2\text{SO}_2+\text{O}_2+2\text{Na}_2\text{CO}_3 = 2\text{Na}_2\text{SO}_4+2\text{CO}_2$	
C	525,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	525,0
H ₂	63,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	63,0
O ₂	250,0	-	-	-	1923,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2173,3
S _{орг}	20,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20,0
NaOH	309,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	309,5
Na ₂ S	20,0	-	-	-	-	-	-	82,4	-	-	-	-	-	-	102,4
Na ₂ CO ₃	50,0	-	6,3	6,5	-	410,5	27,2	-	-	-	-	-	-	-	500,5
Na ₂ SO ₄	12,5	70,2	13,8	68,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	90,5	255,6
H ₂ O	833,3	-	-	-	-	69,7	-	-	-	-	567,0	-	2,3	-	1472,3
H ₂ S	-	-	-	-	-	-	8,7	-	-	-	-	-	-	-	8,7
CO	-	-	-	-	-	-	-	-	35,0	-	-	-	-	-	35,0
CO ₂	-	-	-	-	-	-	-	92,9	-	1776,9	-	-	-	28,1	1897,9
SO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	40,0	8,3	-	48,3
N ₂	-	-	-	-	6438,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6438,5
ВСЕГО	2083,3	70,2	20,1	75,1	8361,8	480,2	35,9	175,3	35,0	1776,9	567,0	40,0	10,6	118,6	13850,0

Расходная часть материального баланса

Компонент	Расход воздушно-сухой целлюлозы, кг/т														
	с плавом	с золой	с возвращенным уносом	с безвозвратным уносом	Вступило в реакции									С газами (по разности)	ИТОГО
					$2\text{NaOH}+\text{CO}_2=\text{Na}_2\text{CO}_3+\text{H}_2\text{S}$	$\text{Na}_2\text{S}+\text{CO}_2+\text{H}_2\text{O}=\text{Na}_2\text{CO}_3+\text{H}_2\text{S}$	$2\text{Na}_2\text{SO}_4+2\text{C}=\text{Na}_2\text{S}+2\text{CO}_2$	$2\text{C}+\text{O}_2=2\text{CO}$	$\text{C}+\text{O}_2=\text{CO}_2$	$2\text{H}_2+\text{O}_2=2\text{H}_2\text{O}$	$\text{S}+\text{O}_2=\text{SO}_2$	$2\text{H}_2\text{S}+3\text{O}_2=2\text{SO}_2+\text{H}_2\text{O}$	$2\text{SO}_2+\text{O}_2+2\text{Na}_2\text{CO}_3=\text{Na}_2\text{SO}_4+2\text{CO}_2$		
C	-	-	-	-	-	-	25,4	15,0	484,6	-	-	-	-	-	525,0
H ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-	63,0	-	-	-	-	63,0
O ₂	-	-	-	-	-	-	-	20,0	1292,3	504,0	20,0	6,2	10,2	320,6	2173,3
S _{opr}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20,0	-	-	-	20,0
NaOH	-	-	-	-	309,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	309,5
Na ₂ S	84,2	-	-	-	-	20,0	-	-	-	-	-	-	-	-	102,4
Na ₂ CO ₃	419,2	6,3	6,5	0,9	-	-	-	-	-	-	-	-	6,7	-	500,5
Na ₂ SO ₄	13,4	13,8	68,6	9,9	-	-	149,9	-	-	-	-	-	-	-	255,6
H ₂ O	-	-	-	-	-	4,6	-	-	-	-	-	-	-	1467,7	1472,3
H ₂ S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,4	-	4,3	8,7
CO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	35,0	35,0
CO ₂	-	-	-	-	170,7	11,3	-	-	-	-	-	-	-	1715,9	1897,9
SO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	40,8	7,5	48,3
N ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6438,5	6438,5
ВСЕГО	515,0	20,1	75,1	10,8	480,2	35,9	175,3	35,0	1776,9	567,0	40,0	10,6	118,6	9989,5	13 850,0

На основе материального баланса, зная площадь пода топки, можно рассчитать съём плава и производительность котлоагрегата по сухому веществу щелока в сутки. Зная объем топочного пространства, также можно рассчитать количество сухого вещества щелока, сжигаемого в одном кубическом метре топки СРК за один час.

Пользуясь данными материального баланса, рассчитывают тепловой баланс для СРК. В тепловом отношении черный щелок рассматривают как высокозольное низкокалорийное топливо. Тепловые процессы протекают при сжигании органической части сухого остатка черного щелока.

4 ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС СОДОРЕГЕНЕРАЦИОННОГО КОТЛОАГРЕГАТА

Источником получения тепла в СРК является сжигание упаренного черного щелока. В теплотехническом отношении черный щелок рассматривается как высокозольное, малокалорийное топливо, имеющее высокую влажность. По разным источникам калорийность черного щелока определяют в пределах 12 560...16 750 кДж/кг.

Выделяющееся в результате сгорания черного щелока тепло используется в химических и физических процессах, протекающих с дополнительными затратами тепла, а избыток идет на получение пара, подогрев воды и воздуха, поступающих в котел. Расчет теплового баланса проводят на 1 т в. с. ц. Пользуясь данными материального баланса, рассчитаем тепловой баланс для СРК производительностью $Q_{\text{СРК}} = 725$ т/сут по сухому веществу черного щелока и производительностью завода $\Pi_{\text{СУТ}} = 600$ т/сут по целлюлозе. Для расчета теплового баланса примем следующие данные:

Размеры экранированной топки агрегата, м:

сечение	8,47×6,37
высота	17,5
Наружная поверхность стенок топки и пода, м ²	945,00
Наружная поверхность облицовки парового котла, м ²	1182,00
<hr/>	
Удельная теплоемкость, кДж/(кг·°С):	
смесь черного щелока с сульфатом, $C_{\text{СМ}}$	2,723
сухой воздух, $C_{\text{В}}$	1,005
плав, $C_{\text{ПЛ}}$	1,13
перегретый водяной пар, $C_{\text{ПВ}}$	1,927
сухой дымовой газ, $C_{\text{ДЫМ}}$	0,963

Скрытая теплота плавления, кДж/(кг·°С):	
карбонат натрия Na_2CO_3 , λ_1	358,24
сульфид натрия Na_2S , λ_2	62,01
сульфат натрия Na_2SO_4 , λ_3	257,70
<hr/>	
Температура, °С	
смесь щелока с золой и сульфатом, $t_{\text{СМ}}$	100,00
воздух после воздухоподогревателя, $t_{\text{В}}$	150,00
плав, вытекающий из печи, $t_{\text{ПЛ}}$	850,00
газ после экономайзера, $t_{\text{ДЫМ}}$	150,00
питательная вода, $t'_{\text{H}_2\text{O}}$	100,00
наружные стенки топки, $t_{\text{СТ}}$	80,00
наружные стенки котла, $t_{\text{КТ}}$	75,00
воздух в помещении, $t_{\text{ВП}}$	20,00
перегретый пар, $t_{\text{ПЕР}}$	450,00

4.1. Определение прихода тепла

Количество физического тепла смеси черного щелока и сульфата:

$$Q_1 = \left[(\text{H}_2\text{O})_{\text{ЩЦ}} + G''_{\text{СЖ}} + N_{\text{ед. Na}_2\text{SO}_4} \right] C_{\text{СМ}} t_{\text{СМ}} =$$

$$= (672,28 + 1096,88 + 44,32 \cdot 100 = 4938106 \text{ кДж.}$$

Количество физического тепла подогретого сухого воздуха, поступающего в топку:

$$Q_2 = L C_{\text{В}} t_{\text{В}} = 5657,34 \cdot 1,005 \cdot 150 = 852\,844,01 \text{ кДж.}$$

Количество тепла сгорания сухого вещества черного щелока зависит от его теплотворной способности, которую определяют по формуле Д.И. Менделеева $K_{\text{В}} = [8100 \text{ С} + 24000 \text{ Н} - 2600(\text{О}^{\text{С}} - \text{S}_{\text{ОРГ}}^{\text{С}})] 4,19$ кДж/кг, где $K_{\text{В}}$ – высшая теплотворная способность топлива, кДж/кг; С, Н, О, $\text{S}_{\text{ОРГ}}$ – количество углерода, водорода, кислорода и органической серы в черном щелоке по элементарному составу.

$$K_{\text{В щЦ}} = \frac{[8100 \text{ С} + 2400 \text{ Н} - 2600 (\text{О} - \text{S}_{\text{ОРГ}})] 4,19}{G''_{\text{СЖ}}} =$$

$$= \frac{(8100 \cdot 423 + 24000 \cdot 30 + 2600 \cdot 280,56) 4,19}{1096,88} = 18\,625,03 \text{ кДж/кг.}$$

Количество тепла сгорания сухого вещества черного щелока

$$Q_3 = K_B G''_{СЖ} = 20429417,64 \text{ кДж/т.}$$

ВСЕГО приходит тепла:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 493810,6 + 852844,01 + 20429417,64 = 21776072,25 \text{ кДж/т.}$$

4.2. Определение расхода тепла

Расход тепла на испарение воды и перегрев водяных паров

$$Q_4 = \Sigma' H_2O [(t_{\text{ПЕР}} + t_{\text{ДЫМ}} - t'_{H_2O}) C_{\text{ПВ}}];$$

$$\Sigma' H_2O = 672,28 + 67,55 + 270 + 4,4 = 1014,23 \text{ кг/т,}$$

где $\Sigma' H_2O$ – сумма воды в черном щелоке и по реакциям (2), (7) и (9).

За вычетом воды на реакцию карбонизации Na_2S (3), количество воды

$$\Sigma H_2O = \Sigma' H_2O - 8,81 = 1014,23 - 8,81 = 1005,42 \text{ кг/т;}$$

$$Q_4 = 1005,42(450 + 140 - 100) = 492655,8 \text{ кДж/т.}$$

Физическое тепло плава

$$Q_5 = (Na_2O)_{\text{ПЛ}} C_{\text{ПЛ}} t_{\text{ПЛ}} = 250,05 \cdot 1,13 \cdot 850 = 240173,03 \text{ кДж/т.}$$

Тепло плавления минеральных солей плава

$$Q_6 = (Na_2CO_3)_{\text{ПЛ}} \lambda_1 + (Na_2S)_{\text{ПЛ}} \lambda_2 + (Na_2SO_4)_{\text{ПЛ}} \lambda_3 = \\ = 332,48 \cdot 358,24 + 66,43 \cdot 62,01 + 6,36 \cdot 257,7 = 124865,93 \text{ кДж/т.}$$

Тепло восстановления сульфата

Эндотермический эффект восстановления сульфата, отнесенный к 1 кг углерода, пошедшего на реакцию, равен $Q_{\text{ВС}} = 8900 \text{ кДж/кг}$. Расчет необходимо вести на сульфат, из которого получается Na_2S в плаве:

$$Q_7 = (Na_2S)_{\text{ПЛ}} \frac{142}{62} Q_{\text{ВС}} = 52,8 \frac{142}{62} 8900 = 1076268,39 \text{ кДж/т.}$$

Потери тепла от неполноты сгорания

На 1 кг углерода, сгоревшего до CO , теряется $Q_{\text{ПОТ}} = 23614 \text{ кДж/кг}$, следовательно, потери тепла, исходя из реакции (5) составят

$$Q_8 = C_{\text{СО}} Q_{\text{ПОТ}} = 12,07 \cdot 23614 = 285257,12 \text{ кДж/т.}$$

Потери тепла от стенок топки и поверхности парового котла

Коэффициент теплоотдачи от стенок топки и кладки котла наружному воздуху помещения примем $\alpha_1 = 62,85 \text{ кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{С})$. Тогда потери тепла за 1 час для агрегата составят:

$$Q'_9 = 62,85 [945 (80 - 20) + 1181 (75 - 20)] = 7\,646\,017 \text{ кДж/ч.}$$

При производительности целлюлозного завода 600 т целлюлозы в сутки потери тепла на 1 т целлюлозы составят:

$$Q_9 = (764\,6017 \cdot 24)/600 = 305\,840,68 \text{ кДж/т.}$$

Тепло, уносимое сухими газами в скруббер и трубу

$$Q_{10} = 7319,7 \cdot t_{\text{дым}} C_{\text{дым}} = 7319,7 \cdot 0,963 \cdot 140 = 986\,842 \text{ кДж/т.}$$

Тепло, поглощаемое паровым котлом, экраном и экономайзером используется для получения пара. Количество тепла для получения определяем по разности прихода и расхода. Суммарный расход тепла на все другие нужды без этой статьи:

$$\begin{aligned} Q' &= Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8 + Q_9 + Q_{10} = \\ &= 492\,655,8 + 240\,173,03 + 124\,865,93 + 1\,076\,268,39 + 285\,257,12 + \\ &\quad + 305\,840,68 + 986\,842 = 3\,511\,902,95 \text{ кДж/т}; \end{aligned}$$

$$Q_{11} = Q - Q' = 21\,776\,072,25 - 3\,511\,902,95 = 18\,264\,169,3 \text{ кДж/т.}$$

Принимаем следующие параметры пара: температура перегретого пара $t_{\text{ПЕР}} = 450^\circ\text{С}$, давление $60 \text{ кгс}/\text{см}^2$. По диаграмме $i - S$ определяют теплосодержание пара. В данном случае $i_{\text{ПАР}} = 3316 \text{ кДж/кг}$, при температуре питательной воды $t'_{\text{H}_2\text{O}} = 100^\circ\text{С}$ количество получаемого пара составит:

$$D_{\text{ПАР}} = \frac{Q_{11}}{i_{\text{ПАР}} - t_{\text{H}_2\text{O}} C_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{18\,264\,169,3}{3316 - 100 \cdot 4,19} = 6304,51 \text{ кг/т,}$$

где $4,19 \text{ кДж}$ – теплосодержание 1 кг воды при 100°С .

Сводный тепловой баланс работы СРК с использованием данных материального баланса на 1 т целлюлозы приведен ниже:

	кДж	%
<u>Приход:</u>		
физическое тепло щелока и сульфата Q_1	493 810,6	2,27
физическое тепло сухого воздуха Q_2	852 844,01	3,92
тепло сгорания сухого вещества черного щелока Q_3	20 429 417,64	93,82
ИТОГО	21 776 072,25	100,00

Расход:

испарение воды и перегрев водяных паров Q_4	492 655,80	2,26
уходит с плавом в растворитель Q_5	240 173,03	1,10
на плавление минеральных солей Q_6	124 865,93	0,57
на восстановление сульфата Q_7	1 076 268,39	4,94
потери тепла от неполноты сгорания Q_8	285 257,12	1,31
потери теплоотдачей топкой и котлом Q_9	305 840,68	1,40
тепло, уносимое сухими газами в трубу Q_{10}	986 842,00	4,53
тепло на получение пара Q_{11}	18 264 169,30	83,87
ИТОГО	21 776 072,25	100,00

Определяем эффективность работы СРК. Она характеризуется теплотехническим и технологическим коэффициентами полезного действия:

$$K_{\text{ТЕПЛ}} = \frac{Q_{11} \cdot 100}{Q_3} = \frac{18\,264\,169,3}{20\,429\,417,64} = 89,4\% ;$$

$$K_{\text{ТЕХН}} = \frac{(Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_{11})100}{Q_3} = \frac{20\,198\,132 \cdot 100}{20\,429\,417,64} = 98,86 \% .$$

Необходимо ввести поправки в величину полученных коэффициентов на затраты тепла, связанные с подогревом щелока и воздуха:

Q'_1 – расход тепла на подогрев щелока и сульфата натрия от 80 до 100 °С;

$$Q'_1 = [(H_2O)_{\text{щЩ}} + G''_{\text{СЖ}} + N_{1 \text{ ед. Na}_2\text{SO}_4}] C_{\text{СМ}} (t_{\text{СМ}} - t_{\text{щЩ}}) = \\ = (672,28 + 1096,88 + 44,32) 2,723 (100 - 80) = 98\,762,12 \text{ кДж/т};$$

Q'_2 – расход тепла для подогрева воздуха от 20 °С (t') до 150 °С (t_B);

$$Q'_2 = L C_B (t_B - t') = 5657,34 \cdot 1,005 (150 - 20) = 739\,131,47 \text{ кДж/т}.$$

Общий расход тепла на подогрев щелока, сульфата и воздуха

$$Q_0 = Q'_1 + Q'_2 = 98\,762,12 + 739\,131,47 = 837\,893,59 \text{ кДж/т}.$$

На эту величину уменьшится количество тепла, получаемого в виде энергетического пара ($D_{\text{ПАР}}$) с СРК, которое составит:

$$Q'_{11} = Q_{11} - Q_0 = 18\,264\,169,3 - 837\,893,59 = 17\,426\,276 \text{ кДж/т}.$$

Количество пара, вырабатываемого СРК, определяется по формуле

$$D_{\text{ПАР}} = \frac{Q'_{11}}{i_{\text{ПАР}} - t'_{\text{H}_2\text{O}} C_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{17\,426\,276}{3316 - 100 \cdot 4,19} = 6015,28 \text{ кг/т}.$$

Действительные КПД:

$$K'_{\text{ТЕПЛ}} = \frac{Q'_{11} \cdot 100}{Q_3} = \frac{17\,426\,276}{20\,429\,417,64} = 85,3\% ;$$

$$K'_{\text{ТЕХН}} = \frac{(Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q'_{11})100}{Q_3} = \frac{18\,502\,636 \cdot 100}{20\,429\,417,64} = 90,57\% .$$

Объем топки СРК $V_{\text{ТОПК}} = 8,4 \cdot 6,37 \cdot 17,5 = 945 \text{ м}^3$.

Теплонапряженность топочного пространства (по высшей тепло-творной способности щелока):

$$X = \frac{Q_3 \Pi_{\text{СУТ}}}{24 \cdot V_{\text{ТОПК}}} = \frac{20\,429\,417,64 \cdot 600}{24 \cdot 945} = 540\,460,75 \text{ кДж/м}^3 \cdot \text{ч}.$$

Съем плава при площади пода $F_{\text{ПОД}} = 8,47 \cdot 6,37 = 56,96 \text{ м}^2$, составляет

$$y = \frac{(\text{Na}_2\text{O})_{\text{ПЛ}} \Pi_{\text{СУТ}}}{24 F_{\text{ПОД}}} = \frac{250,05 \cdot 600}{24 \cdot 56,96} = 109,75 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{ч}.$$



5 ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ НАЗНАЧЕНИЕ И УСТРОЙСТВО СОДОРЕГЕНЕРАЦИОННЫХ КОТЛОАГРЕГАТОВ

В СРК при сжигании черного щелока решаются две задачи: энергетическая (производство пара) и технологическая (регенерация щелочи из черного щелока и свежего сульфата).

Энергетическая задача считается главной, поэтому содорегенерационные цеха целлюлозных заводов играют роль котельных теплосиловых станций.

С теплотехнической точки зрения черный щелок, поступающий в топку СРК с концентрацией 55...65 % сухого вещества, является плохим топливом. Он содержит много золы и воды. Для повышения теплоты сгорания рабочей массы топлива часто применяют подачу в топку дополнительного топлива или мазута. Производительность современных СРК 150...200 т пара в 1 ч, что эквивалентно сжиганию щелоков от выработки 800...1000 т целлюлозы в сутки. Давление пара достигает 6...7 МПа при перегреве до 450 °С.

Конструкции СРК довольно разнообразны. Применяются одно-, двух- и трехбарабанные СРК с вертикальными и наклонными трубками.

Преимущественным распространением пользуются двухбарабанные котлы с передним наклонным (фестонным) пучком трубок. За фестонным пучком трубок располагается пароперегреватель. Через основной котельный пучок трубок газы могут проходить в поперечном или продольном направлениях. Направляющие перегородки в котельной секции, в секции экономайзера делают металлическими. Водяные экономайзеры применяются преимущественно с гладкими вертикальными трубами, реже – с ребристыми горизонтальными трубами.

Топка СРК представляет собой шахту прямоугольного поперечного сечения высотой 10...20 м (до уровня фестонного пучка трубок). Стенки и под топку полностью экранируются трубками парового котла (рис. 5). В некоторых конструкциях в верхней части топки экранные трубки задней стенки образуют поперечный или носовой выступ, уменьшающий живое сечение для прохода газов. Это улучшает обтекание газами фестонного пучка и пароперегревателя, но вызывает необходимость очистки поперечного выступа от пыли и золы. Типичная схема циркуляции воды в трубах экрана [6] показана стрелками на рис. 5

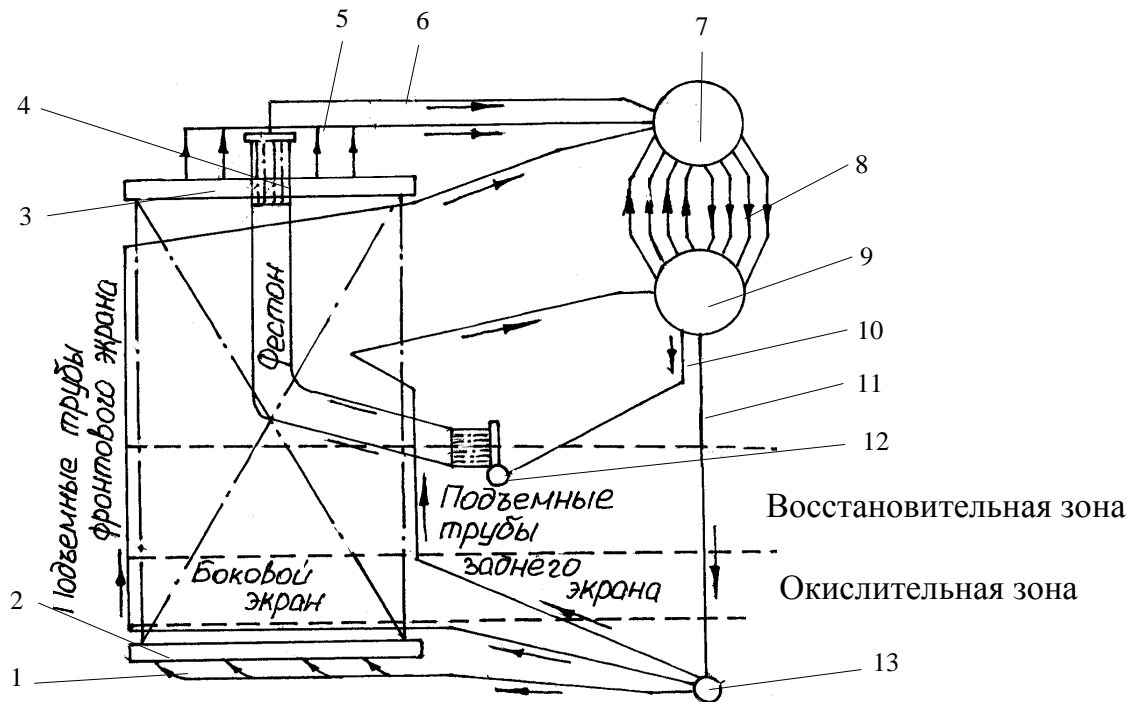


Рис. 5. Схема циркуляции воды в трубах котла и экранов:

- 1 – подводящие трубы нижнего коллектора; 2 – нижний боковой коллектор;
- 3 – верхний боковой коллектор; 4 – верхний коллектор фестона;
- 5 – отводящие трубы бокового экрана; 6 – отводящие трубы фестона;
- 7 – верхний барабан; 8 – конвективный пучок трубы; 9 – нижний барабан;
- 10 – спусковые трубы фестона; 11 – спусковые трубы нижнего коллектора;
- 12 – коллектор фестона; 13 – нижний распределительный коллектор

По высоте топку можно разделить на восстановительную и окислительную зоны. Восстановительная зона включает горн, заполненный плавом и огарком (до уровня сопел первичного воздуха), и газовое пространство (между соплами первичного и вторичного воздуха). Восстановительная зона характеризуется недостатком кислорода и относительно высокой температурой. Окислительная зона занимает пространство от уровня вторичных сопел до фестонного пучка трубок парового котла. Котлоагрегаты работают с избытком воздуха, равным 1,1...1,2, причем количество первичного воздуха обычно составляет 60...70 % от общего расхода. Воздух подается в топку вентилятором или воздуходувкой, а подогревается либо в воздушном экономайзере, либо в особом паровом калорифере.

Экранные трубы в окислительной зоне, как правило, оставляют открытыми. В восстановительной зоне трубки экрана иногда прикрывают чугунными блоками (блоки Бейли) с нанесенным на их поверхность слоем хромитовой обмазки толщиной около 100 мм или чаще просто слоем обмазки. Хромитовая изоляция хорошо противостоит действию высокой температуры, но в окислительной среде при действии щелочи разлагается. Под топки обязательно экранируется. Вместо наклонного экранированного пода иногда применяют так называемый сливной – горизонтальный, имеющий водяное охлаждение и слив плава на высоте примерно 100 мм. На таком поду имеется застывший слой плава, предохраняющий хромитовую изоляцию от воздействия расплавленных щелочных солей.

Сопла первичного воздуха, как правило, имеют небольшой уклон вниз. Сопла вторичного воздуха горизонтальные. Применяют тангенциально направленные вторичные сопла, создающие в центре печи газовый вихрь, что обеспечивает полное сгорание газообразных продуктов.

Для подачи черного щелока в топку применяются два типа *форсунок*. Первый тип – качающаяся механическая форсунка с отбойным щитком, установленная в центре фронтальной стенки, которая наносит щелок на стенки топочной камеры (система Томлинсона). Второй тип – механические или паровые форсунки, установленные в боковых стенках топки и совершающие колебательные движения только в вертикальной плоскости (система Розенкранца). Они подают щелок непосредственно на под.

Сгущенный щелок перед подачей в топку смешивается с измельченным и просеянным сквозь сито сульфатом. Концентрация сухого вещества

в щелоке при подаче в топку составляет 55...70 %. Более низкую концентрацию допускают агрегаты, в которых сушка щелока ведется на стенках топки. Окончательно упаривается щелок перед подачей в топку в каскадных или скрубберных испарителях.

Для улавливания щелочного уноса используют сухие и мокрые электрофилтры, а для утилизации тепла водяных паров и улавливания из газов сернистых соединений устанавливаются хвостовые скрубберы с глубоким охлаждением газов.

Плав из топки по стальной полой летке, охлаждаемой водой, стекает в *растворитель плава*, представляющий собой закрытый стальной бак цилиндрической формы, снабженный вертикальной рамной мешалкой, вращающейся с частотой 0,5...0,6 рад/с. Днище растворителя иногда делают двойным для предохранения от истирания, а боковые стенки защищают слоем щелочепорного цемента. К верхней крышке растворителя присоединяется трубопровод для вывода в атмосферу газов и паров, выделяющихся при растворении плава. Для глушения треска, возникающего от попадания в щелок расплавленного плава, устанавливают небольшой циркуляционный насос, который непрерывно подает зеленый щелок на струю плава, еще в воздухе разбивая ее и совершенно заглушая треск. Иногда для глушения шума дополнительно подводят пар.



ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ СОДОРЕГЕНЕРАЦИОННЫХ КОТЛОАГРЕГАТОВ

По характеру схемы подготовки щелока и использования тепла дымовых газов СРК можно разделить на несколько типов [6]. На рис. 6 изображена распространенная *схема СРК с газоконтактным (каскадным) испарителем и сухим электрофилтром* для улавливания щелочного уноса из дымовых газов. Сгущенный черный щелок после выпарки, имеющей концентрацию 50...55 % сухого вещества, принимается в расходные баки, откуда подается в бачок-растворитель для уноса под электрофилтрами. Далее щелок циркуляционным насосом прогоняется через бункера для воды под паровым котлом и поступает в ванну каскадного испарителя, где за счет тепла дымовых газов СРК упаривается до концентрации 60...65 % сухого вещества. Из испарителя щелок, обогащенный золой, стекает

в смеситель для смешивания со свежим сульфатом. Смесь щелока с сульфатом подается циркуляционным насосом через паровые трубчатые подогреватели, где нагревается до $110...120^{\circ}\text{C}$, к форсункам топки; избыток щелока возвращается обратно в смесители.

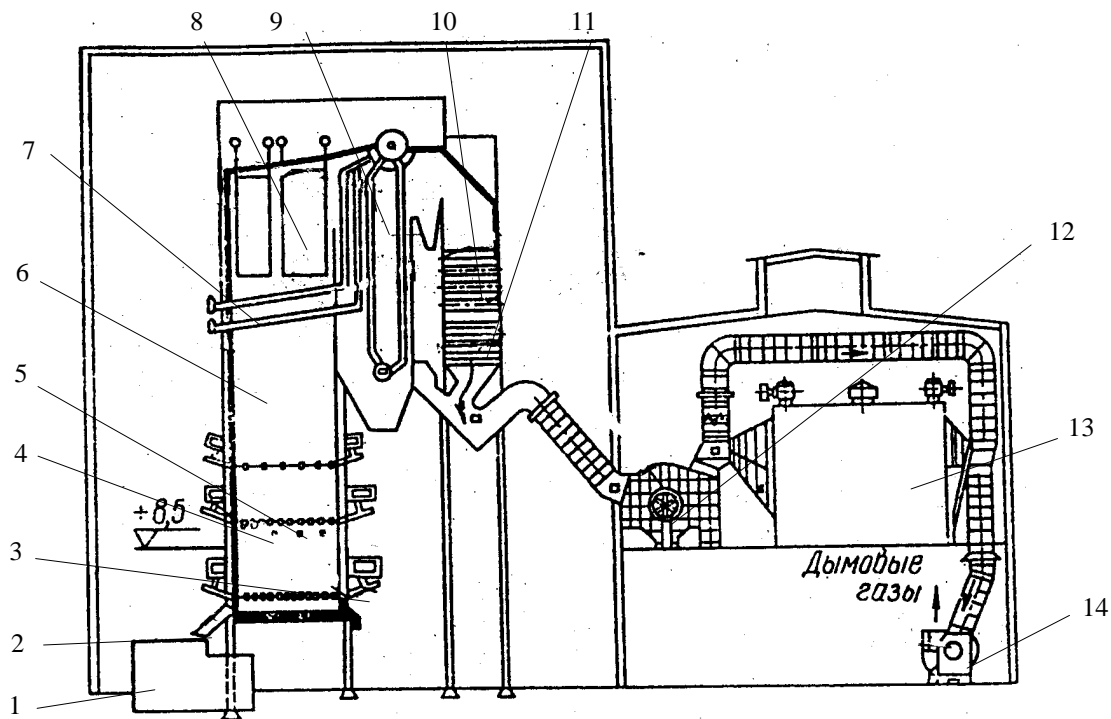


Рис. 6. Схема СРК с газоконтактным (каскадным) испарителем:
 1 – растворитель плава; 2 – летка плава; 3 – сопло первичного воздуха;
 4 – форсунка для щелока; 5 – сопло вторичного воздуха; 6 – топка котлоагрегата; 7 – фестон; 8 – пароперегреватель; 9 – котельный пучок;
 10 – водяной экономайзер; 11 – воздушный экономайзер;
 12 – каскадный испаритель; 13 – электрофильтр; 14 – дымосос

На рис. 7 изображена схема СРК со скруббером Вентури [7]. Эта схема применяется для котлоагрегатов небольшой производственной мощности. Щелок после выпарки с концентрацией 50 % сухого вещества принимается в расходные баки 9 и насосами подается в циклонный каплеуловитель 7 скруббера Вентури 5. Скруббер упаривает щелок до 60 % сухого вещества и улавливает частицы щелочного уноса из дымовых газов. Регулятор уровня 8 регулирует откачку упаренного щелока в смеситель 4, где к щелоку добавляется свежий сульфат. Насосами смесь щелока и сульфата через паровой подогреватель 1 подается к форсункам топки 2 и в зольники парового котла 3. Избыток щелока возвращается вместе с уловленной золой обратно в смеситель 4.

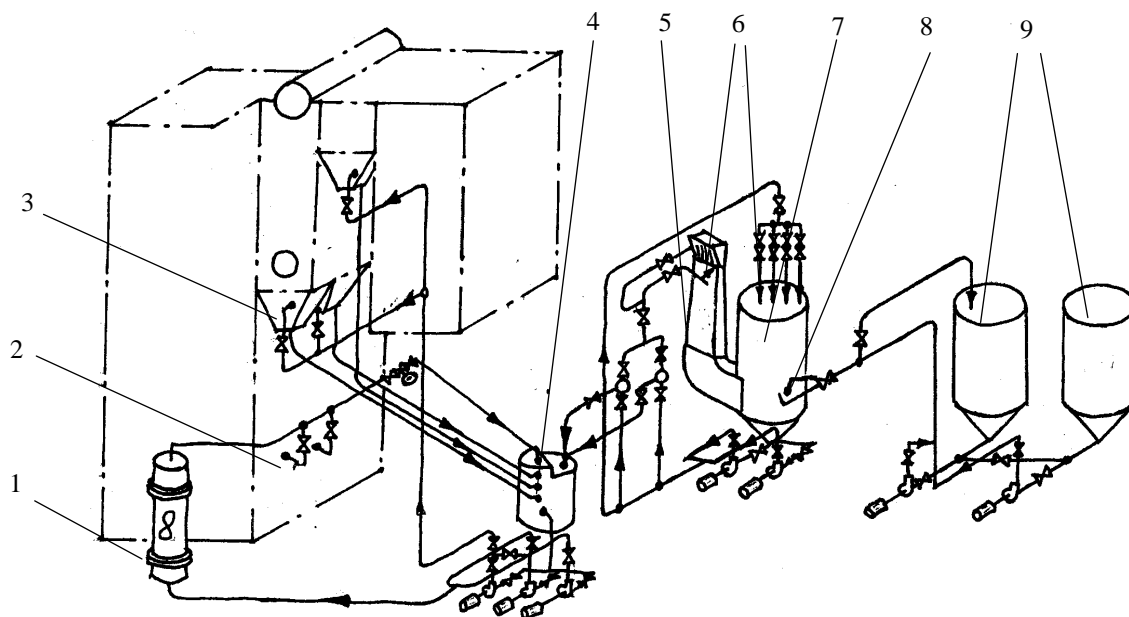


Рис. 7. Схема СРК со скруббером Вентури:

- 1 – паровой подогреватель; 2 – форсунки топки; 3 – зольники парового котла;
 4 – смеситель; 5 – скруббер Вентури; 6 – распылители щелока;
 7 – циклонный каплеуловитель; 8 – регулятор уровня; 9 – расходные баки

Схема СРК с воздухоконтактным каскадным испарителем изображена на рис. 8. Воздух, подаваемый в топку вентиляторами, нагревается дымовыми газами в воздухонагревателе до температуры 250...300 °С и пропускается через каскадный испаритель, где его тепло используется для упаривания черного щелока до концентрации 60...65 % сухого вещества. Одновременно происходит окисление содержащегося в щелоке остаточного сульфида. Недостатком схемы является значительное увлажнение дутьевого воздуха, поступающего в топку. Дымовые же газы после агрегата содержат примерно в 10 раз меньше дурнопахнущих соединений, чем при использовании газоконтактных испарителей.

Схема СРК без испарителей, так называемая шведская схема, показана на рис. 4. В этом случае щелок выпаривается на выпарных станциях до 60...65 % сухого вещества. Дымовые газы после экономайзеров пропускаются через сухой электрофильтр для улавливания щелочного уноса, а для использования вторичного тепла их пропускают через хвостовой

скруббер, где температура газов снижается ниже точки росы и происходит улавливание дурнопахнущих сернистых соединений.

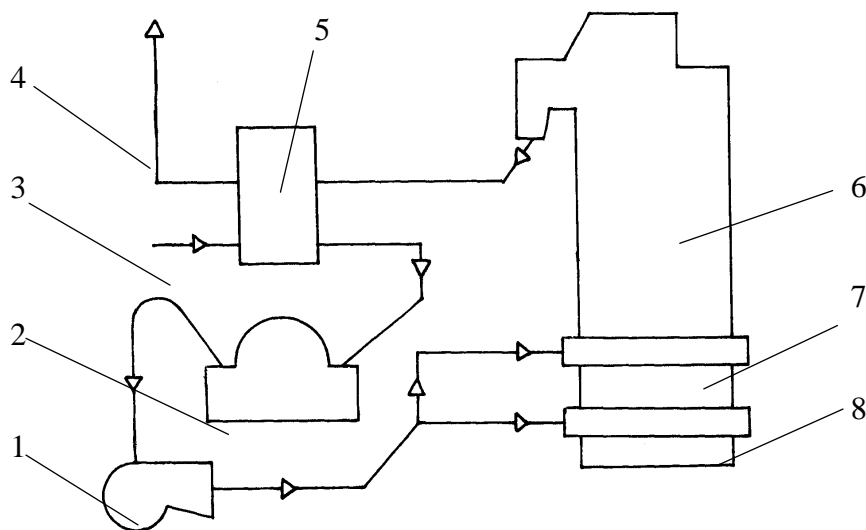


Рис. 8. Схема СРК с воздухоконтактным испарителем:

1 – вентилятор; 2 – воздухоконтактный каскадный испаритель; 3 – подвод свежего воздуха; 4 – отвод газов к электрофильтру; 5 – воздухоподогреватель; 6 – топка; 7 – подвод вторичного воздуха; 8 – подвод первичного воздуха

7

КОНСТРУКЦИИ СОДОРЕГЕНЕРАЦИОННЫХ КОТЛОАГРЕГАТОВ

Конструкции СРК весьма разнообразны [6], однако общепринятой классификации конструкций пока не существует. СРК содержат шесть основных групп оборудования:

- подготовки к сжиганию черного щелока;
- подогрева и подачи воздуха в топку;
- топочной зоны;
- паровой котел;
- охлаждения и очистки дымовых газов;
- растворитель плава.

Оборудование для подготовки к сжиганию черного щелока (рис. 9) применяется для повышения концентрации черного щелока.

Назначение, устройство и типоразмеры оборудования для подготовки черного щелока к сжиганию приведены в работе [4].

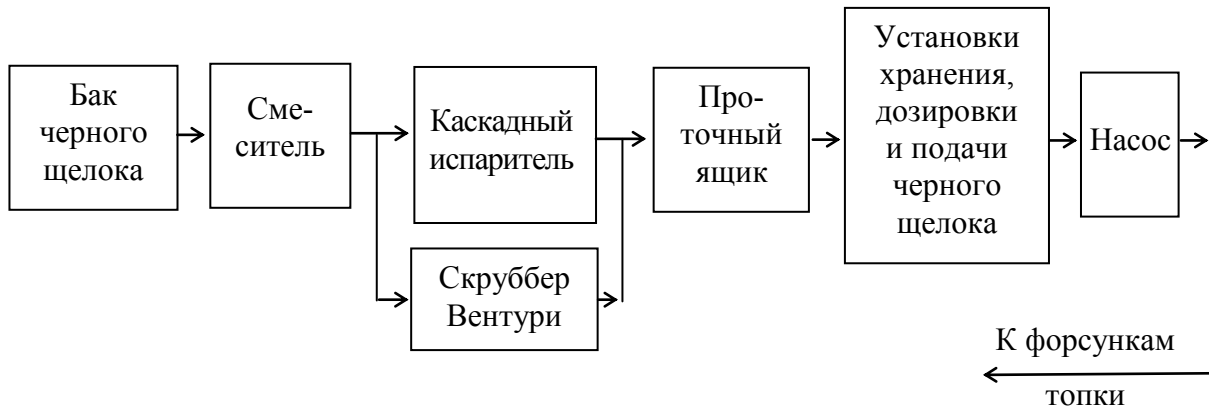


Рис. 9. Функциональная схема оборудования для подготовки черного щелока к сжиганию

Оборудование для подогрева и подачи воздуха в топку содержит вентиляторы, направляющие аппараты, паровые калориферы (воздухоподогреватели), воздухопроводы.

Оборудование топочной зоны содержит форсунки для подачи щелока и мазута, сопла подачи воздуха. Внутри топки смонтированы экранные трубки и защитные плиты. Схема устройства топочной зоны показана на рис. 10, а описание приведено ниже.

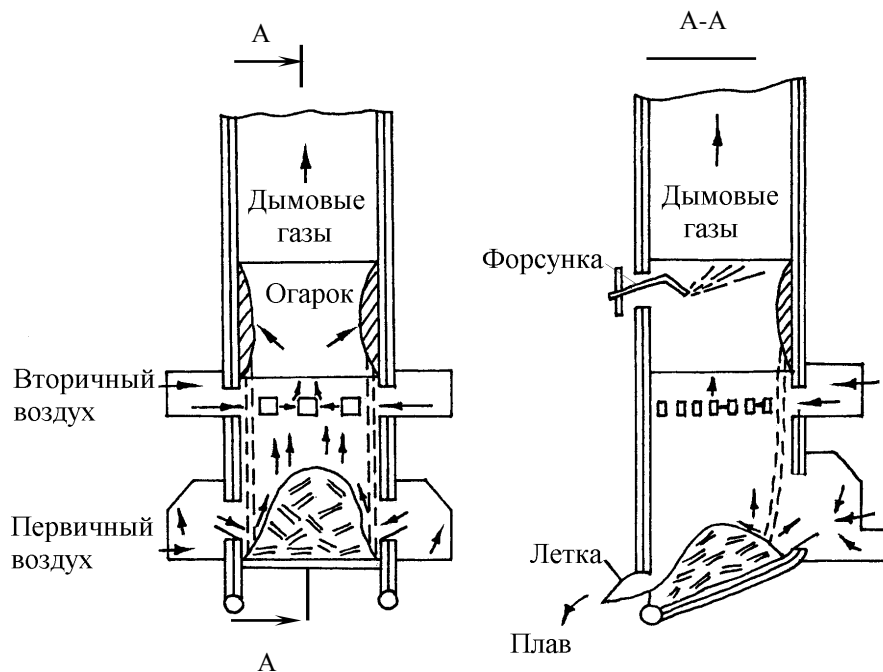


Рис. 10. Схематичный разрез топки агрегата типа БВ

Паровой котел оборудован экраном топки, фестом, конвективным пучком труб, пароперегревателем, барабанами, устройствами для очистки труб, водяным и воздушным экономайзерами.

Оборудование для охлаждения и очистки дымовых газов содержит газоходы, зольники, вентиляторы-дымососы, электрофильтры, дымовые трубы. В эту группу оборудования встроены аппараты для сгущения черного щелока (скруббер Вентури, каскадный испаритель).

Растворитель плава оснащен вертикальным или горизонтальным перемешивающим устройством, устройствами улавливания тепла и уноса химикатов [4].

На рис. 11 показана схема широко распространенного *двухбарабанного СРК типа БВ со скруббером Вентури* для предварительного упаривания щелока. Топка СРК экранирована, задняя ее стенка в верхней части имеет пережимной выступ, а экранированный под наклонен в сторону передней стенки, по середине которой расположена летка для плава. На высоту около 5 м экранные трубки топки прикрыты полыми чугунными блоками или плитками Бейли, навешенными на штыри, приваренные к трубкам.

Выше этой зоны экранные трубки топки открыты и выполнены, как плавниковые. Для подачи щелока на фронтальной стенке на высоте 4 м от пода установлена форсунка системы Томлинсона, которая при помощи кулачкового механизма совершает колебательные движения в вертикальной плоскости и одновременно поворачивается вокруг своей горизонтальной оси на угол $90...120^{\circ}$. К выходному концу форсунки приварена отражательная пластина, ударяясь о которую струя щелока разбивается на крупные капли. Подсыхая в полете, щелок ложится на обе боковые и заднюю стенки топки в виде липкой подушки, занимающей 2...3 м в высоту (см. рис. 10). На стенках щелок высыхает и частично обугливается, превращаясь в сухой пористый огарок, который в виде крупных кусков отваливается от стенок и падает на под, образуя кучу конической формы. Огарок горит за счет первичного воздуха, подаваемого через нижние сопла, расположенные на высоте 750 мм от пода на задней и боковых стенках топки. Сопла вторичного воздуха установлены на тех же стенках на высоте 2 м от пода, а сопла третичного дутья расположены на боковых стенках на высоте 6 м от пода. Через первичные сопла поступают 50...60 % воздуха от общего его расхода, через вторичные 30...40 % и через третичные около 10 %. Воздух в топку подается общим вентилятором, на напорном патрубке которого установлен паровой калорифер, подогревающий воздух до 130°C .

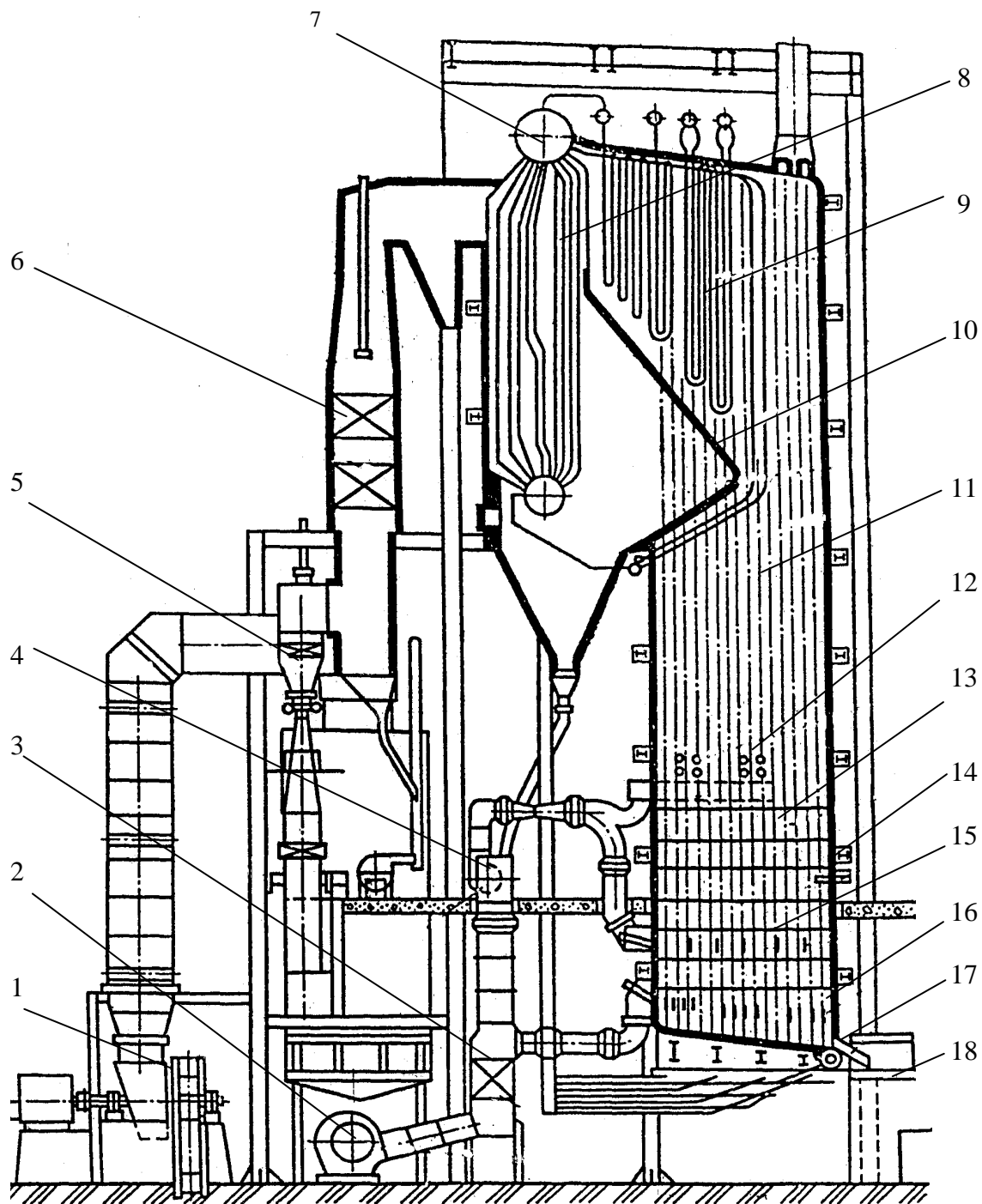


Рис. 11. Схема двухбарабанного СРК типа БВ со скруббером Вентури:
 1 – дымосос; 2 – вентилятор первичного воздуха; 3 – воздухоподогреватель;
 4 – вентилятор вторичного и третичного воздуха; 5 – скруббер Вентури; 6 – экономайзер; 7 – паровой котел; 8 – конвективный пучок;
 9 – пароперегреватель; 10 – фестон; 11 – экран топки; 12 – сопло третичного воздуха; 13 – плитки Бейли; 14 – щелочовая форсунка; 15, 16 – сопла первичного и вторичного воздуха; 17 – летка; 18 – растворитель плава

Для растопки котла и «подсвечивания» в процессе эксплуатации в соплах вторичного воздуха устанавливаются 4...6 форсунок для подачи мазута с воздушным распылением.

Над топкой расположен фестонный пучок трубок парового котла, а за фестонем установлен вертикальный змеевиковый пароперегреватель. Горячие газы дважды проходят вдоль трубок конвективного пучка и с температурой около 350 °С выходят в задний газоход, где установлен водяной экономайзер из ребристых чугунных труб. Трубы экономайзера очищаются стальной дробью, которая высоконапорным вентилятором поднимается обратно в бункер. Для очистки поверхностей нагрева пароперегревателя и конвективного пучка трубок парового котла используются 14 автоматических паровых сажеобдувателей. Зола из зольников вместе с сульфатом примешиваются к черному щелоку перед подачей к форсунке. За экономайзерами установлен скруббер Вентури для упаривания щелока до концентрации 60 % сухого вещества.

На Усть-Илимском ЛПК установлен наиболее крупный СРК типа Парсон-Уитмор с двухбарабанным паровым котлом производительностью по сухому веществу щелока 1600 т/сут, паропроизводительностью 230 т/ч, давлением 4 МПа при перегреве до 440 °С. Котлоагрегат имеет воздухоконтактный сдвоенный каскадный испаритель, который включается в работу только при снижении концентрации черного щелока до 56 %. В этом случае щелок после смывки им золы из зольников направляется в испаритель, где за счет тепла первичного воздуха, нагретого до 240 °С, упаривается до 63 %. Топка сечением 11×11 м снабжена двумя зонами дутья. На всасывающей линии вентилятора первичного воздуха установлен 4-ступенчатый воздухоподогреватель, 2 ступени которого обогреваются питательной водой экономайзера, а остальные – паром давлением 1,2 МПа. При включении в работу воздухоконтактного испарителя первичный воздух пропускается через все четыре ступени подогрева и нагревается до 240 °С; если испаритель не используется, то воздух подогревается в три ступени до 160 °С. Вторичный воздух нагревается в три ступени до 160 °С, после чего подается к тангенциальным соплам. Над топкой расположен фестон поверхностью нагрева 820 м² и 2-ступенчатый пароперегреватель поверхностью 3400 м².

Двухбарабанный паровой котел имеет конвективный пучок поверхностью 5000 м², общая поверхность экранов составляет 2900 м². В заднем газоходе котла расположен 2-ступенчатый горизонтально-трубчатый экономайзер. Газы проходят очистку от щелочной пыли в сухом сдвоенном

трехпольном электрофилт্রে и окончательную очистку в мокром скруббере глубокого охлаждения. Для транспортировки газов за электрофилтром установлены два дымососа с подачей $520 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{ч}$, мощностью 1400 кВт. Расчетный съем плава с 1 м^2 пода топки $150 \text{ кг Na}_2\text{O}/\text{ч}$.

В России разработана документация и производится типовые котлоагрегаты СРК-350, СРК-625, СРК-700 (малая серия) и СРК-1050, СРК-1400, СРК-1750 (большая серия), характеристика которых приведена в табл. 14. Отметим, что российские СРК производительностью свыше 1400 т/сут по сухому веществу еще не изготавливались. Для всех типоразмеров обеих серий конструкция котлоагрегата одинакова (рис. 12).

Типы современных зарубежных СРК приведены в табл. 15.

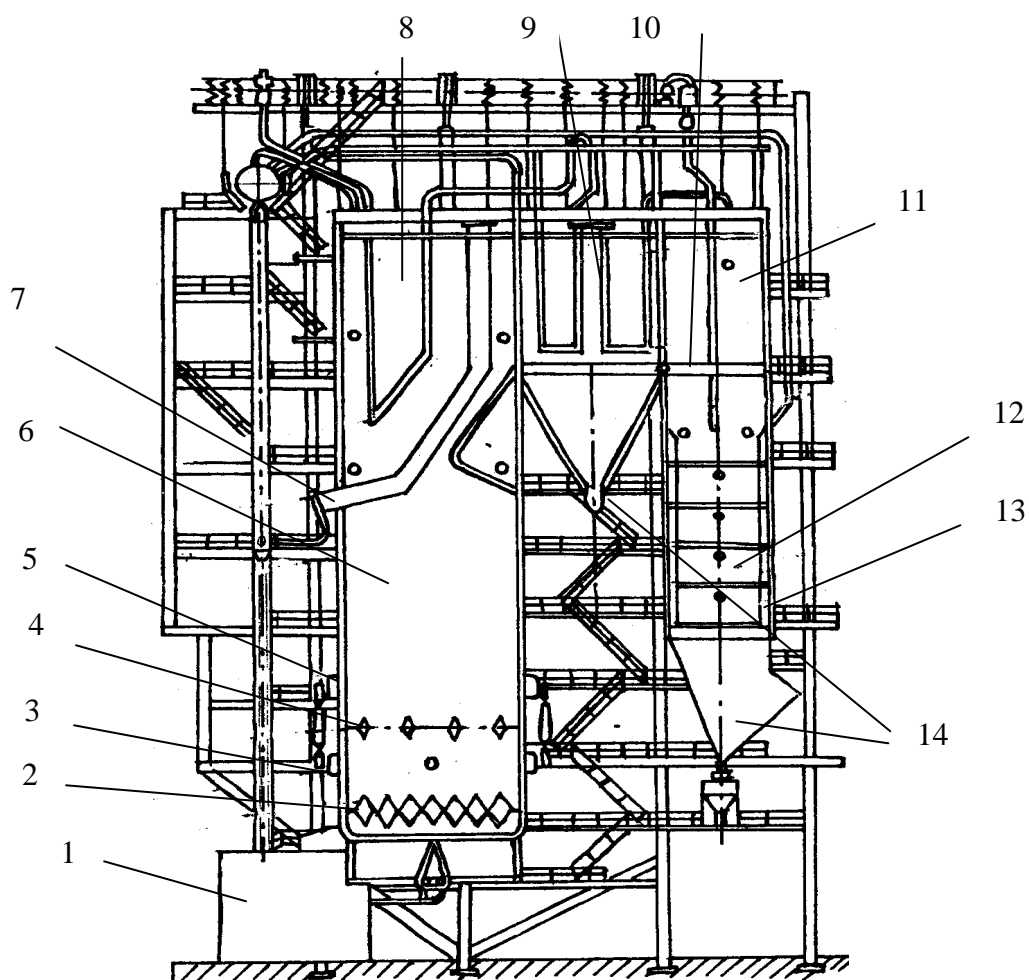


Рис. 12. Типовой СРК с однобарабанным котлом:

1 – растворитель плава; 2 – фурма первичного воздуха; 3 – фурма вторичного воздуха; 4 – щелочная форсунка; 5 – фурма; 6 – топка; 7 – защитный фестон; 8 – пароперегреватель; 9 – переходной газоход; 10 – воздухоподогреватель второй ступени; 11 – водяной экономайзер; 12 – воздухоподогреватель первой ступени; 13 – задняя шахта; 14 – зольники

Характеристика отечественных СРК

Показатели	Тип СРК					
	СРК-350	СРК-625	СРК-700	СРК-1050	СРК-1400	СРК-1750
Производительность по сухому веществу черного щелока, т/сут	350	625	700	1050	1400	1750
Производительность по пару, т/ч	50	95	100	150	200	250
Параметры пара: давление, МПа	4	4	4	4	4	4
температура перегрева, °С	440	440	440	440	440	440
Температура питательной воды, °С	145	145	145	145	145	145
Высота расположения от пода, м: воздушные сопла	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
	3,5	3,5	5,5	5,5	-	-
	7,5	7,5	8,7	8,7	-	-
щелоковые форсунки	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3
Габаритные размеры топки, м: ширина	-	9,024	9,65	-	-	-
высота	15	15	15	20	20,4	20,4
глубина	-	8,54	8,54	-	-	-
Отметка, м: верхняя точка котла	-	35,5	37	-	-	-
под	-	8,5	9,0	9,0	9,0	9,0
площадка обслуживания	3,2	3,6	3,6	-	-	-
Ширина котла по осям колонн, м	-	13,5	13,5	-	-	-
Глубина котла по осям колонн, м	-	16,5	16,5	-	-	-

Типы зарубежных содорегенерационных котлоагрегатов и их краткая характеристика

74

Показатели	Наименование фирмы-изготовителя								
	«Тампелла»				«Альстрем»		«Свенска Машинен Верке»	«Мицубиси»	
Производительность по сухому веществу черного щелока, т/сут	334	540	725	1400	700	290	757	315	780
Производительность по пару, т/ч	56	82	99,2	130-150	102	36	114-120	41	100
Параметры пара:									
давление, МПа	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,6	3,9	4,0
температура перегрева, °С	450	450	450	450	450	400	450	450	450
Температура питательной воды, °С	150	150	150	145	150	105	150	150	145
Высота расположения от пода, м:									
воздушные сопла	1	1	0,8	1	1,1	1,1	1	1	1,1
	4,5	5,4	5,3	7-8	8	8	3	9	8
	7,8	9,2	8,6	-	-	-	5,6	-	-
щелоковые форсунки	3,5	4,6	4,3	-	-	-	5	5	5,3
Отметка, м									
верхняя точка котла	28	34,8	35,9	-	37	-	36	28,7	38,7
под	9,4	9,0	9,6	-	9,3	-	9,0	9,0	9,0
площадка обслуживания	4,3	5,0	5,8	-	4,6	-	5,1	3,0	5,0
Глубина котла по осям колонн, м	14,6	16,4	16,6	-	18,36	-	11,3	14,2	16,4
Глубина топки, м	4,9	6,1	6,39	10,4	7,33	4,83	-	4,5	6,89
Ширина топки, м	7,1	8,02	8,45	10,5	7,33	4,88	-	5,33	7,67
Ширина котла по осям колонн, м	9,3	10,5	10,6	-	10,2	-	5,12	7,8	10,0

Котлоагрегаты оборудованы однобарабанными паровыми котлами с П-образной компоновкой поверхностей нагрева [8]. Топочная камера выполнена из отдельных типовых блоков, число которых увеличивается по мере увеличения производительности СРК. Топка имеет три зоны дутья: первичную, вторичную и третичную. Щелочные форсунки расположены между вторичной и третичной зонами дутья. Мазутные форсунки выполнены в виде тангенциальных сопел во втором ярусе. В шахте за паровым котлом расположены водяной экономайзер из змеевиковых горизонтальных труб и в переходном газоходе первая ступень воздухоподогревателя в виде ширм.

В целлюлозно-бумажной промышленности эксплуатируется большой парк содорегенерационных котлоагрегатов, в том числе импортных. Единичная производительность установленных СРК находится в диапазоне от 140 до 1900 т/сут по а.с.в. щелока. Давление вырабатываемого пара составляет 3,9 МПа, температура 440...450 °С.

Практически все СРК, введенные в эксплуатацию 25...35 лет назад, модернизированы. Установленные в отрасли импортные СРК, за исключением СРК «Альстрем» производительностью 290 т/сут. по а.с.в. щелока, а также отечественные агрегаты первого поколения выполнены по двухбарабанной схеме. Отечественные агрегаты второго поколения СРК-350, СРК-700, СРК-1400 и новые агрегаты СРК-350К, СРК-700К выполнены по однобарабанной схеме.

За рубежом также применяются СРК однобарабанной конструкции, причем не только для давлений 8,5...10 МПа, когда теоретически возможно обойтись без кипяtilьной поверхности, но и для более низких давлений. Распространению СРК однобарабанной конструкции способствует ряд известных преимуществ, связанных с большей надежностью конструкции.

8 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ОБОРУДОВАНИЯ СОДОРЕГЕНЕРАЦИОННОГО ЦЕХА

Для выбора технологического оборудования содорегенерационного цеха необходимо произвести расчеты с целью определения типа конструкции и производительности оборудования с учетом материального и теплового балансов. На основе технологических расчетов оборудования определяются технико-экономические показатели цеха.

8.1. Расчет и выбор теплообменника для подогрева дутьевого воздуха дымовыми газами

Задача расчета – определение поверхности теплообменника и выбор его конструкции. Для определения рабочей поверхности теплообменника необходимо знать расход одного из теплоносителей, его начальную и конечную температуры, а также начальную температуру второго теплоносителя.

Исходные данные (см. тепловой и материальный баланс разд. 3,4):

- масса влажных дымовых газов $M_{\text{ДГВ}} = 7106,05$ кг/т;
- масса влажного воздуха $M_{\text{В}} = Z = 5657,34$ кг/т;
- начальная температура газа $t_{\text{Н}} = 320$ °С;
- конечная температура газа $t_{\text{К}} = 140$ °С;
- начальная температура воздуха $t_{\text{ВП}} = 20$ °С.

Основное уравнение теплового баланса теплообменника

$$Q = G' c' (t_{\text{К}} - t_{\text{Н}}) = G'' c'' (Q_{\text{Н}} - Q_{\text{К}}).$$

Поверхность теплообменника

$$F = \frac{Q}{k \Delta t_{\text{ср}}},$$

где $\Delta t_{\text{ср}} = \frac{(\Delta t_{\text{Н}} - \Delta t_{\text{К}})}{\ln \Delta t_{\text{Н}} / \Delta t_{\text{К}}}.$

Уравнение теплового баланса воздухоподогревателя для приведенного в разд. 3, 4 расчета материального и теплового балансов СРК:

$$Q_{\text{В}} = M_{\text{ДГВ}} C_{\text{ДГВ}} (t_{\text{Н}} - t_{\text{К}}) = M_{\text{В}} C_{\text{ВВ}} (t_2 - t_{\text{ВП}}),$$

где t_2 – конечная температура воздуха, °С;

$C_{\text{ДГВ}}, C_{\text{ВВ}}$ – теплоёмкости влажных дымовых газов и воздуха.

Определение теплоемкости влажных дымовых газов и воздуха

Из общего состава дымовых газов (см. табл. 13) известно содержание следующих компонентов:

- $N_2 = 62,10$ %;
- $CO_2 = 19,49$ %;
- $H_2O = 14,60$ %;
- $O_2 = 2,29$ %.

Газами, присутствующими в малых количествах (H_2S, SO_2, CO), в расчете пренебрегаем. Теплоемкости $C_{N_2}, C_{CO_2}, C_{H_2O}, C_{O_2}$ принимаем по данным табл. 16.

Таблица 16

Теплоемкости для простых веществ и соединений [9]

Вещество	Теплоемкость, C_p , Дж/моль·К	Температурный интервал, К
O ₂ (газ)	29,36	289–3000
N ₂ (газ)	29,10	289–2500
H ₂ (газ)	28,83	298–3000
CO ₂ (газ)	37,14	298–2500
SO ₃ (газ)	50,7	298–1200
CO (газ)	29,13	298–2500
H ₂ S (газ)	34,25	298–1800
H ₂ O (газ)	33,56	298–2500
SO ₂ (газ)	39,90	298–1800
H ₂ O (ж)	73,35	273–373
H ₂ SO ₄ (к)	574,80	298
Na ₂ CO ₃ (к)	590,90	298
NaOH (к)	59,57	298–568
NaCl (к)	53,28	298–1074

Определение теплоемкости для смеси n газов

$$C = \sum_{i=1}^n G_i C_i,$$

где C_i – весовая концентрация i-го компонента смеси;
 G_i – удельная теплоемкость i-го компонента смеси.

Определение средней температуры дымовых газов

$$t_{cp} = \frac{t_H + t_K}{2} = \frac{320 + 140}{2} = 230 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad T_{cp} = 230 + 273 = 503 \text{ К.}$$

В зависимости от процентного состава дымовых газов (см. табл. 13) и величины теплоемкости компонентов газовой смеси (табл. 16) получим:

$$C_{дгв} = C_{N_2} \frac{62,10}{100} + C_{O_2} \frac{2,92}{100} + C_{CO_2} \frac{19,49}{100} + C_{H_2O} \frac{14,16}{100} =$$

$$= 21,9 \cdot 0,621 + 29,36 \cdot 0,029 + 37,14 \cdot 0,19 + 33,56 \cdot 0,15 = 30,88 \text{ Дж/моль} \cdot \text{К.}$$

$$C_{вв} = C_{O_2} \frac{22}{100} + C_{N_2} \frac{77}{100} + C_{H_2O} \frac{1}{100} =$$

$$= 29,36 \cdot 0,22 + 29,1 \cdot 0,77 + 33,56 \cdot 0,01 = 29,19 \text{ Дж/моль} \cdot \text{К.}$$

Расход воздуха на 1 т в.с.ц.

$$M_{вс} = \frac{Z \cdot \Pi_{сут}}{24 \cdot 3600} = \frac{5657,34 \cdot 600}{24 \cdot 3600} = 39,29 \text{ кг/с или } \frac{39,29}{29} = 1,355 \text{ моль/с,}$$

где 29 – молекулярная масса воздуха, у.е.

Расход дымовых газов на 1 т в.с.ц.

$$M_{\text{дс}} = \frac{M_{\text{дгв}} \cdot \Pi_{\text{сут}}}{24 \cdot 3600} = \frac{7106 \cdot 600}{24 \cdot 3600} = 49,35 \text{ кг/с или } \frac{49,35}{30} = 1,645 \text{ моль/с,}$$

где 30 – молекулярная масса дымовых газов, у.е.

Температура подогретого воздуха t_2

$$\begin{aligned} M_{\text{дс}} C_{\text{дгв}} (t_{\text{н}} - t_{\text{к}}) &= M_{\text{вс}} C_{\text{вв}} (t_2 - t_{\text{вп}}) \\ 1,645 \cdot 30,88 (320 - 140) &= 1,355 \cdot 29,19 (t_2 - 20) \\ 9143,568 &= 39,55 t_2 - 791,049 \\ t_2 &= 251,19 \text{ } ^\circ\text{C или } T_2 = 524,19 \text{ К.} \end{aligned}$$

Поверхность теплообменника F

$$F = \frac{Q_{\text{дым}}}{K \Delta t_{\text{ср}}} = \frac{M_{\text{дс}} C_{\text{дгв}} (T_{\text{н}} - T_{\text{к}})}{K \Delta t_{\text{ср}}}, \text{ м}^2$$

где K – коэффициент теплопередачи, зависящий от характера движения теплоносителя. Ориентировочно для отдачи тепла от газа к газу $K = 25 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$ (табл. 17).

Средняя температура $\Delta t_{\text{ср}}$

$$\begin{array}{l|l} \begin{array}{l} \underline{t_{\text{н}}} = 320 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \longrightarrow \underline{t_{\text{к}}} = 140 \text{ } ^\circ\text{C} \\ \underline{t_2} = 251,19 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \longleftarrow \underline{t_{\text{вп}}} = 20 \text{ } ^\circ\text{C} \end{array} & \Delta t_{\text{ср}} = \frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln \frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}}} = \frac{120 - 68,81}{\ln \frac{120}{68,81}} = \\ \hline \underline{\Delta t_{\text{м}}} = 68,81 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad \underline{\Delta t_{\text{б}}} = 120 \text{ } ^\circ\text{C}; & = \frac{51,19}{\ln 1,74} = 92,05 \text{ } ^\circ\text{C.} \end{array}$$

Средняя температура $\Delta t_{\text{ср}} = 92,05 \text{ } ^\circ\text{C}$ или $\Delta T_{\text{ср}} = 365,05 \text{ К}$,

Отсюда $F = \frac{49,35 \cdot 30,88 \cdot 453}{25 \cdot 365,05} = 75,64 \text{ м}^2$.

Таблица 17

Ориентировочные значения коэффициентов теплопередачи

Вид теплообменника	Значения коэффициентов теплопередачи, Вт/м ² ·К
<i>1</i>	<i>2</i>
От газа к газу	10–40
От газа к жидкости или конденсирующемуся пару	10–60
От жидкости к жидкости	200–2000
От конденсирующегося пара к воде	800–3500

1	2
От конденсирующегося пара к органическим жидкостям	200–1000
От конденсирующегося пара к кипящей жидкости	500–3500
От конденсирующегося пара органической жидкости к воде	300–1000

Примечание: 1 кг · м = 9,81 Дж; 1 1 кг · м / с = 9,81 Вт;
1 Вт · ч = 3,6 · 10³ Дж; 1 Дж = 1 Вт.

Тип конструкции теплообменник для подогрева воздуха дымовыми газами выбирается по рабочей поверхности теплообменника, расходу дымовых газов и воздуха, температуре, при этом обязательно предусматривается увеличение поверхности теплообменника в два раза.

8.2. Расчет и выбор подогревателя щелока

Исходные данные (см. тепловой и материальный баланс разд. 3,4):

- количество черного щелока $M_{\text{щц}} = 1893,65$ кг/т;
- начальная температура смеси щелока с сульфатом $t_{\text{н}} = 85$ °С;
- конечная температура смеси щелока с сульфатом $t_{\text{к}} = 100$ °С;
- температура пара $t_{\text{пн}} = 150$ °С;
- давление насыщенного греющего пара $P = 0,5$ МПа.

Уравнение теплового баланса теплообменника

$$Q_{\text{T}} = M_{\text{щц}} C_{\text{см}} (t_{\text{к}} - t_{\text{н}}),$$

где $M_{\text{щц}} = G'_{\text{сж}} + (H_2O)_{\text{щц}} = 672,28 + 1221,28 = 1893,65$ кг/т.

Теплоемкость смеси черного щелока

$$C_{\text{см}} = 2,723 \text{ кДж/кг} \cdot \text{°С} \text{ или } 2723 \text{ кДж/кг} \cdot \text{°С}.$$

Коэффициент теплопередачи от конденсирующегося пара к органическим жидкостям или воде из табл. 17 составит $K = 300$ Вт/м²·К или 300 Дж/м²·К.

Средняя температура Δt_{cp}

$T_{пн} = 150 \text{ }^{\circ}\text{C}$	\longrightarrow	$t_k = 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{\bar{6}} - \Delta t_M}{\ln \frac{\Delta t_{\bar{6}}}{\Delta t_M}} = \frac{50 - 15}{\ln \frac{50}{15}} =$ $= \frac{35}{1,203} = 29,1 \text{ }^{\circ}\text{C}.$
$T_k = 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$	\longleftarrow	$t_H = 85 \text{ }^{\circ}\text{C}$	
$\bar{\Delta t}_{\bar{6}} = 50 \text{ }^{\circ}\text{C};$		$\bar{\Delta t}_M = 15 \text{ }^{\circ}\text{C};$	

Средняя температура в Кельвинах $\Delta T_{cp} = \Delta t_{cp} + T = 29,1 + 273 = 302,1$.

Расход черного щелока

$$M_{щс} = \frac{M_{щц} \cdot \Pi_{сут}}{24 \cdot 3600} = \frac{1893,65 \cdot 600}{24 \cdot 3600} = 13,15 \text{ кг/с}.$$

Тепловой поток

$$Q_{тс} = M_{щс} C_{см} (T_k - T_H) = 13,75 \cdot 2723 (373 - 358) = 537\,111,75 \text{ Дж/с}.$$

Поверхность теплообменника

$$F = \frac{Q_{тс}}{K_T \Delta t_{cp}} = \frac{537\,111,75}{300 \cdot 302,1} = 5,93 \text{ м}^2.$$

Расход пара на подогрев черного щелока на 1 т целлюлозы

$$D_{п} = \frac{Q_T}{i} \text{ кг/т};$$

$$Q_T = \frac{Q_{тс}}{\Pi_{сут}} = \frac{537\,111,75}{\frac{1000 \cdot 600}{24 \cdot 3600}} = 77\,393,623 \text{ кДж/т}.$$

По термодинамическим свойствам воды и водяного пара в состоянии насыщения находим (табл. 18): для пара $P = 0,5 \text{ МПа}$, $t = 150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ энтальпия сухого насыщенного пара h'' составит $2748,5 \text{ кДж/кг}$ [7], тогда расход пара $D_{п}$

$$D_{п} = \frac{77\,393,623}{2748,5} = 28,16 \text{ кг/т};$$

$$D_{пч} = D_{п} \frac{\Pi_{сут}}{24} = 28,16 \frac{600}{24} = 703,99 \text{ кг/ч}.$$

Термодинамические свойства воды и водяного пара
в состоянии насыщения

P, МПа	t, °C	h', энтальпия жидкости	h'', энтальпия сухого насыщенного пара	r = h' + h'', теплота парообра- зования
0,10	99,63	417,51	2675,7	2258,2
0,12	104,81	439,36	2683,8	2244,4
0,14	109,32	458,42	2690,8	2232,4
0,16	113,32	475,38	2696,8	2221,4
0,18	116,93	490,70	2702,1	2211,4
0,20	120,32	504,70	2706,9	2202,2
0,25	127,43	535,40	2717,2	2181,8
0,30	133,54	561,4	2725,5	2164,1
0,35	138,88	584,30	2732,5	2148,2
0,40	143,62	604,70	2738,5	2133,8
0,50	151,85	640,10	2748,5	2108,4
0,80	170,42	720,90	2768,4	2047,5
0,90	175,36	742,60	2773,0	2030,4
1,00	179,88	762,60	2777,0	2014,4
1,50	198,28	844,70	2790,4	1945,7

По результатам проведенных расчетов в качестве подогревателя черного щелока выбираем теплообменник марки 523-20 [4].

8.3. Расчет параметров и выбор электрофильтра

Средняя запыленность дымовых газов перед электрофильтром определяется из материального баланса. Необходимо просуммировать уловленный пылевидный унос в электрофильтрах и безвозвратный пылевидный унос в собственных единицах компонентов минерального уноса [10].

Уловленный пылевидный унос в электрофильтрах

$$(\text{Na}_2\text{O})_{\text{Э Na}_2\text{SO}_4} + (\text{Na}_2\text{O})_{\text{Э Na}_2\text{CO}_3} = (\text{Na}_2\text{O})'_{\text{УЭ}} = 61,45 \text{ кг/т.}$$

Безвозвратный пылевидный унос после электрофильтров

$$(\text{Na}_2\text{O})_{\text{ДЫМ Na}_2\text{SO}_4} + (\text{Na}_2\text{O})_{\text{ДЫМ Na}_2\text{CO}_3} = (\text{Na}_2\text{O})'_{\text{ДЫМ С}} = 4,1 \text{ кг/т.}$$

Суммарное количество пылевидного уноса перед электрофильтрами

$$\Sigma = 61,45 + 4,1 = 65,55 \text{ кг/т.}$$

Запыленность газов до электрофилтра при объеме влажных газов (см. табл. 13) $V_{\text{дв}} = 5706,68 \text{ м}^3/\text{т}$

$$C_{\text{зап}} = \frac{65,55 \cdot 1000}{5706,68} = 11,49 \text{ г/м}^3;$$

после электрофилтра $C_{\text{O}_2} = \frac{4,1 \cdot 1000}{5706,68} = 0,72 \text{ г/м}^3$.

$$\text{Степень улавливания } 100 - \frac{0,72 \cdot 100}{11,49} = 93,73 \%$$

Степень очистки является удовлетворительной, так как промышленные электрофилтры способны улавливать пыль на 93...97 %.

Площадь активного сечения электрофилтра

$$\omega = \frac{Q_v}{Z U}, \text{ м}^2,$$

где Q_v – объемный расход газов, $\text{м}^3/\text{с}$,

$$Q_v = \frac{V_{\text{дв}} \Pi_{\text{сут}}}{24 \cdot 3600} = \frac{5706,68 \cdot 600}{24 \cdot 3600} = 39,63 \text{ м}^3/\text{с};$$

Z – число параллельно включенных корпусов (обычно $Z = 1 \dots 2$ по числу дымососов);

U – скорость газа в активном сечении ($U = 1,0 \dots 1,5 \text{ м/с}$).

Площадь активного сечения

двух дымососов $\omega_1 = \frac{39,63}{2 \cdot 1,3} = 15,24 \text{ м}^2;$

одного дымососа $\omega_2 = \frac{39,63}{1 \cdot 1,3} = 30,48 \text{ м}^2$.

По ω_1 или ω_2 подбираем активное сечение и высоту электрофилтра [8]. Выбираем электрофилтр марки УГ-2-3-74. Потребляемая мощность 224 кВт, в том числе полей электрофилтра 168 кВт. Длина корпуса 14,1 м, длина аппарата 13,98 м, число бункеров по ширине 2.

8.4. Расчет и выбор скруббера для улавливания уноса и утилизации тепла дымовых газов после электрофилтра

Эффективность очистки зависит от скорости газа, его запыленности и физических характеристик. При установке скруббера типа Вентури скорость газа в сужении составляет 10...30 м/с, давление жидкости на spraysках 0,6...1,0 МПа, расход жидкости на орошение 0,8...1,8 л/м³ газа [8].

Определение активной площади сечения аппарата

$$\omega = \frac{Q}{UZ},$$

где U – скорость газа, отнесенная к площади поперечного сечения циклона, м/с ($U = 4,5$ м/с);

Z – число батарейных циклонов на один котел ($Z = 1$);

$Q = V_{дс}$ – количество газов в секунду.

$$V_{дс} = \frac{V_{дв} \cdot \Pi_{сут}}{24 \cdot 3600} = \frac{5706,68 \cdot 600}{24 \cdot 3600} = 39,63 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Площадь активного сечения скруббера для данного примера расчета

$$\omega = \frac{Q_{дс}}{UZ} = \frac{39,63}{4,5 \cdot 1} = 8,81 \text{ м}^2, \text{ диаметр скруббера } 3,35 \text{ м}.$$

По площади активного сечения выбираем типоразмеры скруббера и золоуловителя по табл. 19, 20 и [8].

Таблица 19

Типоразмеры золоуловителей МВ-УО ОРГРЭС

Золоуловитель					Горловина трубы Вентури	
Диаметр, м	Высота, м	Площадь активного сечения, м ²	Размеры входного патрубка, м	Сечение входного патрубка, м ²	Диаметр, м	Площадь сечения, м ²
2	8,02	2,83	1,17×0,58	0,679	0,45-0,6	0,159-0,283
2,5	9,93	4,52	1,34×0,67	0,898	0,55-0,65	0,237-0,332
3	11,83	6,6	1,61×0,80	1,29	0,65-0,8	0,332-0,502
3,5	13,58	9,07	1,88×0,94	1,767	0,75-0,95	0,441-0,709
4	15,58	11,94	2,15×1,07	2,3	0,85-1,0	0,567-0,785
4,5	17,48	15,9	2,44×1,22	2,976	0,95-1,2	0,709-1,13
5	19,33	18,84	2,68×1,34	3,591	1,1-1,3	0,95-1,33

Таблица 20

Типоразмеры центробежных скрубберов ЦС-ВТИ

Наружный диаметр, м	Высота, м	Площадь активного сечения, м ²	Коэффициент гидравлического сопротивления
0,6	3,83	0,204	46,5
0,7	4,31	0,292	42,8
0,8	4,79	0,396	40,3
0,9	5,27	0,515	38,6

Наружный диаметр, м	Высота, м	Площадь активного сечения, м ²	Коэффициент гидравлического сопротивления
1,0	5,75	0,65	37,3
1,1	6,23	0,8	36,6
1,2	6,71	0,967	35,8
1,3	7,16	1,15	35,2
1,4	7,67	1,35	34,7
1,5	8,15	1,56	34,1
1,6	8,63	1,79	33,8
1,7	9,11	2,03	33,5

Определение расхода воды на орошение скруббера

$$Q_{\text{ж}} = 0,45D = 0,45 \cdot 3,5 = 1,575 \text{ кг/с},$$

где D – диаметр скруббера (для данного примера расчета $D = 3,5$ м).

8.5. Расчет и выбор дымососов и вентиляторов

Из рассчитанного материального баланса и табл. 12 количество дымовых газов на 1 т в.с.ц. $V_{\text{дв}} = 5706,68 \text{ нм}^3/\text{т}$ или $M_{\text{дв}} = 7106,05 \text{ кг/т}$.

Часовой объем газов

$$V_{\text{дв ч}} = V_{\text{дв}} \frac{\Pi_{\text{сут}}}{24} = 5706,68 \frac{600}{24} = 142667 \text{ нм}^3/\text{т}.$$

Плотность газов

$$\rho_{\text{дв}} = \frac{M_{\text{дв}}}{V_{\text{дв}}} = \frac{7106,05}{5706,68} = 1,245 \text{ кг/м}^3.$$

Напор дымососов обычно составляет около 0,035 МПа. По рассчитанной часовой производительности и напору выбирают дымососы или вентиляторы для обслуживания СРК. Выбираем три дымососа марки РГН-1200, $N = 14$ кВт (два дымососа рабочих, один резервный).

8.6. Расчет и выбор растворителя плава

Из рассчитанного материального баланса известно количество плава, вырабатываемое СРК на 1 т в.с.ц.:

$$(\text{Na}_2\text{O})_{\text{пл}} = 250,05 \text{ кг/т или } (\text{Na}_2\text{O})_{\text{плс}} = 405,27 \text{ кг/т}.$$

Концентрация зеленого щелока в растворителе плава должна быть в пределах 110...140 кг/ м³ ед. Na₂O, следовательно, объем зеленого щелока на 1 т целлюлозы, исходя из концентрации общей щелочи в белом щелоке (см. табл. 8) в ед. Na₂O

$$C_{0\text{Na}_2\text{O}} = 146,84 \text{ кг/м}^3;$$

$$V_{\text{зщ}} = \frac{(\text{Na}_2\text{O})_{\text{пл}}}{C_{0\text{Na}_2\text{O}}} = \frac{250,05}{146,84} = 1,7 \text{ м}^3/\text{т}.$$

Часовая производительность по зеленому щелоку

$$V_{\text{зщ ч}} = V_{\text{зщ}} \frac{\Pi_{\text{сут}}}{24} = 1,7 \frac{600}{24} = 42,5 \text{ или } 50 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Выбираем растворитель плава [4] типа 204-65 со следующей характеристикой:

- производительность по зеленому щелоку 100...140 м³/ч;
- мощность установленных электродвигателей 2...7,5 кВт;
- габаритные размеры: длина 10 м; ширина 5,82 м; высота 6,51 м.

Необходимо предусмотреть улавливание парогазов, выделяемых из растворителя плава в целях охраны окружающей среды, экономии щелочи и сульфата натрия.

8.7. Расчет и выбор бака-осветлителя для хранения и освещения зеленого щелока

Степень заполнения бака $\psi = 0,8$. Минимальный запас щелока $\tau = 24$ ч. Обычно создают трехсуточный запас зеленого щелока.

Объем бака при суточном запасе

$$V_{\text{бз}} = \frac{V_{\text{зщ}} \Pi_{\text{сут}}}{0,8} = \frac{2 \cdot 600}{0,8} = 1500 \text{ м}^3/\text{сут}.$$

Выбираем однокамерный осветлитель 292-58.01 [4]:

- диаметр корпуса 23 м; высота зоны освещения 3,5 м;
- площадь освещения 415 м²;
- объем зоны хранения 2000 м³;
- мощность привода механизма вращения 5,5 кВт;
- механизма подъема 4,0 кВт.

Для создания трехсуточного запаса зеленого щелока необходимо установить три однокамерных бака-осветлителя.

8.8. Расчет и выбор бака для хранения упаренного черного щелока

Баки, оснащенные вертикальным перемешивающим устройством и змеевиковым подогревателем, рассчитываем и выбираем по источнику [4]. Как правило, устанавливают два бака, один из которых расходный, другой предназначен для опорожнения оборудования и трубопроводов.

Выбираем бак марки 206-1 с параметрами:

- объем, м³:
 - полный 90;
 - рабочий 68;
- рабочее давление гидростатическое;
- температура щелока 85...95 °С;
- частота вращения перемешивающего устройства 32 об/мин;
- мощность электродвигателя 10 кВт;
- площадь поверхности нагрева змеевика 9 м²;
- давление греющего пара 0,5...1,3 МПа;
- габаритные размеры: длина 5,7 м; ширина 5,6 м; высота 6,74 м;
- масса 9,45 т.

8.9. Расчет и выбор установки для хранения, дозирования и подачи сульфата натрия

Запас сульфата создают на 1...3 суток. Расход сульфата на 1 т целлюлозы из баланса щелочи составляет $N'_1 = 46,65$ кг/т.

Плотность сульфата $\gamma = 2670...2690$ кг/м³. Степень заполнения бункера $\psi = 0,7$. При запасе сульфата на $\tau = 1$ сутки работы объем сульфата

$$V_c = \frac{N'_1 \cdot \Pi_{\text{сут}} \tau}{\gamma \psi} = \frac{46,65 \cdot 600}{2670 \cdot 0,7} = 14,97 \text{ м}^3.$$

По методике [4] выбираем установку 292-62 с технической характеристикой:

- производительность до 3,8 м³/ч;
- запас сульфата в бункере 21 м³;
- расход черного щелока 35...70 т/ч;
- влажность черного щелока 33...35%;
- объем смесителя сульфата 7 м³;
- габаритные размеры: длина 8,98 м; ширина 3,77 м; высота 13,5 м.
- установленная мощность 7,2 кВт
 - смесителя 5,5 кВт,
 - питателя 1 кВт;
 - виброактиватора 0,7 кВт.

8.10. Расчет мощности электродвигателей насосов

Насос для подачи черного упаренного щелока

Масса черного щелока, кг

$$M_{\text{чщ}} = G'_{\text{сж}} + (H_2O)_{\text{чщ}} = 1221,37 + 672,28 = 1893,65 \text{ кг / т.}$$

Часовой расход черного щелока

$$M_{\text{чщч}} = M_{\text{чщ}} \frac{\Pi_{\text{сут}}}{24} = \frac{1893,65 \cdot 600}{24} = 47\,341,25 \text{ кг/ч.}$$

Примем напор насоса для очень вязкой жидкости $H = 40$ м вод. ст. и коэффициент полезного действия $\eta = 0,5$, тогда мощность насоса составит

$$N_{\text{чщ}} = \frac{M_{\text{чщч}} H}{3600 \cdot 102 \eta} = \frac{47\,341,25 \cdot 40}{3600 \cdot 102 \cdot 0,5} = 10,31 \text{ кВт.}$$

По рассчитанным данным производительности, напору и мощности выбираем насос марки 4ХА-3К-I-II с технической характеристикой:

- расход щелока 45,4 м³/ч;
- напор 54 м вод. ст.;
- число оборотов 1460 об/мин;
- мощность установочная 28 кВт.

Устанавливается два насоса (один рабочий, второй резервный).

Насос для транспортировки зеленого щелока

Часовой расход зеленого щелока

$$N_{\text{чщ}} = \frac{\left[\frac{(Na_2O)_{\text{пл}} \cdot \Pi_{\text{сут}}}{C_{0 Na_2O} \cdot 24} \right]}{\gamma_{\text{зщ}}} = \frac{\frac{250,05 \cdot 600}{146,84 \cdot 24}}{1,138} = 37,41 \text{ или } 37410 \text{ кг / ч,}$$

где $C_{0 Na_2O} = 148,84$ г/л;

$\gamma_{\text{зщ}} = 1,138$ т/м³ [3] при 90⁰С.

Требуется учитывать потери напора в трубопроводе. Необходимый напор насоса примем для расчета $H = 30$ м вод. ст., а коэффициент полезного действия $\eta = 0,6$, тогда

$$N_{\text{зщ}} = \frac{M_{\text{зщ}} H}{3600 \cdot 102 \eta} = \frac{37\,410 \cdot 30}{3600 \cdot 102 \cdot 0,6} = 5,09 \text{ кВт.}$$

По результатам выбираем насос из кислотоупорной стали марки 4Х-12 с техническими характеристиками:

- напор 30...40 м;
- производительность 65...108 м³/ч;
- мощность 20 кВт.

Устанавливаем два насоса (один рабочий, один резервный).

Насос для циркуляции зеленого щелока в растворителе плава

Циркуляционные насосы рассчитывают на производительность, составляющую 1/3 от производительности транспортирующего насоса зеленого щелока, следовательно, мощность двигателя для привода насоса при $H = 10$ м составит

$$N_{цз} = \frac{M_{щ}H}{3 \cdot 3600 \cdot 102\eta} = \frac{37\,410 \cdot 10}{3 \cdot 3600 \cdot 102 \cdot 0,6} = 0,57 \text{ кВт.}$$

Выбираем насос из кислотоупорной стали марки 2Х-9 с техническими характеристиками:

- производительность 14...32 м³/ч;
- напор 13...20 м;
- установочная мощность 2,8...4,5 кВт.

Устанавливаем три насоса (два рабочих, один запасной).

Насос для транспортировки слабого белого щелока в растворитель плава. Устанавливаем насос, аналогичный насосу для транспортировки зеленого щелока. Следовательно, расчетная мощность насоса 5,09 кВт, а установочная 20 кВт.

Суммарная мощность электродвигателей основного оборудования цеха представлена в табл. 21.

Таблица 21

Определение удельного расхода электроэнергии

Оборудование	Мощность электродвигателя, кВт	Кол-во единиц, шт.	Время работы, ч	Расход электроэнергии, кВт·ч
Электрофильтр	224	1	24	5376
Дымососы и вентиляторы	14	2	24	672
Растворитель плава	7,2	2	24	360
Бак-осветлитель зеленого щелока	5,5	1	24	228
Бак для хранения упаренного черного щелока	10	1	24	240
Установка для хранения, дозирования и подачи сульфата натрия	7,2	1	24	173
Насос для подачи упаренного черного щелока	28	1	24	672

Оборудование	Мощность электродвигателя, кВт	Кол-во единиц, шт.	Время работы, ч	Расход электроэнергии, кВт·ч
Насос для транспортировки зеленого щелока	20	1	24	480
Насос для подачи слабого щелока в растворитель плава	20	1	24	480
Насос для циркуляции зеленого щелока	4,5	2	24	216
ИТОГО $\Sigma_{эл}$	-	-	-	8897

Удельный расход электроэнергии рассчитываем по формуле

$$\mathcal{E}_{уд} = \frac{\Sigma_{эл}}{П_{сут}} = \frac{8897}{535} = 16,63 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т.}$$

8.11. Техничко-экономические показатели цеха

1. Расход сульфата технического $N'_1 = 46,65 \text{ кг/т.}$
2. Выработка плава $(Na_2O)_{пл} = 250,05 \text{ кг/т.}$
3. Выработка пара ($t = 450^0\text{C}$; $P = 6 \text{ МПа}$) $D'_{пар} = 4,074 \text{ т/т.}$
4. Расход электроэнергии $\mathcal{E}_{уд} = 16,63 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т.}$



ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ И ОБСЛУЖИВАНИЕ СОДОРЕГЕНЕРАЦИОННЫХ КОТЛОАГРЕГАТОВ

Производственно-технический контроль предназначен для обеспечения технологического регламента работы СРК в периоды пуска, поддержания заданной производительности и останова. Производственный контроль осуществляется встроенными в оборудование контрольно-измерительными приборами.

Производственно-технический контроль заключается в регулировании следующих параметров:

- уровень черного щелока;
- температура и давление черного щелока;
- питание парового котла водой;
- процесс горения;
- температура перегретого пара;

- плотность черного щелока;
- поступление воды на охлаждение леток;
- плотность и уровня щелока в растворителе плава.

Контроль за работой СРК сходен с контролем работы энергетических котельных установок. Общая схема расположения контрольных и регулирующих приборов для автоматического управления работой СРК [2] показана на рис. 13.

Регулирование уровня черного щелока. Уровень щелока измеряется мембранным манометром. На одну сторону мембраны манометра давит столб щелока, на другую сторону – давление воздуха от компрессора. Воздух при постоянном давлении проходит через воздушную часть манометра. При нормальном уровне щелока мембрана находится в среднем положении. Мембрана перемещается при изменении давления щелока, увеличивая или уменьшая проход для воздуха, что пропорционально меняет давление в воздушной полости, соединенной с дифференциальным манометром. Дифференциальный манометр управляет положением клапана на трубопроводе, подводящим щелок к баку.

Регулирование температуры и давления черного щелока. Температура щелока перед форсунками измеряется термоэлементом. Заданная температура щелока автоматически поддерживается при помощи подачи импульса на исполнительный механизм клапанов, регулирующих поступление пара в подогреватель щелока.

Давление щелока перед форсунками измеряется манометром с разделительной мембраной, которая при отклонении давления подает импульс на клапан рециркуляции щелока в смеситель сульфата.

Регулирование питания парового котла водой. Паровой котел оборудован трехимпульсным регулятором питания, который действует в зависимости от изменения уровня воды, расхода пара и воды. Основным является импульс, возникающий при изменении уровня воды. Импульсы изменения расхода пара и воды суммируются с основным импульсом. Возникший сигнал после усиления поступает в исполнительный механизм, регулирующий подачу воды в паровой котел.

Регулирование процесса горения. Устройство для регулирования процесса горения в топке состоит из приборов, управляющих расходом воздуха и его распределением между зонами горения, а также разрежением в топке в зависимости от расхода щелока. Для корректировки расхода воздуха используется импульс от магнитного кислородомера, определяющего содержание остаточного кислорода в газах перед экономайзером.

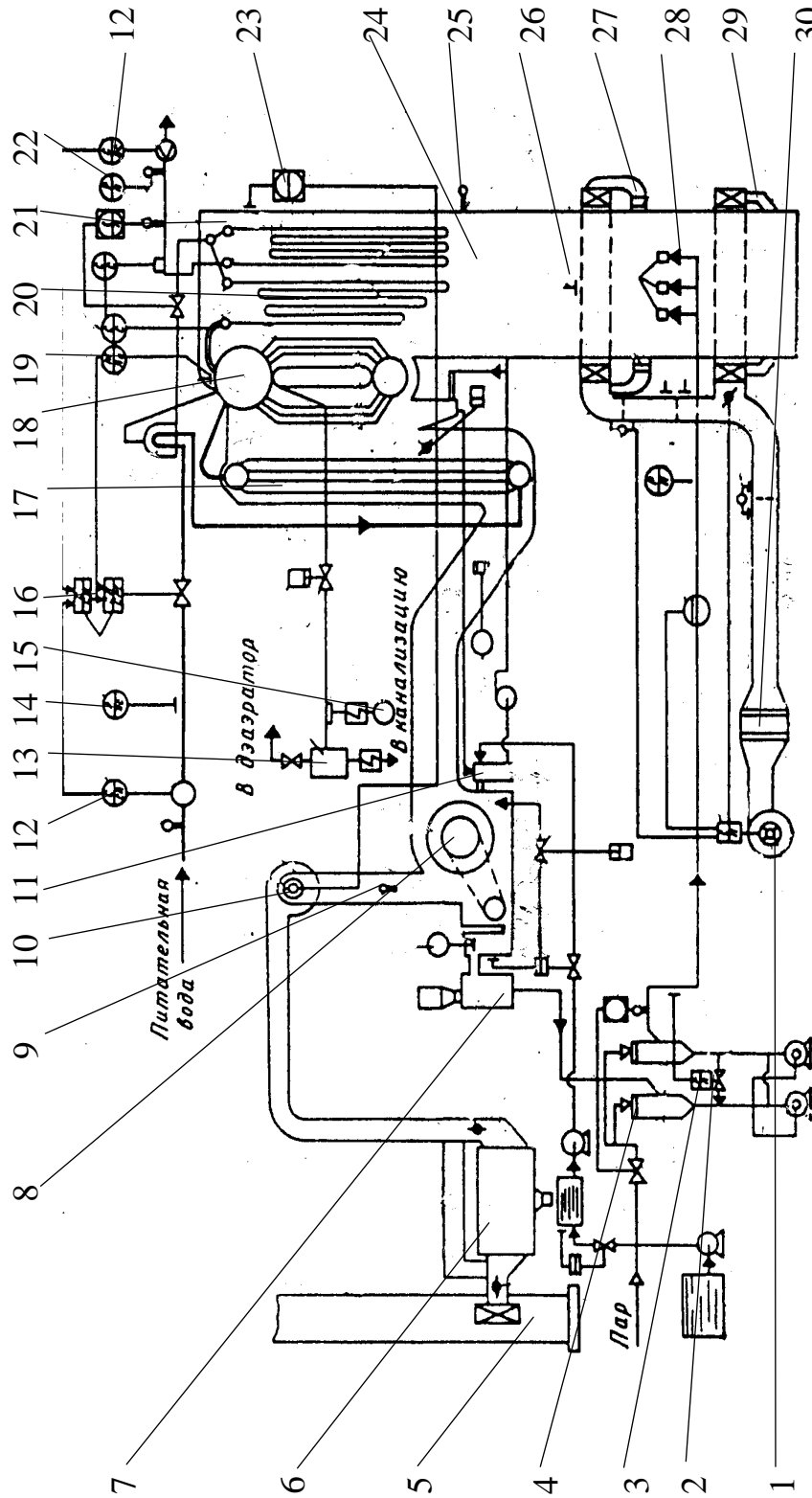


Рис. 13. Схема контроля и регулирования СРК:

1 – вентилятор; 2 – регулятор давления щелока; 3 – регулирующие клапаны; 4 – подогреватель щелока; 5 – дымовая труба; 6 – электрофильтр; 7 – смеситель щелока с сульфатом; 8 – каскадный испаритель; 9 – датчики температуры; 10 – дымосос; 11 – смеситель щелока с золой; 12 – расходомер; 13 – датчики расхода пара и воды; 14 – манометр; 15 – измеритель концентрации; 16 – трехимпульсный регулятор питателя парового котла; 17 – экономайзер; 18 – паровой котел; 19 – указатель уровня; 20 – пароперегреватель; 21 – регулятор перегрева пара; 22 – регулятор давления; 23 – регулятор тяги; 24 – топка; 25 – датчик температуры; 26 – тягомер; 27 – сопла вторичного воздуха; 28 – форсунка; 29 – сопла первичного воздуха; 30 – калорифер

Регулирование температуры перегретого пара. Регулирование основано на измерении температуры и передаче сигнала на исполнительный механизм, который регулирует количество пара и конденсата, поступающих в смешивающий пароохладитель.

Регулирование плотности черного щелока. Содержание в щелоке сухих веществ зависит от температуры дымовых газов, поступающих на каскадный испаритель. Температура дымовых газов регулируется пневматическими исполнительными механизмами, регулирующими положение шиберов на линии для перепуска дымовых газов в обход экономайзера.

Регулирование поступления воды на охлаждение леток. Для охлаждения леток применяется химически очищенная деаэрированная вода из напорного бака. Уровень в напорном баке и подача воды на восполнение потерь регулируются по импульсу от датчика уровня. Импульс воздействует на клапаны, установленные на трубопроводе воды.

Регулирование плотности и уровня щелока в растворителе плава. Регулирование основано на измерении гидростатического давления жидкости в двух местах на разной высоте растворителя плава. Импульс разности давлений, измеренный дифференциальным манометром, поступает в суммирующий регулятор, который связан с показаниями термометра сопротивления, измеряющего температуру щелока. Сигналы суммируются и поступают в преобразователь, где электрический сигнал преобразуется в механический. Механический сигнал после усиления воздействует на положение клапана трубопровода, подводящего щелок в растворитель плава.

СРК обслуживает бригада, состоящая из содовщика-кочегара, подручного содовщика и водосмотра.

Обязанностью содовщика-кочегара является наблюдение за работой агрегата: регулирование подачи щелочи и воздуха в топку, наблюдение за процессом горения в топке и выходом плава, а также регулирование тяги.

Содовщик руководствуется визуальными наблюдениями и показаниями приборов. Основной обязанностью подручного содовщика является заливка растворителей и откачка из растворителей зеленого щелока. Кроме того, подручный наблюдает за работой вспомогательного оборудования, расположенного на первом этаже: насосов для щелоков, воздуходувок, вентиляторов, компрессоров и т.д.

Водосмотр наблюдает за уровнем воды в барабанах парового котла и за подачей питательной воды, следит за показаниями приборов,

регистрирующих параметры и расход пара, и периодически продувает паровой котел.

Обдувку трубок парового котла от заноса пылью производит один-два раза в смену содовщик или, при большом числе агрегатов, рабочий-обдувщик. При наличии электрофильтров для улавливания уноса за их работой наблюдает монтер-электрик. При подаче сульфата и уборке уноса золы заняты один-два разнорабочих.

Персонал должен знать правила взрывобезопасной эксплуатации котлоагрегатов.

Пуск и останов агрегатов совершаются в строгом порядке по особым инструкциям. Агрегаты разжигаются с помощью мазутных форсунок, пуск их в ход занимает несколько часов.

10 НЕПОЛАДКИ В РАБОТЕ СОДОРЕГЕНЕРАЦИОННОГО КОТЛОАГРЕГАТА И СПОСОБЫ ИХ УСТРАНЕНИЯ

Забивание сопел первичного воздуха. Прекращение подачи воздуха в реакционную зону нарушает процесс горения щелока и регенерации химикатов. Сопла первичного воздуха нужно очистить специальной шуровкой. В случае забивания большого числа сопел необходимо наряду с ручной очисткой включить в этой зоне мазутную форсунку для восстановления нормального горения подушки огарка.

Частичное или полное прекращение горения на поде топки. Это нарушение режима вызывается чрезмерно плотным распылением или низкой температурой подаваемого на сжигание щелока, колебаниями давления в щелокопроводах, а также повышением влажности и содержания минеральной части щелока. Ухудшение горения также может наступить в результате недостаточности подачи первичного воздуха или вследствие превышения содержания сульфата в черном щелоке. Следствием ухудшения горения является почернение поверхности огарка. При значительном почернении огарка снижают подачу щелока и включают мазутные форсунки, доводят температуру до 110...115 °С, а в случаях надобности временно прекращают подачу сульфата. При незначительном почернении огарка усиливают дутье.

Прекращение подачи черного щелока. Причинами прекращения поступления черного щелока являются забивание щелоковых форсунок кусками нерастворившегося сульфата (следует прекратить подачу щелока и продуть щелоковую форсунку паром. Если эта мера не дает результата, форсунку заменяют), забивание насосов черного щелока и щелокопроводов (рабочий насос и щелокопроводы немедленно, пока в них не застыл щелок, продувают паром).

Застывание плава в летке. Оно вызывается низкой температурой охлаждающей воды, неравномерным распределением огарка на поде топки или смещением подушки огарка, что также может вызвать закупорку леток плава. Для устранения застывания плава в летке нужно включить мазутные форсунки, расположенные около от засоренной летки, прочистить летку ручной шуровкой. После очистки летки возможен выход плава сильной струей. Попадание сильной струи плава в растворитель может вызвать выброс зеленого щелока или даже взрыв.

Накопление плава и огарка на стенках топки. Попадающий на стенки топки щелок может образовать большие глыбы огарка. Обрушение огарка на под может вызвать разбрызгивание плава. Брызги плава ухудшают горение и восстановление сульфата, а также могут засорить сопла первичного воздуха. Для предотвращения скопления огарка на стенках топки следует отрегулировать углы поворота щелоковых форсунок и периодически сбивать образующиеся глыбы огарка со стенок.

Нарушение плотности леток. Летки повреждаются при отчистке. В летках из-за термических напряжений в металле образуются трещины. Летки перегорают при отложении накипи из охлаждающей воды. При нарушении плотности одной из леток необходимо во избежание взрыва прекратить подачу охлаждающей воды и закрыть асбестовой пробкой отверстие для выхода плава. После освобождения топки от плава поврежденную летку меняют.

Появление течи плава помимо леток. При нарушении плотности пода топки следует направить струю холодного воздуха к отверстию, где вытекает плав. Охлажденный плав, застывает и заполняет трещину. Если течь ликвидировать не удастся, паровой котел останавливают, перед этим зажигается огарок на поде, а плав спускается в растворитель.

Заклинивание обдувочного аппарата. При неисправности ствол обдувочного аппарата может заклинить в рабочем положении. Аппарат возвращают в исходное положение ручным механизмом. Если это не удастся, прекращают подачу пара во избежание повреждения поверхности нагрева.

Неполадки каскадных испарителей. Возможны следующие неполадки: ослабление болтовых соединений ротора с валом, небаланс ротора и неравномерность вращения относительно оси, заклинивание ротора. При плановых остановках СРК на ремонт затягивают болтовые соединения. Небаланс ротора возникает из-за неравномерности осаждения сгущенного черного щелока на трубах по окружности ротора. Неравномерный осадок образуется при работе СРК с остановленным каскадным испарителем. Для удаления осадка с труб ротора каскадный испаритель промывают слабым щелоком при каждой остановке СРК.

Заклинивание ротора каскадного испарителя происходит при длительной работе СРК с остановленным испарителем, когда в ванне остается плотный черный щелок. В этом случае пуск электродвигателя может вызвать поломку редуктора привода или другие серьезные повреждения. Перед пуском каскадного испарителя после остановки необходимо убедиться, что ротор вращается легко. Без этой проверки включение электродвигателя недопустимо.

Вибрация и гидравлические удары в паровом котле и трубопроводах. Гидравлические удары в барабане и соединительных трубопроводах могут возникнуть вследствие образования паровых мешков в соединительных трубах от экономайзера к барабану при большой скорости подачи воды после перерыва в питании парового котла; при заполнении холодного парового котла водой с температурой 90 °С; при неисправности обратных клапанов на питательных линиях перед экономайзером.

Вибрация питательных трубопроводов может появиться в следующих случаях: при неудовлетворительном закреплении трубопроводов; при заполнении трубопроводов водой без освобождения их от воздуха; при неисправности питательного клапана на питательном насосе. Удары в паропроводе могут быть при недостаточном прогреве и дренировании включаемого паропровода, при попадании в паропровод пара и воды, при перепитке парового котла.

Гидравлические удары в паропроводе могут привести к серьезным нарушениям вплоть до разрыва паропровода или вывода из строя турбины. При возникновении гидравлических ударов в питательной линии открывают воздушники, переводят питание парового котла на другую линию, а поврежденную линию отключают. Проверяют исправность обратных клапанов в линиях и насосах, определяют уровень вибрации. При появлении гидравлических ударов в главном паропроводе открывают продувку пароперегревателя и дренажи паропровода, регулируют уровень воды в барабане и температуру перегретого пара.

При разрыве главного паропровода отключают паровой котел и поврежденный участок паропровода от общей паровой магистрали и гасят топку. Причинами разрыва паропровода могут быть недостаточная компенсация температурных удлинений опор, некачественная сварка стыков, гидравлические удары.

Отключение дутьевых вентиляторов. При аварийном останове одного из дутьевых вентиляторов необходимо: закрыть заслонки на напорном воздуховоде остановленного вентилятора и загрузить второй вентилятор до красной черты по амперметру; снять часть нагрузки с парового котла, оставшегося с одним вентилятором (если при работе с одним вентилятором воздуха будет недостаточно и нагрузку снизить нельзя, то следует отключить потребителей пара, затем отрегулировать работу форсунок и подготовить к пуску выключенный вентилятор); при остановке всех вентиляторов воздуха все рабочие форсунки должны быть выключены.

Отключение дымососов. При сильной вибрации, стуках внутри корпуса, нагреве подшипников дымососа выше 63°C дымосос должен быть остановлен. При аварийном отключении одного из дымососов необходимо: оставшийся в работе дымосос загрузить до предела (по амперметру); снизить до возможного уровня избыток воздуха в топке; снизить нагрузку котла, если тяга остается недостаточной даже при снижении избытка воздуха – снизить нагрузку парового котла; выяснить и устранить причину неисправности дымососа и подготовить его к пуску. При отключении последнего работающего дымососа автоблокировкой отключаются дутьевые вентиляторы и все форсунки СРК. В этом случае необходимо принимать меры для пуска дымососа, а если это невозможно – остановить СРК.

11

ВЗРЫВЫ СОДОРЕГЕНЕРАЦИОННЫХ КОТЛОАГРЕГАТОВ

11.1. Причины взрывов

Многие СРК отечественных предприятий [1] являются высокопроизводительными и работающими без резервирования. Обеспечение надежности работы этих СРК является актуальной задачей и должно находиться в центре внимания технологического и технического обслуживания.

В связи с многочисленными и серьезными последствиями взрывов СРК с 1962 г. действует международный консультативный комитет (BLRBAC) [11], координирующий усилия различных организаций по изучению и предотвращению взрывов.

Обстоятельства и причины взрывов СРК отражены в [11–13]. Статистика взрывов приведена в табл. 22.

Таблица 22

Статистика взрывов за период 1960 по 2000 г.

Страна	Кол-во СРК	Кол-во взрывов	Основные причины взрывов, %
США	225	72	Нарушения правил сжигания топлива (50) и взаимодействия плава с водой (50)
Канада	174	63	Нарушения правил сжигания вспомогательного топлива (49), взаимодействия плава с водой (48), неисправность вспомогательного оборудования (3)
Россия*	60	3	Нарушения правил сжигания вспомогательного топлива (66) и взаимодействия плава с водой (33)
Япония*	—	3	Разбавление черного щелока водой (100)

* Отсутствие полной информации о взрывах СРК.

Причины взрывоопасности СРК:

- нарушение процесса сжигания в топке щелока;
- аккумуляция на поду топочной камеры большого количества расплавленных натриевых солей при температуре 850...900 °С;
- взаимодействие сульфатного плава с водой;
- несоблюдение правил сжигания высококалорийного вспомогательного топлива (в основном мазут).

При анализе аварий на отечественных СРК установлено, что в 40 % случаев взрывы произошли в результате воспламенения накопившейся в топке взрывоопасной смеси газов (продуктов неполного сгорания), в 40 % случаев – при попадании из поврежденных экранных труб воды на огарок и плав и в 20 % случаев – в результате грубых нарушений правил технической эксплуатации [1].

Взрывы горючих газов в топках СРК. В топке взрывы горючих газов вызываются неравномерностью процесса горения или потухания факела. Температура горения в топке СРК зависит от влажности и расхода воздуха, а также от коэффициента избытка и температуры воздуха. При раздельной подаче щелока и воздуха в топочном пространстве имеет место большая неравномерность температур и концентраций отдельных газов. Наиболее низкая температура характерна для зоны интенсивного испарения влаги из подаваемого в топку щелока.

Устойчивость подсушки и воспламенения щелока зависит от температуры подаваемого воздуха. Оптимальной считается температура воздуха 300...400 °С. Температура подаваемого в топку СРК воздуха после калорифера [3] достигает лишь 140...150 °С. Для поддержания оптимальной температуры сжигают вспомогательное топливо, которое подается в топку, как правило, без регулирования расхода воздуха. Сжигание вспомогательного топлива снижает общий избыток воздуха и приводит к возникновению полугазового процесса. Объем топки СРК заполняется взрывоопасными горючими газами, что увеличивает вероятность потухания факела и возникновения топочного взрыва. Условия сжигания щелока нарушаются при длительной безостановочной эксплуатации котлоагрегата, когда вследствие больших отложений солей в газоходах СРК резко снижается возможность регулирования аэродинамического режима топки и избытка воздуха. Нарушение устойчивого процесса горения может произойти также при внезапном выключении вентиляторов и дымососов, а также при резком снижении расхода щелока.

Максимальная сила взрыва горючих газов в топке получается, когда между концентрациями этих газов (в основном метана) и кислородом устанавливается стехиометрическое соотношение (например 9,5 % CH_4 + 19 % O_2). Когда соотношение газ – кислород заметно отклоняется от стехиометрического, происходит слабый взрыв или хлопок. Однако и слабые взрывы горючих газов могут вызвать местные повреждения экранов с разрывом труб.

При разрыве труб возможен вторичный взрыв от попадания воды в плав, вызывающий серьезные аварии.

При устойчивом горении с коэффициентом избытка воздуха больше единицы взрывоопасные концентрации горючих газов локализуются в области корня горящего факела и не представляют опасности. Избыток воздуха контролируют кислородомером. Концентрацию избыточного кислорода в газах на выходе из топки поддерживают на уровне 1...2 % [1].

Взрывы в топках СРК от попадания воды в плав [6, 7, 11]. В середине 60-х годов аварии, происходящие при контакте плава с водой, объясняли химическим взаимодействием Na_2S плава с водой, с последующим выделением большого количества кислорода и образованием взрывоопасных концентраций его.

В настоящее время взрывы объясняют физическим происхождением. Физические взрывы возникают в результате очень быстрого растворения пара, когда тепло к испаряющейся жидкости подводится мгновенно. Быстро расширяющийся пар, который и производит всю работу взрыва, как раз и образуется в результате переноса с очень большой скоростью тепла при контакте плава с водой.

Физические взрывы – беспламенные, они менее мощные, чем взрывы, сопровождающиеся быстрым выделением большого количества энергии (взрывы тротила и т.п.). Однако давления, развиваемые при таких взрывах, достигают максимальной силы в течение микросекунд, а возникающие ударные волны распространяются со сверхзвуковой скоростью. Скорость распространения пара в объеме топки СРК при физических взрывах [14] составляет около 450 м/с. Пар в течение долей секунды сжимает газ в точке до давления свыше 0,22 МПа, что достаточно для разрушения системы.

Взаимодействие некоторых расплавленных металлов с водой может также приводить к быстрому взрыву.

Причины, приводящие к проникновению воды в топку. Исследование случаев взрывов от попадания воды в плав выявило, что в 22 случаях из 35 вода поступила в топку в результате течи труб и в 13 – от попадания в топку с посторонними источниками (влажный щелок, вода в сульфатном мыле, вода из системы охлаждения леток).

Повреждения труб экранов топки возможно из-за наружной высокотемпературной коррозии, которая захватывает восстановительную зону и

особенно интенсивно развивается в зоне первичного дутья. При изучении этого вопроса установлено, что в коррозии участвуют сера и серопродукты, а скорость ее зависит от температуры.

Коррозия наружной поверхности труб зависит также от состава и скорости движения топочных газов, состава и физического состояния отложений на трубах, но главным образом от температуры металла, подверженного коррозии [15]. Причем, для углеродистой стали (металл экранных труб) при температуре ниже 300 °С коррозия незначительна, а при температуре выше 320 °С коррозия возрастает и усиленное разрушение начинается при температуре металла 330...340 °С [16].

При коррозии на трубах СРК образуются различные продукты разрушения и всегда обнаруживается черная окалина, которая прочно связана с поверхностью трубы. Рентгеноструктурный анализ окалины показал, что в основном она состоит из сульфида железа, который не защищает металл от дальнейшего поражения. Образование сульфида железа связано с непосредственным взаимодействием железа со свободной серой по схеме $Fe + S \rightarrow FeS$, так как установлено, что любые условия, приводившие к образованию свободной серы, вызывали значительную коррозию [15].

Температура стенки экранной трубы СРК, эксплуатируемого при давлении 0,4 МПа, лежит значительно ниже предельно допустимой. Однако образование накипи на внутренней поверхности труб может существенно повысить термическое сопротивление теплопередачи, что приведет к резкому повышению температуры стенки трубы.

Разрушение труб возможно также и при повышении локальных тепловых нагрузок, что увеличивает температуру стенки трубы [16].

Несоблюдение температурных режимов в топке, в основном при сжигании вспомогательного топлива, может явиться причиной резкого повышения температуры металла экранной трубы. При измерении температуры плавников экранных труб СРК Братского ЛПК, работающих под давлением 0,38...0,39 МПа, выявлено, что при сжигании в топке СРК только щелока температура посередине плавника не превышает 270 °С. Однако уже через некоторое время после включения одной мазутной форсунки, установленной в зоне первичного дутья, наблюдается локальное повышение температуры отдельных плавников до 320...340 °С.

При сильном локальном обогреве плавниковых труб термические напряжения, возникающие в месте приварки плавников к телу трубы,

могут достигать таких высоких значений, что создаются предпосылки для появления усталостного излома и трещин.

В 1972 г. на СРК-2 Сегежского ЦБК была обнаружена течь воды из-под обшивки в районе нижнего коллектора правого экрана. Котлоагрегат был остановлен. Осмотр топки показал, что на 31-й трубе бокового экрана под соплами нижнего дутья в прорезях плавников образовались две трещины, прошедшие сквозь сварной шов и проникшие в тело трубы. Одна трещина оказалась сквозной. В разрезах плавников выявилось значительное количество трещин, длина которых составляла 1...3 мм. Наиболее глубокие трещины были расположены, как правило, ниже сопел первичного дутья.

Исследование характера возникших повреждений против прорезей в плавниках показывает, что они явились следствием термической усталости в условиях сильной концентрации напряжений в прорезях плавников. Различные точки плавниковой трубы оказываются нагретыми до разной температуры. Поэтому возникают напряжения, которые достигают наибольшего значения в месте приварки плавников к телу трубы.

При неправильном выборе размеров и формы плавников и сильном обогреве плавниковых труб термические напряжения могут достигать таких высоких значений, что при каждом пуске и останове топки наступают пластические знакопеременные деформации. Это после определенного количества циклов приводит к появлению усталостного излома и трещин.

Разрушение экранных труб может быть вызвано и другими причинами. На отдельных экранных трубах СРК Братского ЛПК и Байкальского ЦЗ под амбразурами щелоковых форсунок были обнаружены групповые коррозионные язвы диаметром 0,8...2,5 мм и глубиной 0,5...1,5 мм. Причиной их образования явилось увлажнение труб конденсатом, вытекающим из рамок парового уплотнения, установленных для защиты от выбросов пламени.

Попадание воды в топочную камеру может быть связано с браком в сварных стыках экранных труб, а также с нарушением плотности вальцовочных соединений, вызванных частыми «упусками» воды из барабана. Повреждение леток плава может привести к проникновению в топку охлаждающей воды. При использовании для охлаждения леток холодной технической воды с большим содержанием солей жесткости и окислов железа разрушение леток плава происходит часто.

Взрывы от взаимодействия плава с водой вызываются подачей в топку слабого щелока с влажностью больше 45 %, что связано с неудовлетворительной работой выпарной станции, но большей частью со случайным разбавлением щелока водой. Поэтому потенциально опасными являются места постоянного подвода воды к коммуникациям черного щелока для их промывки. Один случай взрыва в США (вода просочилась из резервного коллектора, заполненного водой, в действующий трубопровод черного щелока) и три случая взрыва в Японии были вызваны разбавлением черного щелока [17].

На отечественных предприятиях в СРК вода часто используется в каскадном испарителе для разбавления щелока при его уплотнении. При отсутствии надежных приборов для контроля за влажностью щелока, поступающего в топку, использование воды для регулирования концентрации сухих веществ может привести к серьезным последствиям.

11.2. Меры предупреждения взрывов при эксплуатации

Обеспечение чистоты и предотвращения коррозии внутренних поверхностей нагрева достигается соблюдением норм качества питательной и котловой воды, проведением предпусковых и эксплуатационных промывок. Эффективным мероприятием для улучшения водного режима является коррекционная обработка питательной воды, позволяющая снизить содержание окислов железа в ней, предотвратить появление отложений в трубах, а также замедлить процессы коррозии.

Перспективным методом коррекции является трилонная обработка питательной воды, обеспечивающая безнакипный и безшламовый режимы. В настоящее время накоплен положительный опыт трилонирования питательной воды СРК на Архангельском ЦБК и Астраханском ЦКК.

Гидразинная обработка питательной воды, являющаяся одним из методов коррекции, обеспечивает замедление процессов кислородной коррозии. Схема гидразинной обработки предусматривает ввод гидразина во всасывающие трубопроводы питательных насосов или аккумуляторные баки деаэраторов. Подобная схема успешно эксплуатируется на Братском ЛПК, Котласском ЦБК и Астраханском ЦКК.

При существенном загрязнении внутренних поверхностей нагрева полезными оказываются химические промывки СРК с применением органических кислот, комплексообразующих реагентов и гидразина. Однако,

промывки органическими компонентами оказываются эффективными в случае, когда количество отложений не превышает 400 г/м^2 поверхности нагрева. При сильных загрязнениях более эффективными являются кислотные промывки. Так, на внутренней поверхности экранных трубок СРК «Бабкок» Измаильского ЦКК образовались твердые кремнистые отложения с примесью сульфатно-кальциевых соединений. Количество отложений достигало 1500 г/м^2 . Проведенная промывка СРК ингибированной соляной кислотой оказалась эффективной. За короткий срок отложения были полностью удалены. Экранные трубки при эксплуатации разрушаются от действия высоких температур, что приводит к длительным остановам СРК на ремонт.

Для предотвращения разрушения труб проводят тщательные осмотры поверхностей нагрева и замену дефектных труб в периоды ремонтов, периодическую проверку толщины труб методами неразрушающего контроля (ультразвук, магнитная дефектоскопия) и периодическую вырезку образцов труб.

На СРК с топками, экранированными плавниковыми трубами, и особенно на СРК, находящихся в эксплуатации более 5 лет, необходимо также систематически обследовать трубы методами магнитопорошковой дефектоскопии.

Для избежания эрозии металла необходимо контролировать состояние труб, расположенных у обдувочных устройств. В этой связи эффективная и надежная работа системы отвода конденсата из трубопроводов обдувки очевидна. Целесообразно амбразуру щелоковых форсунок защищать от выброса пламени с помощью воздушной завесы путем отвода горячего воздуха от фурм вторичного дутья.

Для предотвращения разрушения леток плава охлаждать летки следует горячей, химически очищенной деаэрированной водой, циркулирующей в замкнутом контуре.

Экранные трубы СРК, работающих под давлением свыше 400 Па , защищают от высокотемпературной наружной коррозии нанесением специальных покрытий на поверхность. Лучшие результаты были получены при нанесении стального покрытия, содержащего хром, никель и титан.

Экранные трубы СРК среднего давления не подвержены существенной наружной коррозии при соблюдении норм водного режима. Поэтому для этих СРК антикоррозионная защита труб, включая обмазку пластичной

массой вертикальной части экранов до сопел вторичного дутья, необязательна. Опыт работы показал, что изоляция вертикальных экранов разрушается через 2...3 недели эксплуатации СРК.

Режимы СРК, допускающие повышение температуры металла экранных труб выше опасных пределов, следует считать нежелательными. Поэтому большое значение имеет правильное использование горелок вспомогательного топлива, исключая повышенные локальные тепловые нагрузки. Для улучшения условий работы экранной системы следует избегать включения нижних мазутных форсунок во время работы СРК на щелоче и пользоваться ими лишь в случае крайней необходимости. При потребности дополнительной выработки пара в паровом котле следует использовать мазутные форсунки верхнего яруса.

Критическим моментом для возникновения условий взрыва от вспомогательного топлива является розжиг мазутных форсунок, поэтому следует сокращать до минимума их включение. Для выполнения этого условия СРК должен эксплуатироваться на нагрузках не ниже 70...75 % от номинальной, что достигается максимально выровненным графиком подачи черного щелока.

Из опыта работы установлено, что в топках СРК достигается устойчивый процесс горения щелока без подсветки вспомогательным топливом при нагрузке выше 70 % от номинальной и теплоте сгорания щелока перед форсункой 1650...1700 ккал/кг, что достигается его упариванием до содержания сухих веществ более 59 %. Для стабилизации режима горения необходимо, чтобы с выпарных установок поступал щелок с содержанием сухого вещества на уровне 60 % для котлоагрегатов без газоконтактных испарителей и не менее 50 % для СРК с газоконтактными испарителями.

Для избежания обрыва факела при работе мазутных форсунок необходимо поддерживать стабильное давление перед форсунками и не допускать попадания воды на мазут, для чего его надо тщательно подготавливать перед подачей на СРК. Для качественного смешения мазута с воздухом форсунки должны иметь организованный подвод воздуха. В настоящее время для обеспечения безопасного сжигания вспомогательного топлива большое значение уделяется специальным системам защиты, связанным с воспламенением вспомогательного топлива и обнаружением обрыва факела. Для воспламенения топлива используются вспомогательные газогорелочные

устройства, а также искровые и газоэлектрические методы. Вопрос защиты СРК от затухания мазутного факела до конца не решен, несмотря на то, что разработано большое количество датчиков контроля, принцип действия которых основан на использовании свойств факела (световое и тепловое излучения, электропроводность и т.д.).

Топливо в топке СРК должно сгорать полностью, для этого коэффициент избытка воздуха за котельным пучком следует поддерживать на уровне 1,20...1,25, что соответствует 3,4...4,0 % концентрации свободного кислорода в топочных газах. Поэтому необходим тщательный эксплуатационный уход за приборами контроля режима горения. Кроме того, полезна систематическая проверка правильности работы стационарных газоанализаторов переносными химическими анализаторами типа ГХП-3М. Важным условием правильно организованного режима горения наряду с подачей необходимого количества воздуха является создание равномерного поля концентрации газов в топке. Это достигается образованием активной окислительной зоны за счет эффективной турбулизации газоздушного потока. Причем, наибольший эффект достигается в конструкциях СРК с тангенциальным вторичным дутьем, в которых воздух вводится в топку через четыре группы воздушных сопел, расположенных по углам топочной камеры. Скорость выхода верхнего воздуха в топку следует поддерживать в пределах 40...50 м/с, что обеспечивается давлением 2000...3000 Па. Кроме того, в процессе работы СРК необходимо следить за чистотой воздушных сопел.

Предотвращение взрывов в баке-растворителе плава достигается качественным дроблением плава на мелкие фракции паром или зеленым щелочком с тем, чтобы частицы плава успели охладиться до момента соприкосновения с жидкостью мешальных устройств и циркуляционных насосов. Систематически необходимо очищать кожухи над летками, чтобы не допускать наслоений большого количества застывшего плава.

Особое внимание следует уделять предупреждению забивания выходных отверстий леток плава, так как на подду топки накапливается большое количество плава, который при последующем пробивании пробки в большом количестве хлынет по летке в бак-растворитель, что может привести к сильным хлопкам и даже взрыву.

К превентивным мероприятиям предупреждения взрывов относятся:

- стабильная нагрузка СРК и подача в топку щелока с требуемой концентрацией сухих веществ;
- поддержание постоянного соотношения щелок – воздух и стабильного распределения дутьевого воздуха;
- периодическая очистка отверстий для выхода плава;
- полное выжигание подушки огарка при останове СРК.

11.3. Усовершенствования содорегенерационных котлоагрегатов для предотвращения взрывов

Машиностроительными фирмами предлагаются новые конструкции взрывобезопасных СРК. Одна из таких конструкций предусматривает сжигание щелока в выносной циклонной неэкранированной топке без накопления плава на поду [18]. Топка пристраивается к паровому котлу с экранированной камерой, в которой процесс сжигания завершается в окислительной среде. Такая конструкция СРК с наклонной предтопкой исключает возможность взрывов, поскольку в топке нет водяного экрана.

Экранизация топок в условиях интенсивной коррозии создает опасность возникновения топочных взрывов при разрыве труб и попадании воды на слой огарка и в плав. Для предотвращения попадания воды в плав и на слой огарка П.А. Жучковым предложена конструкция двухкамерной топки с U-образным факелом. При этом сжигание и регенерация щелока осуществляются в неэкранированной камере, оборудованной щелоковыми горелками [3].

Фирма «Tampella» (Финляндия) разработала упрощенный СРК (пакетный) мощностью 50...250 т/сут для регенерации химикатов. Он состоит из обычной топки СРК и растворителя плава, а вместо пучков паровых труб установлен контактный испаритель для упаривания щелока с концентрацией 25 % до концентрации 60 %. Дымовые газы перед выходом в трубу очищаются в скруббере. Коррозия низкая, так как давление получаемого пара 1,6...3,0 МПа [19].

Для устранения недостатков сульфатного способа варки (большой расход топлива в известеобжигательной печи, выбросы дурнопахнущих соединений серы) в 1982 г. в Японии образована научная ассоциация ЦБП. Ассоциацией разработан СРК с псевдооживленным слоем для сжигания

черного щелока повышенной сухости [20]. В 1985 г. введена в эксплуатацию опытная линия, состоящая из СРК с псевдоожиженным слоем, варочного котла, выпарной установки и каустизационной установки. Псевдоожиженный слой образован прессованными гранулами окислов железа. Перед сжиганием черный щелок сгущают в многокорпусной выпарной установке и на дисковом фильтре до сухости 80 %. Сначала температуру псевдоожиженного слоя доводят до 450 °С сжиганием мазута, далее добавляют щепу для разогрева псевдоожиженного слоя до температуры 900 °С, при которой плавится карбонат натрия, и лишь затем подают черный щелок. Полное время пуска СРК – 4 ч. Приведен анализ факторов псевдоожиженного слоя: высоты, соотношения железа и натрия, материального и теплового баланса.

В настоящее время получают распространение однобарабанные СРК «полностью сварного типа» [21], которые не имеют протечек и проблем, связанных с коррозией. Композитные трубы позволили уменьшить коррозию в топке котлоагрегата.

В работах [1, 3, 8] отмечается, что внесением изменений в конструкцию типового СРК можно исключить некоторые причины, приводящие к возникновению взрывов. Например, экранирование топочной камеры гладкими трубами с шагом $d+1$ мм оказывается предпочтительней, так как исключает разрушение от усталостного излома, характерного для труб с разрезными плавниками.

Наиболее перспективным является вариант экранирования топочной камеры газоплотными панелями из гладких труб со стальными приставками. Проект котлоагрегата СРК-1400, разработанного Белгородским котельным заводом, предусматривает полное экранирование топки цельносварными панелями, состоящими из труб диаметром 57×5 мм с проставкой 18 мм.

Значительные затруднения в эксплуатации СРК связаны с забиванием минеральными отложениями конвективного пучка. Особенно быстрый рост отложений наблюдается в нижней части продольно-обтекаемых конвективных пучков. Применяемые для очистки поверхностей нагрева обдувочные аппараты снижают толщину минеральных отложений на трубах, но не устраняют их полностью. В новых конструкциях СРК конвективный пучок заменяется ширмовыми испарительными поверхностями, которые эффективно очищаются парообдувочными аппаратами [3].

Композиционные трубы в выпускных отверстиях сульфатного плава и в вентиляционных отверстиях подвержены ускоренной коррозии. Фирмой «Sandvik» поставляются композиционные трубы [22], используемые для трубопроводов СРК. Для изготовления этих труб применяются трубчатые заготовки из простой стали (внутренний слой) и нержавеющей стали (наружный слой). Внутренний слой таких труб предназначен для работы под давлением, а наружный защищает от коррозии. Разница в коэффициентах термического расширения этих сталей заметна только при комнатной температуре и сводится к минимуму при рабочих температурах.

Комбинированная схема нагрева воздуха, подаваемого в топку СРК, считается оптимальной [3]. Нагрев всего необходимого для горения воздуха до температуры 140...150 °С осуществляется в паровых калориферах. Дополнительному нагреву в воздухоподогревателе до 300...320 °С подвергается только вторичный воздух, наиболее существенно влияющий на устойчивость воспламенения и горения щелока.

11.4. Обеспечение безопасной эксплуатации содорегенерационных котлоагрегатов

Нарушения правил эксплуатации СРК приводят к авариям и взрывам топок с трагическими последствиями для обслуживающего персонала. Работа по обеспечению безопасной эксплуатации всех СРК координируется международным консультативным комитетом (BLRBAC). Комитет уделяет серьезное внимание безопасности обслуживающего персонала. Рекомендации комитета [23] не ограничиваются только требованием безусловного выполнения правил техники безопасности при обслуживании энерготехнологических установок, но и распространяются на вопросы, связанные с проектированием оборудования и помещений, а также с постоянным обучением персонала. Ниже приводятся некоторые рекомендации.

СРК должен надежно отделяться от других котлов прочными стенами. Каждая площадка обслуживания должна быть снабжена двумя отдельными выходами. Щит управления должен размещаться в комнате, имеющей железобетонные стены, пол и потолок и запасной выход, который не проходит через котельную. Комната должна обеспечиваться кондиционированным воздухом от источника, находящегося вне помещения.

Поскольку наиболее опасным считается пространство под топкой, то проход через него должен запрещаться и ограничиваться заграждениями.

Особое значение консультативный комитет придает постоянному совершенствованию знаний и навыков обслуживающего персонала и соответствующему жесткому контролю выполнения технологического регламента со стороны администрации. Важны методы отработки действий персонала в аварийных ситуациях, а также анализ имеющихся неполадок и разработка соответствующих превентивных мероприятий, проводимых персоналом.

Консультативный комитет предложил программу аварийной остановки СРК в случае поступления воды в топку. Программа аварийного останова сводится к следующему [24]:

- 1) включение sireны, предупреждающей о необходимости прекращения работ и эвакуации из угрожающих помещений;
- 2) дистанционное включение контакта, приводящего в действие автоматическую программу аварийного останова СРК, при котором отключается подача всего топлива;
- 3) прекращение питания СРК водой;
- 4) отключение подачи первичного воздуха при усиленной подаче вторичного и третичного воздуха;
- 5) спуск воды из СРК до уровня примерно 2,5 м от пода;
- 6) дымосос и паропровод остаются включенными для охлаждения СРК.

Комитет считает, что преимущества, которые приписывались заливке пода топки черным щелоком, фактически не существуют, так как плав не охлаждается черным щелоком и до двух суток сохраняет тепло. Отказ от заливки щелоком предотвращает поступление в топку дополнительного топлива и образование продуктов термохимического разложения щелока, а также поступление воды со щелоком. Кроме того, исключается необходимость пребывания персонала в самом опасном месте угрожаемой зоны.

Наибольшее значение придается *быстрому спуску воды из парового котла*. Эта операция является важнейшей в процедуре аварийного останова. Воду из парового котла нельзя спускать через спускные устройства конструкций, так как это требует ручных операций и присутствия персонала непосредственно на СРК. Для спуска воды паровой котел оборудуется специальными дренажными вентилями с дистанционным электроприводом. Дренаживание парового котла, проведенное в соответствии с указанием фирм-изготовителей, пока не приводило к повреждению СРК.

Следует иметь в виду, что, хотя рассмотренная программа аварийного останова существенно уменьшает вероятность взрыва, полностью не исключает его, так как тепловая энергия, аккумулированная в плаве, может высвободиться со взрывом при контакте плава с проникшей в топку водой.

По-видимому, наиболее перспективным методом обеспечения безопасности является введение в нижнюю часть топки ингибиторов взрыва в случае опасности проникновения воды. Действие таких ингибиторов основывается на предотвращении перегрева воды на границе раздела фаз плав – вода, являющегося детонатором взрыва, и одновременно медленном охлаждении плава во всей его массе до взрывобезопасных пределов. В связи с этим в настоящее время практическое значение приобретает бикарбонат натрия. Предполагается, что, проникнув в огарок и слой плава, бикарбонат натрия термически разлагается, поглощая большое количество тепла, что способствует охлаждению плава. Одновременно образуется большое количество инертных газов, способствующих созданию активных центров кипения в воде и кипящей оболочки на границе плав – вода.

12 ДИАГНОСТИРОВАНИЕ СОДОРЕГЕНЕРАЦИОННЫХ КОТЛОАГРЕГАТОВ

Диагностированием выявляют отклонения технического состояния оборудования от работоспособного, прогнозируют техническое состояние оборудования, решают вопросы генеза, разрабатывают способы и средства локализации неисправностей. При диагностировании технического состояние оборудования определяют на этапах проектирования, эксплуатации и при остановах.

На этапе проектирования при моделировании технологических, статических и динамических характеристик определяют расчетные параметры оборудования и сравнивают их с допустимыми.

На этапе эксплуатации применяют функциональное и тестовое диагностирование, диагностирование физическими и физико-химическими методами. Техническое состояние оборудования диагностируют методами неразрушающего контроля с применением переносной аппаратуры.

При функциональном диагностировании состояние объекта определяют по результатам текущего контроля за выходными переменными. При тестовом диагностировании на вход проверяемого устройства подаются специально подобранные воздействия (тесты). Реакцию на выходе из объекта сравнивают с эталонной и делают заключение о техническом состоянии оборудования. При физическом диагностировании оборудования применяют методы неразрушающего контроля: вибрационный, акустический, тензометрический, оптический, радиационный, ультразвуковой, рентгенографический, тепловой. Преимущественное развитие получил вибрационный метод диагностирования. В автоматизированных системах диагностики важное место занимают физико-химические методы контроля на основе анализаторов жидкостей, газов и сигнализаторов с применением стационарной аппаратуры.

При остановках оборудование диагностируют физическими и физико-химическими методами, определяют дефекты обечаек, футеровок и сварных швов оборудования в виде сквозных пор, трещин, раковин, межкристаллитной коррозии. Для каждого метода диагностирования определяют характерные оценочные критерии, например, для вибрационной диагностики определяют спектр низших собственных частот оборудования и логарифмические декременты затухания вибрации.

Обеспечение эксплуатационной надежности СРК, как потенциально-опасного оборудования, развивается по трем основным направлениям:

- энергетическое;
- процесс горения;
- техническое обслуживание.

Эти направления взаимосвязаны и в совокупности составляют основу производственного контроля. Для каждого из направлений характерны свои методы диагностирования.

Диагностирование энергетических характеристик СРК сходно с контролем работы энергетических котельных установок [28], методы которого разработаны достаточно хорошо и в данной работе не рассматриваются.

12.1. Диагностирование процесса горения

Диагностирование процесса горения заключается в контроле полноты сгорания топлива и контроле температуры в топочном пространстве.

Контроль полноты сгорания топлива. Процесс горения контролируется по анализу продуктов сгорания, на основании которого определяется коэффициент избытка воздуха в топке и газоходах СРК. Для анализа дымовых газов применяются *химические, термокондуктивные, термоманнитные, хроматографические и масс-спектрометрические газоанализаторы*. Подробное описание этих приборов приведено в работе [28]. Поэтому рассмотрим основные принципы, на которых основаны различные методы определения состава дымовых газов, а также преимущества и недостатки этих методов.

Принцип действия термокондуктивных газоанализаторов основан на зависимости теплопроводности от состава газов. Если принять теплопроводность воздуха за единицу, то теплопроводность углекислого газа при температуре $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ равна 0,7, а водорода 7,1. Принципиальной измерительной схемой термометрического газоанализатора (рис. 13) является неуравновешенный мост, работающий на постоянном токе. Все плечи моста выполнены из платины и имеют равные сопротивления. Тепло от нагретой нити передается через слой анализируемого газа или эталонного воздуха к стенкам камеры. Для повышения чувствительности прибора два противоположных плеча омываются анализируемым газом, а два других – воздухом.

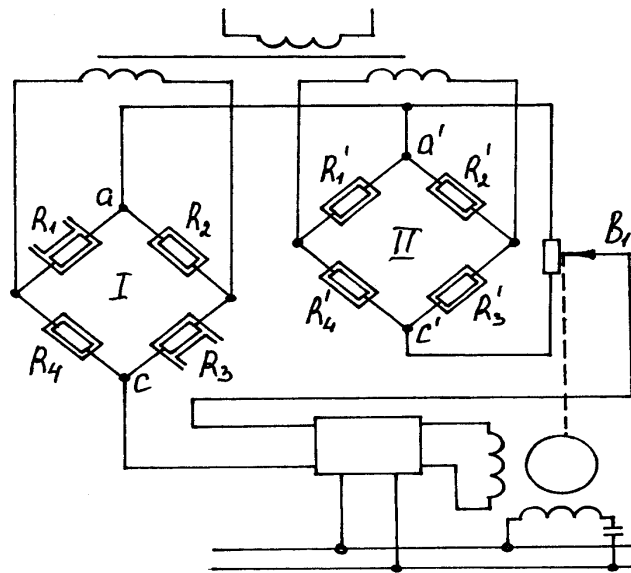


Рис. 13. Компенсационная схема термокондуктометрического газоанализатора:

- I – измерительный мост; II – сравнительный неравновесный мост;
- R_1, R'_1, R_3, R'_3 – рабочие плечи моста, омываемые исследуемым газом;
- R_2, R'_2, R_4, R'_4 – плечи, находящиеся в среде, соответствующей началу шкалы

Эти приборы широко применяются для контроля процесса горения в энергетических печах и СРК. При этом контроль за избытком воздуха осуществляется по содержанию в газах CO_2 , а полнота сгорания определяется по содержанию H_2 . Недостаток данного принципа измерения – невозможность определения окиси углерода, основной составляющей продуктов сгорания, так как ее теплопроводность близка к теплопроводности азота.

Взрывы СРК в 40 % случаев происходят из-за воспламенения накопившейся в топках взрывоопасной смеси газов – продуктов неполного сгорания [3].

В настоящее время для определения содержания в дымовых газах кислорода широко применяют термомагнитные газоанализаторы. Кислород является парамагнитным газом, т.е. газом, притягиваемым магнитным полем. Принцип действия термомагнитных газоанализаторов основан на зависимости парамагнитных свойств кислорода от температуры.

Принципиальная схема термомагнитного газоанализатора (кислородомера) приведена на рис. 14. Кольцевая камера и термоанемометр в виде трубки с двумя секциями платиновой намотки включены в мостовую схему и нагреваются измерительным током. Один конец термоанемометра помещен в магнитное поле. Полюсные наконечники создают неоднородное магнитное поле. В зависимости от содержания кислорода в газе изменяется скорость движения газа в трубке, и теплообмен между плечами моста и газом приводит к изменению плотности измерительного тока.

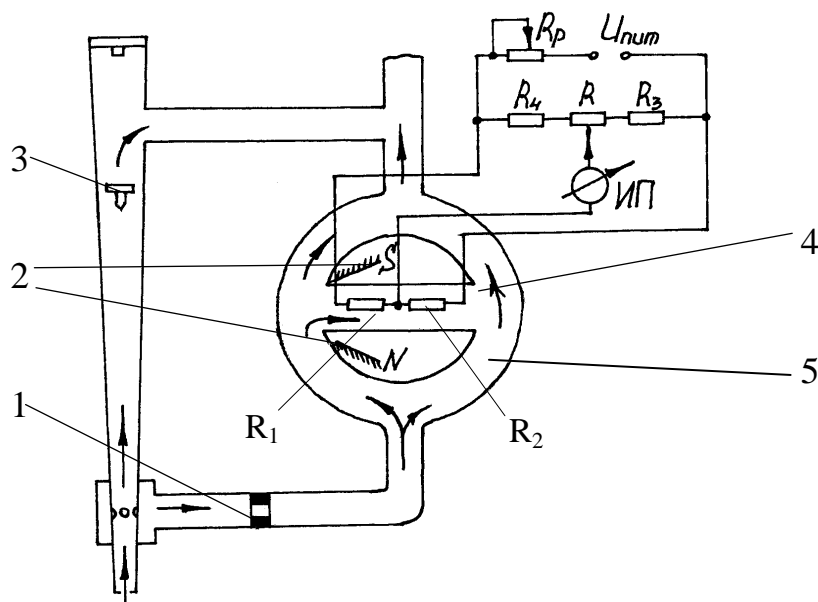


Рис. 14. Термомагнитный газоанализатор (кислородомер):

- 1 – дроссель стабилизации расхода; 2 – полюса магнита; 3 – ротаметр;
 4 – трубка термоанемометра; 5 – кольцевая камера;
 R_1, R_2 – платиновые сопротивления (рабочие плечи моста)

Одним из недостатков кислородомеров является их высокая чувствительность к запыленности газов. В настоящее время их конструкции и схемы измерения совершенствуются.

На рис. 15 показана схема хроматографа, принцип действия которого основан на сорбционном способе разделения пробы газовой смеси на отдельные компоненты при пропускании ее совместно с потоком вспомогательного газа через слой поглощающего вещества (сорбента) и поочередного измерения содержания каждого компонента электрическим методом. В разделительную колонку 1, заполненную твердым пористым веществом с большой активной поверхностью, непрерывно поступает газоноситель. Перед колонкой в его поток дозатором 2 периодически вводится проба исследуемой газовой смеси 3 с искомыми компонентами А, В, С, обладающими различными сорбционными свойствами. Чем выше атомная масса компонента, тем больше время удержания газа на поверхности пор адсорбента. В связи с этим при прохождении сорбирующего вещества происходит сепарация (разделение) отдельных компонентов анализируемого газа в газе-носителе. Первым покидает разделительную колонку газ А, обладающий наименьшей сорбционной способностью, а последним – газ С, характеризующийся наибольшими молекулярными силами сцепления с сорбирующим веществом.

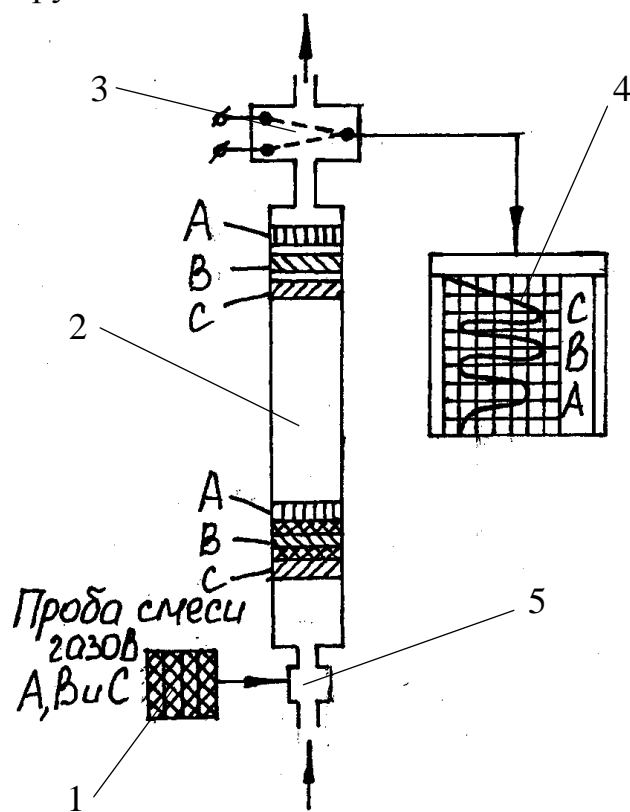


Рис. 15. Схема адсорбционного хроматографа:
 1 – разделительная колонка;
 2 – дозатор; 3 – проба газовой смеси; 4 – приемник (детектор);
 5 – регистрирующий прибор

На рис. 16 приведена принципиальная схема масс-спектрометра. В основе масс-спектрометрического метода измерений лежит ионизация вещества и разделение ионов по их массам и энергиям. Исследуемый газ или пар дозирующим устройством вводится в электронный источник, в качестве которого обычно используют накаленный вольфрамовый катод. Ионизированный пучок подвергается воздействию электрического, а затем магнитного полей. Форма и размеры этих полей выбраны так, чтобы ионы с данным значением отношения массы m к заряду q ($m/q = idem$) собирались в отдельный сфокусированный пучок, подвергаемый регистрации. Точность измерений высокая. В настоящее время хроматограф и масс-спектрометры используются только как лабораторные приборы.

Независимо от метода непрерывного контроля за процессом горения при помощи стационарных приборов необходимо периодически контролировать анализы дымовых газов газоанализаторами.

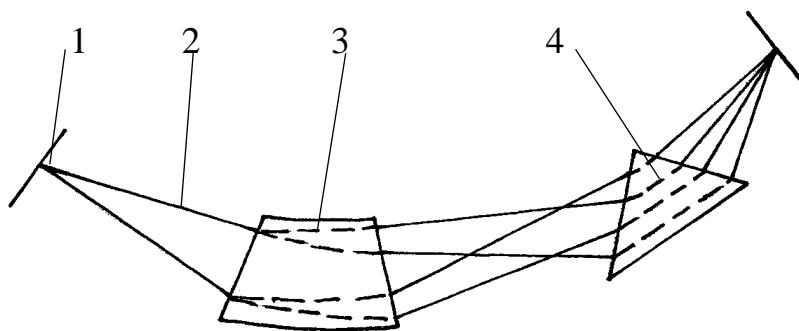


Рис. 16. Принципиальная схема масс-спектрометра:
1 – электронный источник; 2 – ионизирующий пучок газа;
3 – камера электрического поля; 4 – камера магнитного поля

Контроль температуры в топочном пространстве. Температура в топках СКР зависит от избытка воздуха, влажности и расхода щелока, а также от полноты его сгорания. Температуру в горящем факеле щелока в топках СКР не контролируют из-за трудности измерения. Температуру контролируют в топочном пространстве СКР вне зоны горения факела.

Наиболее распространенными приборами для измерения высоких температур являются манометрические термометры, электрические термометры сопротивления, термоэлектрические термометры (термопары), оптические, радиационные и фотоэлектрические пирометры и другие измерительные устройства [23].

Применение манометрических и термоэлектрических приборов осложняется тем, что они должны быть установлены непосредственно в топке. При сжигании щелока топочная среда агрессивна и поэтому выбор устойчивых защитных чехлов для термомпар весьма затруднителен, а применение манометрических термометров практически исключается. Кроме того, при измерении температур выше 1000°C сравнительно устойчивыми являются только платино-платинородиевые термомпары. Но они в условиях топочной среды подвергаются науглероживанию и разрушению. Поэтому целесообразно для контроля температур в топках СРК применять радиационные пирометры.

Для измерения высоких температур обычно применяют оптические пирометры рефракторного типа. Рефракторные оптические системы концентрируют лучистый поток после линзы и диафрагмы внутри корпуса под углом φ . Приемник излучения, расположенный внутри топки, обычно выполняется в форме тонкой металлической пластинки, покрытой сажей. Температура пластинки измеряется несколькими последовательно соединенными термомпарами. Для наводки на измеряемое тело служит окуляр, закрываемый дымчатым светофильтром. Для вывода проводов от термомбатареи используется патрубок.

Электродвижущая сила радиационного пирометра может регистрироваться пиущим потенциометром или осциллографом, а также служить импульсом для автоматического отключения подачи топлива в случае понижения температуры в топке до опасных пределов. Так как излучательная способность топочного факела зависит от эмиссионных характеристик, для повышения устойчивости и надежности показаний прибора целесообразно установить в топке глухую (со стороны топочного объема) керамическую трубу и на дно ее наводить оптический пирометр.

Автоматические системы управления технологическим процессом СРК [25–33] контролируют энергетические характеристики и диагностируют процесс горения. Распространение получают многомодульные автоматические системы управления, в которых параметр диагностируют и контролируют специализированные модули. В работе [2] отмечается, что для управления работой СРК введена в действие АСУ BLRBOMASTER, состоящая из пяти модулей управления. Модуль обдувки сажи рассчитывает теплопередачу экранов и принимает оптимальные решения на включение обдувки, благодаря чему расход пара сокращается на 30 %. Модуль

нагрузки регулирует расходы первичного и вторичного воздуха в соответствии с нагрузкой СРК. Модуль теплоты поддерживает постоянное поступление тепловой энергии с СРК, изменяя расход и давление черного щелока в зависимости от его сухости и зольности. Модуль интенсивности горения регулирует температуру в топке, обеспечивая минимальный выброс двуокиси серы. Модуль координации горения минимизирует общий расход воздуха, контролируя содержание углерода в дымовых газах. За год работы АСУ не потребовалось ни одной внеплановой промывки экранов СРК.

Процесс горения диагностируется химическими, термокондуктивными, термомагнитными, хроматографическими и масс-спектрометрическими газоанализаторами по результатам сравнения показаний стрелочных приборов с допустимыми уровнями контролируемых параметров.

Применяемые на отечественных заводах схемы контроля и регулирования энергетических и технологических характеристик СРК [34] имеют ряд существенных недостатков: несовершенство и низкая надежность применяемых приборов; отсутствие стандартных приборов для измерения температуры в топочном пространстве; отсутствие приборов для надежного контроля процесса горения и полноты сгорания топлива; низкая надежность стационарных газоанализаторов; отсутствие комплексной регулирующей системы для аварийной остановки СРК.

12.2. Диагностирование технического состояния барабанов

Обследование, определение объемов и методов контроля металла барабанов [34] проводятся в соответствии с «Основными положениями по ультразвуковой дефектоскопии сварных соединений котлоагрегатов и трубопроводов тепловых электростанций, ОП № 501 ЦД-75» (СПО «Союзтехэнгерго», 1978) и ГОСТ 21105-75 «Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод».

Обследование металла барабанов паровых котлов высокого давления проводят 1 раз в 3–4 года в период капитального ремонта котла и 1 раз в 2 года в период среднего ремонта. Осмотр отремонтированных наплавкой и приваркой мест в предыдущие ремонты производится 1 раз в 2 года. В случае выявления дефекты необходимо устранить.

Проверку состояния металла барабана и устранение дефектов выполняют при снятых внутрибарабанных устройствах и тепловой изоляции барабана. Проверке подлежат наиболее характерные места повреждений барабанов: поверхности трубных гнезд; внутренние поверхности штуцеров, а также примыкающие к трубным отверстиям участки внутренних поверхностей барабана в радиусе 200 мм; контрольные участки внутренней поверхности барабана размером 200×200 мм на каждом листе обечайки; внутренние поверхности обоих днищ и лазовых отверстий; не менее 15 % наружной поверхности днищ (сектор 60° от лаза до шва); не менее 15 % длины швов и примыкающие к ним участки внутренней поверхности барабана (по 40 мм с обеих сторон шва); не менее 15 % длины швов, крепящих внутрибарабанные устройства и примыкающие к ним участки внутренней поверхности барабана (по 20 мм с обеих сторон). В случае выявления повреждения основных швов на внутренней поверхности вскрывают наружную изоляцию на всем протяжении повреждённого шва. Намеченные для обследования участки зачищают абразивным кругом.

Если при выборочном контроле поверхностей барабана будут обнаружены дефекты, следует проверить поверхности всех гнезд и штуцеров методом магнитопорошковой дефектоскопии; если при выборочном ультразвуковом контроле сварных швов будут обнаружены дефекты по размерам больше допускаемых правилами Ростехнадзора для барабанов котлов, то такие швы должны быть подвергнутся 100 %-му контролю. На кромках всех отверстий диаметром более 70 мм с внутренней стороны барабана должна быть снята фаска.

Во время контроля сплошности барабана составляют формуляр развертки барабана, на котором пронумеровывают все трубные отверстия; отмечают отверстия с трещинами, коррозионными язвами на их поверхности и в зонах, прилегающих к трубным отверстиям; наносят дефекты сплошности металла и сварных швов (трещины, раковины и др.) с указанием их размеров, а также наибольшей глубины и контуров вышлифовки каждого дефекта.

Технологические дефекты возникают иногда из-за некачественного изготовления стального листа или в процессе производства на заводе-изготовителе котлов.

К дефектам стального листа относятся трёхслойность, расслоения, трещины, волосовины, закаты и другие дефекты, являющиеся концентратами напряжений. При внешнем осмотре листа расслоения можно обнаружить,

когда они выходят на поверхность. Например, следует обращать внимание на кромки листа лаза барабана.

К наиболее часто встречающимся дефектам котельного производства относятся чрезмерная овальность барабанов, резкие переходы в местах расточки днищ под стыковку с обечайками, дефекты сварки, грубые риски в отверстиях для труб и др. Трещины и другие дефекты технологического происхождения могут быть в основных сварных соединениях барабанов в швах приварки штуцеров и защитных рубашек.

В процессе эксплуатации возможно возникновение трещин в местах приварки к барабану после термической обработки деталей внутри барабанных устройств. Появление трещин в барабанах котлов во время эксплуатации вызывается следующими причинами: высоким уровнем действующих напряжений; большими температурными напряжениями, которые возникают при пусках и установках (особенно аварийных из-за повреждений труб экранов и экономайзера); коррозией (особенно стояночной, возникающей из-за плохой консервации котла или при ее отсутствии); низкой деформационной способностью металла барабана.

В настоящее время в эксплуатации находятся барабаны котлов среднего и низкого давления с заклепочными соединениями листов днищ и обечаек и с вальцованными соединениями труб с барабаном и коллекторами. В этих соединениях после длительной эксплуатации выявляются трещины от каустической хрупкости. Через трещины вода из труб, барабанов и коллекторов подается в топку на огарок с температурой 850...950 °С. Попадание воды на высокотемпературный огарок сопровождается вторичным взрывом и серьезной аварией [3]. Хрупкие разрушения в заклепочных швах выявляются в нижних барабанах вертикально-водотрубных котлов и в грязевиках горизонтально-водотрубных котлов.

При капитальном ремонте котлов выполняется дефектоскопический контроль состояния металла барабанов магнитопорошковым и ультразвуковым методами на отсутствие трещин в металле (в заклепочных швах, у штуцеров, водоуказательных приборов, линий рециркуляции, ввода пара для прогрева барабанов, в перемышках между трубными отверстиями). Кроме дефектоскопического контроля следует проводить тщательные осмотры с простукиванием заклепок при технических освидетельствованиях котлов. Дефектные заклепки, а также места неплотностей и пропусков, солевых отложений (наростов) у кромок накладок, заклепок, мест вальцовки труб и т.п. необходимо отмечать на развертке барабана.

При проверках барабанов котлов необходимо тщательно проверять швы нижних барабанов, а в самих швах – участки пересечения кольцевых и продольных швов; передний продольный шов нижнего барабана, если были случаи обвала обмуровки, защищающей от обогрева из топки; задний продольный шов верхнего заднего барабана; клёпаные грязевики и швы приклепки к барабанам камер и опускных труб; воротники приклепанных перепускных труб между барабанами и вводом питательной воды; швы приклепки днищ нижних барабанов; завальцованные концы труб.

Проверку заклепочных и вальцованных соединений барабанов паровых котлов для выявления трещин, коррозионных язвин, закатов, расслоений и т. п. осуществляют внешним осмотром, ультразвуковой и магнитопорошковой дефектоскопией в соответствии с «Методикой контроля котельных барабанов с заклепочными соединениями МТ 34-70-006-83».

Перед контролем знакомятся с технической документацией по эксплуатации и ремонту, в которой регистрируются неполадки в работе барабанов и сухопарников, упуски воды, течи и пропаривания в заклепочных и вальцованных соединениях, обрывы головок заклёпок и т. п.

До проведения контроля подготавливают чертежи развертки барабанов и сухопарника по наружной и внутренней поверхностям с указанием на них диаметра и длины барабана (сухопарника), толщины стенок обечаек днищ, накладок и трубной решетки, шага заклепочных швов, диаметра заклепочных головок и отверстий.

Внешний осмотр проводят перед зачисткой и после зачистки барабана и сухопарника для выявления участков с солевыми отложениями у заклёпок или кромок накладок, а также мест пропаривания, течи, обрыва заклепочных головок, трещин на обечайках, днищах и др. При внешнем осмотре используются оптические средства и цветная дефектоскопия [35].

При осмотре вальцованных соединений необходимо обращать внимание на высоту и угол развальцовки, на овальность внутренних диаметров развальцовки труб. На вальцованных соединениях не должно быть трещин. Овальность и конусность по внутреннему диаметру развальцованной трубы допускаются не более 0,2 мм. Трубы с рваными концами, трещинами заменяются. Конец разбортованной трубы не должен иметь утонение более 20 % проектной толщины. Неплотности вальцованных соединений при отсутствии других дефектов устраняют подвальцовкой.

Ультразвуковой дефектоскопией проверяют участки заклепочных соединений вокруг заклёпок и трубных отверстий, а также трубную

решетку по участкам вокруг отверстий изнутри барабана. Ультразвуком контролируется состояние днища и обечайки или листа обечайки, если заклепочный шов изготовлен внахлестку. В заклепочных соединениях с двумя накладками надежно могут быть проверены только накладки.

Качество проверенной ультразвуковой дефектоскопией участков оценивается как «Негоден» (брак), «Условно годен» и «Годен».

Оценка «Негоден» выставляется, когда возле заклепочных отверстий или трубных гнезд выявлен дефект, амплитуда эхо-сигнала от которого равна или превышает амплитуду эхо-сигнала от искусственного отражателя «надпила» и когда наличие дефекта подтверждено методом порошковой дефектоскопии после удаления заклепки (трубы).

Оценка «Условно годен» (допускается к эксплуатации не более чем на один год с повторным контролем) дается, когда выявлен дефект, амплитуда эхо-сигнала от которого меньше амплитуды эхо-сигнала от искусственного отражателя «надпила». Если при повторном контроле не будет отмечено роста дефектов, то следующий контроль проводится через два года эксплуатации котла.

Оценка «Годен» дается, когда в процессе контроля на проверенном участке не выявлены какие-либо дефекты.

Магнитопорошковая дефектоскопия применяется для обнаружения дефектов, выходящих на поверхность металла обечаек, днищ, трубных и заклепочных отверстий. При замене развальцованных труб контролируются трубные гнезда и мостики между отверстиями. Контролируемая поверхность зачищается до металлического блеска. Если обнаружены недопустимые дефекты, то возможность ремонта и дальнейшей эксплуатации барабана (сухопарника) определяется владельцем котла.

12.3. Диагностирование дефектов трубопроводов

При изготовлении труб поверхностей нагрева во время монтажа или при ремонте котла могут возникнуть следующие дефекты: гофры на гнутых участках труб; утонение стенок растянутых участков гибов; овальность гибов выше допустимой; вмятины и задиры в местах закрепления труб на гибочных станках; утонение стенок труб ниже нижнего предела при абразивной зачистке концов труб для вальцовочных соединений; пережог концов труб при термообработке под вальцовку; пережог концов

труб при механизированной абразивной зачистке под вальцовку; изготовление поверхностей нагрева из небрежно хранившихся труб со следами значительной коррозии (выводящей толщину стенки ниже допусков); отклонение радиусов гибов и длин прямых участков выше допустимых значений; дефекты заготовок и сборки под сварку составных труб из отдельных участков; несоответствие указаниям чертежа и инструкции по сварке угла скоса кромок; смещение кромок соединяемых элементов, отклонение размеров и формы швов от требуемых чертежами, нормами, ТУ и инструкциями по сварке; трещины всех видов и направлений, выходящие на поверхность; наплавы, подрезы, прожоги, незаваренные кратеры, непровары, пористость и другие технологические дефекты; деформация и коробление сварных соединений участков труб; дефекты приварки труб поверхностей нагрева к элементам котлов и дефекты сборки под сварку; дефекты вальцовки труб поверхностей нагрева; расслоение, пленки, трещины на концах труб; разрывы на развальцованных участках труб; шероховатая поверхность внутри трубы на развальцованном участке; подрезы и резкие наматы в местах перехода развальцованной трубы в вальцовочный пояс и вальцовочного пояса в разбортованную часть; отжатия трубы в гнезде, щели и загрязнения между трубой и вальцовочным гнездом; отступления от максимального и минимального размеров выступающих концов труб, а также отклонения угла разбортовки от 15^0 ; недоход основания бортовочного колокольчика до кромки трубной доски или заход его за кромку на расстояние свыше 4 мм; уменьшение толщины стенки конца разбортованной трубы более чем на 20 %.

К дефектам монтажа относятся недоброкачественная сварка и попадание посторонних предметов в пароводяную систему котла. Появление свищей и разрывы стыков из-за некачественной сварки являются результатом неправильной разделки кромок стыка и его сборки, а также несоблюдения допусков и наличия непроваров.

В сварных стыках труб, выполненных контактной сваркой, встречаются дефекты в виде несплавления стыкуемых кромок, кольцевых трещин и перегрева прилежащего к стыку участка трубы из-за ускоренного развития ползучести. Повреждения угловых швов приварки змеевиков и штуцеров к коллекторам имеют вид кольцевых трещин вдоль линии сплавления со стороны змеевика или штуцера. Трещины образуются из-за нарушения

технологии сварки, а также при недостаточной компенсации термических удлинений труб.

Гибы труб являются наиболее распространенными и ненадежными элементами трубопроводов. Гибы обычно разрушаются из-за образования трещин на наружной поверхности вдоль наиболее растянутого при гибке волокна. В этом месте действуют наибольшие растягивающие напряжения, вызываемые изгибом поперечного сечения в результате утонения трубы при гибке, а толщина стенки минимальна из-за вытяжки.

Проверка гибов необогреваемых труб котлов и паропроводов с наружным диаметром 76 мм и более (независимо от углагиба) проводится визуальным осмотром, ультразвуковой дефектоскопией с замером фактической толщины стенки и измерением овальности. Измерение овальности проводят в средней частигиба, а ультразвуковому контролю подвергают 2/3 поверхностигиба, включая растянутую при гибке зону и обе боковые, нейтральные зоны.

Труднодоступные гибы с наружным диаметром менее 108 мм проверяются выборочно в количестве 20 %, а диаметром более 108 мм – в количестве 30 % [3]. К труднодоступным относятся гибы труб, которые не могут быть проконтролированы без демонтажа, например, гибы труб, объединенных в плотные пучки и связанных рамами или другими конструкциями, а также водо- и пароперепускных труб между барабанами двухбарабанных котлов. При проведении ультразвуковой дефектоскопии гибов необходимо руководствоваться инструкциями [36, 37].

Если при контроле дефектов не выявлено и запас достаточный, то гибы оставляют в эксплуатации. Если запас на пределе, то прочность проверяют сопоставлением фактических толщин и овальностей с допускаемыми, если толщина и овальность больше допускаемых – оставляют гибы в эксплуатации.

Гибы подлежат немедленной замене, если имеются дефекты по толщине стенки, овальности, трещины и др. Контроль гибов соединительных труб и трубопроводов в пределах котла проводится для каждогогиба трубы, а труб поверхностей нагрева – выборочно, в количестве 10 % числа гибов одного типоразмера по инструкции завода-изготовителя котла.

Овальность сечения A , %, в местах гибов труб определяется по формуле

$$A = \frac{2(D_{нmax} - D_{нmin})}{2(D_{нmax} + D_{нmin})} 100,$$

где $D_{нmax}$, $D_{нmin}$ – соответственно наибольший и наименьший наружные диаметры трубы в местегиба, измеряемые в одной плоскости контролируемого сечения, мм.

В практике критерием оценки овальности сечения гнутого участка трубы принято считать абсолютную разность между наибольшим и наименьшим линейными размерами, снятыми в данном сечении трубы по ее наружному диаметру.

Утонение стенки в гнутых участках труб не должно превышать значений, предусмотренных техническими условиями на изготовление изделия:

$$B = (S - S_{min})/S \cdot 100,$$

где B – утонение стенки, %;

S – номинальная толщина стенки прямой трубы, мм;

S_{min} – минимальная толщина стенки трубы в местегиба на растянутой стороне, мм.

Утонение стенки проверяется ультразвуковым толщиномером, или измерением толщины стенки после разрезки гибов, или засверловкой на растянутой сторонегиба, проводимой в выборочном порядке по усмотрению ОТК завода либо по требованию представителя Гостехнадзора.

На гibaх труб поверхностей нагрева не допускаются утонение стенки больше размеров, указанных в чертежах или стандартах на изделие, трещины, вмятины, задиры и другие дефекты. Перед гнутьем большой партии труб на отсутствие дефектов опытные гibaы проверяются внешним осмотром и прогонкой шара. При визуальном осмотре необходимо убедиться в правильности размеров и в отсутствии трещин.

При проверке и контроле гибов труб все сомнительные места зачищают напильником до блеска металла, шлифуют абразивной шкуркой и протравливают. Для травления труб из углеродистой и низколегированной сталей применяют 10 %-ный раствор азотной кислоты, а для труб из аустенитной стали – реактив Марблi. Трещины в металле будут отчетливо просматриваться через обычную лупу пятикратного увеличения. Протравленные места после внимательного осмотра необходимо промыть.

Проверку чистоты сечения-сужения внутреннего диаметра трубных элементов в местах сварных стыков и в гибах проверяют прогонкой контрольного шарика через змеевики сжатым воздухом давлением 0,4...0,6 МПа. Сужение внутреннего диаметра в сварных швах прямых труб не должно превышать $0,1 D_{\text{вн}}$. Диаметр шарика для проверки проходимости сварных швов прямых участков труб $D_{\text{шар}} = 0,9 D_{\text{вн min}}$.

В настоящее время применяется более быстрый способ нахождения суженных мест в трубах. При этом способе металлический шар, обладающий малой дозой радиации, за счет присутствия в нем изотопа цезия-137 отыскивается специальным прибором ШИ-65 (шарикоискатель). При проведении щупом этого прибора вдоль проверяемой трубы обнаруживают место застревания шарика. Дефектные участки сечения труб вырезают и заменяют гобы или переворачивают стык.

12.4. Диагностирование технического состояния оборудования содорегенерационных котлоагрегатов

Оборудование СРК в зависимости от применяемых методов и средств технического диагностирования разделяется на две группы:

- топочно-котельное;
- роторные машины технологические и общего назначения:

Диагностирование технического состояния топочно-котельного оборудования. К топочно-котельному относится оборудование топочной зоны, котельное оборудование, газоходы, трубопроводная обвязка барабанов.

Диагностирование технического состояния топочно-котельного оборудования направлено на своевременное обнаружение чрезмерных отложений золы на наружных и накипи на внутренних поверхностях труб, на выявление зон повышенной температурной коррозии, на обнаружение трещин и раковин в трубах и мест разгерметизации вальцовочных соединений труб в барабанах СРК. Для топочно-котельного оборудования диагностируются также повреждения леток плава и толщина наслоений застывания плава на летках.

Диагностирование отложений золы и сажи на наружных поверхностях труб СРК является острой производственной проблемой. Причины забивания трубных пучков и экранов отложениями золы и сажи до конца не исследованы. В работе [29] отмечено, что перегрузка котлоагрегатов не

является причиной их забивания. СРК средних размеров забиваются чаще, чем малые или большие. Существующие системы сигнализации о забивании котлов признаны недостаточными. Указывается, что ни одна из причин не является определяющей в забивании СРК, а процесс забивания вызывается комплексом причин.

Изучение механизма осаждения налета золы и сажи на поверхности труб исследовалось в работах [31–33]. На целлюлозном заводе фирмы «Crestbrook Forest Industries» (Канада) при работе с перегрузками происходили частые остановки СРК для очистки поверхности теплообменников [31]. Для нормальной работы котла его приходилось гораздо чаще промывать, чем на любом другом предприятии. Удалось выяснить механизм осаждения налета и природу его частиц. На основе полученных результатов было решено изменить принципы сдувки сажи. Сдувки стали проводить в местах интенсивного образования налета, которые определялись измерением температурных профилей котла.

В работе [32] отмечается, что массивное образование налета в пароперегревателе и котельных пучках труб СРК уменьшает теплопередачу и ведет к незапланированным остановам из-за образования пробок, мешающих прохождению топочного газа. Скорость образования налета зависит от количества и клейкости частиц в топочном газе. Клейкость частиц зависит от температуры, состояния контактирующей поверхности и состава налета, в особенности от содержания в нем хлоридов.

Для измерения скорости образования отложений от топочных газов был применен прибор Soofprobe [33]. Прибор охлаждается воздухом и может устанавливаться в пароперегревателе или в районе котельного пучка труб. Отложения образуются на поверхности прибора, а данные о скорости образования отложений и температуре печных газов преобразуются микропроцессором и записываются в графическом изображении. Прибор автоматически извлекается из топки, чистится и вновь вводится в СРК. Было установлено, что скорость образования отложений зависит от скорости подачи щелока, общего потока воздуха, содержания твердых частиц в черном щелоке.

Для диагностирования неисправностей выпарных аппаратов применяется метод непрерывного измерения расхода греющего пара и испарения воды [34]. Данные измерений используются для расчета теплового баланса выпарного аппарата.

Техническое диагностирование и обслуживание спрысков необходимы для нормальной работы СРК. Спрыски при эксплуатации засоряются, так как работают в условиях повышенной температуры и перегретого пара, способствующих коррозии [35]. При диагностировании измеряют скорость и давление потока, технические характеристики спрыска сравнивают с заданными (угол, ширина потока и т.д.).

В СРК важно раннее обнаружение течей в трубчатых элементах, находящихся под давлением, так как соединение воды и горячего сульфатного щелока может вызвать взрыв. Фирмами «Babcock & Wilcox» и «Westvaco» разработана и внедрена система с акустическими течеискателями [38]. В системе акустический сигнал утечки выделяется из более интенсивного акустического сигнала горения в топке. Проблемы с сигналами, возникающими при сдувке сажи, были преодолены тем, что система включалась во время пауз в операциях по обдувке сажи.

Акустические детекторы течей применяются для обнаружения утечек пара в трубопроводах СРК [39]. При разработке методики диагностирования исследованы звуковые спектры, возникающие при истечении пара с давлением 2...10 МПа через отверстия диаметром 0,13...15,88 мм; изучены шумы, возникающие в СРК. Шум из-за турбулентных потоков газов при горении в СРК стабилен: колебания акустических сигналов не превышают 2 дБ, а основные частоты находятся в области до 0,2 кГц. В верхних зонах СРК уровень звукового давления составляет 104 дБ, а в нижних 106 дБ. Шум при обдувке сажи возникает на частотах до 6 кГц с энергией в 100 раз большей, чем от горения, поэтому на время обдувки акустический детектор нужно отключать.

Диагностирование структурных параметров технического состояния роторного оборудования. К этой группе оборудования относятся *технологические роторные машины и роторные машины общего назначения*: дисковые и каскадные испарители, смесители сульфата натрия, дисковые питатели, дымососы, вентиляторы, насосы, приводы обдувочных аппаратов, мешальные устройства. Диагностирование технического состояния роторного оборудования направлено на прогнозирование работ по техническому обслуживанию и ремонту составных частей оборудования и предотвращение отказов по технической части.

Вентиляторы и дымососы. На привод вентиляторов и дымососов (тягодутьевых машин) расходуется при номинальной нагрузке более

одной трети общего расхода электроэнергии, потребляемой СРК. Отказы этих машин сопровождаются длительными ремонтными работами. Повреждения тягодутьевых машин во время работы могут быть вызваны причинами *механического, электрического и аэродинамического* характера.

Причинами механического характера являются: неуравновешенность рабочего колеса в результате износа или отложений золы (пыли) на лопатках; износ элементов соединительной муфты, ослабление посадки втулки рабочего колеса на валу или ослабление растяжек крыльчатки; ослабление фундаментных болтов или недостаточная жесткость опорных конструкций; ослабление затяжки болтов корпусов подшипников; неудовлетворительная центровка роторов электродвигателя и тягодутьевой машины, чрезмерный нагрев и деформация вала вследствие повышенной температуры дымовых газов и другие отклонения структурных параметров технического состояния составных частей машины от работоспособного.

Причиной неисправности электрического оборудования является большая неравномерность воздушного зазора между ротором и статором электродвигателя.

Причиной неисправности газоходов и дымососов является различная производительность по сторонам дымососов с двухсторонним всасыванием (несимметричная). Аэродинамические силы в этом случае возникают при одностороннем заносе золой воздухонагревателя или при неисправной регулировке заслонок и направляющих аппаратов. К причинам аэродинамического характера можно отнести также абразивный износ рабочих лопаток колеса, внутренних поверхностей всасывающих карманов и улиток тягодутьевых машин из-за транспортирования дымовых газов с большим содержанием золы и пыли.

В работе [40] отмечается, что причинами отказов 229 тягодутьевых машин явились 113 отказов подшипников из-за низкого качества или истощения их ресурса при длительной эксплуатации, 64 отказа из-за абразивного износа рабочих лопаток и несвоевременного вывода в ремонт машин, 52 отказа из-за повреждения валов, муфт, систем смазки.

Дефекты и повреждения тягодутьевых машин могут быть обнаружены на ранней стадии их возникновения средствами диагностирования технического состояния, приведенными в табл. 23.

Методы и средства диагностирования оборудования СРК

Технологический процесс или элемент оборудования	Диагностируемый структурный параметр	Метод диагностирования	Средства диагностирования
1	2	3	4
Технологическое диагностирование			
Процесс горения, полнота сгорания топлива	Состав дымовых газов	Термокондуктивный	Термокондуктометрический газоанализатор
		Термомагнитный	Термомагнитный газоанализатор (кислородомер)
		Сорбционный	Хроматографы ГСТЛ, газохроматограф-3101
		Ионизационный	Масс-спектрометр
		Химический	Газоанализаторы ВТН, ГХП-3М, ГХП-100
Температурное поле в топочном пространстве	Температура	Радиационный	Радиационный пирометр с рефракторной оптической системой
		Термоэлектрический	Термопары платиноплатино-радиевые
		Фотоэлектрический	Фотоэлектрические пирометры
Процессы питания котла водой и парообразования	Режим питания барабанов и трубопроводов водой, режим прогрева и дренирования паропроводов	Акустический	ВШВ-003, ВШВ-003МП (акустический тракт)

1	2	3	4
Диагностирование котельно-топочного оборудования			
Пучки и экраны труб	Скорость образования отложений золы и сажи	Осаждение	Прибор Soofprobe (США)
Барабаны, трубопроводы, форсунки, летки	Толщина накипи отложений плава включения	Осмотр, измерение линейных размеров	–
		Магнитопорошковый, ГОСТ 21106-93	ПМД-70, ПМД-50П, дейтропульсы SWG 1000/1500, SWG 2000/4000 (ФРГ), КН-15 «Магнито-флюкс» (США)
Барабаны, трубопроводы, коллекторы	Уменьшение толщины стенок труб от коррозии, эрозии	Ультразвуковой	УДТ-4М, Микрон-4, ИДЦ-8
		Импульсный эхо-метод	УТ-80Б
		Электропотенциальный	ИГТ-2ВТИ, ИГТ-10НК
		Магнитопорошковый, ГОСТ 21106-87	ПМД-70, ПМД-50П, дейтропульсы SWG 1000/1500, SWG 2000/4000 (ФРГ), КН-15 «Магнито-флюкс» (США)
Футеровка топки	Нарушение футеровки	Тепловизионный	ИФ-14ТВ, ИФ-20Т
Диагностирование роторных машин			
Динамически нагруженные вращающиеся детали и сборочные единицы вентиляторов, дымососов, насосов, каскадных испарителей,	Дефекты роторов, валов, лопастей, крылаток, шнеков, подшипников, опор и других вибрирующих частей	Вибрационный, ГОСТ 26493-85	ВИП-2, ВШВ-003, ВШВ-003МП, ВМ-1, ВПМ-1, ВВМ-337, ВМТ-133

1	2	3	4
смесителей щелока и сульфата натрия, мешалок растворителей плава	Дефекты подшипников, устройств смазки и охлаждения подшипников	Термоэлектрический	Термопары
	Трещины, раковины в сварных соединениях лопаток и ступицы	Ультразвуковой, ГОСТ 14782-86	УД-10УА, УТ-91, УТ-31МЦ
	Аэродинамические дефекты вентиляторов и дымососов (отложения золы и пыли, неправильная регулировка заслонок, абразивный износ)	Измерение расходов газов (воздуха)	Дифференциальные манометры, магнитные кислородомеры, суммирующие регуляторы расхода воздуха

Питательные насосы являются одним из самых ответственных элементов СРК. Паровой котел имеет незначительный запас воды. Прекращение подачи воды от питательного насоса даже на короткое время может привести к испарению всей воды, находящейся в паровом котле. Перегрев парового котла грозит аварией. Согласно правилам Ростехнадзора для СРК устанавливают не менее двух питательных насосов. Насосы приводятся в действие независимо один от другого. Один из питательных насосов имеет паровой привод. При наличии двух независимых источников питания электроэнергией допускается установка всех насосов только с электроприводом. Суммарная производительность питательных насосов с электроприводом должна быть не менее 110 %, а с паровым приводом не менее 50 % номинальной производительности СРК.

Механические повреждения и неполадки питательных насосов происходят вследствие неудовлетворительного ремонта и обслуживания,

неправильной сборки и центровки привода, балансировки во время монтажа, плохой смазки подшипников, ошибок при пуске и остановке [40]. Средства диагностирования структурных параметров технического состояния насосов приведены в табл. 23.

Каскадные испарители. Возможны следующие неполадки каскадных испарителей: ослабление болтовых соединений ротора с валом; небаланс ротора и неравномерность вращения относительно оси; заклинивание ротора. Небаланс ротора каскадного испарителя возникает из-за неравномерного отложения остатков сгущенного щелока на трубах по окружности ротора. Заклинивание ротора наблюдается при длительной работе СРК при остановленном каскадном испарителе, когда в ванне остается плотный черный щелок. В этом случае пуск электродвигателя может вызвать поломку или повреждения передаточных механизмов привода. Как правило, после продолжительного останова ротор перед пуском проворачивают вручную. Для каскадных испарителей характерны также свойственные всем роторным машинам дефекты в виде изменения структурных параметров технического состояния подшипников, элементов привода и др.

Растворители плава. Характерные неполадки растворителей плава – износ лопастей, дебаланс валов мешалки и привода, нарушение структурных параметров технического состояния подшипников и сборочных единиц привода. Неполадки насосов рассмотрены выше. К неполадкам растворителя плава следует отнести также коррозионное разрушение внутренней поверхности корпуса. Ускоренному коррозионному износу подвержена часть внутренней поверхности корпуса, где происходит колебание уровня зеленого щелока (на границе между воздухом и зеленым щелоком).

Смесители сульфата. Неполадками смесителей сульфата являются износ лопастей; отказы нижнего подшипника скольжения вала мешалки, расположенного в сульфатном щелоке, неполадки верхнего подшипника качения и сборочных единиц привода.

На ранней стадии обнаружения неисправностей сложно отличить технологические неполадки от дефектов оборудования. В табл. 23 приведены методы и средства диагностирования технологических характеристик и дефектов технического состояния.

Измерение вибрационных функций при диагностировании технического состояния оборудования. Вибрационное диагностирование является наиболее распространенным и эффективным методом контроля

технического состояния оборудования. Схема измерения и обработки вибрационных характеристик объекта приведена на рис. 17. Вибропреобразователь устанавливается в контрольной точке диагностируемого узла объекта. Измеренная вибропреобразователем вибрационная характеристика в виде электрического сигнала поступает в предварительный усилитель, а затем в регулирующее устройство.

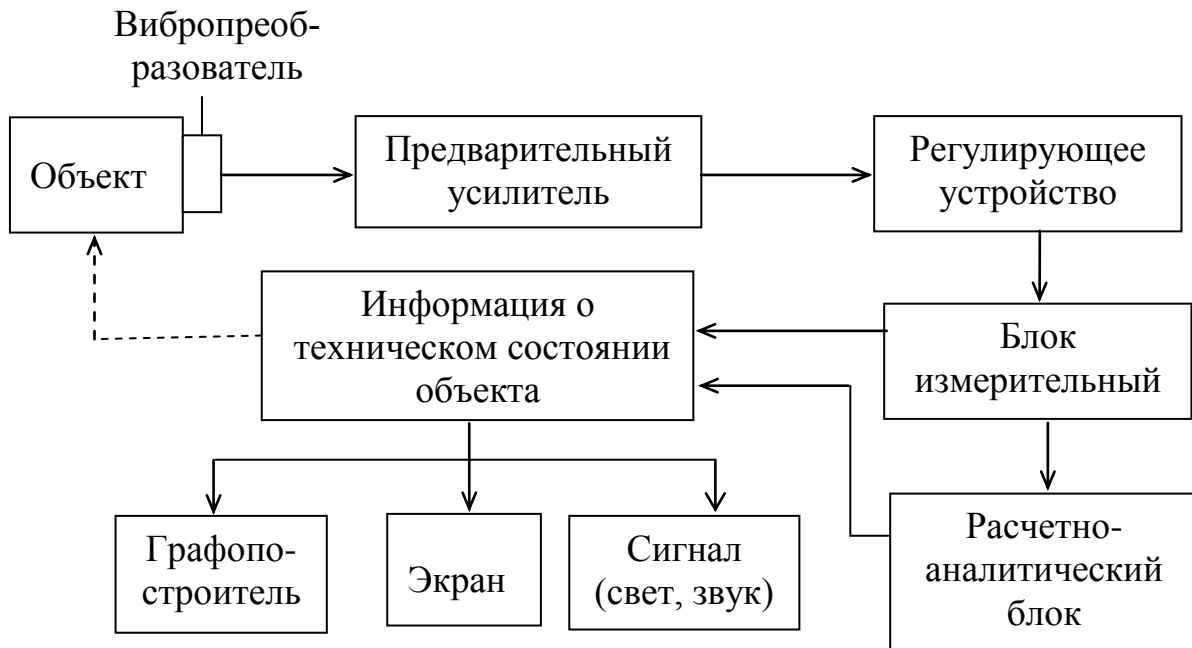


Рис. 17. Схема измерения и обработки вибрационных сигналов при вибрационном диагностировании объекта:
 ————— прямая связь; - - - - - обратная связь

Из вибрационных характеристик регулирующим устройством выделяется диагностическая часть и подается в блок измерительный, в котором определяются ее численные (цифровые) значения и направляются в расчетно-аналитический блок. В расчетно-аналитическом блоке исключаются грубые ошибки наблюдений. Значения вибрационных характеристик обрабатываются методами математической статистики. Статистическими методами определяются закон распределения единичных измерений вибрационных характеристик m_v как случайной величины, среднее квадратическое отклонение измеренных значений σ_v от среднего арифметического, пределы доверительной вероятности.

Экстремальные значения вибрационной характеристики в анализируемой выборке проверяются на грубую ошибку измерений

$$\begin{aligned} V_{i\max} &\leq m_v + 3 \sigma_v; \\ V_{i\min} &\geq m_v - 3 \sigma_v, \end{aligned} \quad (11)$$

где $V_{i\max}$, $V_{i\min}$ – соответственно максимальное и минимальное значение вибрационной характеристики;

m_v – среднее арифметическое значение вибрационной характеристики;

σ_v – среднее квадратическое отклонение вибрационной характеристики.

Если неравенства (11) не выполняются, то экстремальные значения как грубые ошибки измерений исключаются из дальнейшей обработки выборки при расчетах статистических характеристик. После исключения грубых ошибок измерений для выборки измеряемых значений вибрационной характеристики статистическими методами определяются оценочные критерии: виброперемещение $A_{\text{доп}}$, виброскорость $V_{\text{доп}}$, виброускорение $a_{\text{доп}}$, тренд вибрации $T_{\text{доп}}$ и др.

Сравнение измеренных значений вибрационной характеристики с допустимыми уровнями определяет оценку технического состояния объекта (рис. 17). Для объектов, у которых при ухудшении технического состояния вибрация, например V_i , возрастает, оценка производится по уравнениям: допустимо $V_i \leq V_{\text{доп}}$; недопустимо $V_i > V_{\text{доп}}$. Для объектов, у которых ухудшение технического состояния сопровождается снижением вибрации, оценка производится по уравнениям: допустимо $V_i \geq V_{\text{доп}}$; недопустимо $V_i < V_{\text{доп}}$. Оценка «Недопустимо» свидетельствует об ухудшении структурных параметров технического состояния объекта.

Ошибка отдельных измерений вибрационной характеристики прямо пропорциональна числу вариантов измерений и обратно пропорциональна корню квадратному из числа параллельных измерений. Общая погрешность измерений зависит от неоднородности вибрационной характеристики объекта, а также от ошибок, связанных с погрешностью аппаратуры и неточностью приборов.

Ошибки измерений вибрационной характеристики суммируют. Перед суммированием абсолютные ошибки измерений выражают в относительных величинах, % :

$$P_i = \frac{\Delta y_i}{y_i} 100, \quad (12)$$

где P_i – относительная погрешность измерений i -м прибором;

Δy_i – абсолютная погрешность i -го прибора;

y_i – наибольшее значение измеряемой величины на соответствующей шкале i -го прибора измерительной аппаратуры.

Общая погрешность измерений определяется по формуле

$$N = \sqrt{\sum_{i=1}^n P_i^2}.$$

При измерении вибрационной характеристики переносной виброизмерительной аппаратурой по схеме рис. 17 общая погрешность измерений определяется по формуле

$$N = \sqrt{\sum_{i=1}^3 P_i^2},$$

где P_1 – относительная погрешность виброизмерительного прибора;

P_2 – относительная погрешность регистрирующего прибора;

P_3 – относительная погрешность измерительных инструментов при расшифровке виброграммы.

При анализе измерений учитывается измеряемый интервал контролируемой величины. В расчетную формулу (12) подставляется наименьшее значение Δu_i .

Величины и сочетания структурных параметров технического состояния объекта (дисбаланс, степень износа, радиальный зазор, режим смазки, раковины, трещины и др.) влияют на погрешность измерений. Величины и уровни отклонений структурных параметров изменяются при наработке в широких пределах. Текущие значения уровней отклонений структурных параметров технического состояния от исправного могут как возрастать вследствие развития дефектов, так и убывать. Изменения структурных параметров технического состояния объекта, как правило, нелинейно отражаются вибрационными характеристиками.

Сочетание структурных параметров технического состояния объекта изменяется в зависимости от наработки. Каждому измерению вибрационной характеристики объекта соответствует случайное сочетание структурных параметров технического состояния.

Вибрационная реакция на изменения уровней и сочетаний структурных параметров технического состояния объекта является неоднородной. Для повышения достоверности диагностирования наряду с расчетом общей погрешности измерений до диагностирования проводится несколько серий параллельных измерений для проверки воспроизводимости диагноза. Проверка воспроизводимости вибрационного диагностирования является определяющей при анализе нормативных критериев и допустимых уровней вибрационных характеристик.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Непенин Ю.Н. Технология целлюлозы: В 3 т.; Т.2. Производство сульфатной целлюлозы. М.: Лесн. пром-сть, 1990. 600 с.
2. Смоляницкий Б.З., Зайцев А.Н. Регенерация сульфатных щелоков. М.: Лесн. пром-сть, 1987. 312 с.
3. Жучков П.А. Тепловые процессы в целлюлозно-бумажном производстве. М.: Лесн. пром-сть, 1978. 408 с.
4. Оборудование целлюлозно-бумажного производства: Т.1. Оборудование для производства полуфабрикатов / Под ред. В.А. Чичаева. М.: Лесн. пром-сть, 1981. 368 с.
5. Поляков Ю.А., Роцин В.И. Производство сульфатной целлюлозы. М.: Лесн. пром-сть, 1979. 376 с.
6. Новикова А.И. Технологические расчеты материального и теплового балансов содорегенерационного отдела завода сульфатной целлюлозы: учеб. пособие. Л.: ЛТИЦБП, 1983. 78 с.
7. Липовков И.З. Содорегенерационные котлоагрегаты. М.: Лесн. пром-сть, 1977. 224 с.
8. Липовков И.З. Сжигание сульфатного щелока. М.: Лесн. пром-сть, 1979. 128 с.
9. Теплоэнергетика и теплотехника: справочник / Под ред. В.А. Григорьева, В.М. Зорина. М.: Энергия, 1980.
10. Сиваков В.П., Музыкантова В.И., Вураско А.В. Содорегенерационные котлоагрегаты. Технологическое и энергетическое назначение. Устройство и эксплуатация: метод. рекоменд. Екатеринбург: УГЛТА, 2000. 28 с.
11. Липовков И.З., Глейзер И.Ш. Взрывы в содорегенерационных котлоагрегатах и методы их предупреждения : Экспресс-информация. Целлюлоза и бумага. Вып. II-74. М.: ВНИПИЭИлеспром, 1974. 16 с.
12. Explosions – they're still rocking the industry / Grace Thomas // PIMA. 1988. Vol. 70. ¹ 10. P. 41-42.
13. Conversion to low odor improves recovery boiler efficiency and life / Garner Jerry W. // Pulp and Paper. 1989. Vol. 63. № 7. P. 91-95.
14. Жучков П.А., Волков А.Д., Бойков Л.М. Топочные взрывы в содорегенерационных агрегатах при попадании воды в плав // Бумажная промышленность, 1973. № 9. С. 4-6.

15. Stellung, Vegeby A. Corrosion on in black liquor recovery boilers // Pulp and Paper Magazine of Canada. 1969. № 8.
16. Plumby A.L., Levis E.L., Tallent R.G. External corrosion of water wall tubes in Kraft recovery furnace // TAPPI. 1966. Vol. 3.
17. Osborne M J. Summary report on activities of the black liquor recovery boiler Advisory Committee // TAPPI. 1970. Vol. 53. № 2.
18. Новый СРК с циклонной топкой // Бумажная промышленность. 1981. № 12. С. 8.
19. Rimpi P., Hopia R. Tampella recovery system for small-scale pulp mills // Pulp and Paper. 1987. Vol. 88. № 8. P. 72-75.
20. Nagai C., Matsumoro S., Hattori H. Development of fluidized bed chemical recovery boiler // Int. Chem. Recov. Conf., Ottawa, Apr. 3-6, 1989. Atlanta (Ga), 1989. P. 195-200.
21. Wolfe Bill. Many recovery boiler innovations have come in the past five years // Pulp and Paper. 1988. Vol. 62. № 10. P. 96-99.
22. Gurn Jack F. Composite tubes in black liquor recovery boilers - an up-data // 74-lh Annu. Meet. Tech. Sec. Can. Pulp and Pap. Assoc., Montreal, Jap.28-29, 1988, Prepr. Pt B. Montreal, 1988. P. 147-151.
23. Правила, рекомендованные для безопасности персонала содорегенерационных котлов. Апрель 1971 г.: Пер. с англ. М.: Энергобумпром, 1973.
24. Чистяков С.Ф., Радун Д.В. Теплотехнические измерения и приборы. М.: Лесн. пром-сть, 1982. 392 с.
25. Rytter Tom, Pennine Laura M. Burner management system at Leaf River // Paper. 1986. Vol. 206. № 6. P. 16-18.
26. Lizuka Kauyuki, Muramatsu Atsushi, Kuwata Ryuichi. A recovery controlled the worker of boilers // Toshiba Rev., 1986. Vol. 41. № 10. P. 886-888.
27. A computer recovery boiler burning high dry solids / Imelainen Keijo, Ekholm Jari, Kuukkanen Kari, Palsola Ilkka // Confr. Sysf 88, Montreal, Apr. 25-28, 1988. [Prepr.]. S.I. 1988. P. 109-114.
28. Доронин В. А. Автоматизация содорегенерационных агрегатов. М.: Лесн. пром-сть, 1988. 320 с.
29. Imelainen K., Ekholm J., Kuukkanen K., Palsola I. A computer - controlled recovery boiler burning high dry solids // Pulp and Pap. Can. 1989. Vol 90. № 4. P. 50-52, 54-55.
30. Smith I., Christlmeier F., Van Winkle R. Optimization of recovery boiler control // Pulp and Pap. Can. 1986. Vol. 87. № 3. P. 125-128.

31. Recovery boiler debottlenecking at the Varo Rulp Mill: Sweden / Hagelouist Lennart // Inf. Ñ hem. Recov. Conf., Ottawa, Apr. 3-6, 1989. Atlanta (Ga), 1989. P. 55-56.
32. Grace Thomas. Model behavior ; Science fiction becomes fact // PИМА. 1989. Vol. 72. № 4. P. 47-48.
33. Tran H. N., Elliott M., Barham D. Recovery boiler operation and plugging in Canada // Pulp and Pap. Ca. 1986. Vol. 87. № 7. P. 58-64.
34. Kowalsky G. Assessment of recovery boiler fouling at Grestbrook Forest Industries // Pulp and Pap. Can. 1988. Vol. 89. № 3. P. 132-136.
35. Isaak P., Tran H.N., Barham D., Reeve D.W. Stickness of fireside deposits kraft recovery units. Part II. The effect of potassium and surface treatment // Pulp and Paper Sci. 1987. Vol. 13. 1 5. P. 154-158.
36. ОСТ 108.31-75. Котлы стационарные паровые и водогрейные, трубопроводы пара и горячей воды. Нормы расчета на прочность. Л.: НПО ЦКТИ, 1981.
37. Инструкции по дефектоскопии гибов трубопроводов из перлитной стали (И-23-СД-80) Минэнерго СССР. М: Союзтехэнерго, 1980.
38. Grace Thornes M. Acoustic leak detection-one answer to a need // PИМА. 1988. Vol. 70. № 12. P. 53, 54
39. Marziale M.L., Guy C D., Nuspl S.P., Whitten P.G. Using sound to detect boiler leaks // TAP PI Journal 1989, Vol. 72. № 7. P. 67-71.
40. Баранов П.А. Предупреждение аварий паровых котлов. М.: Энергоиздат, 1991. 272 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1. Кругооборот щелочи и серы в натронно-целлюлозном и сульфатцеллюлозном производстве	4
1.1. Потери щелочи в производственном цикле	4
1.2. Круговой баланс и степень регенерации щелочи.....	7
1.3. Потери серы в производственном цикле	10
1.4. Круговой баланс и степень регенерации серы.....	12
1.5. Взаимосвязь баланса серы с балансом щелочи	14
2. Регенерация химикатов в содорегенерационных котлоагрегатах	16
2.1. Состав и количество сухого остатка, направляемого на сжигание	16
2.2. Масса топлива и теплота сгорания щелока	18
2.3. Теоретическая и практическая потребность в воздухе и полнота сгорания щелока	19
2.4. Основные химические процессы при сжигании сульфатных щелоков	23
2.5. Химические процессы, происходящие при сжигании натронных щелоков	28
3. Материальный баланс содорегенерационного котлоагрегата	30
3.1. Исходные данные для составления материального баланса	30
3.2. Выбор и обоснование технологической схемы	32
3.3. Определение количества сухих веществ в черном щелоке	33
3.4. Материальный баланс	41
3.5. Подготовка черного щелока перед подачей в содорегенерационный котлоагрегат	46
3.6. Баланс веществ по химическим реакциям	47
3.7. Определение объема газов при сжигании черного щелока	52
3.8. Составление сводной таблицы материального баланса....	53
4. Тепловой баланс содорегенерационного котлоагрегата.....	56
4.1. Определение прихода тепла	57
4.2. Определение расхода тепла	58
5. Энергетическое назначение и устройство содорегенерационных котлоагрегатов.....	61
6. Технологические схемы содорегенерационных котлоагрегатов	64
7. Конструкции содорегенерационных котлоагрегатов	67
8. Технологические расчеты оборудования содорегенерационного цеха	75

8.1. Расчет и выбор теплообменника для подогрева дутьевого воздуха дымовыми газами	76
8.2. Расчет и выбор подогревателя щелока	79
8.3. Расчет параметров и выбор электрофилтра	81
8.4. Расчет и выбор скруббера для улавливания уноса и утилизации тепла дымовых газов после электрофилтра	82
8.5. Расчет и выбор дымососов и вентиляторов	84
8.6. Расчет и выбор растворителя плава	84
8.7. Расчет и выбор бака-осветлителя для хранения и осветления зеленого щелока	85
8.8. Расчет и выбор бака для хранения упаренного черного щелока	86
8.9. Расчет и выбор установки для хранения, дозирования и подачи сульфата натрия	86
8.10. Расчет мощности электродвигателей насосов	87
8.11. Техничко-экономические показатели цеха	89
9. Производственно-технический контроль и обслуживание содорегенерационных котлоагрегатов	89
10. неполадки в работе содорегенерационного котлоагрегата и способы их устранения	93
11. Взрывы содорегенерационных котлоагрегатов	97
11.1. Причины взрывов	97
11.2. Меры предупреждения взрывов при эксплуатации	102
11.3. Усовершенствования содорегенерационных котлоагрегатов для предотвращения взрывов	106
11.4. Обеспечение безопасной эксплуатации содорегенерационных котлоагрегатов.....	108
12. Диагностирование содорегенерационных котлоагрегатов....	110
12.1. Диагностирование процесса горения	111
12.2. Диагностирование технического состояния барабанов	117
12.3. Диагностирование дефектов трубопроводов	121
12.4. Диагностирование технического состояния оборудования содорегенерационных котлоагрегатов	125
Библиографический список	136

Учебное пособие

Сиваков Валерий Павлович

Вураско Алеся Валерьевна

Музыкантова Вера Ивановна

**РЕГЕНЕРАЦИЯ ХИМИКАТОВ И ТЕПЛА
В СОДОРЕГЕНЕРАЦИОННЫХ КОТЛОАГРЕГАТАХ.
УСТРОЙСТВО И ДИАГНОСТИРОВАНИЕ**

ISBN 978-5-94984-542-4



Редактор Е.А. Назаренко
Компьютерная верстка О.А. Казанцевой

Подписано в печать 10.11.2015

Формат 60×84 1/16

Печать офсетная

Уч.-изд. л. 9,46

Усл. печ. л. 8,14

Тираж 300 экз.

Заказ №

ФГБОУ ВПО «Уральский государственный лесотехнический университет»
620100, Екатеринбург, Сибирский тракт, 37
Тел.: 8(343)262-96-10. Редакционно-издательский отдел

Отпечатано с готового оригинал-макета
Типография ООО «ИЗДАТЕЛЬСТВО УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ ЦЕНТР УПИ»
620062, РФ, Свердловская область, Екатеринбург, ул. Гагарина, 3