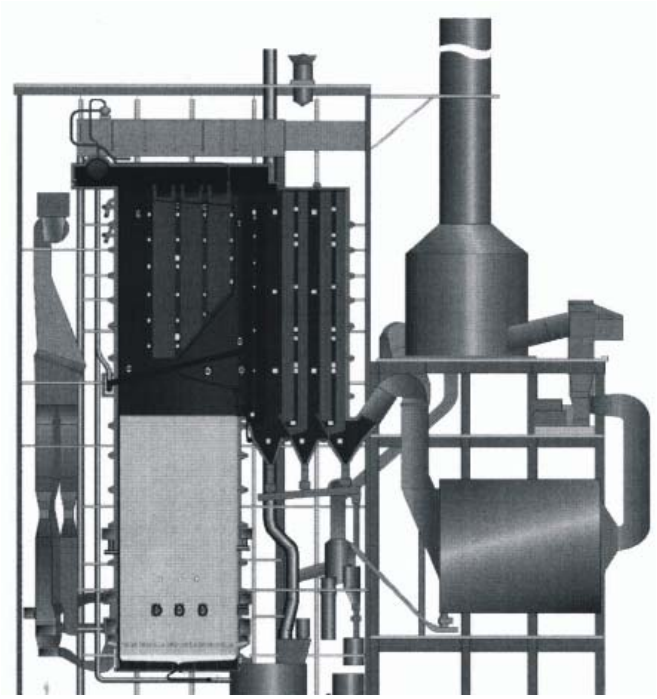
Библиотека СОК

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

С.Н. Смородин, А.Н. Иванов, В.Н. Белоусов

СОДОРЕГЕНЕРАЦИОННЫЕ КОТЛОАГРЕГАТЫ

Учебное пособие



Санкт-Петербург
2010

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Министерство образования и науки Российской Федерации

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Санкт-Петербургский государственный технологический университет растительных полимеров»

С.Н. Смородин, А.Н. Иванов, В.Н. Белоусов

СОДОРЕГЕНЕРАЦИОННЫЕ КОТЛОАГРЕГАТЫ

Учебное пособие

Санкт-Петербург
2010

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

ББК 35.77я7
С 516
УДК 676.05.013.6

Смородин С.Н., Иванов А.Н., Белоусов В.Н.

Содорегенерационные котлоагрегаты: учебное пособие / ГОУВПО СПб ГТУ РП. - СПб., 2010. -164 с.: ил. 50.

В пособии рассмотрены технологические схемы регенерационного цикла, конструктивные особенности СРК отечественного и зарубежного производства, вспомогательное оборудование. Приведены рекомендации по проектированию, эксплуатации и оптимизации процессов сжигания щелоков. Рассмотрены примеры расчетов материального и теплового балансов СРК.

Настоящее пособие предназначается для студентов всех форм обучения по специальностям 140104 «Промышленная теплоэнергетика» и 140105 «Энергетика теплотехнологий».

Рецензенты: д-р техн. наук, профессор кафедры теплотехники и теплоэнергетики Северо-Западного государственного технического университета **Каримов З.Ф.;**

канд. техн.наук, доцент, технический директор ООО «Гарант -Проект» **Мишин О.Н.**

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом университета в качестве учебного пособия.

© Смородин С.Н., Иванов А.Н., Белоусов В.Н., 2010
© ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный технологический университет растительных полимеров», 2010

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Предисловие

Учебное пособие «Содорегенерационные котлоагрегаты» предназначается для студентов всех форм обучения по специальностям 140104 «Промышленная теплоэнергетика» и 140105 «Энергетика теплотехнологий».

Основную направленность содержания учебного пособия авторы видят в раскрытии и анализе рабочих процессов, протекающих в СРК, что соответствует характеру подготовки специалистов как инженеров эксплуатационно – наладочного профиля.

В учебном пособии рассматриваются следующие разделы: место СРК в общем процессе производства сульфатной целлюлозы, теплофизические свойства черного щелока, технологические схемы регенерационного цикла, конструктивные особенности СРК отечественного и зарубежного производства, вспомогательное оборудование, очистка газовых выбросов содорегенерационных котлоагрегатов. Приведены рекомендации по проектированию, эксплуатации и оптимизации процессов сжигания щелоков. Рассмотрены примеры расчетов материального и теплового балансов СРК.

Значительная часть разделов пособия подготовлена на основе следующих изданий: Липовков И.З. «Содорегенерационные котлоагрегаты»; Глейзер И.Ш., Куклев Ю.И. «Повышение эффективности энерготехнологического оборудования целлюлозно-бумажного производства».

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

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Общая характеристика процесса сульфатного производства

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

В ***сульфитном*** способе в качестве реагента используется, так называемая, сульфитная варочная кислота. Она представляет собой раствор сернистой кислоты H_2SO_3, содержащий некоторое количество бисульфитов кальция, магния, натрия или аммония. Небеленая и беленая сульфитная целлюлоза являются одними из важнейших полуфабрикатов для получения искусственного волокна и выработки газетных, типографских, писчих и целого ряда других видов бумаги.

При ***сульфатном*** способе реагентом является смесь едкого натра NaOH и сульфида натрия Na_2S. В настоящее время этот способ самый распространенный из всех промышленных способов получения целлюлозы. Сульфатным способом можно перерабатывать любые древесные породы и растения. По всем показателям механической прочности сульфатная целлюлоза превосходит сульфитную, полученную из той же древесины. Жесткая сульфатная целлюлоза из хвойной древесины за свою чрезвычайно высокую механическую прочность получила название *крафт-целлюлозы*. Сульфатная целлюлоза труднее отбеливается и размалывается, но легче проклеивается и характеризуется более высокой термостойкостью и долговечностью, чем сульфитная. Однако выход сульфатной целлюлозы из древесины при варке оказывается на 3-4 % ниже, чем сульфитной, и это обстоятельство является существенным недостатком этого способа. Общая схема производства целлюлозы из древесины по сульфатному способу (рис. 1) на современных предприятиях складывается из следующих отдельных стадий:

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

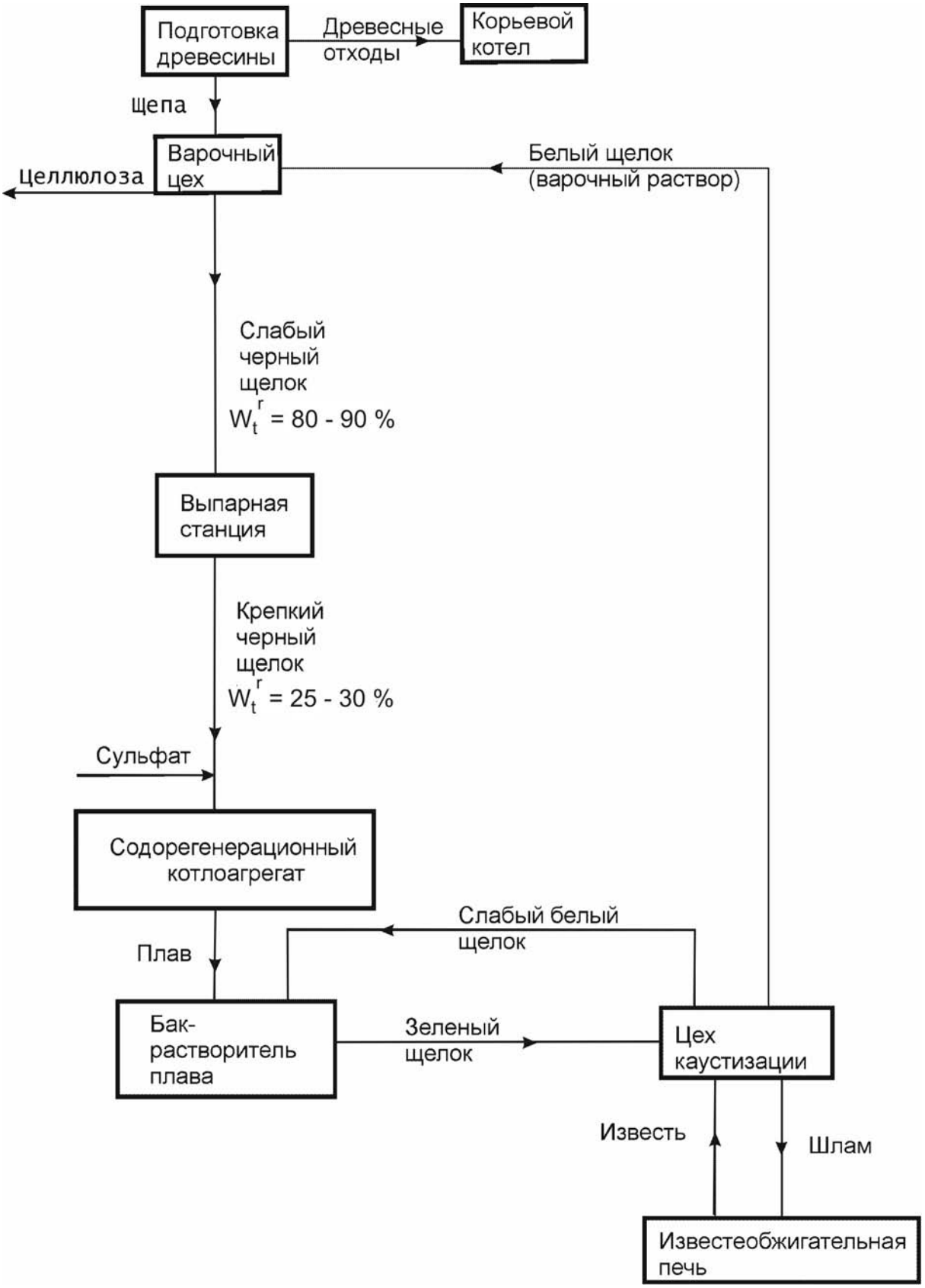


Рис.1. Схема производства сульфатной целлюлозы

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

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

Варка щепы. Варка происходит в периодически или непрерывно действующих варочных котлах под давлением 0,8–1,2 МПа и при температуре 170–180 °С. В котел подаются щепа и варочный *белый щелок*, содержащий в качестве активного реагента смесь едкого натра и сульфида натрия ($NaOH + Na_2S$). После варки полученная масса направляется на ***промывку*** (на рис.1 не показана), где происходит отделение от сваренной целлюлозы отработанного *черного щелока*. Целлюлозная масса затем проходит стадии ***очистки*** (от непровара и минеральных загрязнений), ***облагораживания***, ***отбелки***, ***обезвоживания*** и ***сушки***.

Отбелка целлюлозы проводится только в тех случаях, когда вырабатывается беленая целлюлоза, а облагораживание – только при производстве специальных видов целлюлозы, предназначенных для химической переработки.

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

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

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

Процесс регенерации щелочи состоит из трех операций:

1. *Выпаривание* черного щелока до концентрации 45–60 % сухого вещества в многокорпусных выпарных аппаратах или до 65–75 % при использовании концентраторов.

2. *Сжигание сгущенного щелока* в содорегенерационных котлах с получением регенерированного минерального продукта в виде плава. При сжигании щелока происходят реакции карбонизации

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

едкого натра (NaOH) и сульфида натрия (Na_2S) и восстановления сульфата натрия (Na_2SO_4), которые входят в состав минеральной части черного щелока. Поэтому плав состоит в основном из карбоната (Na_2CO_3 – 70 %), и сульфида натрия (Na_2S – 20 ÷ 25 %). Из СРК плав поступает в бак-растворитель, где растворяется слабым белым щелоком, образуя *зеленый щелок*.

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

$$CaO + H_2O = Ca(OH)_2,$$

$$Na_2CO_3 + Ca(OH)_2 = 2NaOH + CaCO_3\downarrow .$$

Полученный в каустизационных установках крепкий белый щелок откачивается в варочный цех, а образовавшийся шлам ($CaCO_3$) направляется в известеобжигательную печь для регенерации извести.

В процессе регенерации щелоков производится возмещение потерь щелочи за счет добавки в щелок перед его сжиганием сульфата натрия (Na_2SO_4).

Теплофизические свойства черного щелока

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

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

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

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

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

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

Состав минеральной части, в % от массы сухого остатка:

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

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

Одновременно с горением органической части щелока в его минеральной части протекают следующие основные реакции:

– карбонизация свободного и органически связанного едкого натра

$$2NaOH+CO_2=Na_2CO_3+H_2O;$$

– карбонизация сульфида натрия

$$Na_2S+CO_2+H_2O=Na_2CO_3+H_2S;$$

– регенерация серы

$$2SO_2+O_2+2Na_2CO_3=2Na_2SO_4+2CO_2;$$

– восстановление сульфата натрия

$$Na_2SO_4+2C=Na_2S+2CO_2.$$

В результате горения органической массы щелока и преобразования минеральной части сжигаемого щелока в топке содорегенерационного котла образуются дымовые газы, состоящие из продуктов полного сгорания (CO_2, SO_2, H_2O) и продуктов неполного

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

сгорания (CO, CH_4, H_2, H_2S, CH_3SH), а также плав, состоящий в основном из карбоната (Na_2CO_3), сульфида (Na_2S) , сульфата (Na_2SO_4) натрия и едкого натра (NaOH). Сульфат натрия и едкий натр образуются в плаве в результате неполного восстановления сульфида натрия и неполной карбонизации едкого натра.

В процессе карбонизации едкого натра часть углекислого газа, образовавшегося при сгорании органического углерода, переходит в плав, и, наоборот, из минеральной части щелока в газовую среду выделяются водяные пары.

В результате карбонизации сульфида натрия часть углекислого газа переходит в плав, при этом образуется сероводород, который, сгорая, образует воду и сернистый ангидрид в газовой фазе

$$H_2S + {}^{3}\!/_{2}\, O_2 \rightarrow SO_2 + H_2O.$$

При регенерации серы часть сернистого ангидрида (SO_2), образовавшегося при сгорании органической серы, переходит в плав, при этом выделяется углекислый газ.

При восстановлении сульфата из минеральной части щелока в газовую фазу выделяется часть кислорода, принимающего участие в окислении органических веществ щелока.

Все эти изменения, а также разница условий лабораторного и промышленного сжигания щелока должны быть учтены при определении элементарного состава органической массы щелока и теплоты его сгорания. Поэтому содержание в щелоке минеральной части (M) несколько отличается от зольности щелока (A), полученной при лабораторных исследованиях. Для определения содержания минеральных веществ пробу щелока высушивают, сжигают и прокаливают в муфельных печах. В условиях неограниченного доступа воздуха в минеральной части происходят химические преобразования. При определении зольности щелока почти вся органическая сера, содержащаяся в щелоке, и значительное количество углекислого газа, образовавшегося вследствие сгорания органического углерода, превращаются в сульфат и карбонат натрия. Поэтому масса образовавшейся золы больше массы минеральной части. Разница между зольностью A^d сухой массы щелока и содержанием минеральной части M^d может доходить до 10%.

Теплота сгорания щелока. Теплота сгорания щелока, как и других органических топлив, определяется с помощью

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

калориметрической установки, где щелок сжигается в атмосфере кислорода.

Высшая теплота сгорания Q_s^d, кДж/кг, подсчитывается по следующей формуле:

$$Q_s^d = Q_б^d - 94{,}3\, S_o^d - 301{,}2\, S_{Na_2S}^d - 0{,}006 Q_б^d - 0{,}385 (100 - \xi_к)\, (CO_2)_{ре}^d ,$$

где $Q_б^d$ - теплота сгорания сухой массы щелока, определенная в калориметрической установке, кДж/кг;

S_o^d , $S_{Na_2S}^d$ - содержание органической и сульфидной серы, в % от сухой массы щелока;

$\xi_к$ - степень карбонизации едкого натра, %;

$(CO_2)_{ре}^d$ - количество углекислого газа, расходуемого на полную карбонизацию едкого натра, в % от сухой массы щелока.

Методика определения степени карбонизации $\xi_к$ и комплекса $(CO_2)_{ре}^d$ изложена в разделах «Определение состава минеральной части и особенности определения элементного состава органической части щелока» и «Материальный баланс СРК по натрию и сере».

Высшая теплота сгорания рабочей массы топлива:

$$Q_s^r = Q_s^d \cdot \frac{100 - W_t^r}{100} \ , \text{ кДж/кг} \ ,$$

где W_t^r - общая влажность щелока.

Низшая теплота сгорания рабочей массы топлива:

$$Q_i^r = Q_s^r - 25\left(W_t^r + 9H^r + 0{,}00408\xi_к (CO_2)_{ре}^r\right) \ , \text{ кДж/кг.}$$

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

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

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

Состав черного сульфатного щелока по результатам анализов некоторых предприятий приведен в табл.1.

Плотность. Упрощенно можно представить черный щелок как механическую смесь воды и сухого остатка, поэтому достаточно просто аналитически описать зависимость плотности щелока от содержания в нем сухого остатка:

$$\rho = \frac{\rho_в}{1 - \left(1 - \frac{\rho_в}{\rho_с}\right)\frac{b}{100}} \quad , \quad \text{кг/м}^3 \quad ,$$

где ρ, $\rho_в$, $\rho_с$ - плотность соответственно щелока, воды, сухого остатка, кг/м^3; b - концентрация сухого остатка щелока, %.

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

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

Вязкость. Общей закономерностью для всех целлюлозных щелоков является резкое увеличение их вязкости при переходе к высоким концентрациям. Существенное различие в значениях вязкости щелоков в зависимости от вида сырья и условий варки появляется лишь при концентрации сухого остатка выше 30 %.

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Таблица 1

Характеристики сульфатного щелока

		Наименование	Обозначение	Размерность	Предприятия			
					Сегежский ЦБК	Котласский ЦБК	Марийский ЦБК	Братский ЦБК
		Плотность при температуре 15 °С	ρ	кг/м^3	1264	1295	1304	1358
		Содержание сухих веществ	$100 - W_t^r$	%	49	47,3	50,7	59,5
		Теплота сгорания сухой массы	Q_i^d	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	14510	12008	14059	13672
Элементный состав сухой массы щелока	Минеральная часть	Зольность	A^d	%	46,2	49,8	47,11	44,1
		Минеральная часть	M^d	%	38,1	42,1	37,6	38,0
		Едкий натр, связанный с органической частью	$NaOH^{*d}$	%	13,8	15,1	23,3	18,4
		Едкий натр свободный	$NaOH^d$	%	1,97	1,58	2,95	1,3
		Карбонат натрия	$Na_2CO_3^{\ d}$	%	14,2	15,9	5,2	10,9
		Сульфид натрия	Na_2S^d	%	4,8	7,23	3,3	3,1
		Сульфат натрия	$Na_2SO_4^{\ d}$	%	3,3	2,27	2,8	4,27
		Сера сульфидная	$S_{Na_2S}^{\ d}$	%	1,97	2,97	1,35	1,27
		Сера сульфатная	$S_{SO_4}^{\ d}$	%	0,74	0,51	0,63	0,96
		Сера в золе	S_A^d	%	1,7	2,55	2,4	2,68
	Органическая часть	Углерод	C^d	%	38,45	36,6	35,27	40,4
		Водород	H^d	%	3,47	3,7	4,16	3,84
		Сера органическая	S_o^d	%	0,47	0,03	0,82	1,18
		Кислород	O^d	%	19,72	17,45	21,85	19,06
		Азот	N^d	%	0,29	0,12	0,3	0,12

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

При одном и том же содержании сухих веществ черный сульфатный щелок, образующийся при варке древесины хвойных пород, имеет более высокую вязкость, чем щелок, образующийся при варке лиственных пород.

При высоких концентрациях и низких температурах черный щелок представляет собой чрезвычайно вязкую, слаботекучую жидкость, поэтому его следует подогревать. Положительные результаты при транспортировке и подаче щелока в топку достигаются при следующих соотношениях:

концентрация		температура
55 %	-	105 °С;
60 %	-	110 °С;
65 %	-	115 °С.

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

$$c_p = 4{,}1 - 0{,}027\,b \text{ , кДж/кг ,}$$

где b - концентрация сухого остатка % по массе.

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

$$c_p = 4{,}1 - 0{,}017\,b \text{, кДж/кг.}$$

Организация топочных процессов в СРК

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

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

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

Диспергирование (распыливание) щелока должно соответствовать принципу факельно-слоевого сжигания. Размеры капель должны быть достаточно крупными для того, чтобы они не

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

выносились из топки потоком дымовых газов. Вместе с тем, каплям щелока необходимо высохнуть за время пребывания в топочном объеме и иметь влажность 3-5 % при падении в «подушку» огарка. Распыл щелока оказывает существенное влияние на топочный процесс, а также в значительной мере определяет условия сушки и формирование горящего слоя огарка на поду. Ухудшение распыла и образование струй щелока приводит к ухудшению горения, снижению температуры в топке, росту «подушки» огарка, забиванию первичных воздушных сопел. Слишком тонкое диспергирование щелока ускоряет сушку и выгорание капель в объеме, увеличивает механический унос, затрудняет формирование «подушки» огарка.

Колебания в самом составе щелока, связанные с изменяющимся во времени содержанием влаги, органики и сульфата, вызывают колебания топочного процесса. В этих условиях представляется возможным говорить об оптимальном диапазоне размеров капель щелока на выходе из форсунки, который составляет 2-5 мм.

Столь грубый распыл щелока достигается применением механических форсунок, оснащенных соплами с отбойными щитками или с завихрителями, работающих при давлении щелока в диапазоне 0,1 – 0,3 МПа.

Способ Томлинсона. На фронтовой стенке топочной камеры устанавливается одна форсунка, предназначенная для подачи щелока в топку. Форсунка приводится в движение через редуктор электродвигателем и качается в вертикальной плоскости с одновременным поворотом вокруг вертикальной оси на максимальный угол 120°. В вертикальной плоскости угол качания составляет 25-40°. Производительность котла регулируется применением в форсунке сопел различных диаметров. При этом давление щелока поддерживается на уровне 0,28-0,3 МПа.

Щелок набрызгивается веером крупных капель на заднюю и боковые стенки топочной камеры. Он высыхает, частично обугливается, превращаясь в сухую пористую массу, которая время от времени в виде крупных кусков отваливается от стенок и падает на под, формируя слой огарка, где и сгорает. Подсушка щелока происходит в основном на стенках топочной камеры, при этом щелок должен высохнуть до минимальной влажности за время, в течение которого форсунка совершает половину полного колебания в горизонтальной плоскости. Если щелок не успевает подсушиваться, что заметно по появлению темных пятен в слое огарка на поду, то следует расширить площадь сушки. Практически это достигается

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

увеличением углов качания форсунки, оказывающей ключевое влияние на режим сушки щелока на стенках топки. В этой связи необходимо иметь четкие представления о форме и границах подсыхающего щелока на стенках топки. Выявлено, что угол качания форсунки в вертикальной плоскости влияет на формирование слоя щелока на задней стенке топки, а угол поворота вокруг вертикальной оси определяет форму и размеры площади слоя на боковых стенках.

На рис.2 изображена форма слоя подсыхающего щелока на стенках топки и подушки огарка на поду, которые необходимо поддерживать, при этом нижняя граница слоя должна проходить над соплами вторичного дутья.

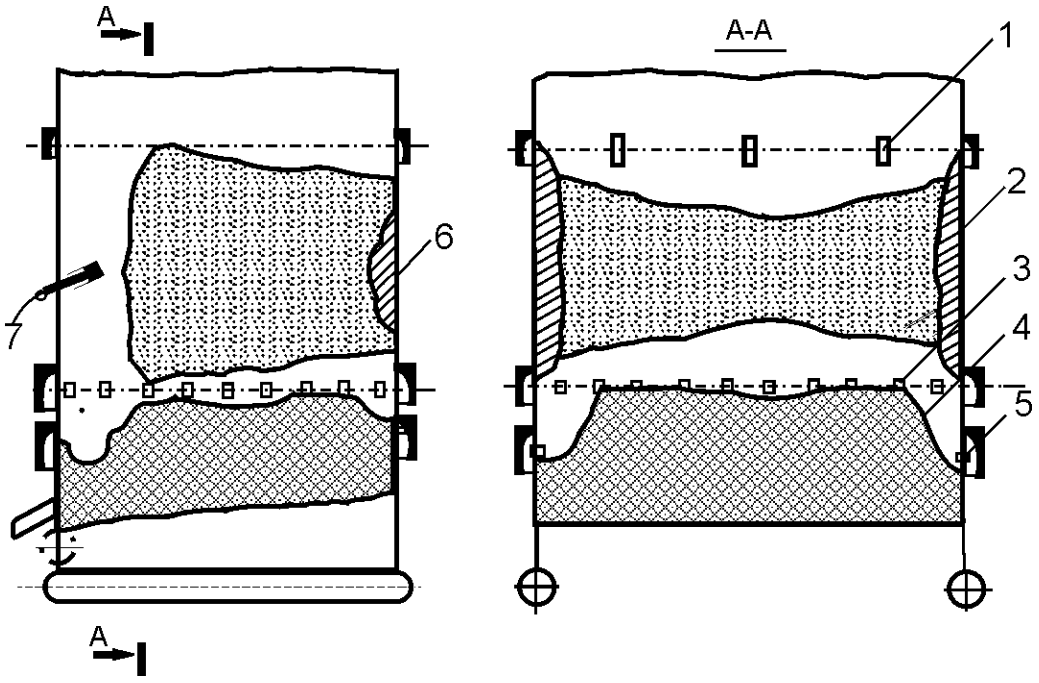


Рис.2. Формирование слоя щелока в топке Томлинсона:
1 – фурмы третичного дутья; 2 – слой щелока на боковых экранах; 3 – фурмы вторичного дутья; 4 – слой огарка на поду топки; 5 – фурмы первичного дутья; 6 – слой щелока на заднем экране; 7 – щелоковая форсунка

При повышении влажности щелока углы качания форсунки следует увеличить. Однако такой прием следует рассматривать как исключительный, потому что при этом возрастает вероятность уноса капель распыленного щелока.

К ***недостаткам*** этого способа следует отнести:

1. Снижение коэффициента тепловой эффективности экранов, так как часть поверхности труб покрыта слоем щелока, что снижает коэффициент теплопередачи в топке и приводит к увеличению температуры газов на выходе из нее.

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

2. Процесс сушки на стенах топки менее эффективен, чем в объеме топки.
3. Подсушенный щелок падает со стен к краям слоя огарка, что вызывает трудности при его формировании.
4. Падение значительной массы щелока вызывает некоторое снижение температуры в слое, что приводит к увеличению выбросов соединений восстановленной серы.

При ***способе Комбашн*** впрыскивание производится в объем топочной камеры. Мелкие частицы щелока диаметром до 2 мм под действием восходящего потока газов увлекаются в верхнюю часть топочного объема. Основная масса частиц с диаметром от 2 до 5 мм подсушивается и воспламеняется в топочном объеме и падает на под топки, образуя слой огарка - так называемую «подушку». В слое огарка происходит выгорание коксового остатка, сопровождаемое химическими преобразованиями.

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

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

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

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

Восстановление сульфата требует соответствующей восстановительной атмосферы, в связи с чем в нижнюю часть топочной камеры подается только часть воздуха, необходимого для горения (до 60 %). Остальной воздух вводится в среднюю часть

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

топки, где формируется окислительная зона, необходимая для дожигания летучих органических соединений, образующихся в процессе пиролиза.

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

- Воздух подводится ступенчато.
- Процесс горения протекает в основном в активной зоне топочного объема, расположенной в пределах от пода топки до уровня форсунок. При этом движение распыленного топлива и воздуха оказывается противоточным: капли щелока падают вниз навстречу восходящему потоку воздуха и продуктов сгорания.
- При испарении влаги из капель образуются хлопья сухого щелока. Наиболее мелкие частицы уносятся газовоздушным потоком в верхнюю часть топочной камеры и далее в газоходы котла. Более крупные частицы падают на под и сгорают в нижней части топки и в слое огарка.

Теоретическая температура горения жидкого щелока и стабильность факела зависят в основном от температуры воздуха, влажности щелока и коэффициента избытка воздуха. В большинстве современных агрегатов коэффициент избытка воздуха в активной зоне топочного объема близок к единице, а температура воздуха, поступающего в топку, находится в пределах 130-180 ˚С. Рекомендуемая влажность щелока перед форсунками не более 40 %.

Средняя расчетная температура газов на выходе из зоны активного горения (примерно на уровне щелоковых форсунок) равна 1040 ˚С. В области распыления и подсушки жидкого щелока имеет место дополнительное локальное снижение температуры, обусловленное испарением влаги. При снижении температуры горения, вследствие увеличения влажности щелока и избытка воздуха, может произойти потухание факела, что является одной из причин топочных взрывов.

Поддержание определенного температурного режима при сжигании щелоков низкой концентрации может осуществляться путем использования *вспомогательного топлива* (газ, мазут). Однако, как показывает опыт, такой прием не устраняет возможности нарушения стабильности факела и образования хлопков и взрывов.

Наиболее надежным методом тепловой стабилизации процессов горения следует считать повышение температуры воздуха до 300 – 400 °С.

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

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

Отрицательной особенностью организации топочного процесса при сжигании сульфатного щелока в СРК является раздельная подача в топку влажного щелока и воздуха. Вследствие этого ухудшаются условия воспламенения распыленного щелока, и снижается интенсивность процесса горения. Периферийная подача воздуха с низкими скоростями посредством сопел малого сечения обуславливает слабое проникновение воздуха в центральную часть, где интенсивность процесса горения оказывается особенно низкой.

Большинство отечественных и зарубежных авторов определяют следующие основные реакции, протекающие в топке СРК (рис.3).

На поду в слое огарка (зона восстановления) происходит:

– горение коксового остатка в слое с образованием CO и CO_2:

$$2C + O_2 = 2CO\ ,$$

$$C + O_2 = CO_2 .$$

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

– восстановление сульфата натрия:

$$Na_2SO_4 + 2C = Na_2S + 2CO_2 ,$$

$$Na_2SO_4 + 4CO = Na_2S + 4CO_2 ,$$

– карбонизация едкого натра:

$$2NaOH + CO_2 = Na_2CO_3 + H_2O ,$$

– разложение сульфатов и карбонатов с образованием Na_2O:

$$Na_2SO_4 + 2C + H_2O = Na_2O + H_2S + 2CO_2 ,$$

$$Na_2CO_3 = Na_2O + CO_2 .$$

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

$$Na_2S + CO_2 + H_2O = Na_2CO_3 + H_2S ,$$

$$Na_2O + CO_2 = Na_2CO_3 .$$

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

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

$$Na_2O + C = 2Na + CO,$$
$$2Na + \tfrac{1}{2}O_2 = Na_2O,$$
$$Na_2O + H_2O = 2NaOH.$$

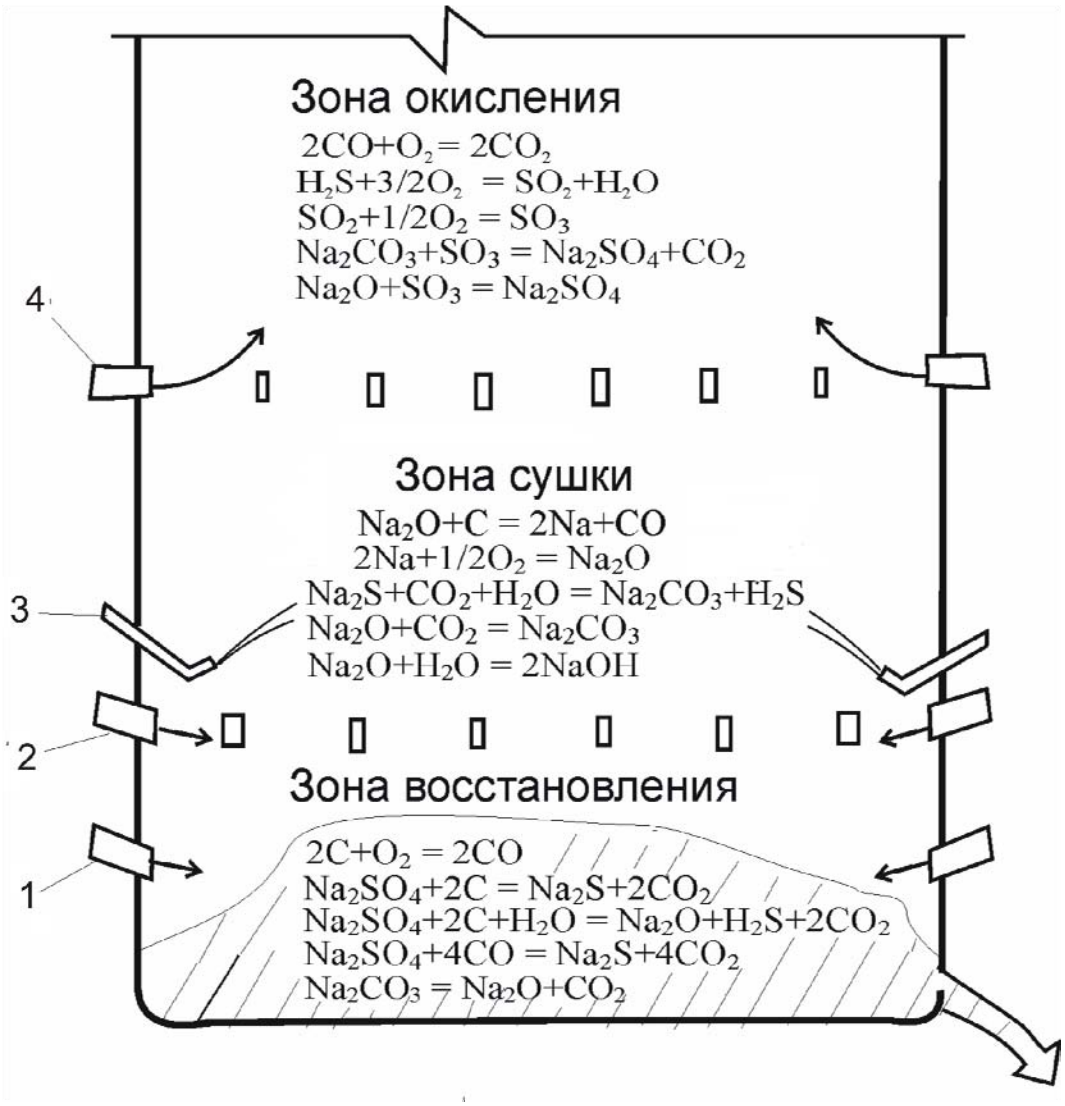


Рис. 3. Химические реакции в топке СРК:
1 – первичный воздух; 2 – нижний ярус вторичного воздуха; 3 – щелоковые форсунки; 4 – верхний ярус вторичного воздуха

В ***зоне окисления*** происходит догорание газообразных горючих веществ:

$$2CO + O_2 = 2CO_2,$$
$$H_2S + \tfrac{3}{2}O_2 = SO_2 + H_2O.$$

Здесь также происходит образование серного ангидрида и сульфата натрия:

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

$$SO_2 + \tfrac{1}{2} O_2 = SO_3,$$

$$Na_2CO_3 + SO_3 = Na_2SO_4 + CO_2,$$

$$Na_2O + SO_3 = Na_2SO_4.$$

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

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

$$CH_3SH + 3O_2 = CO_2 + SO_2 + 2H_2O,$$

$$CH_3SCH_3 + \tfrac{9}{2} O_2 = 2CO_2 + SO_2 + 3H_2O,$$

$$CH_3SSCH_3 + \tfrac{11}{2} O_2 = 2CO_2 + 2SO_2 + 3H_2O.$$

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

Поступающий из СРК в бак-растворитель плав состоит в основном из карбоната натрия (Na_2CO_3) – 60-80 %, сульфида натрия (Na_2S) – 10-30 %, сульфата натрия (Na_2SO_4) – 10-15 %, едкого натра ($NaOH$) – 2-4 %. Кроме этого, в состав плава могут входить тиосульфат натрия ($Na_2S_2O_3$), который образуется при увеличении температуры в присутствии соды, хлорид натрия ($NaCl$) и силикат натрия (Na_3SiO_3), содержащийся в качестве примесей в природном и техническом сульфате, добавляемом в черный щелок для восполнения потерь натрия.

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

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Технологические схемы. Оборудование

Для обеспечения устойчивого и экономичного сжигания щелока в топках содорегенерационных котлоагрегатов необходимо довести содержание сухих веществ в щелоке как минимум до 60-65 %, а потери тепла и химикатов с уходящими дымовыми газами свести к минимуму. Для этого применяют различные схемы содорегенерационных котлоагрегатов, которые увязывают с производительностью выпарных установок по количеству испаряемой влаги и содержанию сухих веществ в черном щелоке.

Выпаривание черного щелока, то есть удаление из него избытка влаги, необходимо для его эффективного сжигания в СРК. Оно может быть проведено в один или два этапа, причем первый, и часто единственный, этап осуществляется в многокорпусных выпарных установках, а второй, дополнительный, - в испарителях с непосредственным контактом между щелоком и теплоносителем.

На рис.4 изображена принципиальная технологическая схема СРК с газоконтактным испарителем. Из выпарной станции черный щелок, концентрированный до 55 % сухих веществ, поступает в расходный бак 1. Из расходного бака транспортными насосами 2 щелок подается в смесительный резервуар 3, где происходит его смешение с уносом, осажденным в электростатическом фильтре. Для улучшения перемешивания резервуар оснащен мешалкой. Из резервуара черный щелок насосом 16 подается в бак 10, служащий для смешения черного щелока с золой, отсепарированной из газового потока в бункерах-зольниках 17. Смыв золы из бункеров осуществляется черным щелоком, рециркулирующим при помощи насосов 12. Из бака 10 черный щелок самотеком поступает в каскадный испаритель 4, где за счет непосредственного контакта с дымовыми газами происходит увеличение его концентрации до 65 %.

Концентрация щелока поддерживается постоянной и регулируется изменением температуры дымовых газов перед испарителем за счет перепуска части дымовых газов, минуя экономайзер, через обводной газоход. Из каскадного испарителя концентрированный черный щелок через проточный ящик 5 поступает самотеком в бак-растворитель сульфата 9. Сульфат подается из бункера-накопителя 6 при помощи винтового питателя 7 и ленточных автоматических весов 8. Введение добавочного сульфата натрия обеспечивает восполнение потерь натрия и серы в цикле производства. Из бака-растворителя сульфата черный щелок насосами 14 через паровой подогреватель 13 направляется к щелоковым форсункам 11,

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

впрыскивающим его в топочную камеру 18. Избыточное количество щелока рециркулирует в бак-растворитель сульфата или в ванну каскадного испарителя 4, что обеспечивает поддержание постоянного давления щелока перед форсунками и позволяет избежать недопустимого увеличения вязкости щелока вследствие снижения его температуры в щелокопроводах при временном выключении одной из форсунок. Все емкости черного щелока имеют паровые рубашки, мешальные устройства и связаны с баком опорожнения 15.

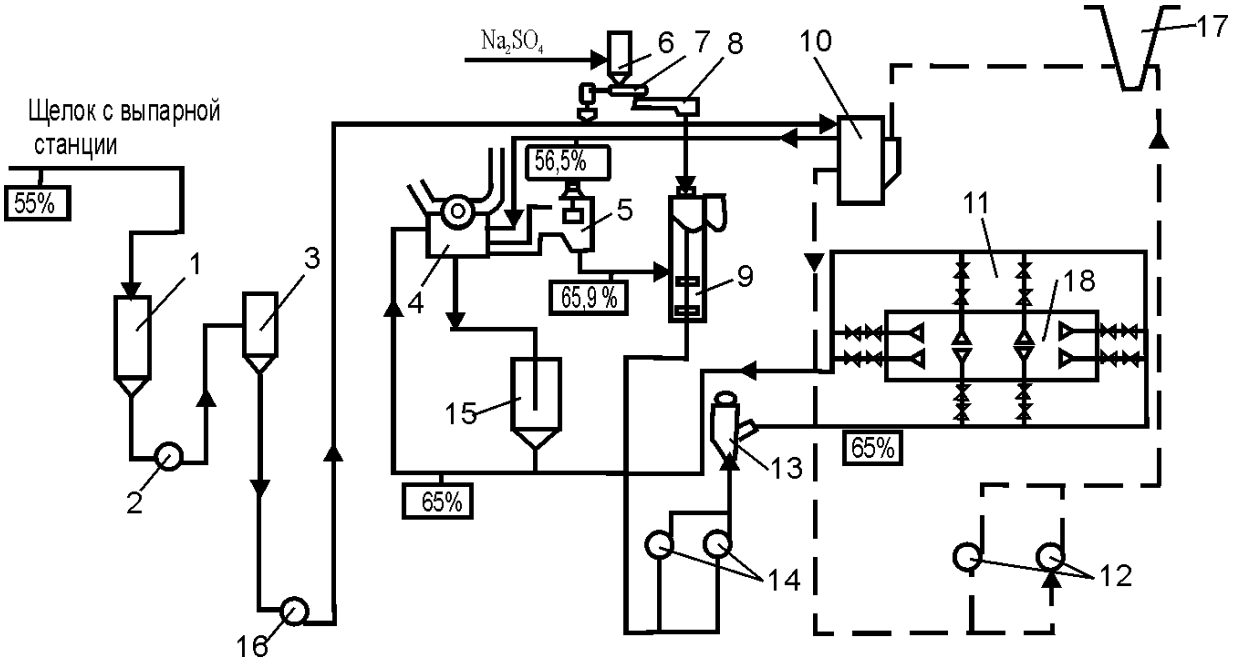


Рис. 4. Технологическая схема СРК с газоконтактным испарителем: 1 – расходный бак; 2 – транспортные насосы; 3 – смесительный резервуар; 4 – каскадный испаритель; 5 – проточный ящик; 6 – бункер-накопитель; 7 – винтовой питатель; 8 – автоматические весы; 9 – бак-растворитель сульфата; 10 – расходный бак; 11 – щелоковые форсунки; 12 – рециркуляционные насосы; 13 – подогреватель щелока; 14,16 – щелоковые насосы; 15 – бак опорожнения; 17 – бункер-зольник, 18 – топочная камера

На рис.5 изображена принципиальная технологическая схема щелокопроводов СРК без газоконтактного испарителя. Из выпарной станции черный щелок поступает в концентратор, где упаривается до 65-75 % и направляется в расходный бак 1, оборудованный мешалкой и паровым змеевиковым подогревателем. Из расходного бака транспортным насосом 2 черный щелок подается в бак-смеситель сульфата 6, который также оборудован подогревателем и мешалкой. Наряду с сульфатом в бак-смеситель системой транспортеров направляются зола, осажденная в бункерах-зольниках котла, и

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

унос, уловленный в электростатическом фильтре. Далее черный щелок, перемешанный с сульфатом и уносом, насосом 7 подается к двум параллельным подогревателям смешивающего типа 5, где он подогревается до температуры 115 – 120 °С. От подогревателей щелок поступает в распределительный коллектор, расположенный по всему периметру вокруг топки котла, из которого форсунками 4 впрыскивается в топочную камеру. Часть щелока по линии рециркуляции 3 сбрасывается в бак-смеситель сульфата 6. На прямой и обратной линиях установлены расходомеры. Температура щелока перед форсунками регулируется автоматически за счет изменения подачи пара в подогреватели. Щелоковые емкости снабжены регуляторами уровня.

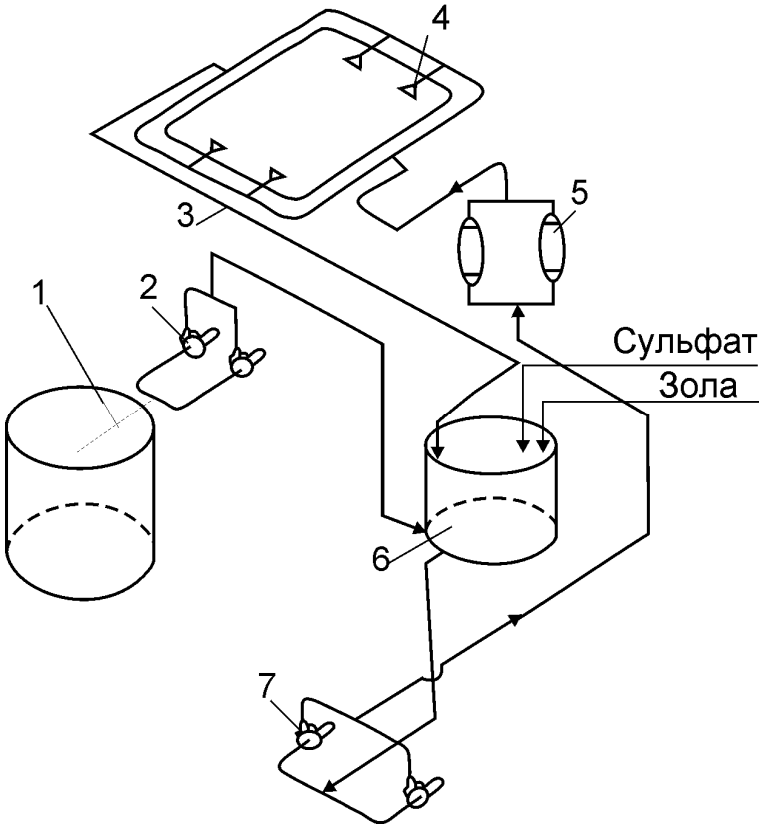


Рис.5. Технологическая схема щелокопроводов СРК:
1 – расходный бак; 2 – транспортный насос; 3 – линия рециркуляции; 4 – щелоковые форсунки; 5 – подогреватели щелока смешивающего типа; 6 – бак-смеситель сульфата; 7 – щелоковые насосы

Возможно использование комбинированной технологической схемы СРК (рис.6). Черный щелок из выпарного цеха с концентрацией 63 – 65 % при температуре 90 – 100 °С поступает в бак 1, где смешивается с уносом, уловленным в электрофильтре. Для

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

обеспечения хорошего перемешивания и растворения уноса бак имеет мешалку и паровой подогрев. Одним из двух насосов 2 щелок, перемешанный с уносом из электрофильтра, подается в бак-растворитель золы 10, где он дополнительно перемешивается с золой, осажденной в бункерах котла. Зола из бункеров котла удаляется гидравлически потоком щелока. Для этого одним из двух установленных насосов 11 щелок из растворителя золы 10 направляется в бункера 12, а из них самотеком, увлекая осевшую золу, стекает обратно в растворитель.

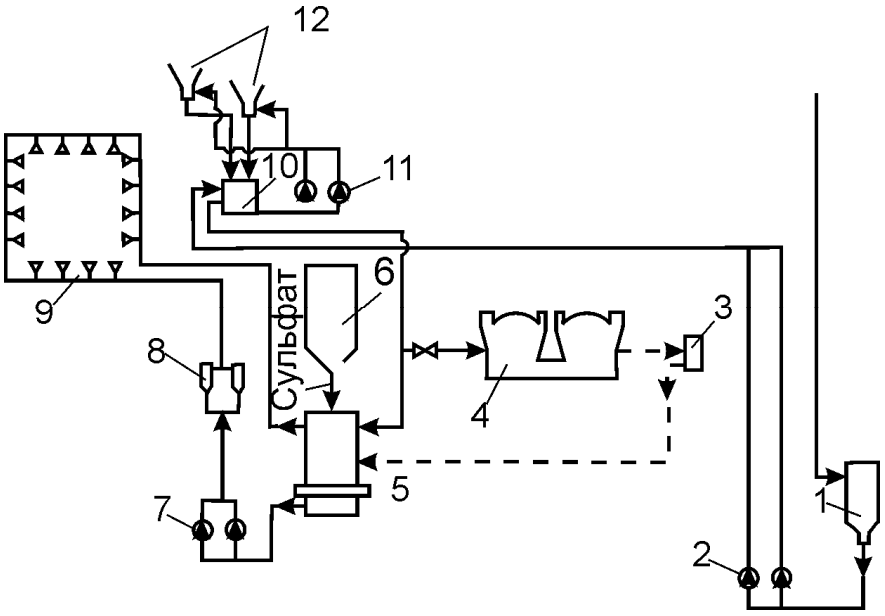


Рис. 6. Комбинированная технологическая схема СРК:
1 – расходный бак; 2 – транспортные насосы; 3 – проточный ящик; 4 – воздухоконтактный испаритель; 5 – бак-смеситель сульфата ; 6 – бункер сульфата; 7 – щелоковые насосы; 8 – подогреватели щелока; 9 – щелоковые форсунки; 10 – бак-растворитель золы; 11 – рециркуляционные насосы; 12 – бункеры-зольники

Таким образом, устанавливается непрерывный контур циркуляции, обеспечивающий удаление золы из бункеров, перемешивание и растворение ее в щелоке. Для интенсификации перемешивания и растворения золы бак-растворитель оборудован мешалкой. Щелок из растворителя золы поступает в смеситель сульфата 5, куда винтовым конвейером из бункера 6 через систему взвешивания подается сульфат натрия. Уровень щелока в смесителе поддерживается автоматически. Смеситель сульфата оборудован мешалкой и паровой рубашкой. Из бака-смесителя сульфата черный щелок одним из двух установленных насосов 7 через подогреватели 8 подается к щелоковым форсункам 9. В том случае, если концентрация

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

черного щелока после выпарной станции оказывается ниже 60 %, то схемой предусмотрена возможность его доупаривания в воздухоконтактном испарителе. Для этого щелок из бака-растворителя золы 10 направляется в воздухоконтактный испаритель 4, в котором он доупаривается горячим воздухом до концентрации 60 – 63 %. Из испарителя щелок поступает в проточный ящик 3, а затем в смеситель сульфата и далее по описанной выше схеме в топку котла.

Сравнение представленных схем показывает, что доупаривание щелока в газоконтактном испарителе при определенных условиях может значительно повысить концентрацию сероводорода в дымовых газах. При газоконтактной выпарке выделение сероводорода возрастает при понижении pH щелока, вызванном абсорбцией CO_2 и SO_2 из дымовых газов:

$$2NaHS+CO_2+H_2O=Na_2CO_3+2H_2S\uparrow ;$$

$$2NaHS+SO_2+H_2O=Na_2SO_3+2H_2S\uparrow ;$$

$$Na_2S+CO_2+H_2O=Na_2CO_3+H_2S\uparrow .$$

При этом выделению сероводорода в газоконтактном испарителе способствует повышенная концентрация остаточного сульфида натрия в черном щелоке.

Содержание сероводорода в дымовых газах при различных технологических схемах СРК:

Схема СРК:	C_{H_2S}, ppm*
- с газоконтактным испарителем	250
- с газоконтактным испарителем и высокоэффективным окислением щелока	25
- без газоконтактного испарителя	2

*ppm - миллионная доля вещества (*от англ.* - parts per million).

Модернизация выпарных станций с установкой концентраторов позволяет исключить каскадный испаритель из технологической схемы, что практически устраняет выбросы сероводорода, однако требует реконструкции экономайзера котлов с целью более глубокого использования тепла дымовых газов.

Каскадный испаритель. Каскадный испаритель (рис.7а) предназначен для частичного улавливания золы из газового потока и дополнительного испарения (за счет тепла отходящих газов) влаги из щелока перед его поступлением в топку. Мощные содорегенерационные котлы, как правило, оборудуются двумя или четырьмя

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

каскадными испарителями, устанавливаемыми с правой и левой стороны котла за экономайзерами.

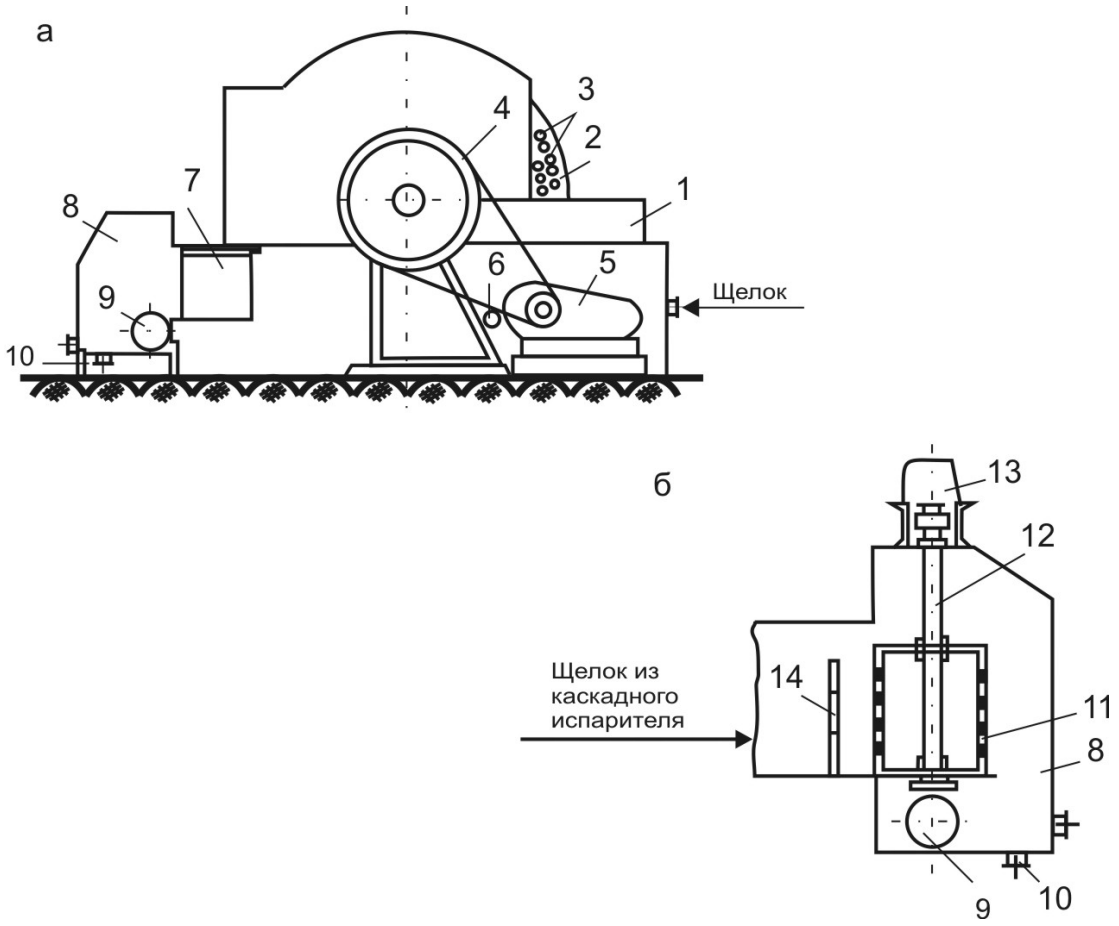


Рис. 7. Каскадный испаритель (а) и проточный ящик (б):
1 – ванна испарителя; 2 – ротор испарителя; 3 – трубки ротора; 4 – шкив; 5 – редуктор; 6 – натяжной ролик; 7 – желоб для прохода щелока в проточный ящик; 8 – проточный ящик; 9 – штуцер для вывода щелока; 10 – сливной патрубок; 11 – вращающийся перфорированный барабан; 12 – вал барабана; 13 – привод барабана; 14 – секционная перегородка

Каскадный испаритель состоит из корпуса, в нижней части которого расположена ванна 1, заполненная на 2/3 высоты щелоком, и вращающегося трубчатого ротора 2. Корпус, изготовленный из листовой стали толщиной 8 – 10 мм, состоит из двух частей (нижней и верхней), соединяемых при помощи болтов. Для обеспечения прочности конструкции обе части корпуса снабжены ребрами жесткости.

Для входа и выхода, а также спуска щелока в корпусе каскадного испарителя устроены соответствующие патрубки. Для осмотра и внутренней очистки ванны предусмотрены два люка.

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Нижняя часть корпуса служит одновременно опорой для подшипников вала ротора. Ротор каскадного испарителя состоит из двух дисков толщиной 12 мм, между которыми развальцованы трубы диаметром 76/70 мм. Трубы роторов выполнены из нержавеющей стали. Торцы труб ротора необходимо заглушить, так как в противном случае внутри труб образуется нагар, вызывающий дисбаланс ротора. Для прочности к дискам ротора приваривают ребра жесткости из профильной стали. Для удобства монтажа ротор состоит из двух частей, соединяемых болтами. Вал, проходящий по оси ротора, вращается в роликовых подшипниках с водяным охлаждением, установленных на нижней части корпуса. В местах прохода вала через корпус установлены сальниковые уплотнения. Во избежание потерь тепла корпус каскадного испарителя снаружи покрывают тепловой изоляцией. Ротор приводится во вращение со скоростью 4 –5 об/мин электродвигателем через редуктор и цепную передачу. Испарение влаги и улавливание золы происходит следующим образом. При вращении ротора трубы периодически смачиваются щелоком в ванне и выносят его в газовую среду. Щелок, находящийся на поверхности труб, войдя в контакт с движущимся потоком дымовых газов, частично теряет влагу и уплотняется. Частицы золы прилипают к мокрой поверхности труб и таким образом улавливаются.

При помощи вращающихся труб ротора щелок постоянно перемешивается, что препятствует образованию осадка золы в нижней части ванны.

В каскадном испарителе концентрация щелока обычно повышается от 50 – 55 до 65 % а.с.в. (абсолютно сухих веществ). Для поддержания постоянной плотности щелока каскадный испаритель иногда оборудуется двумя регуляторами: при низком содержании сухих веществ в щелоке первый регулятор открывает шибер для пропуска части газов мимо экономайзера, повышая при этом температуру газов до каскадного испарителя, а при переуплотнении щелока (во избежание перегрузки электродвигателя из-за повышения вязкости) второй регулятор открывает регулировочный вентиль, через который в испаритель поступает слабый черный щелок с содержанием сухих веществ 11 –15 %. Отдельные конструкции каскадных испарителей снабжены обводным газоходом и автоматическим шибером для регулирования количества газов, проходящих через каскадный испаритель, в зависимости от плотности щелока.

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

В каскадном испарителе из щелока вместе с парами улетучивается часть горючих газов (сероводород, метилмеркаптан и прочие соединения). Вследствие этого, а также увеличения зольности за счет уловленных частиц уноса, теплота сгорания сухой массы щелока за каскадным испарителем несколько снижается.

Для вывода щелока из каскадных испарителей в смеситель сульфата устанавливают проточный ящик из листового железа (рис.7б). Внутри проточного ящика для фильтрации щелока находится перфорированный барабан диаметром 300 мм с отверстиями, выполненный из кислотоупорной стали. Перфорированный барабан вращается через редуктор от электродвигателя со скоростью 7 об/мин.

Для очистки перфорированного вращающегося барабана устанавливается шабер, прижимаемый к барабану пружиной. Для продувки барабана через патрубок, приваренный к верхней части проточного ящика, и отверстия в шабере подводится пар.

Для поддержания определенного минимального уровня щелока в каскадном испарителе, проточном ящике и смесителе сульфата, являющихся сообщающимися сосудами, в проточном ящике устанавливается съемная перегородка из стальных пластин.

Поступление щелока в каскадный испаритель регулируется автоматически от импульса уровня.

Смеситель сульфата. Оборудование для смешения щелока с сульфатом натрия состоит из бункера, питателя и резервуара. Бункер сульфата изготавливается из листовой стали толщиной 6 – 8 мм и снабжается ребрами жесткости. Для просеивания сульфата часто под бункером устанавливается вибрирующее (при помощи эксцентрика) сито с ячейками 3×3 мм, которое приводится в движение электродвигателем.

Сульфат натрия подается из бункера в резервуар при помощи дискового или шнекового питателя. Наиболее распространенный питатель состоит из цилиндрического корпуса, вращающегося диска, ножа-отсекателя и телескопической трубы. Диск питателя получает вращение от электродвигателя мощностью 1 – 2 кВт через конические шестеренки. Производительность дискового питателя регулируется изменением положения ножа-отсекателя (тонкое регулирование) или телескопической трубы (грубое регулирование). Производительность шнекового питателя регулируется изменением числа оборотов электродвигателя.

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Смесительный резервуар цилиндрической формы изготовляется из листовой стали толщиной 12 мм. Для улучшения смешения сульфата со щелоком смеситель оборудован вертикальной мешалкой, состоящей из вала с насаженными на него лопастями. Вал мешалки приводится в движение от электродвигателя с червячно-шестеренчатым редуктором, опорная конструкция которого расположена на верхней крышке резервуара.

На покатой плоскости верхней части смесителя имеется течка, через которую сульфат из питателя поступает в смесительный резервуар. Щелок из проточного ящика поступает на перфорированное промежуточное днище, расположенное внутри смесителя, растворяет сульфат натрия и стекает через отверстие в нижнюю часть резервуара.

Смеситель сульфата имеет соответствующие патрубки для приема щелока из проточного ящика, отвода в щелоковые насосы, опорожнения, перелива, а также для отвода образующихся газов и паров в атмосферу.

Подогреватели и насосы для подачи щелока, форсунки. Для перекачки черного щелока используются центробежные насосы с крыльчатками, изготовленными из кислотоупорной стали. Подшипники и сальники щелоковых насосов охлаждаются водой. Напор насосов для подачи щелока составляет 4 – 6 бар, а производительность всегда превышает потребность содорегенерационного котла, благодаря чему обеспечивается рециркуляция излишнего щелока в смеситель во избежание повышения в щелокопроводе вязкости щелока из-за его охлаждения. Большинство фирм поставляет насосы с приспособлениями для изменения числа оборотов, что обеспечивает регулирование их производительности. В отдельных случаях регулирование давления и количества щелока, подаваемого в форсунки, достигается изменением положения вентиля на линии рециркуляции.

Поскольку температура щелока определяет его вязкость, следует большое внимание уделять поддержанию нужной температуры щелока перед форсунками, что обеспечивает необходимую подготовку щелока к распыливанию и своевременному превращению его в огарок, а также устойчивость горения огарка на поду топки.

Для подогрева щелока используются поверхностные подогреватели, представляющие собой цилиндрический корпус с двумя торцевыми крышками. Внутри корпуса установлены две трубные решетки с развальцованными в них трубами. Щелок

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

движется по трубам, а пар подается в межтрубное пространство. Сконденсировавшийся пар через конденсационный горшок отводится в сборник конденсата.

Преимущество поверхностных подогревателей по сравнению с подогревателями смешивающего типа заключается в том, что они позволяют сохранить конденсат и избежать увлажнения щелока в результате его смешения с конденсатом греющего пара. Однако эксплуатация содорегенерационных котлоагрегатов показывает, что указанные преимущества подогрева щелока в поверхностных подогревателях нельзя использовать вследствие интенсивного образования нагара на поверхности нагрева подогревателей со стороны движения щелока. Образующийся в течение 2 – 3 дней нагар резко снижает коэффициент теплопередачи подогревателя, вследствие чего подогрев щелока в нем полностью прекращается.

На рис. 8 приведен общий вид и детали подогревателя смешивающего типа. Он представляет собой цилиндр с патрубком для ввода щелока 5. Пар в подогреватель вводится при помощи двух перфорированных труб.

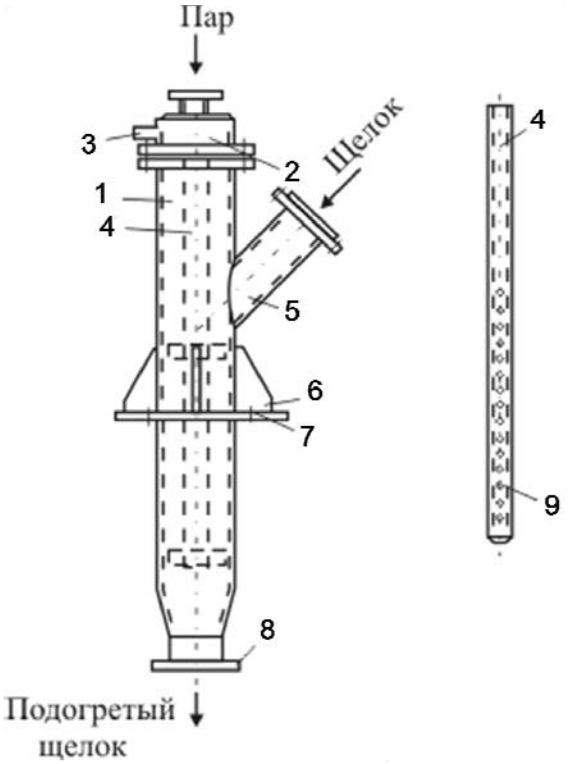


Рис.8. Общий вид и детали подогревателя смешивающего типа:
1 – корпус подогревателя; 2 – головка подогревателя; 3 – штуцер; 4 - перфорированная паровая труба; 5 – патрубок с фланцем; 6 – ребра жесткости; 7– опора; 8 – фланец; 9 – отверстия ø 3 мм (15 шт.)

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Отверстия в них просверлены под углом, поэтому струи пара, выходящие из них по касательной к цилиндрической поверхности труб, совершают вращательное движение и хорошо перемешиваются со щелоком, что способствует быстрой конденсации пара в нем. Патрубок для отвода подогретого щелока расположен в нижней части подогревателя. Расход пара на подогрев щелока составляет примерно 42 кг на 1 т а.с.в. щелока. При этом концентрация щелока в результате смешения с конденсатом пара снижается приблизительно на 1 – 2 %.

Распыление черного щелока в топочном объеме СРК осуществляется с помощью механических форсунок грубого распыла (рис.9). Дисперсность капель щелока определяется вязкостью, плотностью, давлением щелока и диаметром сопел.

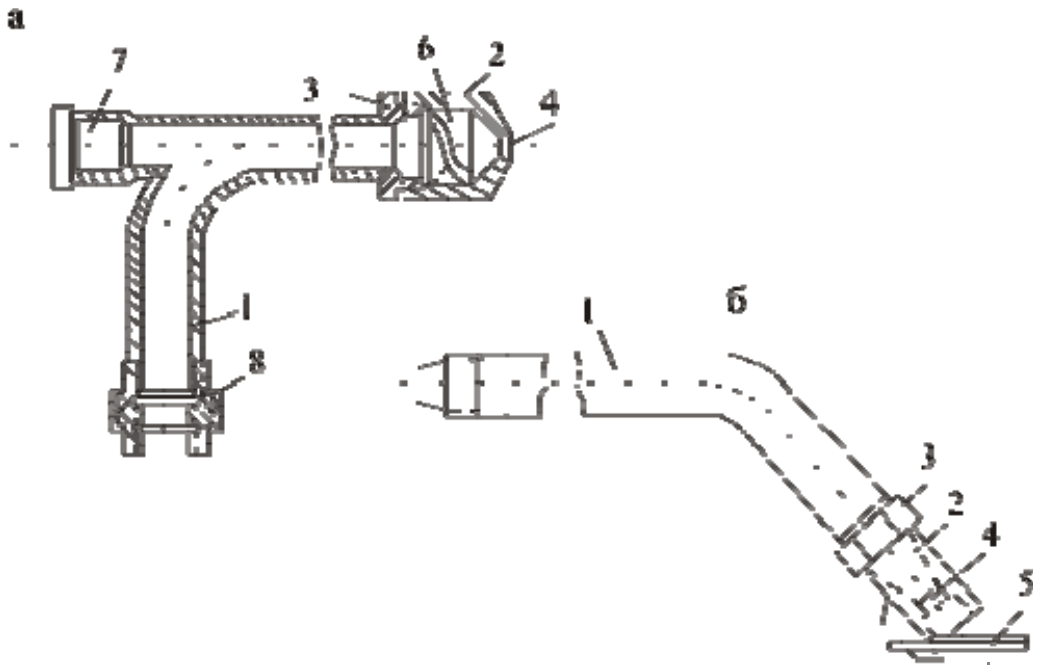


Рис. 9. Щелоковые форсунки для СРК производительностью 200 т/сут:
а – *с завихрителем* ; б – *с пластинкой*;
1 – ствол форсунки; 2– головка форсунки; 3 – гайка головки; 4 – сопло; 5 – пластинка; 6 – завихритель; 7 – штуцер для прочистки головки; 8 – узел соединения с щелокопроводом

Используются форсунки двух типов. К первому относятся форсунки, оборудованные завихрителями (рис.9а). Закрученная в завихрителе струя щелока, выходя из сопла, разбрызгивается на мелкие капли под действием центробежных сил. Такие форсунки работают при давлении щелока 1 – 1,2 бар и позволяют получать равномерный дисперсный состав раздробленных капель щелока, что улучшает подготовку его к горению.

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Однако для такого типа форсунок характерны случаи забивания каналов. Поэтому следует увеличивать температуру щелока и снижать его концентрацию, что отрицательно влияет на работу котла. Кроме того, как показали исследования, оптимальный размер капель щелока должен составлять 2 – 5 мм. Более мелкие частицы щелока сгорают в топочном объеме или уносятся потоком дымовых газов, что приводит к увеличению уноса минеральных солей и увеличению механического недожога. Более крупные капли не успевают подсохнуть в топочной камере, что приводит к снижению температуры в нижней части топки и росту слоя огарка.

Более эффективное дробление обеспечивается в форсунках с пластинкой (рис.9б). Головка форсунки оборудована соплом, на конце которого установлен щиток под углом 135 – 150 °. Нормальное дробление щелока происходит при давлении 1 – 2 бар за счет кинетической энергии струи, направленной на наклонный щиток. Такие форсунки организуют плоскую струю неоднородных капель щелока, характер дисперсности которых представлен на рис.10.

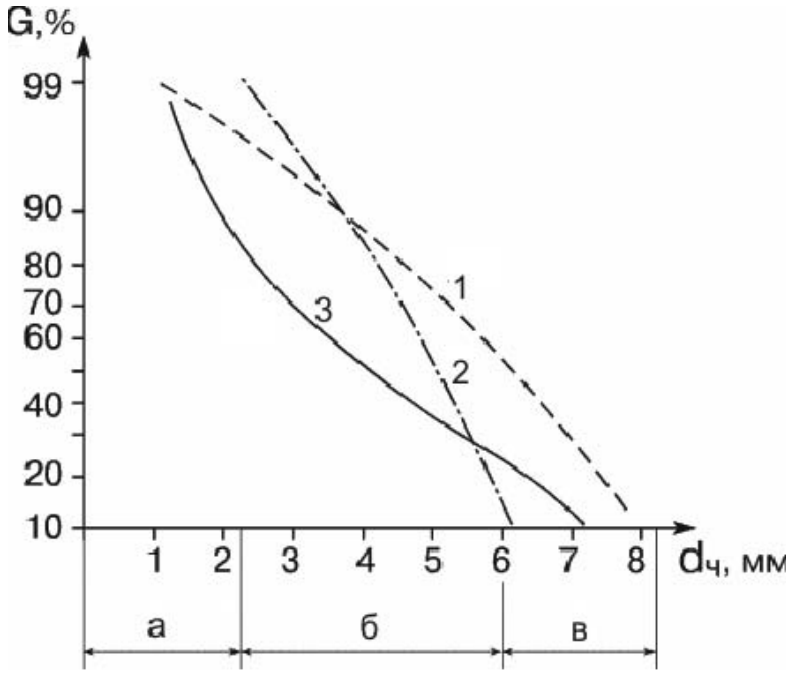


Рис.10. Распределение размеров капель в зависимости от диаметра сопла: 1, 2, 3 – диаметры сопел соответственно 16, 20, 24 мм; **а** – капли, сгорающие во взвешенном состоянии; **б** – капли, воспламеняющиеся при падении на под; **в** – капли, требующие время на подсушку при падении на под; $d_ч$ – диаметр частиц, мм; G – массовая доля частиц, %

На СРК старых конструкций форсунки оборудовались механизмами качания в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Как показала практика, использование механизмов качания приводит к повышенному уносу частиц щелока и периодическому увеличению выбросов соединений восстановленной серы. Поэтому в последнее время принята фиксированная установка форсунок на высоте 5-7 м от пода топки. Производительность СРК по щелоку регулируется диаметром сопел и количеством работающих форсунок.

Баки черного щелока и растворители золы. Баки черного упаренного щелока представляют собой металлические резервуары емкостью 75-100 м^3 со змеевиками для подогрева щелока и мешальными устройствами, представляющими собой валы с лопастями, закрепленными в подшипниках. Мешальное устройство приводится во вращение от электродвигателя через редуктор, который, как правило, монтируется на верхней крышке бака. Щелок в баке подогревается паром низкого давления. Образующийся конденсат отводится через конденсационный горшок. Типовой растворитель золы представляет собой цилиндрический бак с паровой рубашкой. Для интенсификации растворения золы в черном щелоке растворители, как и баки черного щелока, оборудованы вращающимися мешалками. Пары, образующиеся в растворителе, отводятся через трубу в атмосферу.

Конструкции содорегенерационных котлов и вспомогательное оборудование

Конструкция современного СРК обусловлена спецификой процесса регенерации химикатов и свойствами золы черного щелока, имеющей низкую температуру плавления и сильные адгезионные (*от лат.* adhaesio – прилипание) характеристики. Значительный унос и низкая температура плавления золы, частично уносящейся с дымовыми газами и состоящей в основном из сульфата и карбоната натрия, являются причинами загрязнения поверхностей нагрева, большая часть которых работает в условиях жидкоплавкой и размягченной золы.

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

Основными из них являются:

- большая высота топок;
- низкие скорости газов на выходе из топки (до 3 м/с);

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

- сравнительно низкие тепловые напряжения топочного объема (q_V = 90 - 110 кВт/м^3);
- выполнение фестона и пароперегревателя в виде ширмовых поверхностей с большим поперечным шагом (300 – 460 мм);
- применение двухбарабанных конструкций с высокоразвитыми котельными пучками;
- устройство горизонтальных сцеживающих подов, охлаждаемых слабонаклонными участками труб переднего или заднего экрана топки;
- выполнение водяного экономайзера с вертикальным расположением труб;
- наличие большого числа мощных паровых глубоковыдвижных обдувочных аппаратов для очистки поверхностей нагрева, включая поверхность водяного экономайзера;
- подогрев воздуха в калориферах.

Все они могут быть классифицированы следующим образом: тип **БВ** - изготовленные фирмами «Бабкок» и «Бреда»; тип **СЕ** - изготовленные фирмами «Альстрем», «Тампелла», «Стейн», «Мицубиси», «СМВ» и отечественные содорегенерационные котлоагрегаты.

СРК типа **БВ** оборудованы традиционной топкой Томлинсона, имеющей наклонный под, форсуночное устройство, набрызгивающее щелок на заднюю и боковые стенки, и трехъярусную схему подачи воздуха с размещением вторичного дутья ниже отметки установки щелоковой форсунки.

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

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

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

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

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

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

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

На рис. 11 изображены три характерных профиля топочной камеры СРК различных типов.

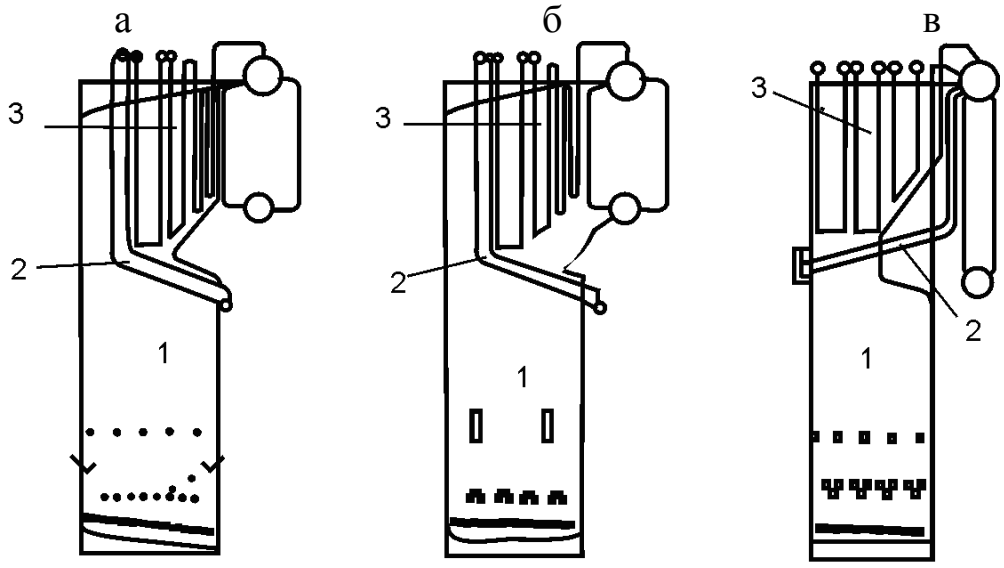


Рис. 11. Профиль топочных камер СРК:
а– типа БВ; б – типа СЕ; в – конструкций «Тампелла»;
1 – топочная камера ; 2 – защитный пучок ; 3 – пароперегреватель

Активный объем топки образован фронтовым, задним и боковыми экранами, в нижней части – трубами пода, а в верхней части – поверхностью, проходящей через первый ряд труб защитного пучка 2. В СРК «Тампелла» ширмы защитного пучка 2 перекрывают топку на всю ее глубину, что связано с размещением пароперегревателя 3 по всему сечению первого подъемного газохода.

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Это обстоятельство отличает топку СРК «Тампелла» от топок **СЕ** и **БВ**, имеющих защитный фестон с длинным вертикальным участком, что в свою очередь связано с компоновкой пароперегревателя.

Основными расчетными характеристиками топки СРК являются: массовая нагрузка пода (массовой расход сухого вещества щелока на 1 $м^2$ пода в час); тепловое напряжение топки по объему и сечению.

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

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

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

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

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

Таким образом, топка содорегенерационного котлоагрегата занимает промежуточное положение между камерной и слоевой топками. Как и при камерном сжигании, в топке СРК обеспечиваются распыление топлива, минимальные избыток воздуха и потери тепла

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

от химического и механического недожога, и, как при слоевом – формируется слой топлива, и минимизируется унос золы, при этом по степени осаждения золы топка СРК превосходит все известные типы слоевых топок. Факельно-слоевой способ сжигания щелока удовлетворяет условиям регенерации щелока, а габаритные размеры топки СРК обеспечивают применение этого способа.

На всех СРК предусматривается возможность сжигания мазута или газа в качестве резервного или вспомогательного топлива. Необходимость использования мазута или газа возникает при растопке котла, в случаях повышенной влажности или недостатке щелока, а также для выжига огарка при останове котла. Пусковые (подовые) горелки устанавливаются, как правило, на уровне или несколько выше уровня первичного дутья по всему периметру топки, а нагрузочные - на уровне сопел вторичного дутья.

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

- гладкие трубы, защищенные чугунными блоками «Бейли»,
- плавниковые трубы,
- гладкие трубы, расположенные с тесным шагом (S = d+1, мм),
- цельносварные газоплотные панели.

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

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

Для гладкотрубных экранов отечественных агрегатов СРК-320, СРК-625 используются трубы диаметром 60 мм, расположенные с шагом 64 мм, для СРК «Альстрем», «Стейн» – трубы диаметром 51 мм с шагом 52 мм, для СРК «Тампелла» – трубы диаметром 60,3 мм с шагом 62 мм.

Для цельносварных газоплотных панелей отечественных СРК-350, СРК-700, СРК-1400 применяются трубы диаметром 57 мм с шагом 75 мм, т.е. ширина проставки равна 18 мм. Газоплотные панели СРК «Стейн», «Тампелла» состоят из труб диаметром 63,5 мм с шагом 76,5 -77 мм, т.е. ширина проставки составляет 13-13,5 мм.

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

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

Конструкция пода топки. Содорегенерационные котлы имеют различное устройство пода топки и его обмуровки (рис. 12).

Динамика развития содорегенерационных котлоагрегатов различных фирм показывает, что по мере увеличения мощности котлов совершенствовалась и их конструкция. Наклонный под топки и изоляция труб экранов на значительную высоту с целью защиты их от наружной коррозии, вызываемой воздействием плава и огарка, сменились соответственно подом в форме горизонтальной чаши с приподнятой леткой и изоляцией труб экранов до летки. Изоляция вертикальной части пода топки быстро разрушается почти на всех СРК, имеющих низкое расположение летки и высокую изоляцию ошипованных труб экранов.

На содорегенерационных котлоагрегатах, имеющих наклонный под и низкорасположенную летку, часто наблюдается образование трещин в изоляции пода и течь плава мимо летки.

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

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

Наклонный под применяется в агрегатах, работающих по принципу набрызгивания щелока на стенки топочной камеры. Трубы пода располагаются с уклоном до 5° в сторону летки плава, ошиповываются, и по шипам наносится слой пластичной огнеупорной хромистой массы. Опыт работы таких агрегатов показал, что на поверхности огнеупорной массы не образуется защитный слой застывшего плава, поэтому поверхностный слой огнеупорной массы находится в контакте с движущимся жидким плавом. В связи с этим даже при правильно подобранных массе и технологии укладки практически ежегодно требуется замена набивки пода.

Горизонтальный и *слабонаклонный поды* используются в агрегатах, работающих по принципу впрыскивания щелока в топочную камеру. В горизонтальной конструкции летки плава приподняты над плоскостью огнеупорной массы примерно на 90 – 100 мм.

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Собственно огнеупорная масса наносится непосредственно на трубы, как правило, не имеющие ошиповки, с изоляцией вертикальных участков экранов до нижней кромки леток.

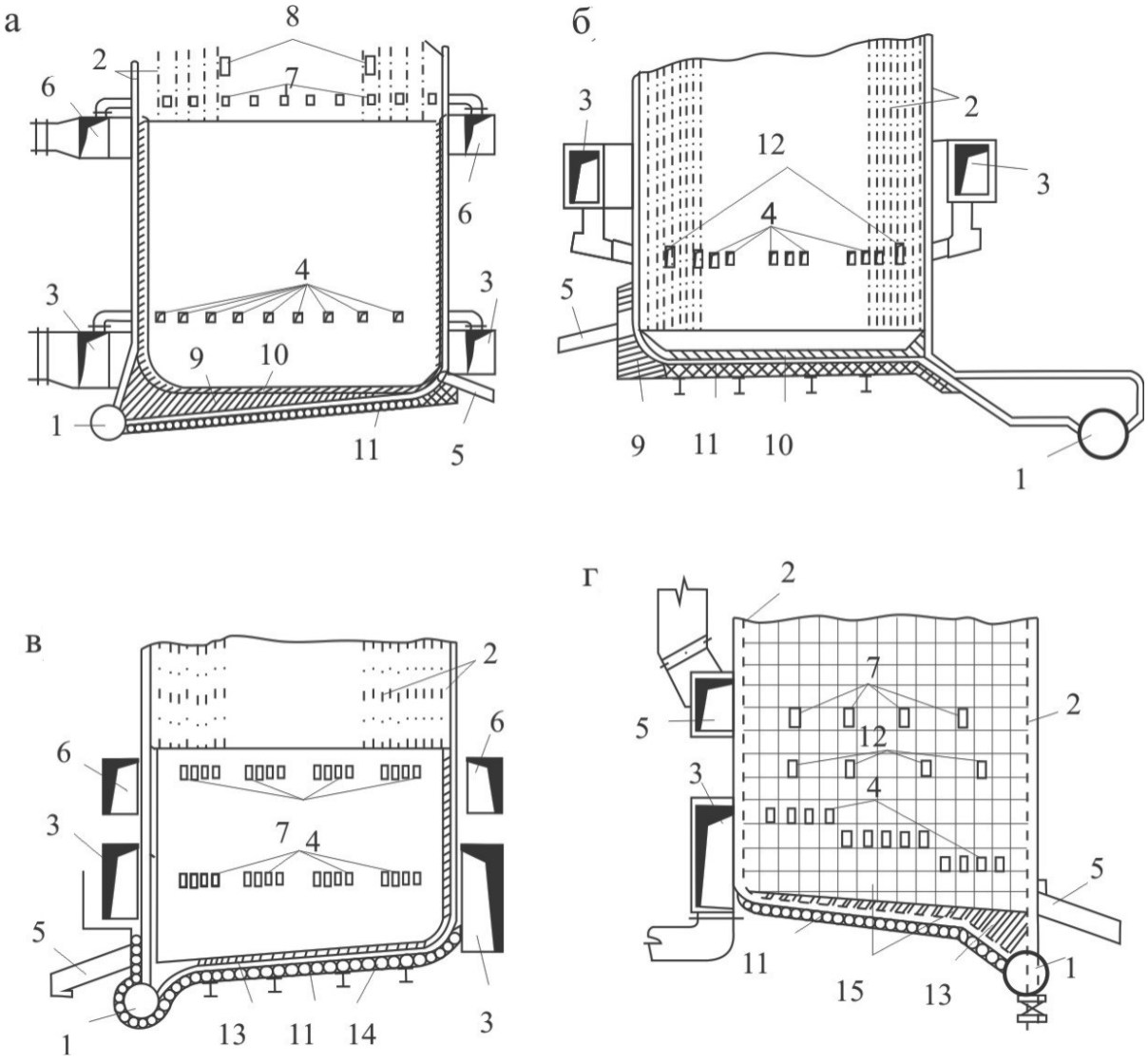


Рис. 12. Схемы обмуровки пода содорегенерационных котлоагрегатов:
а – топка с горизонтальным подом и обмуровкой вертикальной части до сопел вторичного дутья; б – то же, с обмуровкой вертикальной части пода до летки; в – топка с наклонным подом и обмуровкой вертикальной части до сопел вторичного дутья; г – то же, с обмуровкой вертикальной части пода до летки;
1 – коллекторы; 2 – экранные трубы; 3 – воздуховоды первичного дутья; 4 – окна для сопел первичного дутья; 5 – лётки; 6 – воздуховоды вторичного дутья; 7 – окна для сопел вторичного дутья; 8 – окна для щелоковых форсунок; 9 – бетон перхромит; 10 – масса перхромит; 11 – минеральное волокно; 12 – мазутные форсунки; 13 – хроморганическая масса; 14 – обшивка; 15 – плитки Бейли

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Горизонтальный под с приподнятой лёткой (декантирующий) образует неподвижный слой плава, который затвердевает и предохраняет огнеупорную массу от разрушения (рис.13). Агрегаты с декантирующим подом эксплуатируются в течение длительного времени без замены огнеупорной массы.

В *слабонаклонной конструкции пода* трубы находятся под углом до 2°, а уровень летки устанавливается таким образом, чтобы поверхность огнеупорной массы была горизонтальной и покрывалась слоем застывшего плава. Слабонаклонный под рассматривается как потенциально надежная конструкция, чтобы при возможном закипании воды в трубах пода исключить возможность образования паровых мешков.

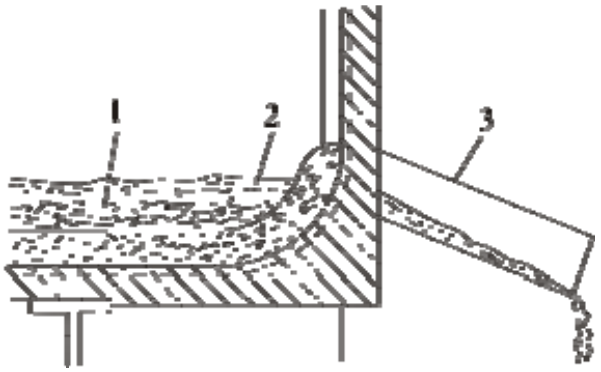


Рис.13. Схема работы горизонтального пода с приподнятой леткой:
1 – застывший слой плава; 2 – плав; 3 – летка для плава

Покрытие нижней части экранов на высоту примерно до уровня вторичного дутья с огневой стороны специальной набивной массой на основе хромита или хромомагнезита связано с наличием в нижней части топки восстановительной атмосферы. Назначение защитной массы – предохранить трубы, находящиеся в зоне воздействия жидкого плава и газообразных соединений восстановленной серы, от коррозионного разрушения. Опыт эксплуатации показал, что набивная масса на вертикальных стенках разрушается в короткий срок. Восстановление защитного слоя является трудоемкой и нецелесообразной операцией. Однако регулярные осмотры СРК других конструкций («Альстрем», «Мицубиси»), не имеющих защиты нижней части топки, выявили, что скорость коррозии труб в этой зоне сравнительно низка. В то же время, коррозия экранных труб является серьезной проблемой, с которой пришлось столкнуться при повышении давления в СРК до 6,4 МПа и выше. Ввод в эксплуатацию СРК, работающих под давлением 6,4 – 8,4 МПа, сопровождался серьезными коррозионными повреждениями экранных труб, захваты-

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

вающими, в основном, восстановительную часть топки. Опыт работы СРК, эксплуатирующихся при давлении 6,4 МПа, показывает, что в случае применения труб из углеродистой стали с ошиповкой нижней части экрана замена труб необходима через 4 – 6 лет.

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

$$2Na_2S + 2O_2 = Na_2S_2O_3 + Na_2O;$$

$$Na_2S_2O_3 + Q = Na_2SO_3 + S.$$

Свободная сера непосредственно взаимодействует с железом по схеме Fe + S = FeS.

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

На рис. 14 показана зависимость расчетной температуры стенки труб топочной камеры от давления пара в СРК. При давлении 4 МПа расчетная температура стенки трубы на несколько десятков градусов ниже температуры, при которой начинается усиленное разрушение углеродистой стали.

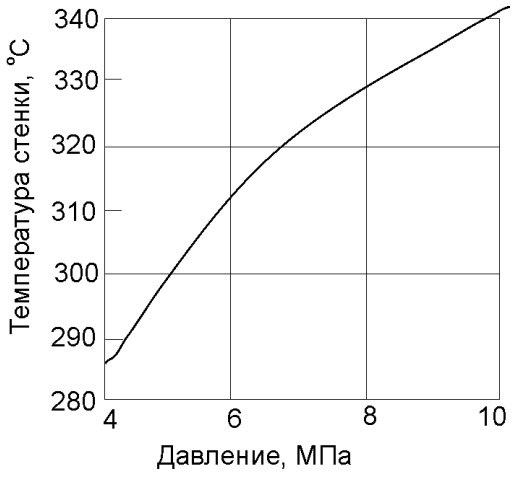


Рис. 14. Зависимость расчетной температуры стенки трубы от давления пара

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

В отечественной промышленности СРК работают при давлении 4 МПа, поэтому коррозионные явления в топке проявляются в отдельных случаях и носят локальный характер (зона леток плава, фурмы первичного дутья), вызванный спецификой эксплуатации СРК. Однако специальные методы защиты труб топок (увеличение толщины стенки углеродистых труб; наварка на трубы высоколегированной стали; использование биметаллических труб) находят применение на практике. Так, совместное сжигание сульфатного и сульфитного щелоков в силу высокой сульфидности плава (до 60 %) делает обязательным применение коррозионной защиты труб топочной камеры при давлении 4 МПа. Эксплуатация СРК при совместном сжигании сульфатных и сульфитных щелоков целесообразна при биметаллическом выполнение экранов в нижней части топки и кислотоупорной металлизации труб в ее верхней части.

Биметаллические (компаундные) трубы применяются почти без исключения для обеспечения надежности работы нижней части топочной камеры для СРК с давлением выше 6 МПа. Внутренний слой этих труб выполняется из углеродистой стали, причем толщина слоя выбирается, исходя из расчета на прочность, а наружный слой - из стали аустенитного класса типа Х18Н9, толщина которого определяется запасом на коррозию. Изготовление труб производится горячим прессованием при температуре 1200 °С.

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

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

Гидравлические схемы. В СРК повреждения парообразующих поверхностей, связанные с неудовлетворительной циркуляцией воды,

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

маловероятны, что объясняется достаточной степенью надежности высоких циркуляционных контуров СРК.

*Схема циркуляции двухбарабанного СРК***.** На рис. 15 показана традиционная схема циркуляции двухбарабанного СРК, по которой видно, что вода из верхнего барабана 8 поступает в нижний 9 по обогреваемым последним рядам труб котельного пучка 1. Из нижнего барабана по необогреваемым опускным трубам 3 (или по стоякам большего диаметра) она проходит в главный распределительный коллектор 10, из которого осуществляется питание фронтового, заднего и боковых экранов. Пароводяная смесь из фронтового и заднего экранов 5 непосредственно вводится в верхний барабан.

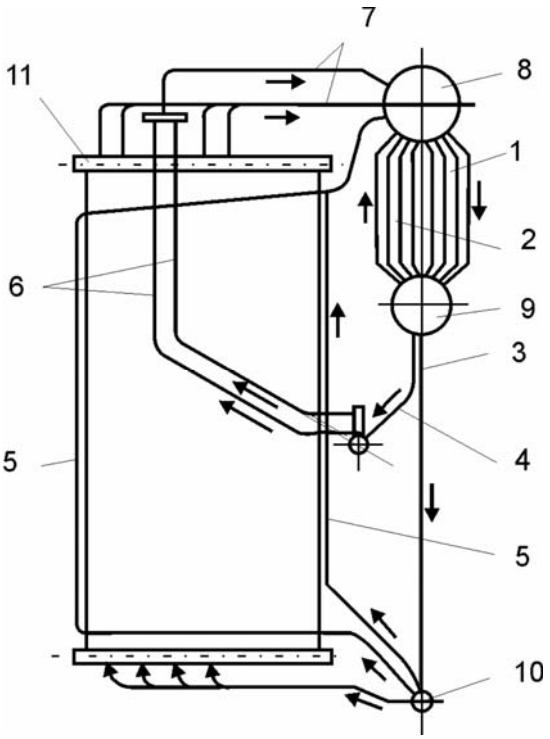


Рис. 15. Схема циркуляции двухбарабанного СРК:
1 – опускные трубы котельного пучка; 2 – подъемные трубы котельного пучка; 3 – необогреваемые опускные стояки экранов; 4 – необогреваемые опускные стояки фестона; 5 – экраны; 6 – фестон; 7 – пароотводящие трубы боковых экранов и фестона; 8 – верхний барабан; 9 – нижний барабан; 10 – главный распределительный коллектор; 11 – верхний коллектор

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

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

из нижнего барабана. Циркуляционные контуры экранов, защитного фестона и котельного пучка имеют общий элемент – обогреваемые опускные ряды котельного пучка.

Таким образом, обеспечение надежного опускного движения воды в последних рядах котельного пучка является важным фактором, обуславливающим нормальное питание подъемных труб. Практически это достигается предотвращением кипения в обогреваемых опускных трубах. Котельные пучки размещаются в зонах относительно слабого обогрева, и их опускные ряды омываются газами с температурой 400 – 500 °С. Питательная вода, поступающая в барабан после экономайзера с температурой на 20 – 30 °С ниже температуры кипения, равномерно распределяется через перфорированную трубу со сливом в сторону опускных труб. В результате достигаются гарантированный недогрев до кипения циркулирующей воды на входе в опускные трубы и отсутствие кипения в них.

Схема циркуляции однобарабанного СРК. В отечественных однобарабанных СРК применено двухступенчатое испарение.

На рис.16 показана схема циркуляции СРК-700. Барабан котла разделен на чистый отсек с первой ступенью испарения и два солевых отсека, расположенных с торцов барабана, со второй ступенью испарения. Чистый отсек барабана (первая ступень испарения) включает фронтовой и задний экраны топки, 24 ширмы защитного фестона и все экраны конвективного поворотного газохода. Питание всех контуров чистого отсека осуществляется из барабана двумя стояками 1 наружным диаметром 630 мм.

Фронтовой экран состоит из 4 блоков по 32 подъемные трубы диаметром 57×5 мм, образующих 4 циркуляционных контура. Питание экрана осуществляется из стояков трубами 133×5 мм (по 2 трубы на каждый контур). Отвод пароводяной смеси в чистый отсек барабана осуществляется трубами 14 диаметром 133×5 мм (по 2 трубы от каждого контура).

Задний экран 5 также состоит из четырех контуров. Питание каждого контура идет по двум трубам диаметром 133×5 мм, связывающим стояк 1 с нижним коллектором. Задний экран в верхней части топки образует пережим, в этом месте каждая труба экрана имеет развилку. Вертикальные трубы необогреваемы. На выходе из них в коллекторе установлены шайбы (8 мм) с таким расчетом, чтобы по необогреваемым трубам проходило не более 3 – 5 % пароводяной

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

смеси. Трубы, образующие пережим, входят в тот же промежуточный коллектор.

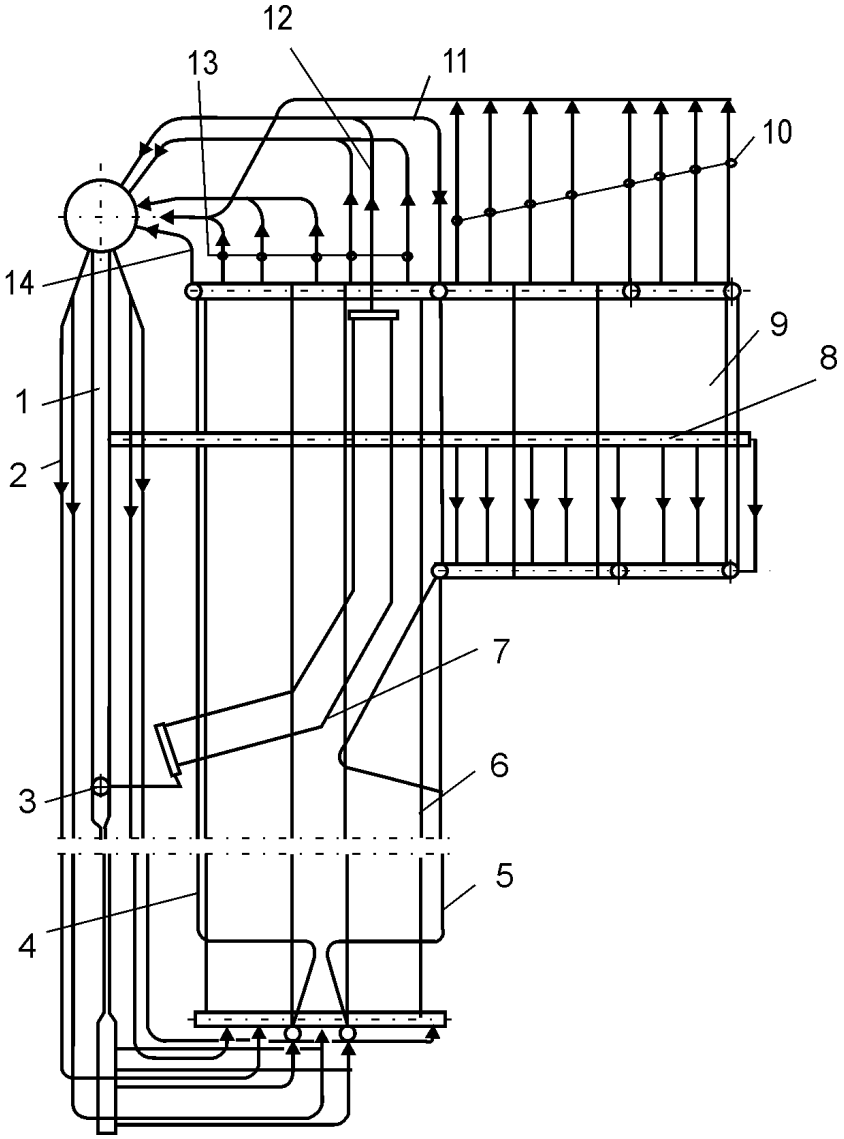


Рис. 16. Схема циркуляции однобарабанного СРК:
1 – питательные стояки 1-й ступени испарения; 2 – опускные трубы солевого отсека; 3 – коллектор питания фестона; 4 – блоки фронтового экрана топки; 5 – блоки заднего экрана топки; 6 – блоки боковых экранов; 7 – фестон; 8 – коллектор питания экранов конвективного газохода: 9 – блоки экранов конвективного газохода; 10 – пароотводящие трубы экранов конвективного газохода; 11 – пароотводящие трубы заднего экрана; 12 – пароотводящие трубы ширм защитного фестона; 13 – пароотводящие трубы боковых экранов; 14 – пароотводящие трубы фронтового экрана

Из промежуточного коллектора выходят 24 трубы диаметром 108×8 мм, образующие однорядный фестон перед второй ступенью пароперегревателя. Трубы входят в верхние коллекторы фестона (по одному на каждый контур). От каждого верхнего коллектора

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

пароводяная смесь отводится в чистый отсек барабана тремя трубами 11.

Защитный ширмовый фестон состоит из 24 ширм (по 15 труб диаметром 57×5 мм в каждой ширме). Питание ширм осуществляется из коллектора 3 наружным диаметром 465 мм, соединенного с двумя стояками 1. Пароводяная смесь из верхнего коллектора каждой ширмы отводится одной трубой 12 диаметром 133×5 мм в чистый отсек барабана.

Экраны конвективного поворотного газохода включают экранирование боковых и задней стен. Боковые экраны состоят из 8 блоков подъемных труб диаметром 57×5 мм: 6 блоков по 30 труб и 2 блока по 12 подъемных труб. Задний экран выполнен из 4 блоков по 30 подъемных труб в каждом. Питание контуров бокового и заднего экранов конвективного газохода 9 осуществляется трубами диаметром 133×5 мм из кольцевого коллектора 8 наружным диаметром 273 мм, в который поступает котловая вода из стояков 2. Отвод пароводяной смеси от каждого контура осуществляется трубами 10 диаметром 133×5 мм. Все отводящие трубы объединены в кольцо наружным диаметром 219 мм, соединенное с чистым отсеком барабана. Для повышения надежности циркуляции воды в испарительных контурах экранов конвективного газохода предусмотрены рециркуляционные трубы диаметром 108×8 мм (по 2 трубы на каждый контур). Подвод котловой воды и отвод пароводяной смеси от однорядного фестона, состоящего из 24 труб диаметром 57×5 мм и расположенного перед опускным газоходом, осуществляется через нижний и верхний коллекторы, которые соединены непосредственно с нижним и верхним коллекторами контуров боковых экранов конвективного газохода, содержащих по 12 подъемных труб.

В солевые отсеки барабана (вторую ступень испарения) включены боковые экраны 6. Каждый боковой экран состоит из трех блоков подъемных трубы диаметром 57×5 мм: 2 блока по 32 трубы и 1 блок с 16 подъемными трубами. Питание боковых экранов осуществляется из солевых отсеков барабана: в нижние коллекторы крайних контуров вводится по 2 трубы, в средний – 1 труба. Для выравнивания солесодержания обоих солевых отсеков сделан переброс трубами, на которых установлен шламоотделитель. Эти трубы вводятся в крайний (передний) нижний коллектор бокового экрана. Отвод пароводяной смеси из верхних коллекторов осуществляется трубами 13. Все они включены в солевые отсеки верхнего барабана.

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Пароперегреватели. Пароперегреватели содорегенерационных котлоагрегатов работают в напряженных условиях, вызванных тем обстоятельством, что адгезионные свойства пылевого уноса наиболее сильно проявляются в интервале температур от 600 до 850 °С. В этой температурной зоне унос, состоящий преимущественно из сульфата и карбоната натрия, находится в размягченном состоянии и образует на трубах липкие отложения. Именно необходимость надежной очистки труб от наружных загрязнений вызвала применение на СРК ширмовых пароперегревателей. Металл поверхности нагрева пароперегревателя имеет наивысшую в котельном агрегате температуру. Это обусловлено высокой температурой пара и относительно большими удельными тепловыми нагрузками. Поэтому для выходной ступени пароперегревателя применяются легированные стали. Отложения на трубах при определенных условиях могут быть коррозионно-опасными, в результате чего даже незначительное повышение температуры пара в отдельных трубах выше среднего значения может привести к недопустимому, по условиям коррозии, повышению температуры стенки трубы, а с развитием и углублением коррозии – к потере прочности трубы. В этой связи конструктивные мероприятия, направленные на уменьшение температурной развертки труб, приобретают исключительное значение. Основным мероприятием в этом плане является разделение всей поверхности пароперегревателя на последовательно включенные по пару части с перемешиванием его перед поступлением в каждую из них.

Пароперегреватели большинства СРК разделены на две ступени, однако лучшей следует считать трехступенчатую компоновку. Пароперегреватели СРК, за исключением некоторых, выполнены в виде ширмовых поверхностей из труб диаметром 42 – 54 мм (на отечественных СРК для ширм первой ступени используются трубы диаметром 38 мм) с толщиной стенки 4,5 – 6,3 мм. Ширмы расположены с шагом 364 – 434 мм ($S_1/d = 7,5 – 8$). Ширмовые пароперегреватели, хорошо компонующиеся с глубоковыдвижными обдувочными аппаратами, благодаря большому поперечному шагу менее подвержены заносу и при правильном подборе давления обдувки (не менее 1,6 – 2 МПа) делают возможной длительную эксплуатацию СРК на номинальной нагрузке.

В трехступенчатых пароперегревателях СРК «Тампелла» первая ступень выполнена в виде змеевиковой поверхности с коридорным расположением змеевиков. Относительный поперечный шаг труб $S_1/d = 4,5 – 5$, продольный – $S_2/d = 2,7 – 5$. Змеевиковые поверхности

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

достаточно разрежены и размещены в зоне температур газов 550 – 650 °С. Применение змеевиков с разреженным расположением труб для первой ступени пароперегревателя СРК является компромиссом между снижением металлоемкости конструкции, с одной стороны, и необходимостью ограничения заносов поверхности – с другой.

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

Котельные пучки. Большая часть находящихся в эксплуатации СРК выполнена по двухбарабанной схеме и имеет развитые котельные пучки (рис.17). Наличие котельного пучка позволяет снизить температуру газов перед экономайзером до 400 – 420 °С, что имеет важное значение особенно для экономайзеров с горизонтальным расположением труб по условиям их очистки от наружных загрязнений. Безотносительно к типоразмеру конструкция котельного пучка сохраняется традиционной для каждого типа СРК.

В СРК «Стейн», «Альстрем», «Мицубиси» и в отечественных двухбарабанных агрегатах котельный пучок выполнен относительно коротким и широким с поперечным омыванием газами (рис. 17а). В СРК «Бабкок» и «Бреда» котельный пучок имеет продольное омывание нисходящим и восходящим газовыми потоками с устройством специальной газовой перегородки (рис. 17б), а в агрегатах «Тампелла» он выполняется в виде длинного пучка труб с организацией продольного омывания основной поверхности восходящим потоком газов (рис. 17в).

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

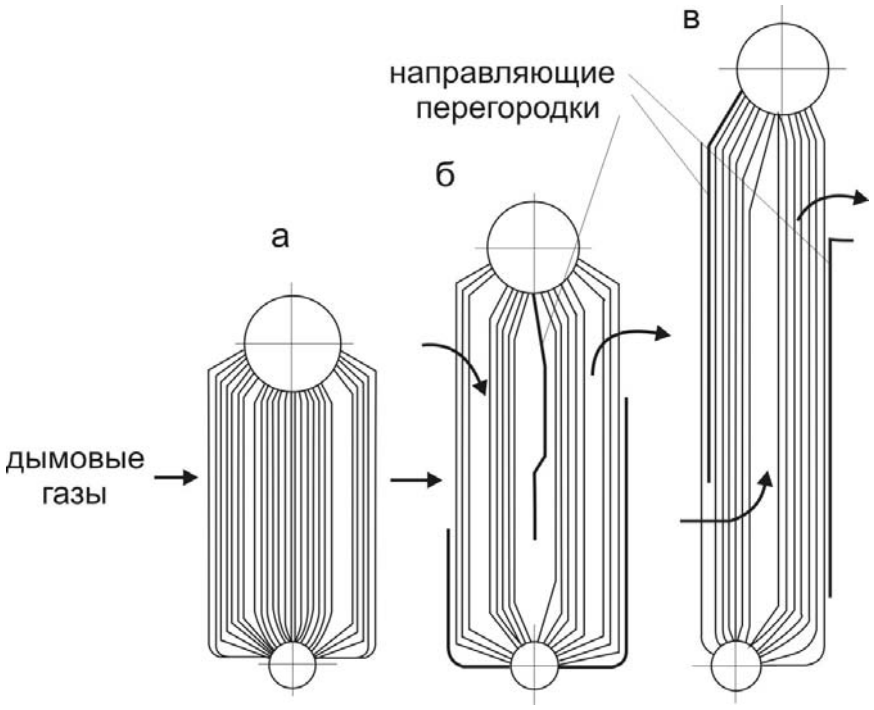


Рис.17. Котельные пучки СРК:
а - тип СЕ; б - тип БВ; в - конструкции «Тампелла»

Особенностью котельных пучков агрегатов «Стейн», «Альстрем», «Мицубиси» является использованием труб с обжатыми концами. Трубы пучка имеют наружный диаметр 63,5 мм, а по концам обжаты до 51 мм. Этому размеру соответствуют отверстия в барабанах. Такое решение связано со стремлением, с одной стороны, максимально развить поверхность котельного пучка (труба диаметром 63,5 м имеет поверхность на 25 % больше трубы диаметром 51 мм), а с другой - обеспечить требуемую прочность барабанов без излишнего увеличения толщины стенки. Для котельных пучков данных агрегатов характерен также и меньший относительный шаг труб в поперечном направлении ($S_1/d=1,8$) по сравнению с агрегатами других типов, однако первые 2 – 4 ряда труб пучка выполняются разреженными с увеличенным относительным шагом $S_1/d = 3,8 – 4,8$.

Рассмотрим работу котельных пучков с точки зрения отложения золы на трубах. При продольном обтекании осаждение частиц происходит вследствие турбулентных пульсаций в потоке дымовых газов в направлении к поверхности нагрева, а при поперечном обтекании - вследствие прямого набегания потока на лобовые участки труб и турбулентных пульсаций на кормовых участках труб. При поперечном омывании трубы наиболее вероятным является осаждение золы в кормовой области, в которую крупные кусочки

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

золы не попадают, а мелкие частички, склонные к прилипанию, приносятся вихревыми токами.

В трубном пучке омывание зависит от взаимного расположения труб. В СРК применяются котельные пучки только с коридорным расположением труб, имеющие преимущество по сравнению с шахматным в отношении заносов. В коридорных пучках при поперечном омывании зона прямого набегания и вихреобразования расположена в промежутках между трубами продольного ряда, а на изменение аэродинамического сопротивления коридорного пучка оказывает влияние главным образом нарастание отложений золы на боковых образующих труб, причем этот процесс протекает достаточно медленно. Поэтому можно считать, что относительный продольный шаг S_2/d практически не влияет на величину отложений, а увеличение относительного поперечного шага S_1/d следует рассматривать как положительный фактор. Последнее обстоятельство существенно тем более, что температура газов на входе в котельный пучок превышает 500 °С, а при этой температуре адгезионные свойства уноса могут проявляться в большей степени.

Практика показывает, что трубы котельных пучков с продольным омыванием в меньшей степени подвержены заносам, чем котельные пучки с поперечным омыванием. Однако слабым местом в продольноомываемых пучках является зона, расположенная над нижним барабаном, в которой газовый поток совершает поворот на 180°, переходя от опускного к подъемному движению. В этой зоне происходит сепарация крупных фракций золы с перекрытием части живого сечения газохода. Эффективным методом борьбы с отложениями этого типа может быть рациональная компоновка обдувочных аппаратов с их размещением непосредственно в зоне вероятного осаждения золы. Занос поперечно омываемых пучков, особенно в начальной их части, может являться фактором, ограничивающим продолжительность непрерывной рабочей кампании СРК, и вызвать необходимость в проведении периодических ручных расшлаковок пучка.

Экономайзеры. Содорегенерационные котлоагрегаты оборудованы водяными экономайзерами, являющимися хвостовыми (низкотемпературными) поверхностями. В экономайзере температура металла имеет наименьшее значение из всех поверхностей, находящихся под давлением. При низкой температуре поверхности стенки могут возникнуть условия для коррозионного повреждения металла вследствие конденсации влаги из дымовых газов. Водяной

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

экономайзер в большой степени подвержен отложениям летучей золы на трубах. Характерным для хвостовой поверхности является низкий температурный напор, особенно на входе в экономайзер.

Технологическая схема СРК в значительной мере определяет размеры и металлоемкость экономайзера. В схемах СРК с газоконтактным испарителем по условиям доупаривания черного щелока температура газов за экономайзером может достигать 300 °С. В схемах СРК без газоконтактного испарителя с концентрированием щелока до заданного значения на выпарной станции температура газов за экономайзером составляет 165 – 185 °С. В этом случае требуется существенное развитие поверхности экономайзера с соответствующим увеличением его габаритных размеров и металлоемкости. Для обеспечения циркуляции воды и ее надежного опускного движения в последних по ходу газа рядах труб котельного пучка необходимо исключить кипение воды в экономайзере и обеспечить гарантированный недогрев до кипения питательной воды, поступающей в барабан. В связи с этим в агрегатах без газоконтактного испарителя применяется метод промежуточного охлаждения питательной воды в воздушно-водяных теплообменниках, суть которого заключается в использовании части тепла воды для нагрева дутьевого воздуха.

Существуют два принципиально отличных типа экономайзеров СРК: *горизонтальный* и *вертикальный*. В СРК старых конструкций, как правило, устанавливались горизонтальные экономайзеры скомпонованные с установками дробевой очистки.

Для экономайзеров *горизонтального* типа, составленных из гладкотрубных змеевиков диаметром 38-51 мм, расположенных в шахматном порядке, характерны следующие значения относительных шагов: в поперечном направлении $S_1/d = 2,8 – 3,15$, в продольном – $S_2/d = 1,4 – 1,57$. Продольные и поперечные шаги имеют соотношение 2:1. В ряде агрегатов горизонтальные экономайзеры конструктивно выполняются из труб с продольным оребрением. При этом в верхних пакетах трубы располагаются коридорно с относительными шагами $S_1/d = 2$ и $S_2/d = 2,15$, а в нижних пакетах – шахматно, с относительными шагами $S_1/d = 2,7$ и $S_2/d = 1,3$. Применение коридорного расположения труб в экономайзере следует рассматривать как конструктивную попытку уменьшить интенсивность золового заноса, так как коридорные пучки по сравнению с шахматными менее склонны к заносу. Однако коридорные пучки менее эффективны в

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

тепловом отношении, поэтому для увеличения тепловосприни-мающей поверхности используется оребрение труб.

Несмотря на то, что трубные пучки горизонтальных экономайзеров разрежены, их очистка от наружных загрязнений при помощи дроби является серьезной проблемой в эксплуатации. Обеспечение удовлетворительной очистки горизонтальных экономайзеров СРК требует высокой плотности дробевого потока (до 900 кг/(м^2·ч)) при практически постоянной работе дробеструйной установки. В этих условиях дробевому износу подвергаются не только трубы экономайзера, но и элементы самой дробеструйной установки, что вызывает необходимость проведения промывок экономайзера водой. Опыт эксплуатации показал, что из-за дробевого износа и коррозионного повреждения при частых промывках необходимость в частичной или даже полной замене труб возникала через 3-4 года эксплуатации.

Водяные экономайзеры с *вертикальным* расположением труб и паровой обдувкой были сконструированы и применены на СРК как альтернатива экономайзерам горизонтального типа. Эксплуатацион-ные преимущества вертикальных экономайзеров оказались столь значительными, что в современных СРК применяются только экономайзеры с вертикальным расположением труб, несмотря на увеличенные габаритные размеры и металлоемкость. Многолетний опыт эксплуатации СРК с экономайзерами вертикального типа подтвердил их надежность и высокую эффективность очистки от загрязнений при использовании паровой обдувки. В конструкциях вертикальных экономайзеров (рис.18) используются плавниковые трубы, расположенные в коридорном порядке с относительным шагом $S_1/d \geq 2$.

По условиям очистки конструкция вертикального экономайзера с продольным омыванием (рис.18б) предпочтительней конструкции вертикального экономайзера с наклонными газовыми перегородками (рис.18а), за счет которых характер омывания становится ближе к поперечному.

При модернизации экономайзеров СРК, работающих по схеме с газоконтактным испарителем, можно разместить вертикальный экономайзер в имеющейся ячейке. При этом появляется возможность осуществить некоторое повышение температуры газов за экономайзером, позволяющее улучшить доупаривание щелока в каскадном испарителе и снизить металлоемкость конструкции.

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

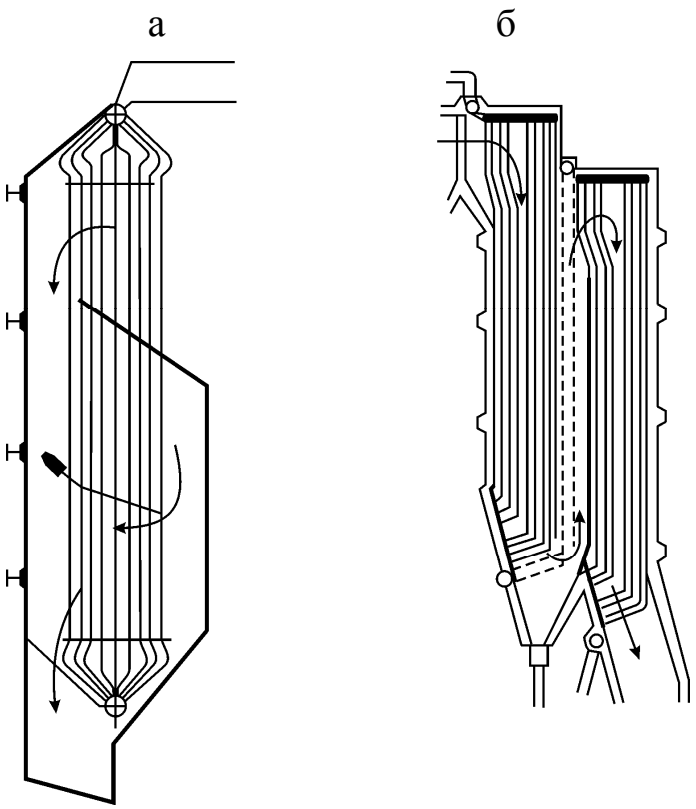


Рис.18. Вертикальные экономайзеры СРК:
а - «Стейн»; б - «Тампелла»

Необходимость снижения температуры дымовых газов за экономайзером до 165 – 185 °С при исключении из схемы газоконтактного испарителя требует существенного развития поверхности вертикального экономайзера. В целях снижения металлоемкости, а также предотвращения кипения воды в экономайзере необходима организация промежуточного охлаждения воды с использованием ее тепла для подогрева дутьевого воздуха.

Для уменьшения поверхности экономайзера целесообразным является и обоснованное снижение начальной температуры питательной воды до 105 – 120 °С, что позволяет увеличить температурный напор и, соответственно, тепловосприятие экономайзера. Возможность снижения температуры питательной воды подтверждается как практикой работы ряда СРК, так и фактической температурой точки росы продуктов сгорания сульфатного щелока, составляющей, по данным испытаний, 85-95 °С.

Каркас, обмуровка котла. Каркас котла состоит из опор и балок, выполненных из профилей конструктивной стали, и является несущей конструкцией котла. Топочные камеры СРК имеют натрубную обмуровку, из-за которой усилия от избыточного давления газов не передаются на основной каркас, а воспринимаются

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

специально укрепленными на экранных трубах *поясными балками*. Экранные трубы СРК подвешены к балкам перекрытия каркаса и свободно удлиняются вниз. Поясные балки прикреплены к трубам и перемещаются совместно с ними. Линейное расширение балок, находящихся вне обогрева, существенно меньше расширения экранных стен. Для взаимного перемещения балок и труб балочные пояса разрезаются по углам топки, а крепления самих балок к трубам допускают продольные перемещения вдоль балок. Все они отвечают поставленным требованиям и являются достаточно простыми. В конструкции, показанной на рис.19, к экранным трубам в плоскости пояса приварена полоса 1, дистанционирующая трубы. Сверху и снизу полосы к трубам приварены фигурные пластины 2, расположенные с шагом 762 мм. Верхняя и нижняя пластины соединены между собой скобой 3, имеющей вырез по профилю полочки балки 4. Собственно поясная балка свободно опирается на скобы, что обеспечивает перемещение экранов относительно поясной балки. Балочные пояса разрезаны по углам, а крепления на концах балок выполнены таким образом, что их реакции передаются на перпендикулярные им стены. Наличие овальных вырезов на концах поясных балок обеспечивает заданное конечное перемещение балок.

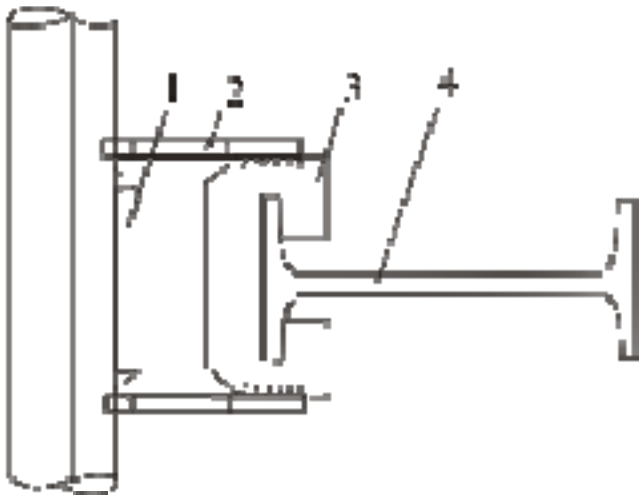


Рис.19. Крепление поясной балки к трубам:
1 – полоса; 2 – фигурная пластина; 3 – скоба; 4 – балка

Расстояние между поясными балками по высоте топки зависит от прочности экранных труб и самих балок. Обычно расстояние между балками составляет около 3 м и зависит от размеров СРК. Наибольшее возможное по условиям прочности труб расстояние определяется суммой всех действующих усилий. Максимальные

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

нагрузки в содорегенерационных котлоагрегатах приходятся на боковые экраны.

Опорная конструкция пода. На *под* топочной камеры СРК приходятся существенные весовые нагрузки, складывающиеся из веса подовых труб с водой, изоляции и обмуровки, веса плава и слоя огарка щелока. Указанные весовые нагрузки через подовые балки передаются на боковые экраны. Боковые экраны и трубы пода имеют тепловые перемещения относительно более холодных балок, поэтому конструкция опор предусматривает возможность таких перемещений. При перемещениях экранов относительно подовых балок возникают силы трения, вызывающие изгибающие моменты, которые в совокупности с моментами от весовых нагрузок приводят к дополнительному напряжению в трубах.

Существует два типа опор под подовые балки: первый – опора, размещенная непосредственно на трубах боковых экранов (рис.20); второй – опора, размещенная на нижних коллекторах боковых экранов (рис.21). На рис. 20а изображена широко распространенная в агрегатах «Тампелла» опорная конструкция пода.

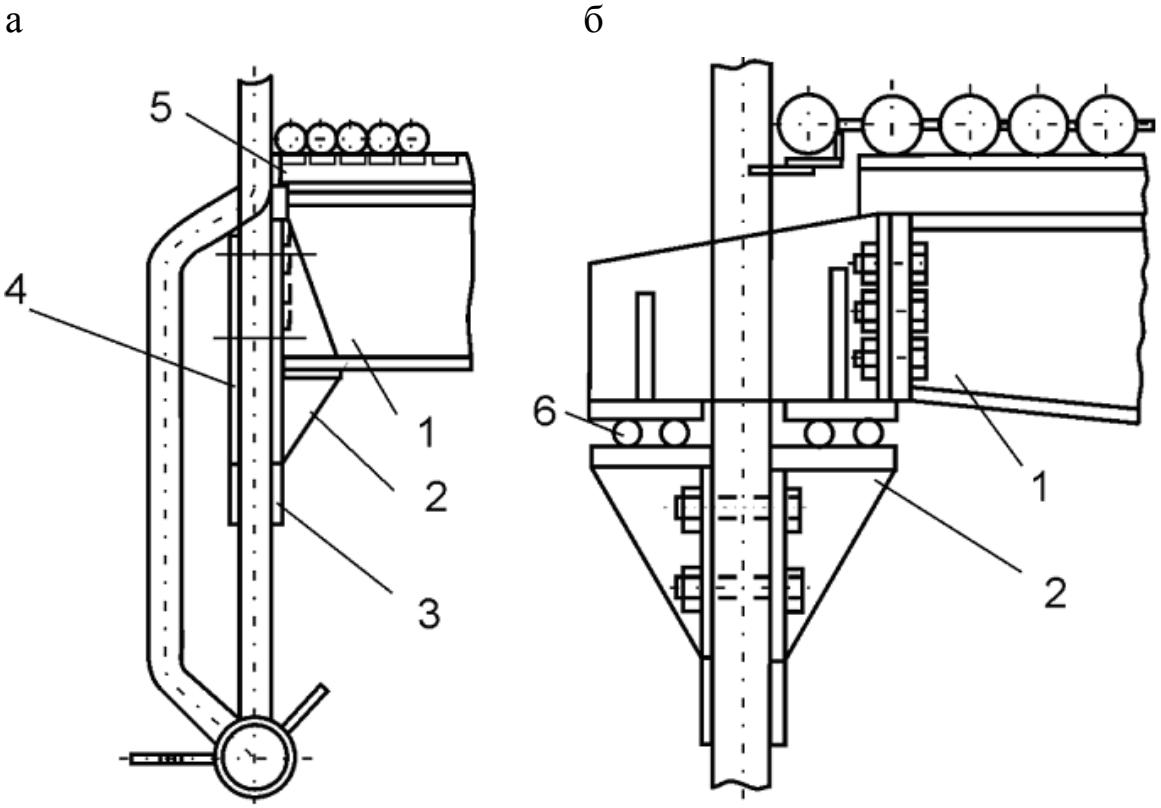


Рис. 20. Опорная конструкция пода на трубах:
1 – подовая балка; 2 – стульчик; 3 – упоры; 4 – прижимная плита; 5 – промежуточные балки; 6 – катки

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

В зависимости от мощности СРК число подовых балок меняется от 5 до 10. Расстояние между балками составляет 1000-1200 мм. Подовая балка двутаврового сечения 1 свободно опирается на стульчик 2. Опорный стульчик имеет развитую вертикальную стенку, через которую он стягивается с прижимной плитой 4 при помощи болтов, проходящих в зазоры между трубами. Своей нижней плоскостью стульчик 2 и прижимная плита 4 опираются на упоры 3. Упоры приварены к трубам и представляют собой стальной брус сечением 16×16 мм. Подовые трубы передают нагрузку на подовые балки через промежуточные балочки 5. К балочкам 5 трубы не приварены и имеют возможность свободно перемещаться при тепловом удлинении. В свою очередь балочки приварены к основным балкам 1.

При тепловом расширении котла боковые экраны перемещаются относительно более холодных подовых балок. В месте касания поверхности полки балки и стульчика развивается сила трения скольжения, которая вызывает изгибающий момент относительно места примыкания труб пода и бокового экрана. Конструктивно места примыкания выполняются в виде пластин, привариваемых к трубам пода и бокового экрана и создающих абсолютную плотность соединения. Практика работы СРК показала, что в ряде случаев наблюдаются трещины и даже разрывы по сварке в местах соединения боковых экранов и пода.

Образование трещин и разрывов объясняется возникновением дополнительных напряжений от изгибающего момента рассмотренного типа, а также от изгибающего момента, вызванного смещением приложенной весовой нагрузки относительно оси. Поскольку подовая балка опирается на стульчик, то весовая нагрузка передается на трубы с плечом, равным расстоянию от центра приложения силы до образующей трубы.

Показанная на рис. 20б опорная конструкция пода относится к типу опор, размещенных на трубах боковых экранов. Но в отличие от ранее рассмотренной, эта конструкция практически исключает изгибающие моменты и контактные напряжения в трубах. Подовая балка 1 через катки 6 опирается на опорные стульчики 2. Опорные стульчики размещены по обе стороны труб, поэтому нагрузка действует на трубы симметрично и не вызывает изгибающего момента. При относительных перемещениях подовой балки и опорного стульчика, вызванных тепловым перемещением бокового экрана, возникающая благодаря наличию катков сила трения качения

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

на порядок меньше силы трения скольжения. Поэтому изгибающий момент от силы трения качения незначителен, а симметричное приложение нагрузок исключает также и контактные напряжения в трубах.

На рис. 21а показана опорная конструкция пода, широко применяемая в агрегатах типа СЕ, «Мицубиси». Подовая балка двутаврового сечения 1 свободно опирается на стульчик 2, приваренный к коллектору бокового экрана. Подовая балка перемещается относительно бокового экрана при помощи тяги 3. Необходимый зазор между балкой и боковым экраном для теплового перемещения устанавливается зажимной гайкой 4. Трубы пода непосредственно опираются на промежуточные балки 5 (трубы к балкам не привариваются).

В рассматриваемой опорной конструкции так же, как и в конструкции, показанной на рис. 20а, возникают дополнительные изгибающие моменты от сил трения скольжения и от эксцентрически приложенной нагрузки, действующей на трубы бокового экрана. Однако контактных напряжений в трубах эта конструкция не вызывает. На рис 21б изображена опорная конструкция пода, в которой устранены причины появления дополнительных напряжений в трубах. Подовая балка 1 на катках 6 установлена на симметрично расположенных опорных стульчиках 2, приваренных к нижнему коллектору бокового экрана.

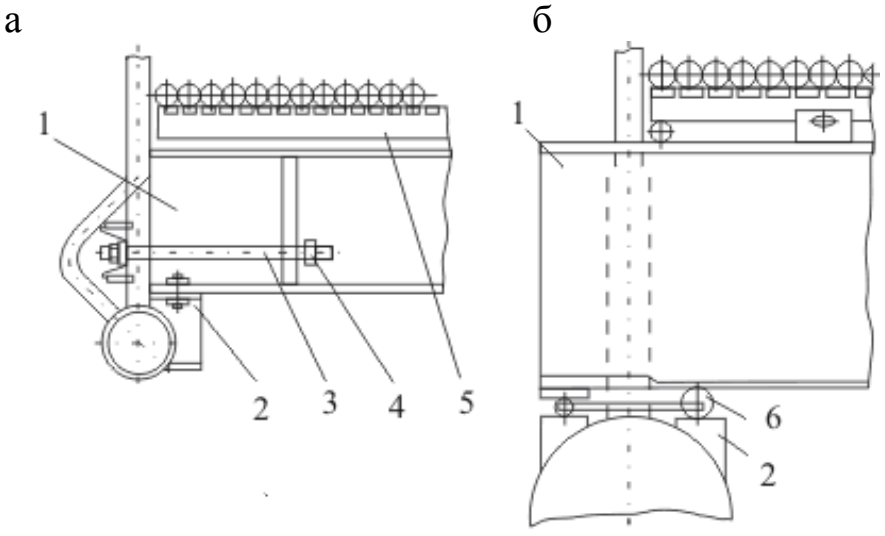


Рис. 21. Опорная конструкция пода на коллекторах:
1 – подовая балка; 2 – стульчик; 3 – тяга; 4 – зажимная гайка; 5 – промежуточная балка; 6 – катки

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

*Ограждения топочной камеры***.** Ограждения (обмуровка) СРК, являясь наружными стенками топочной камеры и газоходов, одновременно обеспечивают газоплотность и тепловую изоляцию. Конструкция ограждения определяется конструкцией самого СРК. Топочная камера СРК и его конвективный газоход в районе расположения пароперегревателя и котельного пучка имеют натрубную обмуровку, непосредственно прикрепленную к трубной системе и передвигающуюся с ней при температурных расширениях труб. Натрубные обмуровки конструктивно проще и легче накаркасных и хорошо сочетаются с вертикальными экранами. Ограждения экономайзеров, работающих при температуре газов ниже 450 °С, выполняются из углеродистой листовой стали с наружной тепловой изоляцией.

На рис.22 показана конструкция ограждения топочной камеры, экранированной гладкими трубами. Эта конструкция относится к типу газоплотных обмуровок с обшивкой стальным листом по экранным трубам, на которые устанавливаются стальные листы внутренней обшивки 1. Листы внутренней обшивки, имеющие отбортовку, крепятся на сварке к опорным швеллерам и гребням, приваренным к трубам. Зазоры между трубами и внутренней обшивкой заполняются огнеупорным бетоном с хромитовым наполнителем 2.

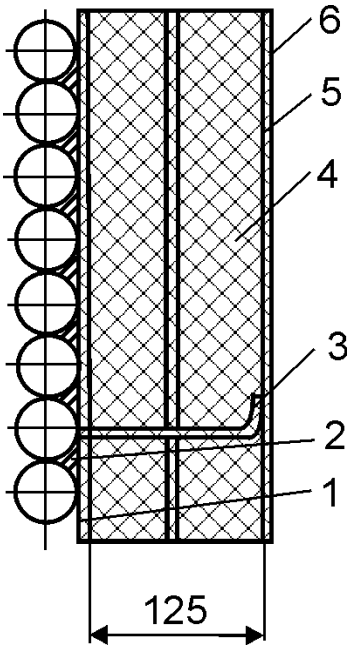


Рис. 22. Ограждение топки, экранированной гладкими трубами:
1 – лист внутренней обшивки ; 2 – огнеупорный бетон с хромитовым наполнителем; 3 – стальные крючья; 4 – минеральная вата; 5 – металлическая сетка; 6 – металлический лист

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

К листам внутренней обшивки в коридорном порядке с шагом 300 мм приварены стальные крючья 3 диаметром 3 мм, служащие для закрепления теплоизоляционных матов и минеральной ваты 4. Маты устанавливаются в два слоя, каждый толщиной 60 мм. Поверх слоя теплоизоляционных матов помещается металлическая сетка 5. С наружной стороны ограждение обшивается металлическими листами. Листы наружной обшивки 6 крепятся к поясным балкам и служат для защиты изоляции от механических повреждений. Внутренняя обшивка, выполненная из стальных листов толщиной 2 – 3 мм, плотно примыкает к тыльной поверхности экранных труб. Предельная температура применения углеродистой стали по условиям окалинообразования не должна превышать 450 °С, именно поэтому обшивка стальным листом по экранным трубам применена в условиях тесного экранирования топочных стен. Непосредственные измерения температуры стального листа, установленного на экранных трубах, показали, что она близка к температуре стенки экранных труб. При этом разность температур в соседних точках, лежащих на линии между трубами и напротив них, не превышает 10 °С.

Незначительная разность температур листа и экранных труб объясняется охлаждающим влиянием экранных труб при их контакте. Это охлаждение надежно обеспечивается при S/d < 1,1. Практически относительный шаг в гладкотрубных экранах содорегенерационных котлоагрегатов составляет 1,02-1,07. Благодаря очень малой разности температур листа и экранных труб их линейное расширение практически одинаково, и установленные листы не имеют короблений, нарушающих изоляцию.

Толщина рассмотренного типа ограждения равна 125 мм (расстояние от тыльной поверхности труб до щитов наружной обшивки). При указанной толщине температура на поверхности наружной обшивки составляет примерно 50 °С. Экранные трубы, имеющие температуру 250 – 270 °С, удлиняются в значительно большей степени, чем щиты наружной обшивки. Разница температурных перемещений труб и листов наружной обшивки составляет 2,5 мм на 1 м длины, а в пределах между поясными балками, на которые опираются щиты, разница перемещений достигает 7-8 мм. Поэтому конструкция обшивки предусматривает возможность ее свободного перемещения. Щиты обшивки привариваются только к одной из поясных балок, а к другой – щиты прижимаются с помощью прижимных планок.

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

В отношении натрубной обмуровки с металлической обшивкой по трубам принято считать, что давление газов при возможных хлопках в топке непосредственно действует на обшивку, а затем передается на элементы, к которым она прикреплена. Поэтому внутренняя обшивка должна обладать достаточной прочностью. Собственно листы внутренней обшивки, имеющие большие линейные размеры и малую толщину, следует рассматривать как мембрану. Так как мембрана обладает большой гибкостью, она не воспринимает изгибающих и скручивающих моментов и рассчитывается только на растягивающие усилия, действующие по всему сечению. Напряжения в щитах невелики и составляют 20 – 26 МПа при допускаемом напряжении на растяжение 120 МПа при температуре 250 °С. Результаты длительной эксплуатации показали надежность применения тонкого стального листа в качестве газоплотной внутренней обшивки натрубной обмуровки при плотном экранировании топочной камеры содорегенерационного котлоагрегата.

На рис. 23 приведена конструкция ограждения топочной камеры СРК, экранированной газоплотными цельносварными панелями. В газоплотных цельносварных экранах конфигурация изолируемой поверхности получается сложной и в общем случае нуждается в выравнивании. Выравнивающий слой предназначен для ликвидации длинных каналов вдоль труб, которые образуются при установке плитной изоляции. Эти каналы могут служить проходами для топочных газов при неплотности экранов в работе котла под наддувом. СРК работает с уравновешенной тягой, поэтому необходимость в выравнивающем слое мастичного типа отсутствует.

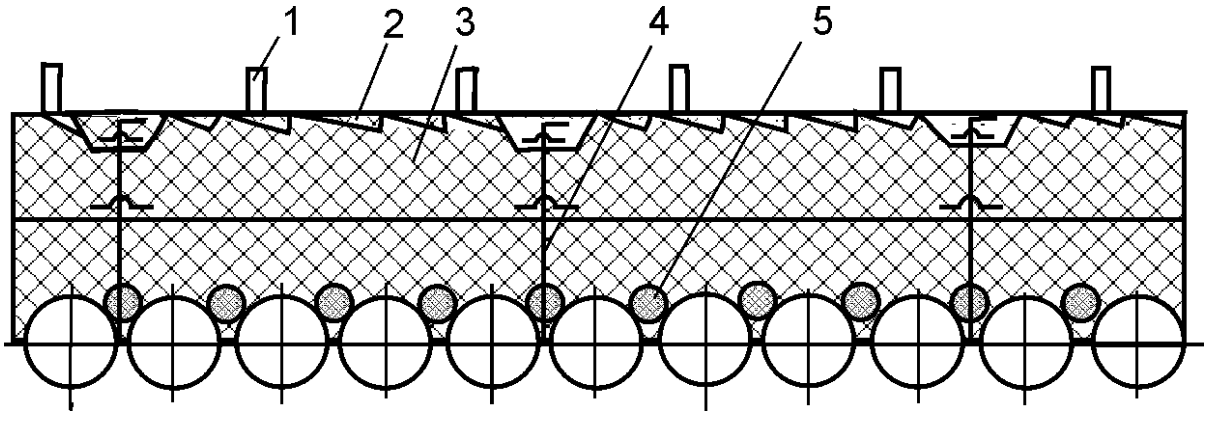


Рис. 23. Ограждение топки, экранированной цельносварными панелями:
1 – гофрированный лист с алюминиевым покрытием; 2 – стальная сетка; 3 – теплоизоляционная плита; 4 – шпилька; 5 – асбестовый шнур

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Длинные каналы между трубами забиваются асбестовым шнуром 5 диаметром 30 мм. Два слоя теплоизоляционных плит 3 толщиной по 60 мм крепятся с помощью шпилек 4, приваренных к проставкам между трубами с шагом 300 мм. Сверху теплоизоляционных плит устанавливается стальная сетка 2. В качестве наружного слоя газо-плотной изоляции применяется тонкий гофрированный лист 1 с алюминиевым покрытием. Гофрированным лист установлен с небольшим воздушным зазором, оказывающим влияние на теплопередачу через ограждение. При малых воздушных зазорах, когда конвекция воздуха в воздушной прослойке практически отсутствует, возникает дополнительное термическое сопротивление и температура на поверхности ограждения снижается. Ограждения газоплотных топок СРК, конструктивно выполненных из гладких труб со стальной обшивкой по трубам или из цельносварных панелей, имеют следующие преимущества: значительно снижаются весовые характеристики ограждения, сокращаются сроки и трудозатраты на монтажные и ремонтные обмуровочные работы.

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

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

Ширмовые поверхности фестона, пароперегревателя и конвективного пучка содорегенерационных котлоагрегатов легко очищаются от наружных загрязнений при помощи паровых обдувочных аппаратов.

Для очистки горизонтальных змеевиковых экономайзеров содорегенерационных котлоагрегатов получили широкое распространение дробеструйные установки с пневматическим и механическим подъемом дроби.

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Обдувочные аппараты. Конструктивная схема обдувочного аппарата приведена на рис. 24. Обдувочный аппарат включает в себя: электродвигатель 1, укрепленный на каретке 4; редуктор 3, предназначенный для вращения обдувочной трубы 2; электродвигатель 5 и редуктор 6, укрепленные на монорельсе 7, предназначенные для поступательного перемещения обдувочной трубы 2; механизм поступательного перемещения обдувочной трубы, состоящий из каретки 4, которая перемещается по полкам монорельса 7, звездочек 8 и бесконечной цепи 9; запорный клапан 10, автоматически открывающий подачу пара в обдувочную трубу после ее выхода на позицию обдувки; механизм, управляющий запорным клапаном 10, состоящий из тяги с клином 11 и рычага 12. Обдувочная труба соединена при помощи сальника с неподвижным паропроводом 13, подводящим к ней пар от запорного клапана. Двутавровый монорельс 7 несет на себе все указанные механизмы, а сам крепится к каркасу котла.

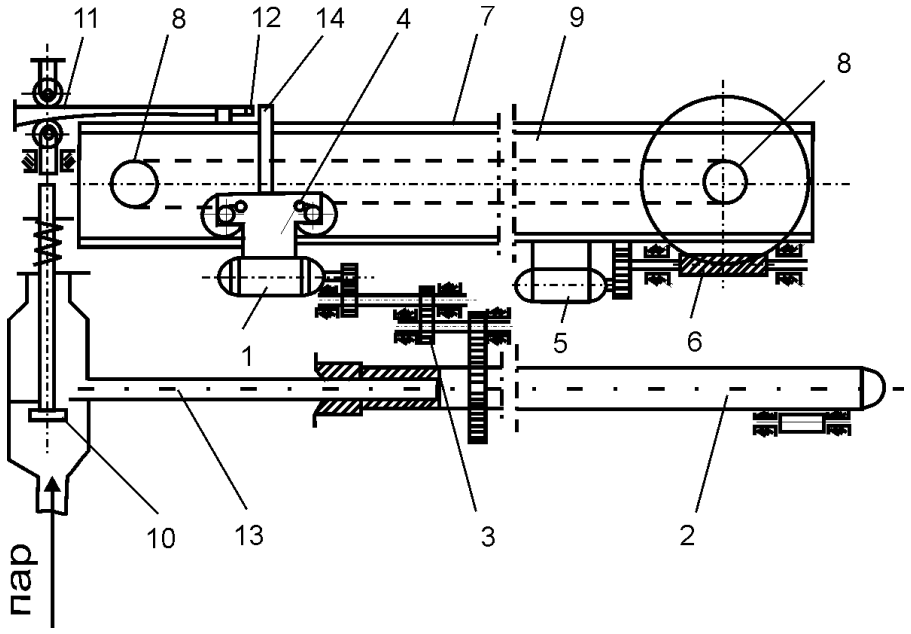


Рис. 24. Обдувочный аппарат:
1, 5 – электродвигатель; 2 – обдувочная труба; 3, 6 – редуктор; 4 – каретка; 7 – монорельс; 8 – звездочка; 9 – бесконечная цепь; 10 – запорный клапан; 11 – тяга с клином; 12 – рычаг; 13 – неподвижный паропровод; 14 – стержень

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

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Каретка 4, перемещаясь по монорельсу, вводит обдувочную трубу 2 в газоход. Когда обдувочная труба выходит на позицию обдувки, стержень 14, воздействуя на рычаг, увлекает при помощи тяги клин 11, который через толкатель отжимает запорный паровой клапан, открывающий доступ пара в обдувочную трубу. Пар из обдувочной трубы выходит через сопла, обдувая поверхность нагрева.

При поступательно-вращательном движении трубы 2 обдувка производится по винтовой линии.

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

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

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

Схема охлаждения леток. Для охлаждения леток, как правило, используется неочищенная производственная вода, поэтому не исключены отложения шлама в проточной части леток и коррозия металла. Кроме того, на большинстве содорегенерационных котлоагрегатов отсутствует контроль температуры охлаждающей воды. Отсутствие контроля затрудняет регулирование количества охлаждающей воды. При недостатке охлаждающей воды перегорают летки, а при избытке струя плава переохлаждается и вследствие повышения вязкости теряет текучесть.

Применение леток, у которых сторона, соприкасающаяся со струей плава, выполнена из нержавеющей стали, значительно увеличивает длительность их службы. Во избежание отложения шлама и коррозии металла следует также рекомендовать охлаждение леток химически очищенной деаэрированной водой или конденсатом. При этом охлаждение летки наиболее целесообразно осуществить в замкнутом контуре циркуляции с автоматическим поддержанием уровня воды в расходных баках и автоматической регулировкой количества подпиточной воды.

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Рекомендуемая схема охлаждения леток приведена на рис. 25.

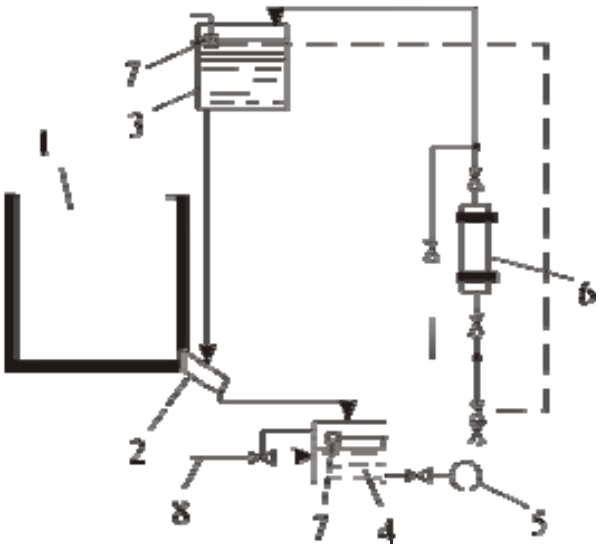


Рис. 25. Схема охлаждения леток химически очищенной деаэрированной водой в замкнутом контуре циркуляции:
1 – топка; 2 – летка; 3 – верхний напорный бак; 4 – нижний бак; 5 – насос; 6 – теплообменник; 7 – регулятор уровня; 8 – подпиточная вода

Как видно на этой схеме, деаэрированная химически очищенная вода поступает на охлаждение летки самотеком из верхнего бака, расположенного выше уровня леток на отметке примерно 14 м. Из кожуха летки вода поступает в нижний бак, расположенный на нулевой отметке, откуда насосом через теплообменник перекачивается обратно в верхний бак. Температура воды, поступающей на охлаждение летки, не должна быть ниже 60 – 65 °С, а на выходе из летки 70 – 75 °С. При низкой температуре охлаждающей воды в верхней части летки, которая с одной стороны омывается плавом, а с другой – холодной водой, возникают большие напряжения, способствующие разрушению металла. Целесообразно при компоновке СРК с растворителем плава стремиться к установке леток минимальной длины.

Дробление струи плава и использование его физического тепла. Во избежание хлопков и взрывов в растворителях плава необходимо дробление его струи, стекающей из летки, зеленым щелоком (рис.26а), подаваемым специальными насосами рециркуляции. На случай внезапной остановки насосов для дробления стекающего плава должен быть подведен пар низкого давления.

На ряде комбинатов паропровод подводится под струю плава (как и трубопровод зеленого щелока), что не дает должного эффекта

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

(рис. 26б). Наиболее правильно для дробления струи плава подводить пар так, как это показано на рис. 26в.

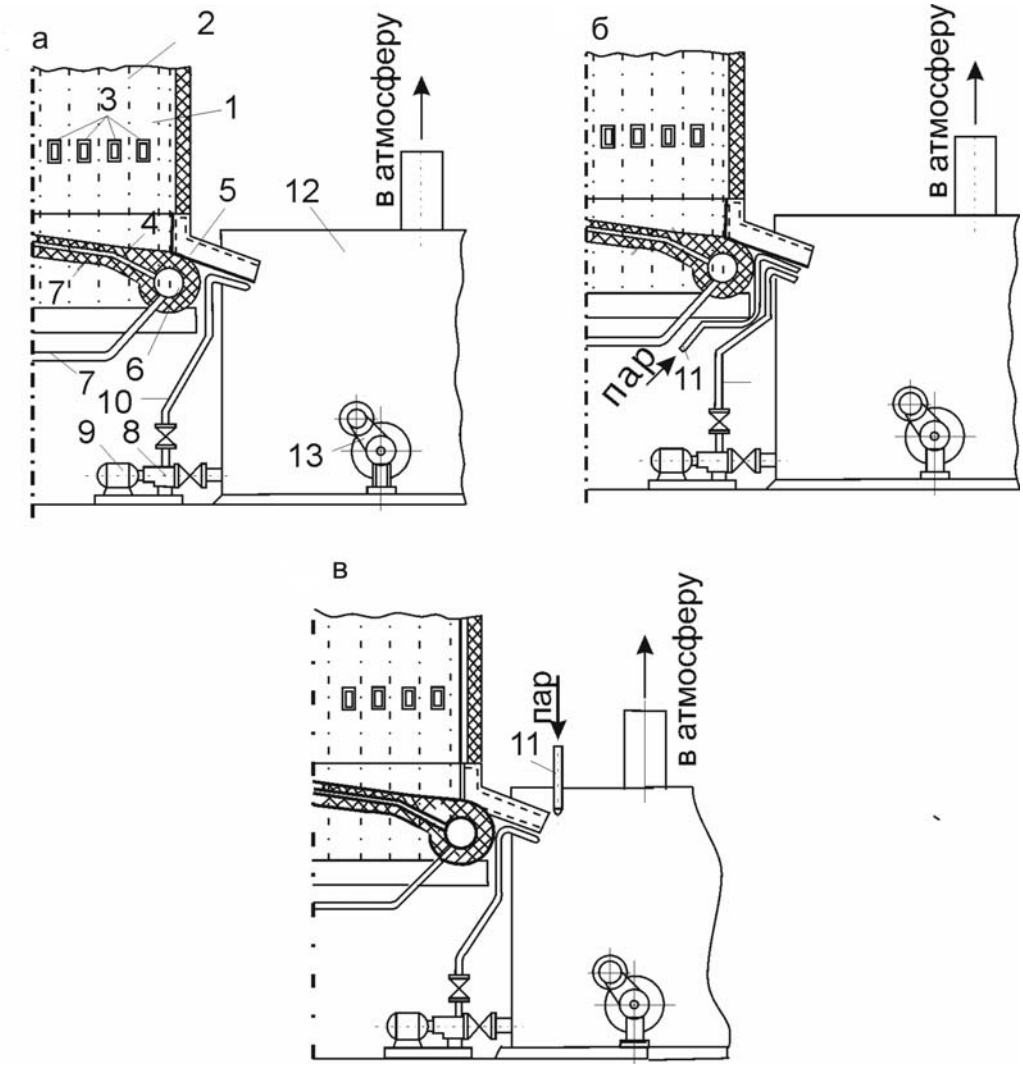


Рис. 26. Схемы дробления струи плава:
а – струей рециркулирующего зеленого щелока; б – струей рециркулирующего зеленого щелока и паром, подведенным под струю плава на выходе из летки; в – струей рециркулирующего щелока и паром, подаваемым на струю плава сверху;
1 – топка; 2 – экранные трубы; 3 – фурмы первичного дутья; 4 – под топки; 5 – летка; 6 – коллектор; 7 – водоподводящие трубы; 8 – рециркуляционный насос; 9 – электродвигатель; 10 – трубопровод подачи зеленого щелока для дробления струи плава; 11 – трубопровод подвода пара для дробления струи плава; 12 – бак-растворитель плава; 13 – привод горизонтальной мешалки растворителя плава

Дробление струи плава паром позволяет не использовать в ряде случаев рециркуляционные насосы зеленого щелока. Однако такое мероприятие может быть рекомендовано там, где имеются мешалки в

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

растворителях, обеспечивающие хорошее перемешивание зеленого щелока. В этих случаях появляется возможность экономии электроэнергии и снижения затрат на ремонт насосов и рециркуляционных трубопроводов.

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

В баках зеленого щелока за счет физического тепла плава происходит интенсивное испарение воды и увлечение химикатов паром в атмосферу. Таким образом может теряться физическое тепло плава, которое составляет 4 – 5 % в тепловом балансе СРК. Поэтому на ряде предприятий тепло паров, испаряющихся из баков зеленого щелока, используется для нагрева воды в поверхностных теплообменниках. На других предприятиях в атмосферной трубе бака зеленого щелока устанавливаются уголки, которые орошаются слабым белым щелоком, направляемым противотоком к парам испарения.

Пары самоиспарения, контактируя с поверхностью уголков, охлажденных слабым белым щелоком, конденсируются и стекают в бак, нагревая стекающий туда же слабый белый щелок. Со стекающим конденсатом и белым щелоком возвращаются в растворитель плава химикаты, увлеченные парами самоиспарения.

Подача и регулирование воздуха

Воздух, подаваемый на горение, вводится в топку СРК в два или три яруса. Первичный воздух (а в СРК с трехъярусной воздушной схемой и низким расположением сопел вторичного дутья также и вторичный воздух) формирует подушку огарка на поду топки. Верхний воздух (вторичный и третичный) обеспечивает турбулизацию и дожигание продуктов пиролиза. Техника сжигания щелока требует регулирования расхода воздуха по дутьевым ярусам. В соответствии с этим, общий воздушный поток разделяется на части по числу ярусов.

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Существуют три типа воздушных схем: общая, последовательная и параллельная. В воздушной схеме первого типа поток воздуха общим вентилятором распределяется по дутьевым ярусам. Такая схема усложняет регулирование расходов воздуха по ярусам. Эта схема не является экономичной, так как общий вентилятор работает на параллельные тракты с различными характеристиками, что вызывает необходимость неэкономичного дроссельного регулирования.

В воздушной схеме второго типа часть воздуха после общего вентилятора направляется в первичный ярус, а другая часть – забирается последовательно установленным вентилятором и направляется во вторичный и третичный ярусы. Последовательная схема экономичней рассмотренной выше общей схемы, однако, с позиции регулирования, эта схема не может считаться оптимальной из-за наличия общего всасывающего воздуховода для всех ярусов.

Оптимальной можно считать воздушную схему третьего типа – параллельную, в которой первичный воздух имеет индивидуальный тракт с собственным вентилятором, а подача воздуха во вторичный и третичный ярусы осуществляется также по отдельному тракту.

Расход воздуха на горение регулируется в соответствии с расходом щелока. В отношении формирования подушки огарка на поду топки большое значение имеет скорость истечения воздушных струй и возможность поддержания оптимальной скорости в рабочем интервале изменения нагрузки СРК.

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

Одной из важных характеристик струи является глубина ее проникновения в поток топочных газов. Глубина проникновения струи пропорциональна скорости истечения из сопла и его эквивалентному диаметру.

Этим объясняется принципиальный характер отличий работы воздушных сопел с различным регулированием расхода воздуха.

Существует *дроссельный* способ регулирования первичного воздуха, при котором напор дросселируется на регулирующем органе (рис. 27а). При таком регулировании сечение сопла остается постоянным, поэтому изменение расхода воздуха всегда связано с изменением скорости.

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

При *сопловом* регулировании (рис. 27б, в), позволяющем менять сечение сопла, практически удается поддерживать заданную скорость в широком диапазоне изменения расхода воздуха. Такие конструкции сопел первичного воздуха применены в агрегатах «Тампелла». Сопла с регулируемым сечением, обеспечивая большую глубину проникновения воздушной струи и более интенсивную турбулизацию потока, создают, как показывает опыт работы СРК, благоприятные условия для тонкого регулирования воздушного режима восстановительной зоны топки.

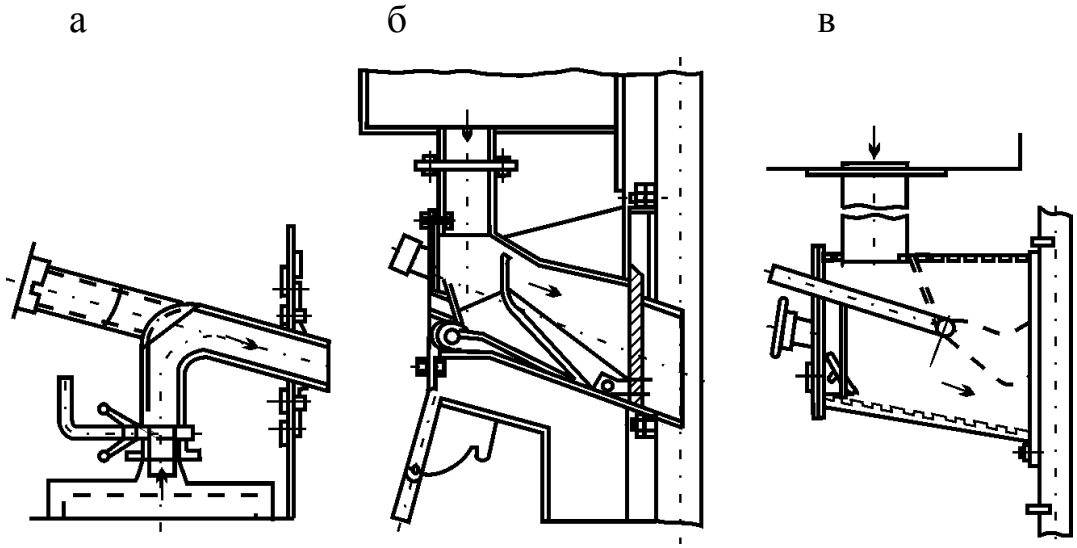


Рис. 27. Регулирование расхода воздуха первичного дутья:
а – дроссельное; б, в – сопловое

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

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

При эксплуатации СРК воздушные сопла, преимущественно сопла первичного дутья, требуют прочистки от огарка щелока. Поскольку такая прочистка производится периодически, то в случае продолжительных промежутков между ними забивание сопел огарком щелока со стороны топки может существенно перекрывать сечение для прохода воздуха, что приводит к изменению его расхода. Чистка сопел с промежутками более одного часа вызывает увеличение эмиссии соединений восстановленной серы. Поэтому требуется более частая прочистка. Однако для мощных СРК, в которых число

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

воздушных сопел достигает нескольких сотен, операции по прочистке требуют большего объема ручного труда.

Подогрев воздуха происходит в паровых или водяных калориферах. В паровых калориферах воздух подогревается насыщенным паром давлением 1,2 – 1,6 МПа до температуры 150 – 180 °С. При работе СРК по схеме без каскадного испарителя воздух подогревается в водовоздушных теплообменных аппаратах (ВВТО). Подогрев воздуха происходит за счет использования теплоты воды, проходящей через экономайзер, тем самым осуществляется промежуточное регулирование температуры воды, что позволяет предотвратить кипение воды в экономайзере, снизить его металлоемкость, обеспечив при этом подогрев воздуха до стандартной температуры 150 °С.

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

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

Очистка газовых выбросов содорегенерационных котлоагрегатов

Производство сульфатной целлюлозы связано с образованием значительных количеств газовых выбросов, содержащих токсичные и дурнопахнущие соединения. Один из основных источников выброса – СРК, хотя концентрации дурнопахнущих соединений в дымовых газах обычно невелики. Дурнопахнущие серосодержащие газы – сероводород H_2S, метилмеркаптан CH_3SH, диметилсульфид $(CH_3)_2S$, диметилдисульфид $(CH_3)_2S_2$ – образуются главным образом во время сушки и пиролиза черного щелока в топке СРК. Оптимальный топочный режим позволяет свести к минимуму выделение дурнопахнущих соединений из топки. Однако использование в технологической схеме газоконтактного испарителя приводит к многократному увеличению выбросов сероводорода и метилмеркаптана.

Очистка дымовых газов в электрофильтрах. Практически все СРК оборудованы электростатическими фильтрами, являющимися весьма надежными и эффективными устройствами для очистки дымовых газов от содержащейся в них высокодисперсной пыли.

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Основные расчетные характеристики электрофильтров

Скорость газов в активном сечении, м/с	0,8 – 1,0
Удельная плотность тока, мА/м^2:	
для пружинных коронирующих электродов	0,25
для игольчатых коронирующих электродов	0,10
Температура газов на входе , °С	140 – 180
Запыленность газов на входе, г/м^3	6 – 10
Эффективность пылеулавливания, %	96 – 98

Запыленность газов на выходе находится на уровне 0,25 – 0,4 г/м^3. При появлении дефектов в техническом состоянии электрофильтров эффективность пылеулавливания существенно снижается, и запыленность газов на выходе может доходить до 1 – 3 г/м^3.

Техническая характеристика электрофильтра

(проектные данные для СРК паропроизводительностью 100 т/ч)

Тип	горизонтальный двухпольный с мокрым золоудалением
Корпус	стальной
Осадительные электроды	пластинчатые, S-образной формы
Коронирующие электроды	спиральные
Система встряхивания электродов и газораспределительной решетки	ударно-молотковая
Шаг между разноименными электродами, мм	125
Площадь активного сечения, м^2	72
Площадь поверхности осаждения, м^2	2000
Длина активного поля, мм	3500
Температура газов на входе, °С:	
минимальная	110
средняя	150
максимальная	180
Средняя скорость газов в активном сечении, м/с	1,24
Запыленность газов, г/м^3:	
на входе	10
на выходе	0,4
Эффективность очистки, %	96

По основным конструктивным признакам электрофильтры характеризуются:

- горизонтальным ходом газов;
- металлическим или железобетонным корпусом;

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

- очисткой электродов путем встряхивания ударно-молотковым механизмом;
- сухим, с использованием скребково-винтовых механизмов и шлюзовых затворов, способом удаления золы или мокрым - с применением смыва золы щелоком;
- осадительными электродами, представляющими пластины S-образного типа из углеродистой стали;
- пружинными или игольчатыми коронирующими электродами из высоколегированной стали.

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

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

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

Очистка дымовых газов в мокрых скрубберах. На значительном числе СРК за электрофильтрами установлены скрубберные устройства, являющиеся второй ступенью очистки газов. Скрубберы позволяют уменьшить выброс в атмосферу диоксида серы, а при определенных условиях и сероводорода, и одновременно более глубоко использовать тепло уходящих газов. Большая часть скрубберов установлена за СРК, скомпонованными по схемам с газоконтактными испарителями, а также за СРК, предназначенными для совместного сжигания сульфатных и сульфитных щелоков. Применение скрубберов в схемах СРК с газоконтактными испарителями вытекает из необходимости дезодорации дымовых газов. Использование скрубберов при совместном сжигании сульфатных и сульфитных щелоков обусловлено достаточно высокой концентрацией диоксида серы в

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

дымовых газах. Так, при сжигании в СРК сульфатного щелока концентрация диоксида серы в дымовых газах находится на среднем уровне 500-600 ppm , при сжигании смеси сульфатных и сульфитных щелоков концентрация диоксида серы возрастает в $2-4$ раза в зависимости от соотношения щелоков в смеси. Для сравнения отметим, что концентрация диоксида серы в продуктах сгорания высокосернистого мазута составляет 900-1000 ppm.

Скруббер (рис.28) представляет собой башню из нержавеющей стали, в нижнюю часть которой тангенциально подводятся дымовые газы. В верхней части скруббера расположена батарея сопел, через которые подается орошающая жидкость. Для утилизации тепла дымовых газов устанавливается пластинчатый теплообменник, в котором подогревается технологическая вода.

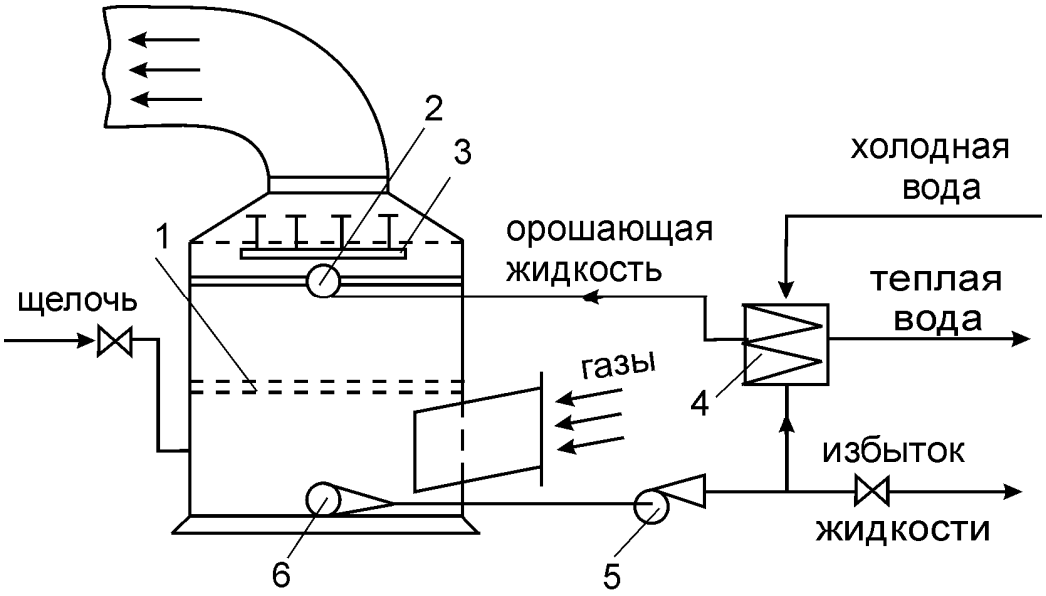


Рис. 28. Полый скруббер:
1 – газораспределительная решетка; 2 – спрысковое устройство; 3 – жалюзийный каплеотбойник; 4 – теплообменник; 5 – циркуляционный насос; 6 – трубопровод вывода жидкости

*Эксплуатация полого скруббера в качестве второй ступени очистки от пылевого уноса***.** Начальная запыленность газов, поступающих в скруббер после электрофильтра, составляет 0,25 – 0,4 г/м^3, что соответствует КПД электрофильтра 96 – 98 %. Степень улавливания золы в скруббере доходит до 66 %. Поскольку избыток орошающей жидкости отводится в бак-растворитель плава, уловленный в скруббере пылевой унос, содержащий до 95 – 98 % сульфата натрия, приводит к снижению показателя степени восстановления сульфата в зеленом щелоке. Этот недостаток схемы

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

может быть сведен к минимуму при хорошей работе электрофильтра с КПД 96 – 98 % .

Большое значение в обеспечении высокого КПД скруббера по улавливанию пыли имеют скорость газов в активном сечении и удельный расход орошающей жидкости. Увеличение скорости газов и уменьшение орошения приводит к снижению степени улавливания уноса в скруббере. Таким образом, для обеспечения высокой степени улавливания уноса в скруббере важно контролировать избыток воздуха в топке, величины присосов по газовому тракту и орошение.

Работа полого скруббера в режиме дезодорации дымовых газов. Газы промываются в скруббере щелочным раствором. При непосредственном контакте щелочного раствора с газами протекают следующие реакции:

- связывание серы:

$$2NaOH + SO_3 = Na_2SO_4 + H_2O;$$

$$2NaOH + SO_2 = Na_2SO_3 + H_2O;$$

$$2NaOH + H_2S = Na_2S + 2H_2O;$$

- связывание CO_2:

$$2NaOH + CO_2 = Na_2CO_3 + H_2O.$$

Одновременно с реакциями поглощения возможно взаимодействие между углекислым газом и сульфидом натрия, приходящим со слабым белым щелоком, если он используется в качестве поглотительного раствора, или образующимся за счет поглощения сероводорода из дымовых газов. Точно так же может разложиться меркаптид натрия, образовавшийся в результате поглощения меркаптана. Разложение сульфида и меркаптида натрия приводит к выделению сероводорода и меркаптана.

Утилизация тепла дымовых газов в полом скруббере. В процессе контакта дымовых газов со скрубберной жидкостью происходит теплообмен, при котором скрубберная жидкость нагревается до 55 – 60 °С, а дымовые газы охлаждаются со 120 – 140 до 50 – 60 °С. Максимальная температура нагрева скрубберной жидкости ограничена температурой мокрого термометра, и она не может быть нагрета выше 60 – 65 °С. Техническая вода нагревается в теплообменниках до 45 – 55 °С, охлаждая скрубберную жидкость до 34 – 40 °С.

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Конструктивные и расчетные характеристики полого скруббера

Диаметр башни, м	7,35
Высота (полная), м	9
Сечение активной части скруббера, $м^2$	42
Температура газов, °С:	
на входе в скруббер	130 – 140
на выходе из скруббера	50 – 60
Температура скрубберного раствора, °С:	
до теплообменников	58 – 60
после теплообменников	38 – 40
Температура воды, °С:	
на входе в теплообменник	4 – 5
на выходе из теплообменника	48 – 50
Расход, $м^3$/ч:	
дымовых газов	340000
циркулирующей жидкости	945
технической воды	420

На рис. 29 показан скруббер, который представляет собой колонну диаметром 5,136 м и высотой цилиндрической части 14 м.

Он оборудован четырехъярусной системой орошения, расположенной в центре по его оси. Дополнительно скруббер имеет 7 спрысков, расположенных на входе дымовых газов. В качестве орошающей жидкости используется раствор соды в количестве 0,5 – 0,6 т/ч для нейтрализации кислых компонентов.

Испытания скруббера показали, что при степени улавливания пыли 50 – 60 % общая эффективность пылеулавливания в двух ступенях очистки доходит до 98,8 %. Сернистый ангидрид поглощается в скруббере с эффективностью свыше 70 %, при этом максимальная степень очистки за время испытаний составила 88 %. Орошение скруббера содовым раствором обеспечивает улавливание до 58 % сероводорода. Наибольшая эффективность улавливания по сероводороду до 88 % отмечается при pH раствора 9,5 – 9,8. При испытаниях скруббера отмечено значительное снижение концентрации сероводорода и метилмеркаптана в периоды работы окислительных установок.

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

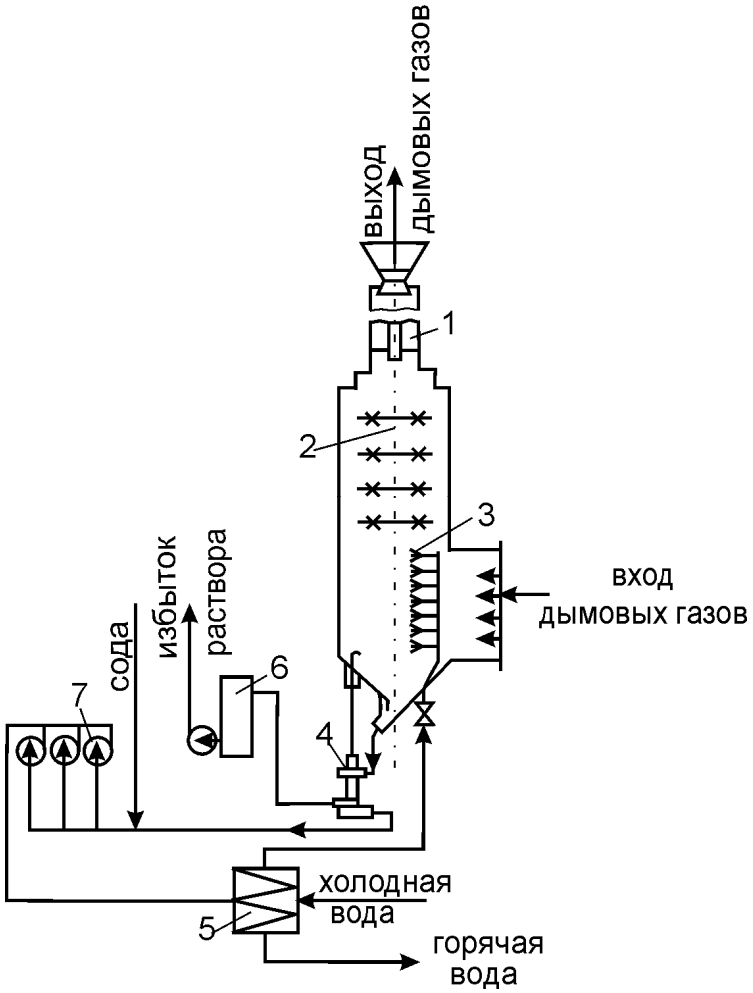


Рис. 29. Скруббер колонного типа:
1 – завихритель; 2 – основное орошение; 3 – дополнительное орошение; 4 – центробежный уловитель; 5 – теплообменник; 6 – приемный бак; 7 – циркуляционный насос

Скруббер Варкаус представляет собой разновидность струйного газопромывателя. Принцип его действия основан на воздействии капель жидкости на газы. Жидкость подается под давлением 0,6 – 1,2 МПа через специальный распылитель по направлению движения газов. При этом возникает процесс эжекции газов и одновременно с интенсивным смешиванием капель жидкости с газами протекают процессы сорбции, пылеулавливания и газоочистки. Скруббер имеет две ступени, включенные последовательно по ходу газов. Каждая ступень представляет собой струйный аппарат, состоящий из трубы-смесителя и каплеотделителя.

Проведенные испытания показывают, что при работе СРК на номинальной нагрузке в скруббере полезно используется 36 МВт тепла в виде тепла воды, нагреваемой в теплообменниках до 50 °С.

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Практически на 1 т целлюлозы утилизируется примерно 3,1 ГДж тепла. Если в качестве орошающей жидкости в скруббере используется раствор каустика, то для обеспечения pH скрубберной жидкости, равного 10, необходимо введение в систему 1,4 – 1,5 $м^3$/ч раствора каустика концентрацией 600 г/л.

В этих условиях концентрация серосодержащих газов составляет:

до скруббера:

H_2S	0 – 5 $мг/м^3$
SO_2	10 – 40 $мг/м^3$

после скруббера:

H_2S	0 – 1 $мг/м^3$
SO_2	0 – 5 $мг/м^3$

Таким образом, КПД скруббера по улавливанию H_2S не ниже 80 %, а по улавливанию SO_2 не ниже 90 %.

Технические характеристики скруббера Варкаус

Расход дымовых газов, поступающих в скруббер, $м^3$/ч	350000
Температура дымовых газов, °С:	
на входе	150
на выходе	50
Сопротивление скруббера, Па	100
Расход скрубберного раствора, поступающего в теплообменник, $м^3$/ч	990
Температура скрубберного раствора, °С:	
до теплообменника	62
после теплообменника	27
Значение pH скрубберного раствора	10
Количество уловленного уноса (при запыленности до скруббера 0,35 $г/м^3$), кг/ч	122,5
Количество уловленной серы (при количестве серы в газах до скруббера 156 кг/ч), кг/ч	140
Количество скрубберного раствора, откачиваемого в растворитель СРК, $м^3$/ч	40
Температура подогретой воды за теплообменником, °С	52,5
Количество уловленного тепла, ГДж/т целлюлозы	3,79

Во всех описанных ранее скрубберах подогрев воды осуществляется в поверхностных теплообменниках. Это является существенным недостатком скрубберных устройств, так как поддержание в чистоте поверхностей нагрева теплообменников

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

сопряжено со значительными затруднениями и вызывает необходимость их промывки. Кроме того, стоимость теплообменников составляет значительную часть общих капитальных затрат на скрубберную установку.

Скруббер контактного типа (рис. 30) не требует теплообменников, так как промывка дымовых газов осуществляется в специальной секции до поступления газов в секцию регенерации тепла. Скруббер представляет собой башню из нержавеющей стали, разделенную на секции промывки (для поглощения химикатов) и регенерации тепла. Дымовые газы после электрофильтра поступают в нижнюю часть башни и, поднимаясь через промывочную и регенерационную секции, уходят в атмосферу.

Непосредственно у входа в скруббер дымовые газы насыщаются водой, которая подается в виде плоской распыленной струи, образованной соплами специальной конструкции. В верхней части промывочной секции установлена батарея форсунок, служащая для распыления скрубберного раствора. Для компенсации испарения скрубберного раствора добавляют холодную воду, что снижает температуру раствора и тем самым интенсифицирует поглощение серосодержащих газов в верхней части промывочной секции. Для поддержания pH равного 8-9 в скрубберный раствор добавляют едкий натр NaOH. С помощью регулятора уровня избыточную часть раствора отводят в растворитель плава или на каустизацию для промывок известкового шлама. Во избежание капельного уноса скрубберного раствора в верхней части промывочной секции установлен каплеуловитель. Секция регенерации тепла разделена на ступени, каждая из которых состоит из одной батареи распыливающих форсунок и промежуточных поддонов. Вода после нагревания направляется в бак подогретой воды и расходуется на технологи-ческие нужды. Эффективность скруббера по улавливанию пыли доходит до 95 %, а по сернистому ангидриду – до 90 % (при орошении содовым раствором).

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

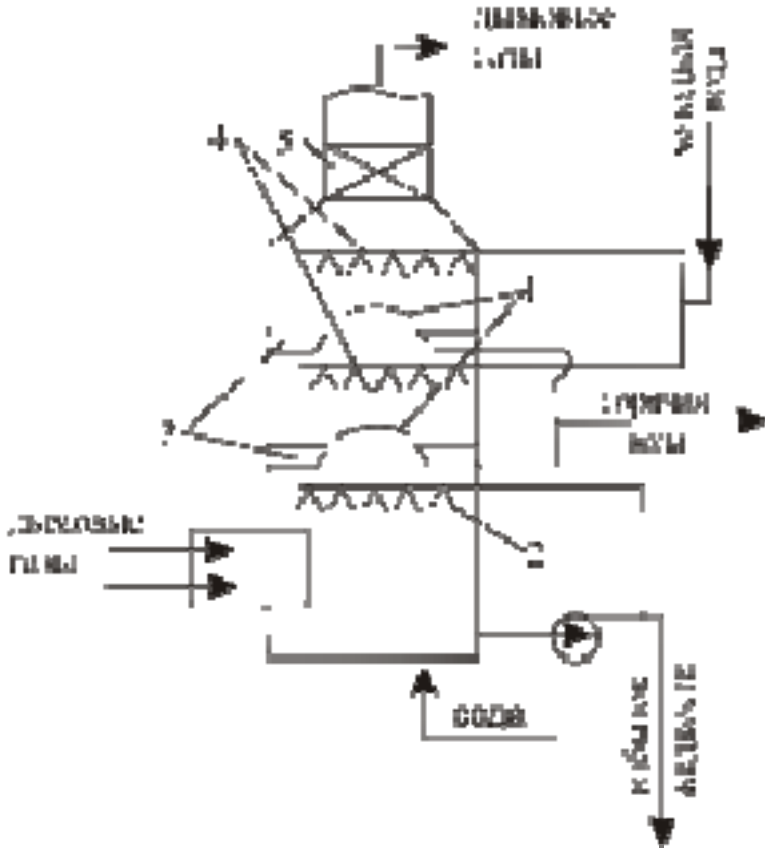


Рис. 30. Скруббер контактного типа:
1 – водоотделительные перегородки; 2 – спрыски скрубберной секции; 3 – сборные лотки; 4 – спрыски охладительных секций; 5 – сепаратор

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

Утилизация парогазовых выбросов позволяет полезно использовать существенную долю тепла парогазов и резко сократить потери химикатов. Существуют различные системы утилизации. Достаточно распространены устройства, позволяющие одновременно утилизировать тепло и химикаты парогазовых выбросов. Принципиальная схема таких устройств включает: теплообменник, омываемый парогазами с температурой 80-100 °С; отвод конденсата в бак-растворитель плава с целью возврата химикатов; вентилятор для усиления тяги (в некоторых установках используется только естественная тяга вытяжной трубы бака-растворителя). В таких установках достигается сокращение потерь тепла с парогазами, при

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

этом обеспечивается подогрев воды в теплообменниках до 50 – 55 °С. В отношении улавливания химикатов установки также достаточно эффективны (60 – 70 %).

В ряде СРК применено специальное газоочистное устройство, представляющее собой полый скруббер, в верхней части которого имеется форсунка, разбрызгивающая орошающую жидкость. Скруббер высотой 5 м и диаметром 1,9 м устанавливается непосредственно в вытяжной трубе бака-растворителя плава.

Параметры работы полого скруббера

Расход парогазовой смеси, $м^3$/ч	10800 – 11800
Температура смеси, °С:	
на входе	80 – 83
на выходе	75 – 77
Температура орошающей жидкости, °С:	
на входе	60
на выходе	75 – 80
Концентрация пыли, мг/$м^3$:	
на входе	280 – 340
на выходе	16 – 18
Степень очистки в скруббере, %	94 – 95

Альтернативным решением в части утилизации парогазовых выбросов бака плава является использование скруббера, установленного после электрофильтра. По схеме (рис. 31) парогазовые выбросы из бака-растворителя плава 6 по отдельному газопроводу направляются через каплеуловитель 9 на всас дымососа 2, где смешиваются с отходящими газами СРК.

После дымососа газы поступают в скруббер 10, где нагревают орошающую жидкость, охлаждаясь при этом до 60 °С. Тепло орошающей жидкости используется для нагрева технологической воды до 50 °С в теплообменнике 1.

Преимуществом схемы является ее простота. Опасаться недостаточной производительности или коррозии существующих дымососов не приходится, поскольку объем парогазовых выбросов по данным замеров находится на уровне 5 – 10 % от объема отходящих газов СРК, а дымососы рассчитаны с большим запасом. Температура, парциальные давления и состав дымовых газов перед дымососом в результате смешения с парогазовыми выбросами также почти не изменяются, что подтверждают расчеты и опытные данные.

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

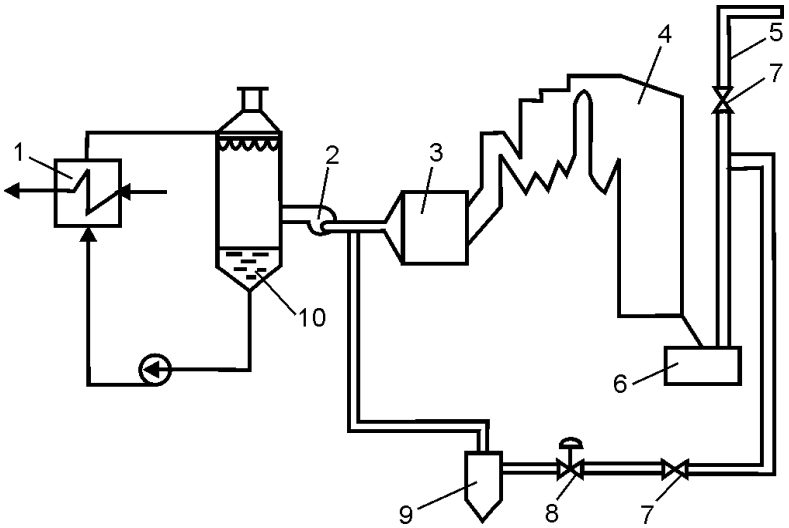


Рис. 31. Схема утилизации парогазовых выбросов:
1 – теплообменник; 2 – дымосос; 3 – электрофильтр; 4 – СРК;
5 – выхлопная труба; 6 – бак-растворитель плава; 7 – запорная арматура;
8 – регулирующий орган; 9 – каплеуловитель; 10 – скруббер

Температура перед дымососом, °С	150 / 146
Парциальное давление водяных паров, МПа	0,02 / 0,0218
Температура насыщения водяных паров, °С	59,5 / 61

Примечание. В числителе - отходящие газы, в знаменателе - смесь отходящих газов и парогазовых выбросов.

По рассмотренной схеме для СРК паропроизводительностью 100 т/ч можно получить до 1 МВт тепла в виде горячей воды и снизить потери химикатов. Преимущество схемы состоит также в том, что парогазовые выбросы удаляются в атмосферу не на верхней отметке котельной через выхлопную трубу 5, а через высокую дымовую трубу.

Технологические и конструктивные характеристики некоторых содорегенерационных котлоагрегатов

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 абсолютно сухому веществу (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

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

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 кипятильной поверхности, но и для более низких давлений. Распространению СРК однобарабанной конструкции способствует ряд известных преимуществ, связанных с большей надежностью конструкции. Рассмотрим некоторые типичные агрегаты, применяемые в ЦБП.

СРК «Тампелла». Агрегаты «Тампелла» являются котлами независимой конструкции. В отношении топочной камеры СРК «Тампелла» ближе к агрегатам СЕ, так как щелок в топках этих СРК сжигается по способу Комбашн. Из всех импортных агрегатов они наиболее распространены в нашей промышленности.

Традиционными для СРК «Тампелла» всех поколений являются:

- 2х-барабанная схема агрегата в П-образной компоновке;
- 3х-ярусная схема ввода дутьевого воздуха в топочную камеру через аксиально расположенные сопла;
- размещение щелоковых форсунок на боковых стенах топки;
- продольно омываемый длинный котельный пучок.

СРК «Тампелла» производительностью от 328 до 725 т а.с.в. щелока в сутки, поставленные до 1964 г., отличаются экранированием прямоугольной топочной камеры плавниковыми трубами диаметром 83 мм с шагом 130 мм. По площади пода и на высоту до сопел первичного дутья трубы экранов ошипованы. Щелоковые форсунки размещены симметрично на боковых стенках топки, а летки для стока плава – на фронтовой стенке. Топочная камера в верхней части ограничена ширмовым фестоном, при этом ширмы расположены шахматно в два яруса. Над фестоном имеется двухступенчатый ширмовый пароперегреватель. Ширмы второй ступени пароперегревателя выполнены из хромомолибденовой стали. Регулирование температуры перегретого пара осуществляется в поверхностном пароохладителе. В поворотном газоходе за пароперегревателем размещена конвективная часть ширм защитного фестона, за которым находится котельный пучок из труб диаметром 63×2,9 мм. Трубы котельного пучка, развальцованные между верхним и нижним барабанами, расположены коридорно.

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Перед нижним барабаном и за ним, а также перед поворотом газов в последний опускной газоход размещены три бункера сбора золы. Стальной змеевиковый экономайзер горизонтального типа скомпонован в двух параллельных вертикальных шахтах.

В СРК «Тампелла» производительностью 725 т/сут по а.с.в. щелока за экономайзером уменьшенной поверхности находится рекуперативный воздухоподогреватель с горизонтальным расположением труб. Использование тепла дымовых газов для подогрева дутьевого воздуха является особенностью указанного котлоагрегата и ни в одном другом агрегате, как фирмы «Тампелла», так и других фирм, не применяется.

Для очистки пароперегревателя и котельного пучка применены глубоковыдвижные обдувочные аппараты. СРК рассчитан на работу с газоконтактным испарителем. Для регулирования температуры газов помимо экономайзера имеется обводной газоход.

СРК «Тампелла» производительностью 1400 т/сут по а.с.в. щелока (рис. 32) имеет улучшенную конструкцию отдельных узлов.

Топочная камера квадратного сечения 9,946×9,946 м экранирована гладкими трубами диаметром 60×5 мм с шагом 62 мм. Под топки – слабонаклонный, с размещением леток на фронтовой стенке. На высоте примерно 20 м от пода 2/3 труб заднего экрана образуют аэродинамический пережим, для чего они в этом месте снабжены плавниками. Защитный 2х-рядный фестон выполнен в виде ширм из труб диаметром 51×4,5 мм. Ширмовый пароперегреватель состоит из двух ступеней, при этом первую ступень пароперегревателя образуют два элемента труб. Ширмы второй ступени и выходного элемента первой ступени пароперегревателя конструктивно идентичны, выполнены из труб диаметром 51 мм (хромомолибденовая сталь) и расположены с шагом 434 мм; ширмы входного элемента первой ступени пароперегревателя – из труб диаметром 48 мм, размещены с шагом 217 мм. (Компоновка ширм пароперегревателя с переменным шагом, адекватным температуре зон расположения ширм, применена и в последующих конструкциях фирмы «Тампелла», а также широко используется в агрегатах БВ). Температура перегретого пара регулируется в пароохладителе впрыскивающего типа.

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

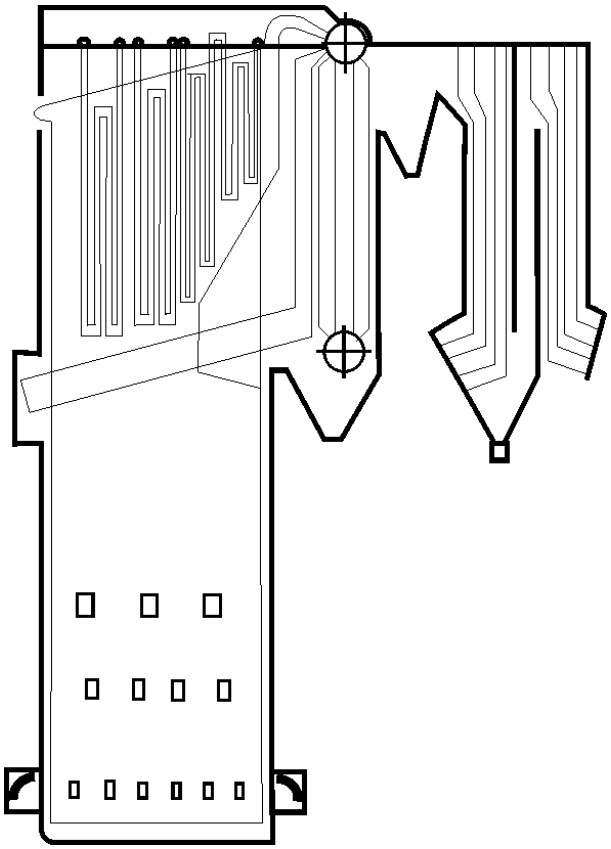


Рис.32. Содорегенерационный котлоагрегат «Тампелла» производительностью 1400 т/сут по а.с.в. щелока

Продольно омываемый котельный пучок изготовлен из труб диаметром 60×4,5 мм, развальцованных в верхнем и нижнем барабанах. Расположение труб пучка коридорное с шагом 124 мм. Продольно омываемый двухступенчатый водяной экономайзер выполнен из плавниковых труб диаметром 42,4×4,5 мм. Очистка всех поверхностей нагрева котла осуществляется 50 обдувочными аппаратами.

СРК-1400, в отличие от ранее описанных котлов «Тампелла», оборудован тремя нагрузочными мазутными горелками с организованным подводом воздуха, размещенным на высоте 12,2 м от пода. Воздух к горелкам подается индивидуальным вентилятором, не зависимым от общей дутьевой схемы агрегата. СРК-1400 рассчитан на работу в технологической схеме с газоконтактным испарителем.

СРК «Тампелла» производительностью 520 т/сут по а.с.в. щелока характеризуют современный уровень энерготехнологических установок (рис. 33). Топка СРК квадратного сечения 6,096×6,096 м экранирована цельносварными газоплотными панелями из труб диаметром 63,5×5 мм с шагом 77 мм. СРК рассчитан на сжигание смеси сульфатного и сульфитного щелоков, поэтому экраны в нижней

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

части выполнены из биметаллических (компаундных) труб, а в верхней – из труб с кислотоупорной металлизацией. Горизонтальный под декантирующего типа образован трубами переднего и заднего экранов.

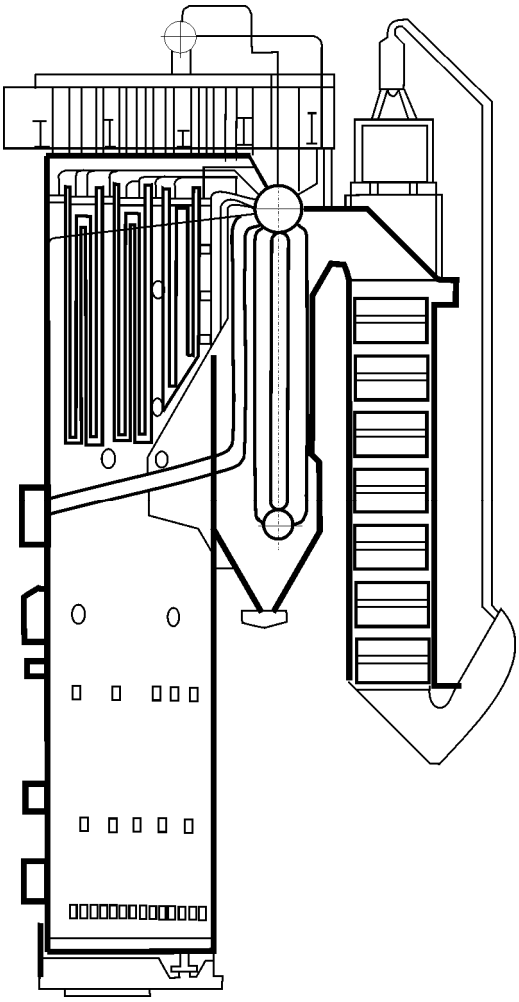


Рис. 33. Содорегенерационный котлоагрегат «Тампелла» производительностью 520 т/сут по а.с.в. щелока

Щелоковые форсунки размещены симметрично на боковых стенах на высоте примерно 4 м от пода. Воздух в топку вводится традиционно через три яруса сопел с регулируемым сечением.

Аэродинамический пережим в верху топки образован частью труб заднего экрана. Однорядный защитный фестон состоит из 15 ширм с шагом 381 мм. Трубы фестона в конвективной части топки располагаются между пароперегревателем и котельным пучком и крепятся в верхнем барабане на вальцовке.

Ширмовый пароперегреватель включает в себя три ступени, что связано с наличием двух ступеней пароохладителя впрыскивающего типа. Первая ступень пароперегревателя (углеродистая сталь) состоит из 30 ширм с шагом 190,5 мм, вторая и третья ступень

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

(хромомолибденовая сталь) – из 15 ширм с шагом 381 мм каждая. Длинный котельный пучок с продольным омыванием газов выполнен из труб диаметром 63,5×4 мм, развальцованных в верхнем и нижнем барабанах.

На котле установлен горизонтальный водяной экономайзер, выполненный из гладких стальных труб диаметром 50,8 мм с шахматным расположением труб. Компоновка СРК с горизонтальным экономайзером является нетипичной для современных конструкций «Тампелла». (Фирма «Тампелла» и другие фирмы компонуют агрегаты с вертикальными экономайзерами даже в случае работы СРК в схеме без газоконтактного испарителя, когда требуется существенное развитие хвостовой поверхности). Очистка пароперегревателя, фестона и котельного пучка труб производится 20 сажеобдувочными аппаратами глубоковыдвижного типа.

СРК-520, помимо традиционных мазутных форсунок, которыми оборудуются все агрегаты, оснащен двумя дополнительными нагрузочными мазутными форсунками с независимой подачей воздуха от индивидуального вентилятора. Агрегат рассчитан на работу в технологической схеме без газоконтактного испарителя. Конструктивные и расчетные данные по СРК фирмы «Тампелла» приведены в табл. 2.

Отечественные СРК. Проектирование отечественных содорегенерационных котлоагрегатов было начато в начале 60-х г.г. В 1967 г. была изготовлена в металле первая партия отечественных агрегатов СРК-625 и СРК-320 (рис. 34). Головной образец был смонтирован на Сегежском ЦБК и введен в эксплуатацию в 1972 г.

Котлы СРК-320 и СРК-625 выполнены по П-образной компоновке с применением двухбарабанной схемы. Топочная камера экранирована гладкими трубами наружным диаметром 60 мм и толщиной стенки 7 мм с шагом 64 мм. Под топочной камеры образован экранными трубами и до сопел первичного дутья герметизирован проваркой между трубами прутков. Топочная камера высотой 15 м ограничена в верхней части ширмами защитных труб пароперегревателя II ступени.

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Таблица 2

Технические характеристики СРК «Тампелла»

Наименование	Производительность по а.с.в. щелока, т/сут				
	324	540	725	1400	520
1	2	3	4	5	6
Паропроизводительность, т/ч	44	83	100	186	78
Давление пара в барабане, МПа	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4
Давление перегретого пара, МПа	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9
Температура, °С:					
перегретого пара	450	450	450	440	440
питательной воды	150	150	150	145	145
горячего воздуха	150	150	-	150	150
Радиационные поверхности	Плавниковые трубы			Гладкотрубные экраны	Цельносварные газоплотные панели
Размеры топки по осям труб:					
глубина, м	4,90	6,10	6,37	9,946	6,095
ширина, м	7,10	8,02	8,45	9,946	6,095
площадь пода, $м^2$	34,8	49	53,8	98,5	37
Высота топки, м	13,8	16,8	17,7	26	17
Расстояние от пода до потолка топки, м	22,5	26,4	26,0	33,5	26,5
Активный объем топки, $м^3$	480	810	956	2930	630

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Продолжение табл. 2

1	2	3	4	5	6
Тепловое напряжение топки: по объему, Вт/м^3 по сечению, Вт/м^2	 78×10^3 $1{,}1\times10^6$	 77×10^3 $1{,}3\times10^6$	 88×10^3 $1{,}6\times10^6$	 80×10^3 $1{,}7\times10^6$	 96×10^3 $1{,}6\times10^6$
Массовая нагрузка пода, кг/(м^2·ч)	400	460	565	595	585
Отметка верхнего барабана, м	25,15	31,7	32,3	41,1	34,6
Поверхность стен топки, м^2	350	579	634	1007	450
Диаметр труб экранов, мм	83×5	83×5	83×4	60,3×5	63,5×5
Шаг труб экранов, мм	130	130	130	62	77
Диаметр труб фестона, мм	44,5×4	51×3,5	51×3,5	51×3,5	63,5×5
Шаг труб фестона, мм	260	780	780	434	381
Поверхность нагрева фестона, м^2	250	192	158	433	150
Диамстр труб пароперегревателя I ступени, мм	44,5×4	44,5×4	51×4,5	48,3×4,5	38×4
Шаг труб пароперегревателя I ступени, мм	320	390	345	217	190,5
Поверхность нагрева пароперегревателя I ступени, м^2	-	485	-	1228	340
Диаметр труб пароперегревателя II ступени, мм	44,5×4	44,5×4	51×4,5	51×4,5	42,4×4,5

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6
Шаг труб пароперегревателя II ступени, мм	320	390	345	434	381
Поверхность нагрева пароперегревателя II ступени, м^2	-	519	-	504	255
Диаметр труб пароперегревателя III ступени, мм	-	-	-	51×4,5	44,5×4,5
Шаг труб пароперегревателя III ступени, мм	-	-	-	434	381
Поверхность нагрева пароперегревателя III ступени, м^2	-	-	-	506	270
Диаметр труб котельного пучка, мм	83×3,25 и 63,5×2,9	83×3,25 и 63,5×2,9	63,5×2,9	60,3×4,5	63,5×4
Шаг труб котельного пучка, мм	130 / 130	130 / 130	250 / 150	124 / 124	130 / 130
Поверхность нагрева котельного пучка, м^2	1420	1420	1680	3038	1290
Экономайзер	горизонтальный гладкотрубный			вертикальный из плавниковых труб	горизонтальный гладкотрубный
Диаметр труб экономайзера, мм	38×4	51×4	38×4	42,4×4	50,8×4
Шаг труб экономайзера, мм	120 / 60	160 / 80	123 / 78	124 / 130	140 / 70
Поверхность нагрева экономайзера, м^2	1185	1605	750	8600	2850

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Первая ступень пароперегревателя расположена над пережимом, который образован частью труб заднего экрана. За пароперегревателем установлен котельный пучок высотой 6,5 м.

В нижней части горизонтального газохода до и после котельного пучка размещены бункеры сбора золы. Экономайзер с шахматным расположением труб установлен в двух изолированных друг от друга вертикальных шахтах. Экономайзер оборудован дробеочисткой с пневмотранспортом дроби и паровым эжектором. Для очистки пароперегревателя и котельного пучка установлены 24 глубоковыдвижных паровых обдувочных аппарата.

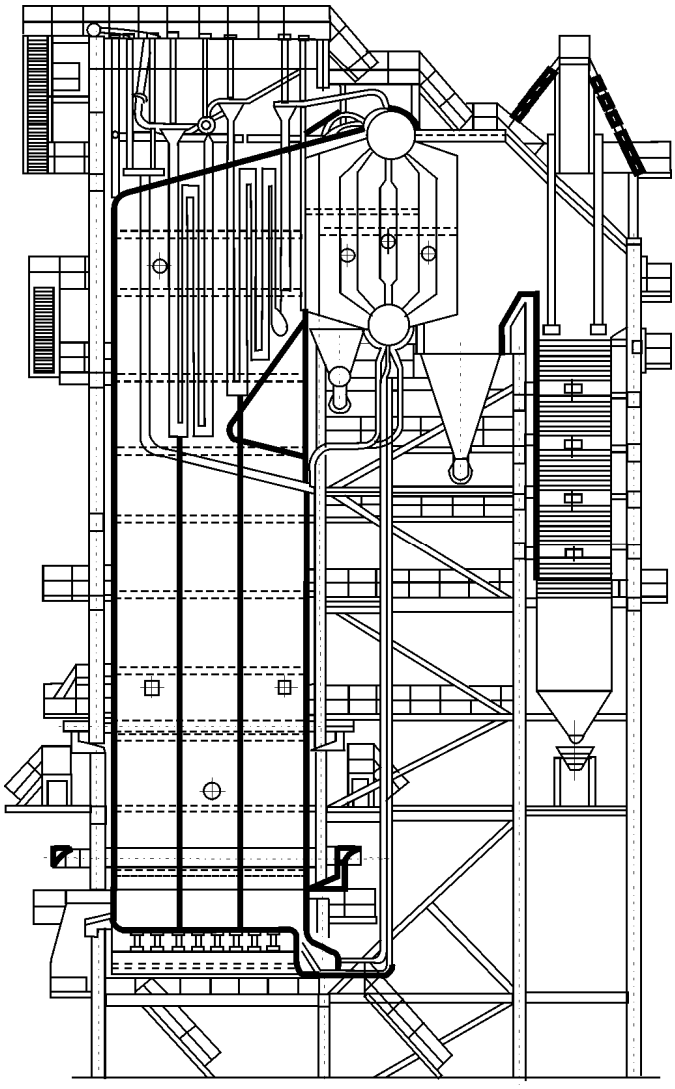


Рис. 34. Отечественный двухбарабанный СРК
(СРК-320 т/сут, СРК-625 т/сут по а.с.в. щелока)

Основные конструктивные и расчетные характеристики СРК-320 и СРК-625 приведены в табл. 3. Оба котла рассчитаны на

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

работу с газоконтактным испарителем. Расчетная температура газов за экономайзером составляет 265°С.

Унифицированные СРК производительностью 350 и 700 т/сут по а.с.в. щелока были введены в эксплуатацию на ряде предприятий в начале 80-х г.г. Содорегенерационные котлоагрегаты СРК-350 и СРК-700 – однобарабанные, с П-образной компоновкой, секционированы на ряд крупных транспортабельных блоков и узлов (рис. 35).

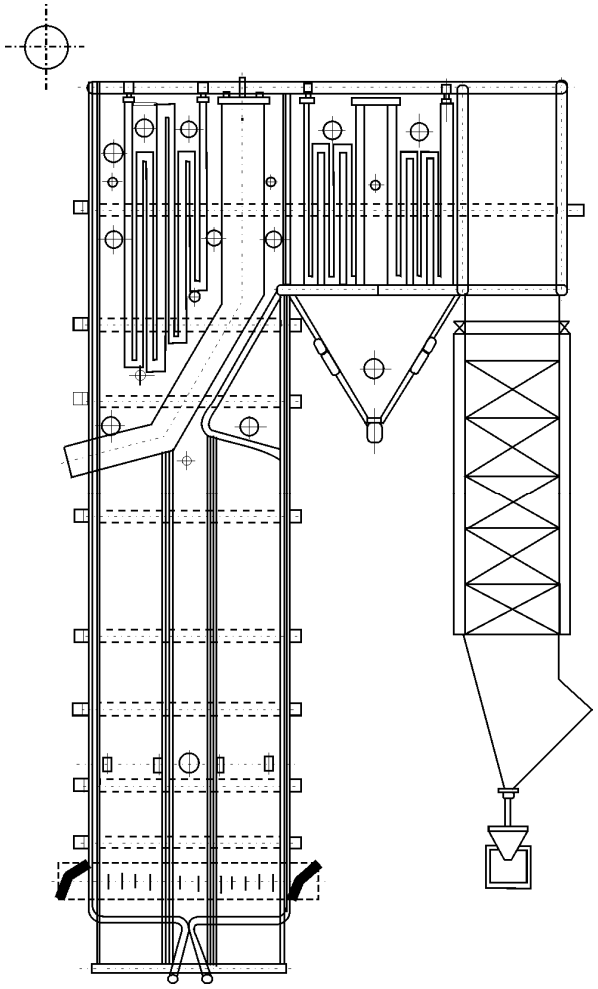


Рис.35. Отечественный однобарабанный СРК
(СРК-350 т/сут, СРК-700 т/сут по а.с.в. щелока)

Топочная камера, образованная радиационными поверхностями нагрева, и поворотный газоход выполнены из газоплотных цельносварных панелей, состоящих из труб диаметром 57х5 мм с шагом 75 мм. Горизонтальный под топочной камеры образован трубами фронтового и заднего экрана. По высоте топка охвачена восемью поясами жесткости с шагами 1800, 2400 и 3600 мм. Потолок топочной камеры и поворотного газохода экранирован радиационным пароперегревателем.

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Таблица 3

Технические характеристики СРК Белгородского завода

Наименование	Производительность по а.с.в. щелока, т/сут			
	320	625	350	700
1	2	3	4	5
Паропроизводительность, т/ч	50	102	52	103
Давление пара в барабане, МПа	4,6	4,6	4,7	4,7
Давление перегретого пара, МПа	3,9	3,9	3,9	3,9
Температура, °С:				
перегретого пара	440	440	440	440
питательной воды	145	145	145	145
горячего воздуха	130	130	130	130
Радиационные поверхности	гладкотрубные экраны		цельносварные газоплотные панели	
Размеры топки по осям труб:				
глубина, м	6,208	6,208	6,0	6,0
ширина, м	4,512	9,024	4,85	9,65
площадь пода, $м^2$	28	56	29,0	58,0
Высота топки, м	15,3	15,3	14,5	14,5
Расстояние от пода до потолка топочной камеры, м	25,2	25,2	25,0	25,0
Активный объем топки, $м^3$	428	956	443	990
Тепловое напряжение топки:				
по объему, $Вт/м^3$	116?10^3	140?10^3	136?10^3	136?10^3
по сечению, $Вт/м^2$	2,0?10^6	1,98?10^6	2,0?10^6	2,0?10^6
Массовая нагрузка пода, $кг/м^2 \cdot ч$	475	465	500	500
Отметка верхнего барабана, м	31,78	31,78	33,1	33,1
Диаметр труб экранов, мм	60?7	60?7	57?5	57?5

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5
Шаг труб экранов, мм	64	64	75	75
Диаметр труб фестона, мм	60?7	60?7	57?5	57?5
Шаг труб фестона, мм	380	380	399	399
Поверхность нагрева фестона, м^2	228	370	168	712
Диаметр труб пароперегревателя, мм	32?5	32?5	–	–
Шаг труб пароперегревателя, мм	380	380	–	–
Поверхность нагрева пароперегревателя, м^2	865	1260	857	1652
Диаметр труб конвективного пучка, мм	51?3,5	51?3,5	–	–
Шаг труб конвективного пучка, мм	130/130	130/130	–	–
Поверхность нагрева конвективного пучка, м^2	878	1776	–	–
Диаметр труб пароперегревателя I ступени, мм	–	–	38?5	38?5
Шаг труб пароперегревателя I ступени, мм	–	–	399/40	399/40
Поверхность нагрева пароперегревателя I ступени, м^2	–	–	412	825
Диаметр труб пароперегревателя II ступени, мм	–	–	42? 4,5	42?4,5
Шаг труб пароперегревателя II ступени, м^2	–	–	399/44	399/44
Поверхность нагрева пароперегревателя II ступени, м^2	–	–	375	690
Диаметр труб экономайзера, мм	32?3,5	32?3,5	32?4	32?4
Шаг труб экономайзера (шахматный), мм	55/60	55/60	55/60	55/60
Поверхность нагрева экономайзера, м^2	880	1760	880	1760

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

На боковых стенах топки на высоте 4,6 м от пода установлены щелоковые форсунки. Для подачи воздуха организовано три яруса дутьевых сопел. Первичный воздух поступает в топку аксиально через сопла, расположенные на отметке 6,6 м. Для второго и третьего ярусов дутья выполнены разводки под тангенциально расположенные сопла на фронтовой и задней стенках на отметках 8,7 м и 13,2 м.

Топка оборудована двумя ярусами паромеханических мазутных форсунок. Первый ярус форсунок находится в области первичного дутья (по 2 форсунки на каждом из боковых экранов), второй ярус (4 форсунки) – в соплах третичного дутья. На фронтовой стенке СРК-700 имеются разводки для установки трех леток плава, на СРК-350 – двух леток.

Задний экран в верхней части оснащен пережимом, перекрывающим 40 % сечения топки, выше которого трубами диаметром 108 мм образован однорядный фестон. Ширмы защитного фестона, выполненные из труб диаметром 57×5 мм, расположены с шагом, соответствующим шагу пароперегревателя.

Ширмовый пароперегреватель состоит из двух ступеней. Вторая по ходу пара ступень пароперегревателя изготовлена из труб диаметром 42×4,5 мм (сталь 15ХМ) и находится над топкой за защитным фестоном. Первая ступень пароперегревателя выполнена из труб диаметром 38×5 мм (сталь 20) и состоит из двух частей, расположенных в поворотном экранированном газоходе. В двух параллельных опускных газоходах котла размещены блоки горизонтального змеевикового экономайзера, представляющего собой пучок труб диаметром 32×4 мм (сталь 20), расположенных в шахматном порядке.

Вся экранная система котла, защитный ширмовый фестон, обе ступени ширмового пароперегревателя и потолочный пароперегреватель с помощью необогреваемых подвесок крепятся к каркасу котла. Точки подвесок выбраны на одном уровне. Компенсация тепловых расширений элементов котла осуществляется с помощью песочного компенсатора, установленного в соединительном газоходе котла.

Барабан котла наружным диаметром 1680 мм выполнен из стали 09Г2С. В нем размещены сепарационные устройства первой и второй ступени испарения. Опускная система первой ступени испарения выполняется из стояков большого диаметра (630 мм – СРК-700, 465 мм – СРК-350); опускные трубы второй ступени – из труб диаметром 133 мм. Опускные и пароотводящие трубы крепятся к барабану котла и коллекторам с помощью сварки на штуцерах.

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

В поворотном газоходе котла установлены «горячие» бункеры, предназначенные для сбора и удаления уносов. Очистка поверхностей ширмового пароперегревателя и ширм защитного фестона производится паром с помощью глубоковыдвижных обдувочных аппаратов. Очистка наружной поверхности труб водяного экономайзера осуществляется дробью. Предусмотрено также устройство для обмывки водяного экономайзера. Основные конструктивные и расчетные характеристики СРК-350 и СРК-700 приведены в табл. 3.

СРК-350 и СРК-700 рассчитаны на работу с газоконтактным испарителем. Расчетная температура газов за экономайзером составляет 280 °С.

Экономайзер котла в первоначальном варианте заводской поставки является горизонтальным с шахматным расположением труб. При модернизации СРК в практику внедрены две конструкции: вертикальный экономайзер из плавниковых труб и горизонтальный с коридорным расположением труб. В обеих конструкциях используются паровые обдувочные аппараты.

В СРК-700К Белгородского завода, спроектированном для работы в технологической схеме без газоконтактного испарителя, предусмотрена дополнительная кипятильная поверхность в виде испарительных ширм. Испарительные ширмы размещены между пароперегревателем и экономайзером, для уменьшения поверхности которого применяется промежуточное охлаждение воды, проходящей через экономайзер, в водовоздушном теплообменнике.

Оптимизация параметров сжигания щелока

Оптимальный топочный режим СРК характеризуется полнотой сгорания щелока, максимальной степенью восстановления сульфата, минимальным уровнем пылегазовых выбросов, поддержанием температуры газов на выходе из топки, исключающей интенсивное шлакование последующих поверхностей нагрева. Продукты горения щелока находятся в топочной камере в различных агрегатных состояниях (газообразном, жидком, твердом), что накладывает дополнительные специфические условия на организацию топочного процесса.

Факельно-слоевое сжигание щелока в современном СРК позволяет организовать устойчивый процесс горения при нагрузке 70 – 100 % от номинальной при подогреве воздуха до 150 – 160 °С и теплоте сгорания щелока 6700 – 7100 кДж/кг, что достигается его

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

концентрированием до 60 % и более. Степень восстановления сульфата в плаве находится в пределах 90 – 94 %, а в ряде случаев достигает 96 %. При нормальном топочном режиме создаются условия для осаждения в топке до 90 % золы. Поддержание избытка воздуха за котлом на уровне 1,2 – 1,23 обеспечивает минимальные потери тепла от химической неполноты сгорания.

Процессы, происходящие в топке при сжигании черного щелока, условно делятся на три стадии.

Первая стадия включает подсушку щелока под действием горячих топочных газов и происходит после впрыскивания щелока в топку. Одновременно с подсушкой щелока протекают химические реакции, сводящиеся к взаимодействию щелока с кислыми компонентами дымовых газов. В реакциях участвуют остаточный едкий натр, сульфид натрия, соли различных органических кислот:

$2NaOH + CO_2 \rightarrow Na_2CO_3 + H_2O$;

$2NaOH + SO_2 \rightarrow Na_2SO_3 + H_2O$;

$2NaOH + SO_3 \rightarrow Na_2SO_4 + H_2O$;

$Na_2S + CO_2 + H_2O \rightarrow Na_2CO_3 + H_2S\uparrow$;

$2NaSH + CO_2 + H_2O \rightarrow Na_2CO_3 + 2H_2S\uparrow$;

$2RCOONa + SO_3 + H_2O \rightarrow Na_2SO_4 + 2RCOOH$;

$Na_2S + SO_3 + H_2O \rightarrow Na_2SO_4 + H_2S\uparrow$.

В результате этих реакций весь свободный едкий натр NaOH и значительная часть сернистого натрия Na_2S переходят в карбонат, сульфит и сульфат натрия. Это приводит к выделению на этом этапе сероводорода.

Вторая стадия состоит в пиролизе и коксовании органической части щелока и начинается при влажности менее 15 %. При пиролизе выделяется значительное количество летучих органических веществ, в том числе, содержащих серу (сероводород, метилмеркаптан, диметилсульфид и др.). С удалением остатков влаги скорость пиролиза органической части щелока увеличивается, и к началу третьей стадии в виде кокса присутствует примерно половина начального количества углерода.

Во время *третьей стадии* происходит выжигание кокса, расплавление всех оставшихся минеральных солей. Основной реакцией, протекающей во время третьей стадии, является реакция

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

восстановления сульфата натрия, в том числе, и добавляемого в щелок для возмещения производственных потерь химикатов. Сульфат, сплавленный с минеральным остатком щелока, за счет остаточного органического кокса восстанавливается в сульфид натрия:

$$Na_2SO_4 + 2C \rightarrow Na_2S + 2CO_2\uparrow - Q.$$

Эта реакция требует соответствующей восстановительной атмосферы и определенных температурных условий, так как реакция восстановления эндотермическая (на восстановление 1 кг сульфата затрачивается порядка 7100 кДж). Восстановление сульфата начинается при температуре 600 – 650 °С и значительно ускоряется при повышении температуры. Кроме того, на степень восстановления сульфата натрия влияют избыток углерода, исчисляемый по отношению к сульфату, и условия контактирования.

Восстановительная атмосфера организуется путем подачи в нижнюю часть топочной камеры только части воздуха. Остальной воздух вводится в среднюю часть топки, где формируется окислительная зона, необходимая для дожигания летучих органических соединений пиролитического происхождения. Таким образом, топочная камера разделяется на четко выраженные технологические зоны: *восстановительную* и *окислительную*.

На режим работы топки оказывает влияние большое число факторов, к которым прежде всего следует отнести:

- избыток воздуха в топке;
- температуру в топке;
- распределение воздуха по дутьевым зонам;
- расход сульфата;
- давление щелока перед форсунками;
- сжигание вспомогательного топлива;
- теплофизические характеристики щелока.

Избыток воздуха в топке влияет на полноту сгорания щелока, то есть на экономичность СРК. Концентрация продуктов химического недожога (H_2, CO, CH_4) в топочных газах начинает резко возрастать при уменьшении коэффициента избытка воздуха ниже определенной (критической) величины, а при превышении ее меняется незначительно. Можно считать, что эта величина коэффициента избытка воздуха является оптимальной, поскольку сумма тепловых потерь от химического недожога и с уходящими газами будет при этом минимальна.

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

На рис. 36 приводится усредненная зависимость потерь тепла с химическим недожогом от коэффициента избытка воздуха, полученная по результатам испытаний различных СРК.

Уже при коэффициенте избытка воздуха за котельным пучком, равном 1,17 – 1,2 (что соответствует коэффициенту избытка воздуха на выходе из топки 1,12 – 1,15) потери от химического недожога практически равны нулю. С учетом фактора уменьшения серосодержащих выбросов из топочной камеры предпочтительными являются режимы с избытками воздуха за котельным пучком 1,2 – 1,25. Это связано с тем, что в топке создаются более благоприятные условия для окисления газообразных соединений восстановленной серы, причем максимальный эффект достигается при интенсивном перемешивании газов и воздуха в зоне высоких температур, что практически обеспечивается высокими скоростями верхнего дутья.

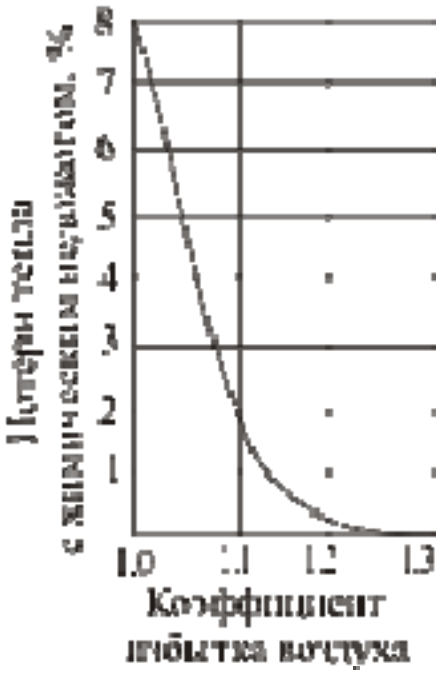


Рис. 36. Усредненная зависимость потерь тепла с химическим недожогом от коэффициента избытка воздуха за котельным пучком

На рис. 37 приведена зависимость концентрации дурнопахнущих соединений от содержания кислорода в топочных газах. Снижение избытка воздуха приводит к резкому повышению выброса сероводорода, выброс метилмеркаптана также увеличивается, но медленнее. Увеличение избытка воздуха приводит к падению выброса сероводорода практически до нуля.

Однако метилмеркаптан может присутствовать в газах и при повышенной концентрации кислорода. Согласно результатам

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

исследований, полное отсутствие сероводорода и минимальный выброс метилмеркаптана (менее 10 мг/м^3) достигаются при концентрации кислорода 3,5 % и более, то есть при коэффициенте избытка воздуха за котельным пучком не ниже 1,2. Чрезмерное его повышение, сверх 1,28 (концентрация кислорода более 4,5 %), нежелательно, поскольку, не оказывая существенного влияния на снижение выброса дурнопахнущих соединений, оно увеличивает потери тепла с уходящими газами и, кроме того, приводит к образованию липких отложений на поверхностях нагрева.

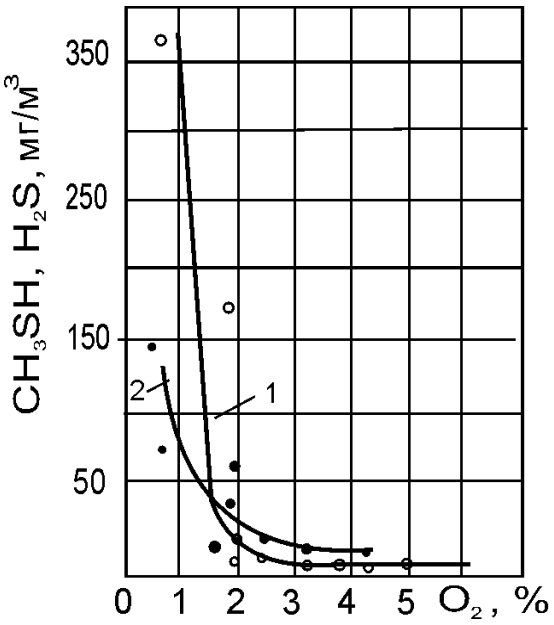


Рис. 37. Концентрация H_2S и CH_3SH в зависимости от содержания кислорода в топочных газах:
1 – сероводород H_2S; 2 – метилмеркаптан CH_3SH

Температура, развиваемая при горении щелока в топочной камере, является основным фактором, влияющим на кинетику реакции восстановления сульфата натрия и величину пылегазовых выбросов.

На рис. 38 представлены расчетные профили температур по высоте топочной камеры.

Температуры в топке по высоте распределены неравномерно. Определяющей является температура в восстановительной зоне над поверхностью огарка. При этом важным условием является поддержание равномерного температурного поля в этой области топки. Регулировать топочный процесс изменением температуры невозможно, так как сама температура определяется совместным эффектом действия распределения воздуха, нагрузки котла,

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

концентрации щелока, расхода сульфата и должна поддерживаться на определенном уровне. Определенный температурный уровень в топке при стабилизации прочих факторов достигается регулировкой распределения подачи воздуха.

На первом графике (рис. 38а) показано распределение температур при нормальных условиях, соответствующих номинальной нагрузке котла, 60 %-ой концентрации щелока и распределению воздуха на первичный, вторичный и третичный в соотношении 50, 35 и 15 %. Следует отметить, что расчетный температурный профиль согласуется с практическими измерениями.

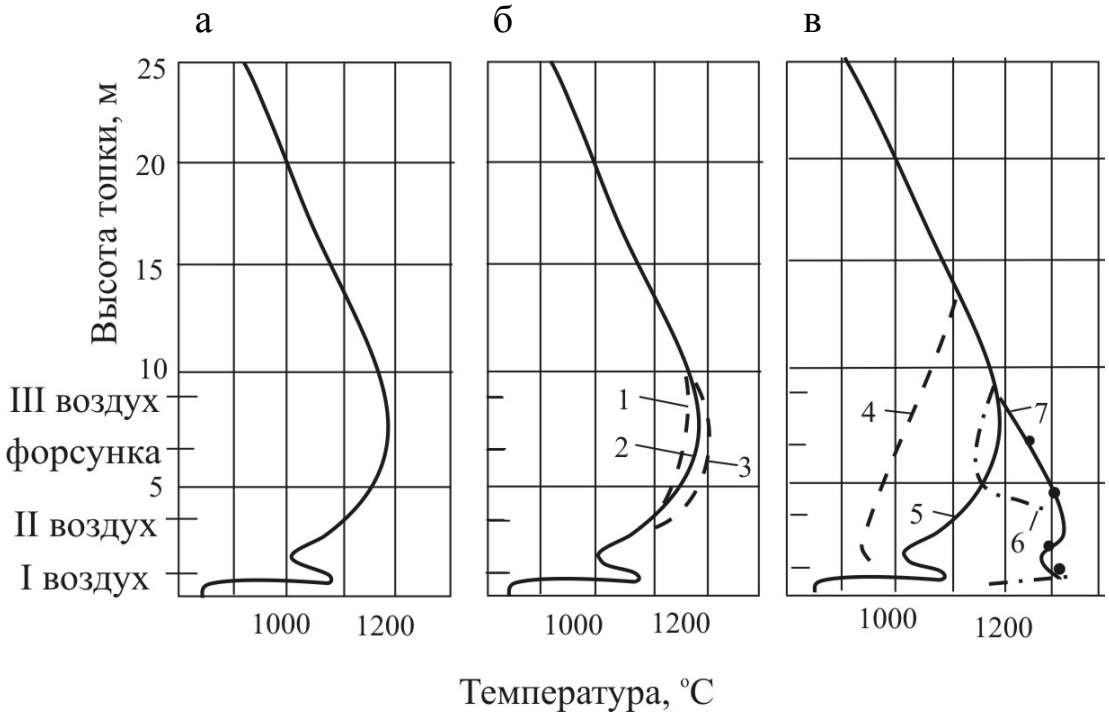


Рис. 38. Расчетные профили температур по высоте топки:
а – номинальный режим;
б – влияние концентрации щелока: 1 – 58 %; 2 – 60 %; 3 – 62 %;
в – влияние распределения воздуха (соотношение долей первичного, вторичного и третичного воздуха):
4 – 45, 35, 20 %; 5 – 50, 35, 15 %; 6 – 60, 25, 15 %; 7 – 60, 30, 10 %

На втором графике (рис. 38б) показано влияние на распределение температур концентрации черного щелока.

Третий график (рис. 38в) иллюстрирует влияние распределения воздуха.

По графикам видно, что перераспределение воздуха с одного уровня на другой на 5 – 10 % приводит к изменению температуры в нижней части топки до 200 °С.

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Известны равновесные фазовые диаграммы реакций горения щелока, в основе которых лежит термодинамический анализ процесса, позволяющий вычислить выбросы из топки щелочи (натрия) и серы в зависимости от температуры в зоне восстановления.

Примером такой расчетной зависимости являются графики, приведенные на рис. 39.

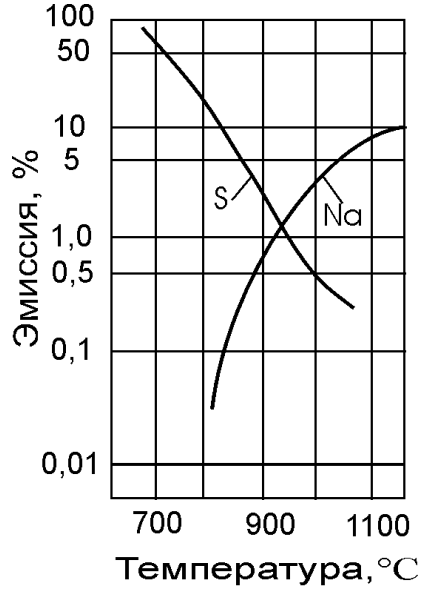


Рис. 39. Эмиссия натрия и серы в зависимости от температуры

При снижении температуры в нижней части топки существенно возрастает эмиссия серы, в том числе и восстановленной, эмиссия натрия при этом невелика. При повышении температуры эмиссия серы резко сокращается, а эмиссия натрия начинает существенно возрастать. Последнее связано с тем, что в результате термической диссоциации карбоната натрия происходит возгонка элементарного натрия, образование над слоем огарка окиси натрия, ее конденсация и взаимодействие с кислыми компонентами дымовых газов, приводящее к образованию летучей золы. В основе этих взаимодействий лежат следующие реакции:

$$2Na_2CO_3 \rightarrow 4Na + 2CO_2 + O_2;$$

$$4Na + O_2 \rightarrow 2Na_2O;$$

$$Na_2O + CO_2 \rightarrow Na_2CO_3;$$

$$Na_2CO_3 + SO_3 \rightarrow Na_2SO_4 + CO_2;$$

$$Na_2O + SO_3 \rightarrow Na_2SO_4.$$

Преимущественно возгонный характер пылевых выбросов из топки подтверждается как мелкой дисперсностью пылевых частиц (1 – 2 мкм), так и превалирующим содержанием сульфата натрия в

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

уносе (до 90 – 96 %). На рис. 40 приведены результаты измерений концентрации пылевого уноса в газах в зависимости от температуры, полученные на СРК производительностью 1400 т/сут а.с.в. щелока.

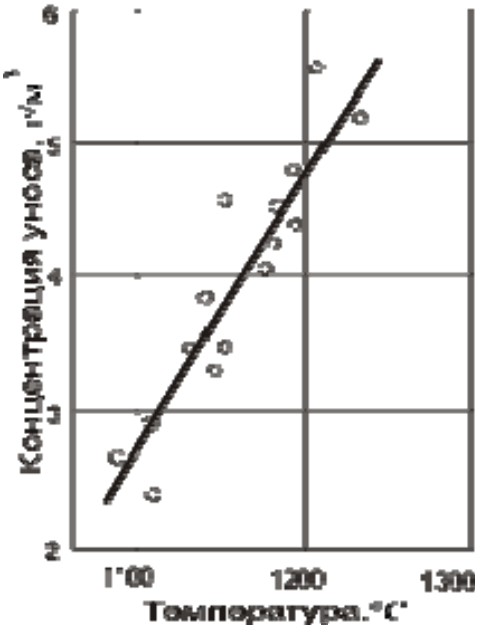


Рис. 40. Концентрация пылевого уноса в газах
в зависимости от температуры

Рассмотренные выше зависимости выбросов от температуры указывают на необходимость оптимизации температурного поля в топочной камере. Практически это должно достигаться наладкой режима СРК с учетом его конструктивных особенностей. Температура в топке может явиться параметром контроля и регулирования подачи воздуха.

Распределение воздуха по дутьевым зонам при прочих постоянных факторах влияет на температуру в зонах слоя огарка и пиролиза (см. рис. 38в).

Первичное дутье, кроме того, влияет на стабильность формы и величину подушки огарка, степень восстановления сульфата, величину пылевого уноса. Оптимальную долю первичного воздуха следует рассматривать в увязке с конструктивным оформлением аэродинамической схемы топочной камеры СРК, т.е. с числом ярусов дутья, их расположением по высоте, конструкцией и геометрией воздушных сопел, способом регулирования расхода воздуха в них.

В конечном итоге именно скорость воздуха в соплах определяет глубину проникновения воздушных струй в топку и интенсивность их воздействия на слой огарка. При недостаточной скорости первичного воздуха увеличивается высота подушки огарка, темнеет ее

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

поверхность, происходит забивание воздушных сопел. При слишком высокой скорости первичного воздуха и, соответственно, чрезмерном его расходе подушка огарка интенсивно выгорает, ее высота резко снижается. Правильно сформированная подушка огарка, в которой обеспечивается хороший контакт сульфата и кокса, является необходимым условием для достижения высокой степени восстановления сульфата.

Как показывают испытания, практически для всех СРК скорость первичного воздуха должна находится в пределах 20 – 30 м/с. Скорости воздуха ближе к нижнему пределу характерны для котлов, имеющих двухъярусную схему ввода воздуха в топочную камеру и дроссельный способ регулирования расхода первичного воздуха при помощи заслонок, установленных перед группой сопел. Скорости воздуха ближе к верхнему пределу относятся к котлам, имеющим трехъярусную схему ввода воздуха в топочную камеру и индивидуальное регулирование расхода (в ряде случаев и скорости) воздуха в сопле.

На рис. 41а показана зависимость степени восстановления сульфата от расхода первичного воздуха для СРК с двухъярусной воздушной схемой. Практически диапазон регулирования расхода первичного воздуха находится в пределах 50 – 70 %, при этом лучшие результаты степени восстановления достигаются при подаче через сопла первичного дутья 60 % организованного воздуха. При расходах первичного воздуха, отличных от указанного диапазона, фактически невозможно обеспечить стабильность формы и величину подушки огарка. На некоторых СРК с увеличением суммарного сечения сопел первичного воздуха (до 80 % от суммарного сечения воздушных сопел) верхняя граница диапазона регулирования первичного дутья доходит до 75 %.

На рис. 41б показана зависимость степени восстановления сульфата для СРК с трехъярусной схемой подачи воздуха. Практический диапазон регулирования первичного воздуха находится в пределах 35 – 60 %. Максимум степени восстановления сульфата соответствует подаче 45 – 50 % воздуха в первичном дутье.

Таким образом, первичное дутье оказывает влияние на формирование слоя огарка и температуру в зоне подушки огарка, определяющую скорость реакции восстановления. Влияние первичного воздуха на пылеунос определяется по росту концентрации золы в дымовых газах примерно на 15 – 25 % с увеличением расхода первичного воздуха в диапазоне 40 – 60 % для СРК с трехъярусной

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

схемой подачи воздуха. Верхнее дутье является важным фактором минимизации тепловых потерь в топке. Его эффективность повышается с ростом скорости истечения воздуха из сопел, которая не должна быть ниже 40 – 50 м/с.

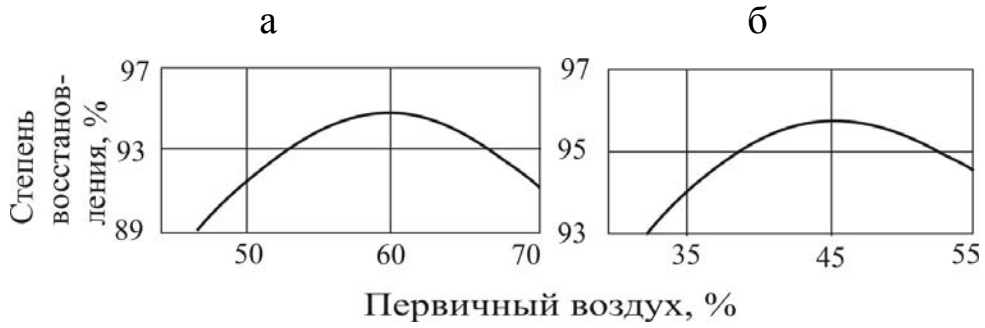


Рис. 41. Зависимость степени восстановления сульфата от расхода первичного воздуха:
а – при двухъярусной подаче воздуха; б – при трехъярусной подаче воздуха

Для СРК с традиционной трехъярусной схемой ввода воздуха в топку лучшие результаты достигаются при следующем распределении воздуха: первичный 50 %, вторичный 35 %, третичный 15 %. Существуют трехъярусные и четырехъярусные схемы, отличительной особенностью которых является размещение вторичного воздуха на достаточно низком уровне, всего на 1,5 – 2 м выше сопел первичного дутья. Появление этих воздушных схем направлено на улучшение регулирования и контроля топочного процесса.

По данным ряда фирм, при эксплуатации СРК, оборудованных низким вторичным дутьем, концентрация соединений восстановленной серы (сероводород и др.) в уходящих газах составляет менее 1 ppm.

Для справки приведем значения высоты расположения дутьевых сопел и щелоковых форсунок над плоскостью пода СРК с трехъярусной воздушной схемой:

- первичный воздух – 1,4 м;
- вторичный воздух – 3,4 м;
- третичный воздух – 9 - 10 м;
- щелоковые форсунки –7,5 м.

Ниже представлены рекомендуемые значения распределения воздуха по ярусам, в % от общего расхода.

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

	Трехъярусная схема	Четырехъярусная схема
Первичный	30 – 40	45 – 50
Вторичный	50 – 70	30 – 35
Третичный	0 – 15	10 – 15
Четвертичный	–	5 – 10

Расход сульфата. Стехиометрически для реакции восстановления сульфата натрия $Na_2SO_4 + 4C = Na_2S + 4CO - Q$ необходимо 0,34 кг углерода на 1 кг сульфата. В реальных условиях требуется значительно большее количество углерода, необходимого в качестве топлива для обеспечения требуемого температурного уровня и компенсации тепловых потерь в реакционной зоне топки. Практически на 1 кг сульфата в исходной смеси щелока и сульфата приходится 4 – 5 кг углерода. При увеличении добавки сульфата в щелок наблюдается снижение степени восстановления, что может быть объяснено дефицитом свободного углерода в слое огарка. Зависимость между расходом сульфата и степенью восстановления имеет технологическое обоснование, однако из-за одновременного действия в СРК большого числа факторов, а также из-за колебаний силы воздействия самих факторов по случайным и многочисленным причинам количественная оценка зависимости достаточно сложна. В среднем, расход сульфата составляет до 140 кг на тонну а.с.в. щелока.

Давление щелока перед форсунками определяет размер капель. Распределение размеров капель в струе щелока, впрыскиваемого в топку, подчиняется нормальному статистическому закону. В любом случае струя щелока будет содержать какую-то часть капель, скорость витания которых будут существенно меньше скорости подъемного потока газов, поэтому такие капли, не достигая пода, выносятся из топочной камеры. При этом органическая часть капли щелока выгорает в объеме, а ее минеральный остаток формирует механический унос. При неблагоприятных условиях (чрезмерном угле отклонения качающейся форсунки от горизонтали вверх) увеличивается вертикальная составляющая скорости капли, что может привести к выносу из топочной камеры даже коксовых частиц. Для мелких капель зона сушки и пиролиза смещается резко вверх по высоте топочной камеры в область относительно низких температур. В этой области достаточно трудно обеспечить полное окисление продуктов пиролиза, в особенности из-за существенного уменьшения времени их пребывания в топочной камере, что в конечном итоге

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

приводит к увеличению выброса из топки сероводорода и других соединений восстановленной серы.

На рис.42а показана зависимость запыленности топочных газов от давления щелока перед форсунками. Результаты получены при испытаниях СРК, оборудованного качающимися механическими форсунками с отбойными щитками. При увеличении давления щелока с 0,1 до 0,2 МПа запыленность газов возрастает на 15 %.

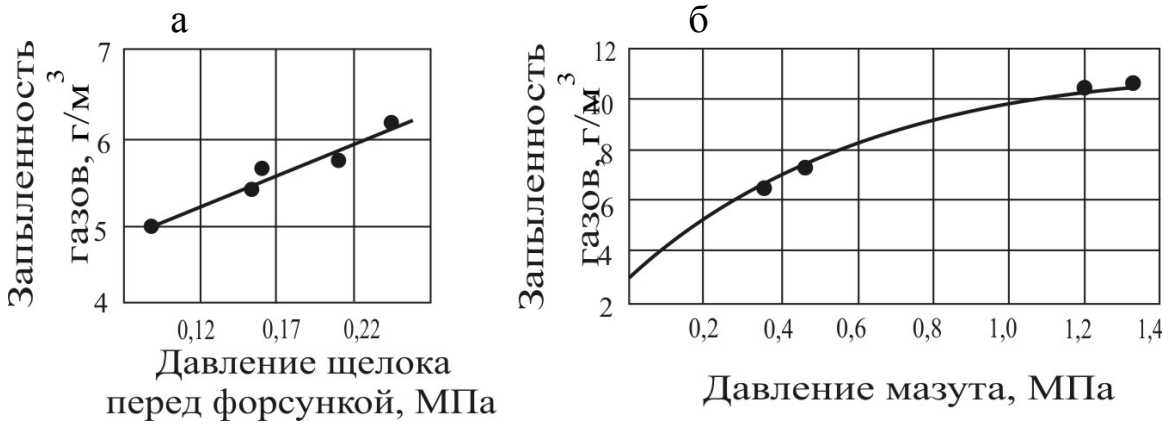


Рис. 42. Зависимость запыленности топочных газов:
а – от давления щелока;
б – от давления (расхода) мазута

Сжигание вспомогательного топлива (мазута) оказывает существенное влияние на пылеунос в случае использования нижних "подсвечивающих" форсунок. Увеличение пылеуноса при этом объясняется ростом температурного уровня, но в основном – развитием высоких локальных температур в зоне слоя огарка.

На рис. 42б показана зависимость запыленности топочных газов от давления мазута, полученная на СРК производительностью 700 т/сут по а.с.в. При работе котла с отключенными нижними мазутными форсунками запыленность газов находится на уровне 4 – 4,5 г/м^3, при включении форсунок с расходом мазута до 1,5 т/ч запыленность возрастает в 2,5 раза. Постоянный расход мазута на «подсветку» снижает, как показывает практика, степень восстановления сульфата, что связано с разрушающим воздействием мазутного факела на процесс нормального формирования подушки огарка.

Сульфидность плава влияет на содержание SO_2 в топочных газах. Чем выше содержание серы в исходной смеси щелока и сульфата, тем больше концентрация SO_2 при постоянной степени перехода серы в газовую фазу. Ниже приведены данные по

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

содержанию SO_2 в топочных газах в зависимости от сульфидности белого щелока. Повышенная концентрация SO_2 (соответственно и SO_3) в газах может оказать неблагоприятное влияние в отношении усиления адгезионных свойств отложений на поверхностях нагрева котла.

Сульфидность белого щелока, %	28	36	42
Концентрация SO_2, ppm / (г/м^3)	36 / 0,107	115 / 0,341	450 / 1,34

Сульфидность плава является параметром, жестко определенным технологическим регламентом сульфатного производства, и ее колебания ограничены пределом допускаемых отклонений.

Сжигание щелока высокой концентрации. В традиционных технологических схемах СРК черный щелок концентрируется до 60 – 65 % и с такой концентрацией сухих веществ впрыскивается в топочную камеру. Финскими фирмами «Тампелла» и «Розенлев» проведены работы по исследованию сжигания щелока концентрацией 75 – 80 %. В ходе работы ставилось целью повышение экономичности СРК, поскольку повышение концентрации щелока – это улучшение качества его подготовки к сжиганию в виде топлива. Сжигание более концентрированного щелока обусловливает снижение затрат тепла на испарение влаги непосредственно в топочной камере, а также уменьшение расхода дымовых газов и, следовательно, увеличение количества тепла, полезно использованного в СРК. По данным фирмы «Тампелла», при испытании СРК производительностью 350 т/сут по а.с.в. при использовании щелока концентрацией 75 – 80 % отмечено увеличение выработки пара на 7 % и снижение выбросов диоксида серы до 0 – 50 ppm против обычных значений 200 – 500 ppm.

Вихревая топка для сжигания щелока. В СРК применяется рассредоточенная подача щелока и воздуха. Основная часть горючих веществ сгорает в зоне подвода воздуха и жидкого щелока, в которой газовоздушный поток и щелок движутся по противоточной схеме.

Этой схеме присущи специфические недостатки:

- рассредоточенная подача щелока и воздуха ухудшает условия взаимного перемешивания, что приводит к неустойчивости воспламенения и снижает интенсивность процесса горения;
- периферийный подвод воздуха с низкими скоростями не позволяет воздуху проникнуть в центральную часть топки, в результате чего возникает значительный химический недожог горючих веществ;

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

- обеспечиваются низкие удельные тепловые напряжения топочного объема; за пределы активной зоны горения выносятся мелкие ококсованные щелоковые частицы, увеличиваются механический недожог топлива и потери химикатов;
- агрегаты оборудованы паровыми калориферами, которые обеспечивают нагрев воздуха до сравнительно низкой температуры (140-180 ^{o}C). Достигаемая при этом температура в зоне воспламенения щелока не способствует устойчивому процессу горения, особенно при повышении влажности и уменьшении расхода щелока. В целях поддержания необходимого температурного уровня применяется сжигание вспомогательного топлива (газа или мазута).

На кафедре промышленной теплоэнергетики Санкт-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров (СПб ГТУ РП) разработана вихревая топка для сжигания и регенерации отработанных щелоков с сохранением факельно-слоевого способа сжигания, один из вариантов которой представлен на рис. 43.

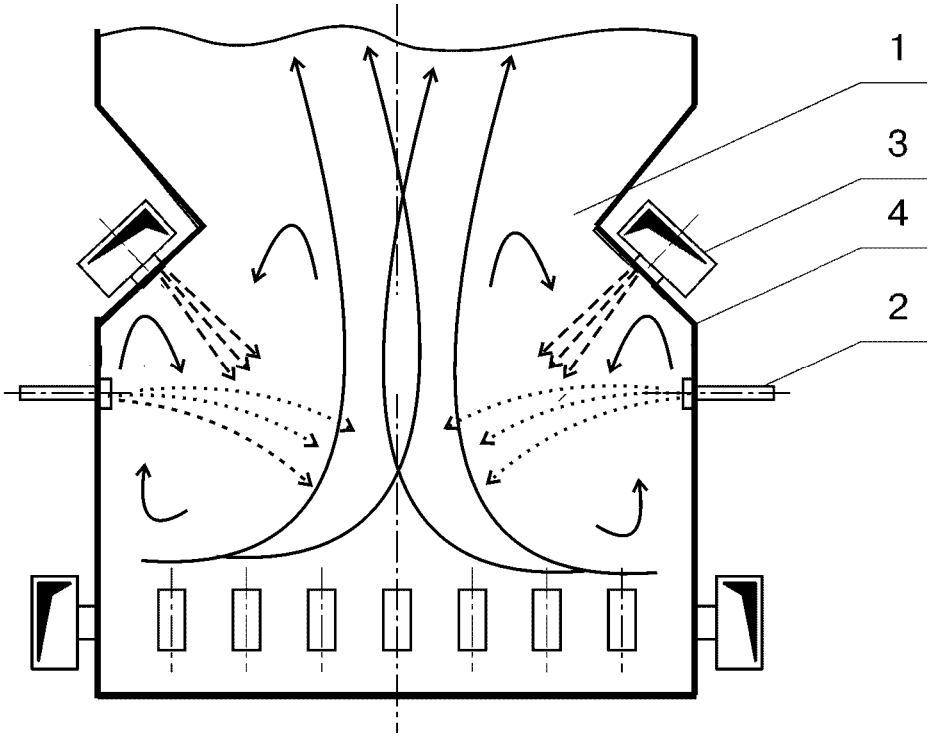


Рис.43. Схема вихревой топки СРК:
1 – топочная камера; 2 – щелоковые форсунки; 3 – вторичное дутье; 4 – аэродинамический выступ

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Сущность предлагаемого метода основывается на принципиально новой аэродинамической схеме сжигания щелоков в пересекающихся струях с U–образным движением факела. Для реализации этого проекта была выполнена реконструкция СРК-200 Котласского ЦБК с организацией аэродинамического пережима, образованного трубами фронтового и заднего экранов, на уровне вторичного дутья. Вторичный воздух подается в топку с помощью 20 регулируемых сопел (по 10 на каждом выступе) с направлением воздушных струй под углом 60^{o} к поду топки. Щелоковые форсунки расположены на фронтовой и задней стенках на 0,9 м ниже уровня сопел вторичного дутья. Третичное дутье отключено полностью, первичное дутье осталось без изменения.

Вторичный воздух на уровне щелоковых форсунок образует сплошную плоскую струю. Эжектирующее действие этой струи вызывает подсос продуктов сгорания щелока к корню воздушной струи, образуя вихревое движение. Воздушные струи пересекают щелоковые, увлекают мелкие капли щелока, не требующие длительного времени на подготовку к воспламенению, в сторону пода. Крупные капли по инерции движутся в центральную зону топочного объема, откуда медленно опускаются вниз в восходящем потоке газов под воздействием гравитационных сил.

Таким образом, в пересекающихся струях происходят сепарация и естественное регулирование времени нахождения капель щелока в топочном объеме в соответствии с их дисперсностью.

Подача воздуха осуществляется сосредоточенно к корню топливных струй, что обеспечивает быстрое образование однородной топливной смеси и интенсивную подготовку капель топлива к воспламенению. Этому способствует также подсос продуктов сгорания из топочного объема за счет эжектирующего действия воздушных струй. При этом в вертикальной плоскости топочного объема возникает вихревое движение продуктов сгорания и капель топлива, способствующее интенсификации процесса горения и полному выжигу горючих веществ.

Как показали результаты измерения температуры по высоте топочной камеры, во всем диапазоне нагрузок наличие пережима сократило прямое излучение теплоты, что привело к снижению температуры газов на выходе из топки. Это является благоприятным фактором для предотвращения шлакования и для оптимизации температурных условий работы пароперегревателя.

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Температура газов на выходе из топки в зависимости от нагрузок составляет 820 – 86 °С, что на 50 – 70 °С ниже, чем до реконструкции. Интенсификация процесса горения обеспечивает повышение температуры в зоне первичного дутья, что приводит к снижению эмиссии серы, но максимум температуры на уровне первичного дутья снижается с 1250 до 1160 – 1180 °С, что приводит к снижению эмиссии натрия из плава.

Из теплового баланса СРК до и после реконструкции следует, что КПД «брутто» котлов изменяется в больших пределах, при этом для реконструированного СРК он составляет 72-82 %, а для СРК с обычной топкой 69-77 % (рис. 44). Это обуславливается, прежде всего, снижением потерь с уходящими газами и с химическим недожогом.

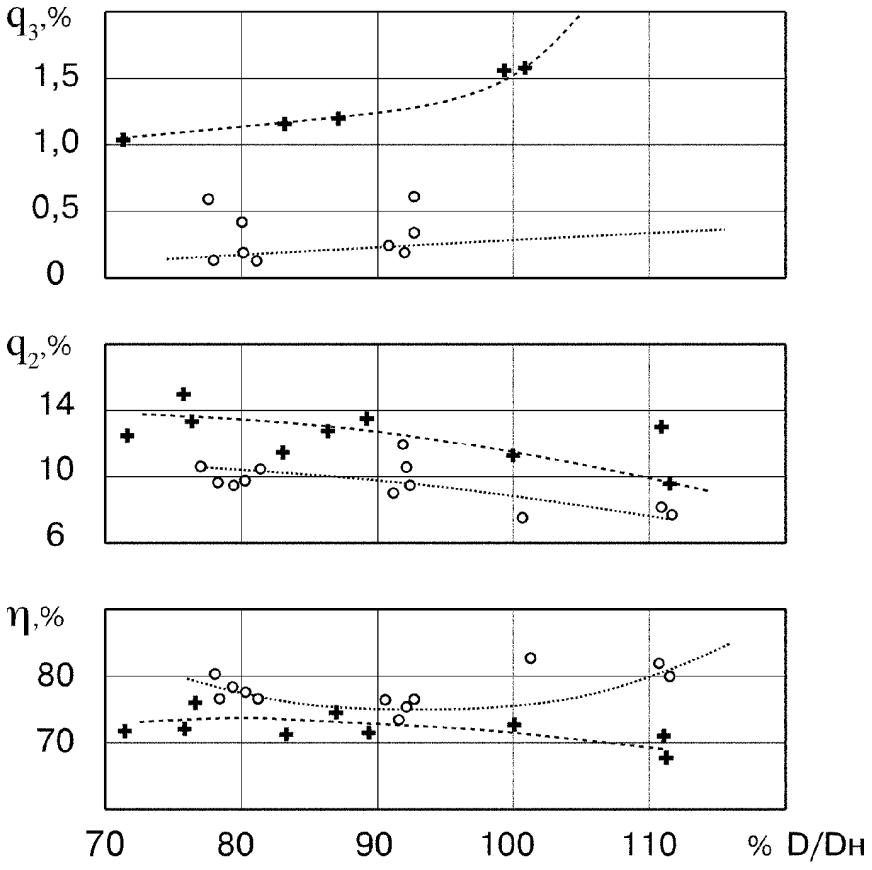


Рис. 44. Потери теплоты с химическим недожогом q_3 ,с уходящими газами q_2 и КПД котла η в зависимости от нагрузки котла:
+ , **o** – до и после реконструкции

Концентрация пылевого уноса до электрофильтра для реконструированного СРК составляет 1,6 – 2,7 г/м^3, для СРК с обычной топкой 2,6 – 6,3 г/м^3 (рис. 45).

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Результаты газового анализа показали, что содержание вредных серосодержащих выбросов определяется наличием в схеме каскадного испарителя. До каскадного испарителя содержание выбросов составило до и после реконструкции, мг/м^3:

	до реконструкции	***после реконструкции***
метилмеркаптан, CH_3SH	6,7	2,5
сероводород, H_2S	---	---
сернистый ангидрид, SO_2	80	107 - 161
окислы азота, NO_x	95	45 - 107
оксид углерода, CO	47	2 - 6

Технологические показатели работы СРК были близки к показателям типовых агрегатов. Степень восстановления сульфата в плаве составляла 88-91 %, сульфидность зеленого щелока 20-25 %.

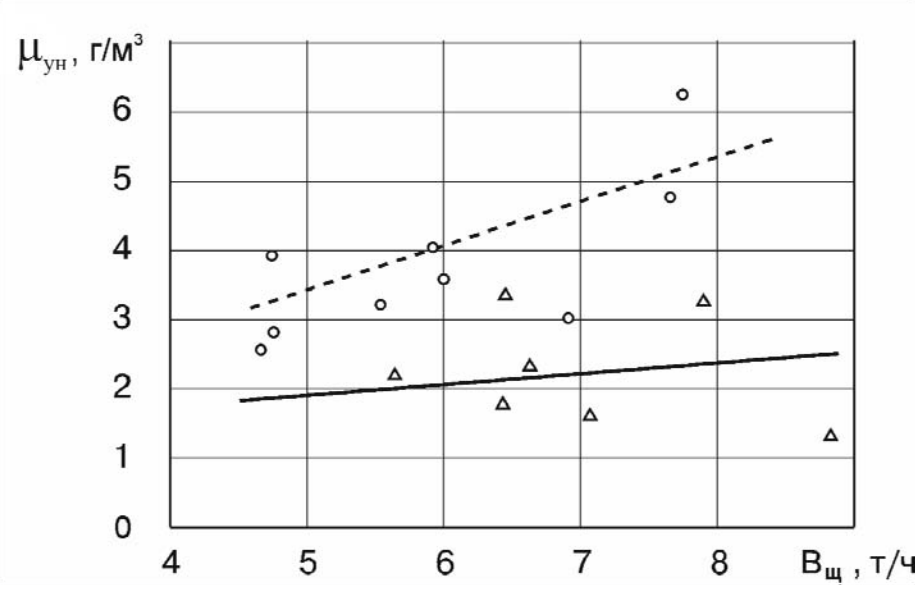


Рис.45. Изменение концентрации пылевого уноса
в зависимости от расхода щелока:
---- – до реконструкции; —— – после реконструкции

Взрывобезопасность содорегенерационных котлоагрегатов

Специфика СРК заключается в сжигании в топке отработанного после варки сульфатной целлюлозы щелока, представляющего собой влажное, высокозольное, низкокалорийное топливо, а также в аккумуляции на поду топочной камеры значительного количества расплавленных натриевых солей при температуре 850 – 900 °С.

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Эксплуатация СРК предъявляет повышенные требования к знанию основных принципов организации топочного процесса и физико-химических свойств жидкого сульфатного плава, так как при определенных условиях взаимодействие сульфатного плава с водой может привести к сильным взрывам.

Кроме того, в содорегенерационных котлоагрегатах используется вспомогательное топливо (газ, мазут), применяемое при пуске, останове СРК, перебоях в подаче черного щелока с выпарной станции и для «подсвечивания» в случае повышения влажности щелока сверх предела устойчивого горения. Это налагает дополнительные условия на организацию работы СРК, так как несоблюдение правил сжигания мазута или газа может явиться причиной взрывов в топках содорегенерационных котлов. Не исключена вероятность взрывов в баке-растворителе в момент контакта плава с зеленым щелоком. Такие взрывы могут привести к серьезным разрушениям оборудования и человеческим жертвам.

Условия взрывов, связанные со сжиганием вспомогательного топлива, хорошо известны. Вместе с тем необходимо помнить, что взрыв горючих газов в топке СРК может привести к повреждению трубной системы и попаданию воды на плав, что еще более усилит аварию.

Механизм взрывов «сульфатный плав – вода». Взрывы, происходящие при контакте сульфатного плава с водой, пытались объяснить химическим взаимодействием расплавленного сульфида натрия с водой, приводящим к выделению и образованию взрывоопасных концентраций водорода. Однако лабораторные исследования и наблюдения в промышленных условиях показали, что взрывы вызываются другими причинами и объясняются физической природой явления. Так, жидкая частица плава размером примерно 5 мм вызывает взрывы при контакте с зеленым щелоком, и, наоборот, контакт охлажденной твердой частицы плава таких же размеров никогда не приводит к взрыву. Физические взрывы возникают в результате чрезвычайно быстрого (взрывного) расширения пара в случае подвода тепла к испаряющейся жидкости с очень большой скоростью.

Взаимодействие расплавленных металлов, например расплавленного алюминия, с водой может привести к быстрому взрыву. Между тем, известен целый ряд расплавленных материалов (стекло, карбонат натрия), которые не вызывают взрыв при контакте с водой. Расплав карбоната натрия не вызывает взрыв, однако расплав

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

смеси Na_2CO_3 с более чем 12 % Na_2S при контакте с водой приводит к взрыву.

Физические взрывы являются беспламенными, они не менее мощны, чем взрывы, сопровождающиеся быстрым выделением большого количества энергии (взрывы тротила). Однако давления, развиваемые при физических взрывах, могут достигнуть максимальных значений в течение микросекунд, а возникающие ударные волны распространяются со сверхзвуковыми скоростями.

Выше упоминалось, что взрывное образование пара связано с передачей тепла с очень большой скоростью от высокотемпературного материала к воде. Можно выделить следующие условия интенсификации теплообмена:

- непосредственный контакт жидкого расплава с водой;
- резкое увеличение поверхности контакта жидкого расплава и воды, что может быть достигнуто делением расплава на большое количество частичек;
- прохождение образовавшихся в конечном итоге из расплава частичек через воду с большой скоростью, препятствующей образованию паровой оболочки, которая могла бы снизить теплопередачу.

Исходя из этого, взрыв в системе «расплав – вода» должен быть инициирован, т.е. должно произойти разрушение жидкого расплава, его деление.

Предполагается, что физические взрывы, возникающие при контакте воды с большой массой различных расплавленных материалов, имеют общий механизм, в основе которого лежит предельный перегрев испаряющейся жидкости. Теория преминидельного перегрева предложена в ходе изучения физических взрывов в системе «сжиженный природный газ – вода».

Прежде чем рассмотреть концепцию предельного перегрева для физических взрывов, дадим общие представления о процессе кипения, необходимые для понимания сути концепции. Кипение – сложный процесс образования пара внутри объема жидкости. Для возникновения кипения всегда необходим некоторый перегрев жидкости, т.е. превышение температуры жидкости t относительно температуры насыщения $t_н$ при заданном давлении P. Этот перегрев зависит от физических свойств жидкости, ее чистоты, а также свойств граничных твердых поверхностей. Чем чище жидкость, тем более высоким оказывается начальный перегрев, необходимый для возникновения кипения. Известны опыты, в которых тщательно

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

очищенные жидкости, лишенные растворенных газов, удавалось перегревать без вскипания на десятки градусов. Однако, в конце концов, такая перегретая жидкость все же вскипает, причем кипение происходит крайне бурно, напоминая взрыв.

Иначе обстоит дело, когда жидкость содержит растворенный газ, а также мельчайшие взвешенные частицы. При ее нагревании процесс кипения начинается почти сразу после достижения жидкостью температуры насыщения. При этом кипение носит спокойный характер. В данном случае образующиеся при нагревании газовые пузырьки, а также находящиеся в жидкости твердые частицы являются зародышами паровой фазы.

Начальный перегрев снижается и в том случае, когда стенки сосуда, в котором происходит нагревание жидкости, имеют абсорбированный на поверхности газ, микрошероховатость, а также различные неоднородности и включения, понижающие молекулярное сцепление жидкости с поверхностью. При подводе теплоты через такую поверхность образование пузырьков наблюдается в отдельных точках поверхности – так называемых центрах парообразования. Таким образом, процесс кипения в этом случае начинается в слоях жидкости, контактирующих с поверхностью и имеющих одинаковую с ней температуру.

На рис. 46 показана зависимость плотности теплового потока от температурного напора при кипении жидкости. По мере увеличения температуры поверхности нагревания t_c и соответственно температурного напора $\Delta t = t_c - t_н$ число действующих центров парообразования растет, процесс кипения становится все более интенсивным и характеризуется *пузырьковым режимом*. Тепловой поток при *пузырьковом кипении* с увеличением температурного напора растёт и достигает некоторого максимального критического значения ($q_{кр1}$).

При дальнейшем увеличении Δt наступает второй, *переходный режим кипения*, характеризующийся тем, что как на самой поверхности, так и вблизи нее пузырьки непрерывно сливаются между собой, образуя большие паровые полости. Из-за этого доступ жидкости к самой поверхности все более затрудняется, что определяет резкое снижение коэффициента теплопередачи и теплового потока в области переходного режима кипения, поскольку паровые области создают дополнительное термическое сопротивление.

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

При некотором значении температурного напора вся поверхность нагрева обволакивается сплошной пленкой пара, и наступает третий, *пленочный*, режим кипения. Интенсивность теплообмена в режиме пленочного кипения достаточно низкая. В момент наступления пленочного кипения тепловой поток, отводимый от поверхности, имеет минимальное значение ($q_{кр2}$).

Все три режима кипения можно наблюдать и в обратном порядке.

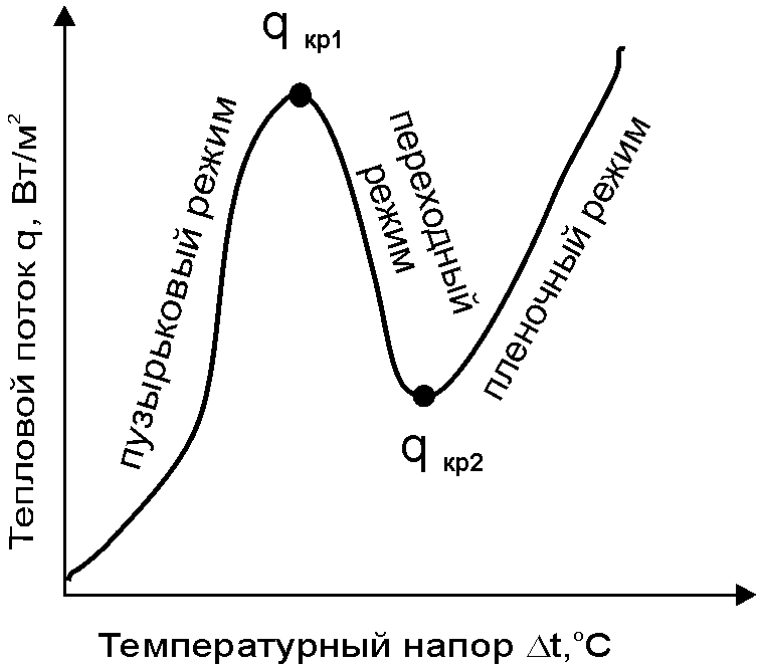


Рис.46. Зависимость плотности теплового потока от температурного напора при кипении воды

Весьма важным параметром процесса кипения является *температура предельного перегрева жидкости* $t_п$, определяющая тот максимальный перегрев жидкости, выше которого жидкая фаза оказывается термодинамически абсолютно неустойчивой и самопроизвольно распадается.

Концепция предельного перегрева при взрыве в системе «сульфатный плав – вода» представляется следующим образом.

Жидкая частица плава при соприкосновении с водой мгновенно окутывается паровой оболочкой, которая в течение нескольких секунд предохраняет воду от соприкосновения с плавом. Чем выше температура плава, тем дольше сохраняется паровая оболочка. В результате снижения температуры плава паровая оболочка разрушается. При этом возникает прямой контакт между водой и жидким плавом. Контакт такого типа не образует активных центров

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

кипения, а приводит к перегреву в тонком слое воды, соприкасающемся с жидким плавом. В течение десятков миллисекунд перегрев воды достигает предела (~200 °С) и вода мгновенно обращается в пар. Все это происходит в пограничном слое. Взрывное образование пара побуждает слабые, но глубокие ударные волны, что вызывает сотрясение частиц плава, их деление на более мелкие частицы, которые с большой скоростью пронизывают окружающую массу воды. Каждая частица может, в свою очередь, делиться по тому же принципу на более мелкие части, что вызывает лавинное увеличение поверхности контакта плава с водой. Это приводит к мгновенному образованию большого количества быстро расширяющегося пара, вызывающего мощную взрывную волну.

На основании результатов исследований с учетом анализа обстоятельств аварий было выдвинуто предположение, что собственно взрыв от взаимодействия плава с водой инициирует взрыв горючих компонентов подушки огарка в объеме топочной камеры.

Причины, приводящие к проникновению воды в топку. Анализ статистических данных по взрывам в содорегенерационных котлоагрегатах из-за попадания воды на плав показывает, что основными причинами являются течи в трубах, сжигание влажного щелока и поступление воды из системы охлаждения леток плава. Однако часть взрывов была вызвана случайными причинами, например, неконтролируемым случайным разбавлением щелока водой. Рассмотрим эти причины.

Повреждение труб экранов топки происходит в результате высокотемпературной коррозии. Как отмечалось, при температуре стенки трубы из углеродистой стали выше 320 °С коррозия развивается с чрезвычайно высокой скоростью, тогда как при температуре стенки меньше 320 °С скорость коррозии незначительна. Для СРК, эксплуатирующихся при давлении 4 МПа, температура стенки является ниже предельно допустимой, однако образование накипи на внутренней поверхности труб может существенно повысить термическое сопротивление теплопередаче, что приведет к резкому повышению температуры стенки трубы.

Неправильные температурные режимы в топке, связанные, как правило, со сжиганием вспомогательного топлива, также могут явиться причиной резкого повышения температуры металла экранной трубы. Так, измерения температуры плавников экранных труб на СРК, работающем под давлением 4 МПа, показали, что при сжигании в топке только щелока температура в середине плавника не

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

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. Отключение мазутной форсунки приводит к снижению температуры плавников до первоначальных значений. Сильный обогрев плавниковых труб, усугубленный циклическим характером теплового режима топки и неправильным выбором геометрии плавников, приводит к развитию явления термоусталостного излома с последующим разрушением металла плавников и труб.

Разрушение экранных труб может быть вызвано и некоторыми другими причинами. На отдельных экранных трубах некоторых СРК под амбразурами щелоковых форсунок были отмечены групповые язвины коррозионного происхождения размерами в поперечнике 0,8 – 2,5 мм и глубиной 0,5 – 1,5 мм. Причиной образования таких язвин явилось увлажнение труб конденсатом, вытекающим из рамок парового уплотнения, установленных для защиты от выброса пламени.

Попадание воды в топочную камеру может быть связано и с дефектами сварных стыков в экранных трубах, а также с нарушением плотности вальцовочных соединений труб с барабанами.

Повреждение леток плава и системы их охлаждения может привести к проникновению воды в топку. При использовании для охлаждения леток холодной технической воды с большим содержанием солей жесткости и окислов железа разрушение леток плава происходит достаточно часто.

Взрывы от взаимодействия плава с водой могут быть вызваны подачей в топку слабого щелока влажностью больше 45 %, что связано с неудовлетворительной работой выпарной станции, но большей частью случайным разбавлением щелока водой. В этом отношении потенциально опасными являются места постоянного подвода воды к коммуникациям черного щелока для их промывки.

Следует отметить, что в практике эксплуатации СРК вода часто используется для разбавления щелока в случае его переуплотнения в каскадном испарителе. При отсутствии контроля над влажностью щелока, поступающего в топку, использование воды с целью регулирования концентрации может привести к серьезным последствиям.

Меры предупреждения взрывов. Обеспечение чистоты и предотвращение коррозии внутренних поверхностей нагрева

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

достигается соблюдением норм качества питательной и котловой воды, проведением эффективной консервации резервного оборудования, предпусковых и эксплуатационных промывок.

Эффективным мероприятием для улучшения водного режима является коррекционная обработка питательной воды, позволяющая снизить содержание в ней оксидов железа, предотвратить появление отложений в трубах, а также замедлить процесс коррозии. Рациональный метод коррекции состоит в *трилонной обработке питательной воды*, обеспечивающей не только безнакипный, но и бесшламовый режим. В настоящее время накоплен положительный опыт трилонирования питательной воды СРК.

Гидразинная обработка питательной воды, являющаяся одним из методов коррекции, обеспечивает замедление процессов кислородной коррозии. Схема гидразинной обработки предусматривает присадку гидразина во всасывающие трубопроводы питательных насосов или в аккумуляторные баки деаэраторов. Разработаны комплексные схемы, обеспечивающие не только гидразинную обработку питательной воды, но и промывку СРК гидразином «на ходу», а также консервацию резервных СРК раствором гидразина. Подобная схема успешно эксплуатируется на ряде предприятий.

В случае существенного загрязнения внутренних поверхностей нагрева могут быть полезными химические промывки СРК с применением органических кислот, комплексообразующих реагентов и гидразина. Однако следует иметь в виду, что промывки органическими компонентами оказываются эффективными только в том случае, когда количество отложений не превышает 300 – 400 г/м^2 поверхности нагрева. При значительных загрязнениях более действенными являются кислотные промывки. Например, на внутренней поверхности экранных труб могут образовываться твердокаменные отложения кремнистого характера с примесью сульфатно-кальциевых соединений. Количество отложений достигает 1500 г/м^2. В таких случаях весьма эффективной оказывается промывка СРК ингибированной соляной кислотой. В течение короткого срока отложения полностью удаляются, и котел может быть пущен в нормальную эксплуатацию.

Безопасная работа агрегата обеспечивается при умеренных загрязнениях (100 – 150 г/м^2 поверхности). Количество отложений на внутренней поверхности труб экранов при этом не должно превышать 250 г/м^2.

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

К числу важнейших мероприятий по предотвращению разрушения труб относятся также проведение тщательных осмотров поверхностей нагрева и замена дефектных труб в периоды ремонтов, периодическая проверка толщины стенок методами неразрушающего контроля (магнитопорошковая и ультразвуковая дефектоскопия), периодическая вырезка образцов труб.

На рис. 47 показана минимально допустимая толщина стенки труб различного диаметра в зависимости от давления в котле (материал труб – углеродистая сталь). Если при замерах установлено, что толщина стенок труб равна величине, показанной на рисунке, или меньше ее, то эти трубы должны быть заменены.

Должное внимание следует уделять контролю над состоянием труб в районе расположения обдувочных устройств во избежание эрозии металла. В этой связи очевидна необходимость эффективной и надежной работы системы отвода конденсата из трубопроводов обдувки. Целесообразно защиту амбразур щелоковых форсунок от выброса пламени осуществлять с помощью воздушной завесы путем отвода горячего воздуха от фурм вторичного дутья. Для предотвращения разрушения леток плава их охлаждение следует осуществлять горячей химически очищенной водой, циркулирующей в замкнутом контуре.

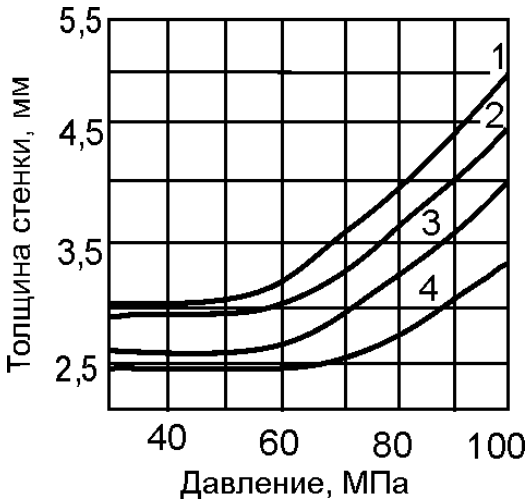


Рис.47. Зависимость минимально допустимой толщины стенки от давления пара при диаметре труб:
1 – 83,5 мм; 2 – 76 мм; 3 – 63,5 мм; 4 – 51 мм

Режимы СРК, допускающие повышение температуры металла труб, нежелательны. Поэтому большое значение имеет правильное использование горелок вспомогательного топлива, исключающее

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

повышенные локальные тепловые нагрузки. Для улучшения условий работы экранной системы необходимо избегать включения нижних мазутных форсунок во время работы котла на щелоке, а пользоваться ими лишь в случае крайней необходимости. Для дополнительной выработки пара в котле следует использовать мазутные форсунки верхнего яруса.

Наиболее критическими, с точки зрения возникновения условий для взрывов от вспомогательного топлива, являются моменты розжига мазутных форсунок. Поэтому включение мазутных форсунок следует сокращать до минимума.

В топках СРК устанавливается устойчивый процесс горения щелоков без «подсветки» вспомогательным топливом при нагрузке выше 70 % от номинальной и теплоте сгорания щелока Q_i^r = 6900 – 7200 кДж/кг, что достигается упариванием щелока до содержания сухих веществ более 60 %. Поэтому для стабилизации режима горения необходимо предъявлять жесткие требования к работе выпарных установок с целью подачи щелока с мало колеблющимся содержанием сухих веществ на уровне 60 % (для агрегатов без газоконтактных испарителей) и не менее 50 % (для СРК с газоконтактными испарителями).

В настоящее время для безопасного сжигания вспомогательного топлива большое значение придается специальным системам защиты, связанным с обеспечением воспламенения вспомогательного топлива и обнаружением обрыва факела. Такими системами оснащены практически все СРК. Однако несмотря на то, что разработано и используется большое количество датчиков контроля, принцип действия которых основан на использовании свойств факела (световое и тепловое излучение, электропроводность и т. д.), проблема защиты от погасания мазутного факела не может считаться до конца решенной, особенно для «подсвечивающих» горелок. При работе мазутных форсунок необходимо поддерживать стабильные давление и температуру мазута перед форсунками, а также не допускать попадания в него воды, для чего мазут должен тщательно подготавливаться перед подачей в СРК. С целью эффективного смешения мазута с воздухом мазутные форсунки должны иметь независимый подвод воздуха.

В топке СРК должно быть обеспечено полное сгорание топлива, поэтому коэффициент избытка воздуха (за котельным пучком) следует поддерживать на уровне 1,2–1,25, что соответствует концентрации свободного кислорода в топочных газах 3,5–4 %.

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

В связи с этим необходим тщательный эксплуатационный уход за приборами контроля режима горения, для чего осуществляется систематическая проверка правильности работы стационарных газоанализаторов с помощью переносных химических анализаторов.

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 газовоздушного потока. Скорость истечения «верхнего» воздуха в топку следует поддерживать на уровне 40–50 м/с, что обеспечивается поддержанием давления в фурмах на уровне 2–3 кПа. Кроме того, в процессе работы котла необходимо следить за чистотой воздушных сопел.

Предотвращение взрывов в баке-растворителе плава достигается дроблением плава на мелкие фракции паром и зеленым щелоком, чтобы частицы плава успели охладиться до момента соприкосновения с жидкостью, находящейся в баке. При этом в баке должны обеспечиваться эффективное перемешивание зеленого щелока при помощи мешальных устройств и циркуляционных насосов и оттяжка образующихся парогазов в атмосферу. Необходимо также систематически очищать кожухи над летками плава, чтобы не допускать наслоений большого количества застывшего плава. Особое внимание следует уделять предотвращению забивания выходных отверстий леток плава, так как на поду топки накапливается большое количество плава, и при последующей пробивке пробки плав в большом количестве хлынет по летке в бак-растворитель, что может привести к сильным хлопкам и даже взрыву. Поэтому летки плава должны постоянно находиться под наблюдением обслуживающего персонала.

К основным контролирующим мероприятиям относятся:

- стабильная нагрузка котла и подача в топку щелоков с требуемой концентрацией сухих веществ;
- поддержание постоянного соотношения «щелок – воздух»;
- поддержание стабильного распределения дутьевого воздуха;
- периодическая очистка отверстий для выхода плава;
- полное выжигание подушки огарка во время останова котла.

Во избежание случайного разбавления щелока водой присоединение промывочной воды к бакам и щелокопроводам должно осуществляться путем установки двух вентилей и сигнального запорного органа между ними. При работе СРК вентили

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

должны быть закрыты, а сигнальный запорный орган открыт. Весьма важным является постоянный эксплуатационный контроль температуры металла барабанов и труб, поэтому целесообразным является оснащение СРК соответствующими средствами измерения (термопарами).

Конструкция самого агрегата может исключить некоторые причины, приводящие к возникновению взрывов, или существенно уменьшить их разрушительную силу. Экранирование топочной камеры гладкими трубами, расположенными с тесным шагом, или цельносварными панелями исключает разрушение труб от термоусталостного излома, характерное для плавниковых труб. Организация в топке так называемых раскрывающихся углов, выполняющих роль взрывных клапанов, уменьшает силу взрыва или хлопка в топке.

Большое значение придается быстрому спуску воды из котла. Это важнейшая операция при аварийном останове. Естественно, что спуск воды из котла нельзя производить через спускные устройства существующих конструкций, так как это требует ручных операций и нахождения персонала непосредственно на котле. Для спуска воды котел специально оборудуется соответствующими дренажными вентилями с дистанционным приводом.

В этом случае вероятность взрыва существенно уменьшается, но полностью не исключена, так как тепловая энергия, аккумулированная в плаве, может высвободиться со взрывом при контакте плава с водой, проникшей в топку. Существуют методы, заключающиеся во введении в нижнюю часть 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 на быстром охлаждении плава во всей его массе до взрывобезопасных пределов. Одним из таких ингибиторов является бикарбонат натрия. Предполагается, что, проникнув в огарок и слой плава, бикарбонат натрия термически разлагается, поглощая большое количество тепла, и это способствует охлаждению плава. Одновременно образуется большое количество инертных газов, способствующих созданию активных центров кипения в воде и кипящей оболочки на границе раздела «плав – вода».

Предлагаются также и другие вещества для ингибирования взрывов и интенсивного охлаждения плава, к которым относят

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

сульфат аммония и некоторые органические высокомолекулярные соединения, например, полиэтиленгликоль.

Для ингибирования взрыва рекомендуется применять водные растворы веществ, так как вода имеет большие удельную теплоемкость и теплоту испарения и хорошо охлаждает расплавленный материал.

Для этих целей лучше всего использовать сульфат аммония $(NH_4)_2SO_4$, который стабилен в растворе, коррозионно неопасен, нетоксичен, термостоек, имеет низкую температуру замерзания, дешев и легко хранится. Эксперименты с сульфатным плавом, имеющим температуру 800–900 °С, показали, что раствор, содержащий по массе 5–10 % $(NH_4)_2SO_4$, предотвращает взрыв. Исключение составляет расплав, содержащий большое количество сульфидов и хлористого натрия. В этом случае концентрация ингибирующего раствора должна быть выше. Оптимальной для всех случаев считается концентрация $(NH_4)_2SO_4$, составляющая 40 % по массе. Это максимальная концентрация сульфата аммония в воде. Необходимое количество раствора определяется размерами топки. Так, для топочной камеры размером 7,0×5,0 м требуется около 1 м^3 40 %-го раствора сульфата аммония. Практически раствор сульфата аммония может быть введен в топку набрызгиванием на под по всей его поверхности.

Основными условиями, предотвращающими взрывы в практике эксплуатации содорегенерационных котлоагрегатов, являются:

- безусловное выполнение действующих правил и директивных документов, направленных на обеспечение своевременного ремонта оборудования, чистоты внутренних поверхностей нагрева и контроля над состоянием металла;
- ведение процесса сжигания щелока в соответствии с режимно-технологическими картами;
- контроль над правилами сжигания вспомогательного топлива;
- повышение квалификации обслуживающего персонала.

Рекомендации по проектированию содорегенерационных котлоагрегатов

Специфические свойства отработанного сульфатного щелока, особенности технологических схем и их аппаратурного оформления обусловливают своеобразие тепловой схемы и компоновки СРК. Так как в настоящее время в отрасли для содорегенерационных

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

котлоагрегатов приняты средние параметры пара (4 МПа, 440 °С), вопросы проектирования рассматриваются применительно к СРК указанных параметров.

Расчетные температуры. Выбор температуры газов за экономайзером определяется аппаратурным оформлением технологической схемы. Наиболее эффективной в экономическом и экологическом смысле является технологическая схема СРК без газоконтактного испарителя с концентрированием щелока до требуемой сухости непосредственно на выпарной станции.

Температура газов за экономайзером СРК в схеме *без газоконтактного испарителя* должна находиться в пределах 165-185 °С. Температура газов ниже указанных пределов нецелесообразна, так как для охлаждения газов требуется существенное увеличение конвективной поверхности, и, кроме того, необходимо учитывать фактор минимального температурного напора. Повышение температуры сверх 190 °С ограничено условиями нормальной работы электростатических фильтров.

Для СРК *с газоконтактным испарителем* рекомендуемый диапазон температур газов за экономайзером 260-280 °С. При указанных температурах существенно сокращается поверхность экономайзера, и значительно улучшаются условия доупаривания щелока в газоконтактном испарителе.

Подогрев воздух в СРК до температуры 150-160 °С осуществляется в паровых или водяных воздухоподогревателях. При концентрации щелока до 62-65 % вполне достаточным оказывается указанный, относительно невысокий, подогрев воздуха.

Тепловая схема СРК отражает распределение общего тепловосприятия рабочей среды между отдельными поверхностями. Выбор рациональной последовательности размещения поверхностей нагрева вдоль потока дымовых газов и распределение приращения энтальпии рабочего тела по этим поверхностям составляют основу тепловой схемы.

В газовом тракте СРК можно выделить три зоны, различающиеся по способу передачи тепла и величине теплонапряжений поверхностей нагрева:

- *настенные экраны* топочной камеры, где тепло передается в основном радиацией, а средние тепловые потоки составляют 50-60 кВт/м^2;
- *ширмовые и фестонные* разреженные поверхности нагрева с высокой температурой омывающих их газов, где теплоотдача

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

происходит интенсивно как радиацией, так и конвекцией, а средние тепловые потоки имеют значение 12-15 кВт/м^2;

- *конвективные* поверхности нагрева в зоне относительно низких температур газов, где теплоотдача происходит в основном конвекцией с тепловыми потоками 4-6 кВт/м^2.

Доля тепла, передаваемая экранам в топочной камере СРК, определяется температурой газов на выходе из топки и составляет в большинстве случаев примерно 40 %. Температура газов на выходе из топочной камеры выбирается по условию предупреждения шлакования последующих поверхностей нагрева и составляет 860-900 °С.

При средних параметрах пара доля тепла, воспринимаемая пароперегревателем, составляет примерно 20 %, чему соответствует температура газов за пароперегревателем 560-600 °С.

Температура газов перед экономайзером не должна превышать 400-420 °С, что обусловлено как фактором предотвращения кипения воды в экономайзере, так и фактором уменьшения загрязнения его поверхности нагрева. Поэтому тепловосприятие дополнительной парообразующей поверхности, размещаемой между пароперегревателем и экономайзером, должно составлять примерно до 10-15 % полезного тепловосприятия в котле. Такими дополнительными поверхностями являются развитые конвективные пучки труб в двухбарабанных СРК или испарительные ширмы в СРК однобарабанной конструкции.

Водяной экономайзер – первая поверхность по ходу рабочей среды – является замыкающей поверхностью по тепловосприятию и получает остаток конвективного тепла после распределения его между другими поверхностями (экранами топки, пароперегревателем, котельным пучком). Однако при этом необходимо снизить температуру газов до заданных величин и одновременно обеспечить недогрев воды в экономайзере до кипения. В любом случае следует стремиться к минимизации поверхности, что может быть достигнуто повышением тепловой эффективности экономайзера, в частности – выбором наибольшего возможного температурного напора. В этом отношении весьма полезным может явиться обоснованное снижение температуры питательной воды до 105 °С, а также обязательное применение в схемах СРК без газоконтактного испарителя промежуточного охлаждения воды, проходящей через экономайзер.

В табл. 4 и 5 приведено распределение тепловосприятия по отдельным поверхностям нагрева СРК в увязке с величинами температур дымовых газов и рабочей среды и коэффициентов

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

теплопередачи для *двухбарабанного* СРК с конвективным пучком и *однобарабанного* СРК с испарительными ширмами.

Таблица 4

Распределение тепловосприятия в двухбарабанном СРК

	топка	фестон	паропе-регрева-тель	конвектив-ный пучок	экономайзер
Доля полезного тепловосприятия в котле, %	40	5	18	13	24
Температура газов, °С:					
- на входе	1299	860	803	595	420
- на выходе	860	803	595	420	167
Температура рабочей среды, °С:					
- на входе	256	256	256	256	120
- на выходе	256	256	440	256	229
Коэффициент теплопередачи, Вт/(м^2 ·К)	-	20,6	25,2	20,4	20,4

Таблица 5

Распределение тепловосприятия в однобарабанном СРК

	топка	фестон	паропе-регрева-тель	испари-тельные ширмы	экономайзер
Доля полезного тепловосприятия в котле, %	41	7	22	14	16
Температура газов, °С:					
- на входе	1350	942	858	583	398
- на выходе	942	858	583	398	179
Температура рабочей среды, °С:					
- на входе	256	256	256	256	145
- на выходе	256	256	440	256	222
Коэффициент теплопередачи, Вт/(м^2 ·К)	-	24,4	25,6	21,8	19,6

В экономайзере рассматриваемых агрегатов использовано промежуточное охлаждение воды, тепло которой идет на подогрев

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

дутьевого воздуха. При этом на подогрев воздуха расходуется примерно 12-15 % тепловосприятия экономайзера.

Особенности компоновки СРК и отдельных поверхностей нагрева. В содорегенерационных агрегатах применяется П-образная компоновка, при которой организуются два вертикальных газохода – подъемный (топочная камера) и опускной (конвективная шахта) – и соединяющий их горизонтальных газоход.

При развитом двухступенчатом вертикальном экономайзере в схеме двухбарабанного СРК без газоконтактного испарителя применяются две последовательно установленные опускные конвективные шахты, соединенные перепускным подъемным газоходом. В конвективных шахтах размещаются испарительные ширмы и две ступени вертикального экономайзера.

П-образная компоновка весьма рациональна и удобна тем, что подвод щелока и отвод дымовых газов располагаются внизу, в районе установки элементов схем подготовки щелока к сжиганию, золоуловителей и дымососов. При П-образной компоновке наиболее просто организовать паровую обдувку поверхности, размещенной в конвективной шахте.

Особенностью компоновки является то, что в СРК из-за заноса золой не применяются трубчатые воздухоподогреватели с традиционным их расположением в конвективной шахте. Достаточность невысокого подогрева дутьевого воздуха делает возможным применение на СРК вынесенных из газового тракта воздухоподогревателей, обогреваемых насыщенным паром или питательной водой.

Объем и лучевоспринимающая поверхность топочной камеры СРК определяются условием снижения температуры продуктов сгорания до 860 – 900 °С. Выбор сечения топочной камеры следует производить на основании апробированных в практике тепло-напряжений топочных камер и весовой нагрузки пода. В качестве расчетных могут быть приняты следующие значения: теплонапряжение по сечению топки $q_F = (1{,}7 – 2) \cdot 10^6$ Вт/м^2; массовая нагрузка пода $B_р / R = 560 – 620$ кг/(м^2·ч). Нижний предел относится к агрегатам производительностью не больше 350 т/сут по а.с.в. щелока, верхний – к агрегатам производительностью не меньше 1000 т/сут.

Объем топочной камеры при выбранном ее сечении определяет высоту топки и зависит от производительности агрегата и теплонапряжения топочного объема. В качестве расчетных могут быть приняты следующие значения теплонапряжения по объему

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

топочной камеры: $q_v = (90 – 110) \cdot 10^3$ Вт/м^3. Нижний предел относится к агрегатам производительностью не меньше 1000 т/сут по а.с.в. щелока, верхний – к агрегатам производительность не больше 350 т/сут. Необходимо отметить, что приведенные значения теплонапряжения объема топки СРК несколько меньше допустимых по условиям сгорания щелока и также зависят от выбранной температуры газов на выходе из топочной камеры.

Предпочтительной является топка квадратного сечения. Ширина горизонтального газохода и конвективной шахты принимается равной ширине топочной камеры. Ширину топочной камеры ограничивают факторы газового переноса и ухудшения организации аэродинамики топки. Увеличение ширины котла ограничено также требованиями обеспечения надежной очистки поверхностей глубоко-выдвижными обдувочными аппаратами, размещаемыми на боковых стенках котла, так как изготовление обдувочных аппаратов с большим ходом представляет значительные трудности.

Испарительные топочные экраны СРК с естественной циркуляцией, имеющие конструктивное оформление в виде вертикальных труб с параллельным их включением по всему периметру топки, следует выполнять из цельносварных газоплотных панелей. По условиям надежности циркуляции целесообразно применять трубы диаметром 57 - 63 мм. Качество котловой воды не влияет на выбор диаметра труб в указанных пределах. Шаг между трубами не должен превышать 75 мм.

Защитный фестон необходимо выполнять в виде ширм мембранной конструкции, расположенных в одной плоскости с ширмами пароперегревателя с шагом 400 – 420 мм. Защитный фестон является важным элементом котла, воспринимающим часть излучения из топки и снижающим температуру газов перед пароперегревателем.

Пароперегреватель следует выполнять в виде ширмовых поверхностей, составленных из труб диаметром 45–51 мм. Целесообразна разбивка пароперегревателя на три части. Соединение труб в ширмах должно обеспечивать возможность теплового перемещения труб. Уменьшение вышеуказанного расстояния между ширмами не рекомендуется по соображениям шлакования. Увеличение шага сопряжено со снижением тепловой эффективности поверхности пароперегревателя, размещаемой в зоне относительно невысоких температур 600 – 850 °С. Кипятильная поверхность нагрева является необходимой частью СРК среднего давления,

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

размещаемой между пароперегревателем и экономайзером в зоне температур 450 – 600 ˚С.

В двухбарабанном СРК кипятильную поверхность целесообразно компоновать в виде коридорно расположенных труб диаметром 51–64 мм с шагом между трубами в поперечном и продольном направлениях 130–150 мм. Меньший шаг относится к меньшему диаметру труб. Первые по ходу газа ряды труб (2 – 4 ряда) следует выполнять разреженными, с увеличением шага в поперечном направлении до 260 – 280 мм. С точки зрения уменьшения загрязнения котельного пучка предпочтительной представляется организация продольного смывания.

В однобарабанных котлах, имеющих ряд существенных преимуществ по сравнению с двухбарабанными, кипятильная поверхность может быть выполнена в виде испарительных элементов, размещенных с шагом 190–200 мм. В качестве испарительных элементов могут быть использованы цельносварные панели или плавниковые трубы.

При компоновке экономайзеров предпочтение следует отдавать экономайзерам вертикального типа. Для экономайзера целесообразно применять трубы диаметром 45–50 мм с продольным оребрением, позволяющим существенно развить тепловоспринимающую поверхность. Трубы экономайзера необходимо располагать в коридорном порядке с относительным поперечным шагом $S_1/d \geq 2{,}2$. В отдельных обоснованных случаях возможно применение экономайзеров горизонтального типа с коридорным расположением труб.

Газификация черного щелока

В настоящее время разрабатываются новые перспективные технологии, связанные с созданием улучшенных природоохранных технологий для производства высококачественной целлюлозно-бумажной продукции, которые приводят к снижению выбросов и экономии энергии.

Газификация черного щелока. Газификация является многообещающей технологией, удобной для использования на целлюлозных заводах и направленной на образование избытка электроэнергии. Производство горючего газа из различного топлива (уголь, отходы древесные, черный щелок) возможно с помощью различных вариантов газификации. Принцип газификации черного щелока заключается в пиролизе концентрированного черного щелока

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

с образованием неорганической и газовой фаз посредством взаимодействия щелока с кислородом (воздухом) при высоких температурах. Было предложено несколько вариантов процесса газификации черного щелока. Концептуально они делятся на два вида. Первый – газификация при относительно низких температурах. При этом газификатор работает при температуре ниже точки плавления неорганических солей (700-750 °С). Псевдоожиженные слои годятся для процесса низкотемпературной газификации и применяются во всех низкотемпературных процессах, находящихся в стадии разработки. Второй вид процессов газификации – это процессы, которые реализуются при температурах выше точки плавления, и в которых используется вода для охлаждения и растворения расплавленных солей натрия. Ниже описан один пример процесса такой газификации (процесс Chemrec).

Черный щелок после выпарной установки нагревается до 130-135 °С при использовании непрямого нагрева. Сухость упаренного черного щелока составляет примерно 65 %. Нагретый щелок далее поступает в первую часть процесса Chemrec, которая осуществляется в газификаторе.

Черный щелок поступает в газификатор (рис.48), где распыляется воздухом под высоким давлением (12 бар), и впрыскивается в верхнюю часть реактора. Основная часть воздуха, необходимого для процесса, предварительно нагревается с 80 до 500 °С и подается самостоятельно под давлением в 0,5 бар. В свободном объеме камеры температура примерно 950 °С, и распыленный черный щелок образует маленькие капли, которые частично сгорают. Неорганические соединения черного щелока превращаются в мельчайшие капли расплавленного карбоната натрия, и этот туман падает в нижнюю часть реактора, где расположен гаситель-холодильник, являющийся частью реактора. Органические соединения превращаются в горючий газ, содержащий оксид углерода, метан и водород.

Расплавленные капельки и горючий газ разделяются, когда они одновременно приводятся в непосредственный контакт с охлаждающей жидкостью в гасителе-холодильнике, в котором температура быстро снижается до 95 °С. Расплавленные капли растворяются, превращаясь в слабый раствор зеленого щелока, который откачивается в бак, расположенный под содорегенерационным котлом. Некоторое количество зеленого щелока рециркулирует, т.е. подаётся обратно в гаситель. До насоса

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

установлена сетка для улавливания небольших частиц и нерастворенных расплавленных капель.

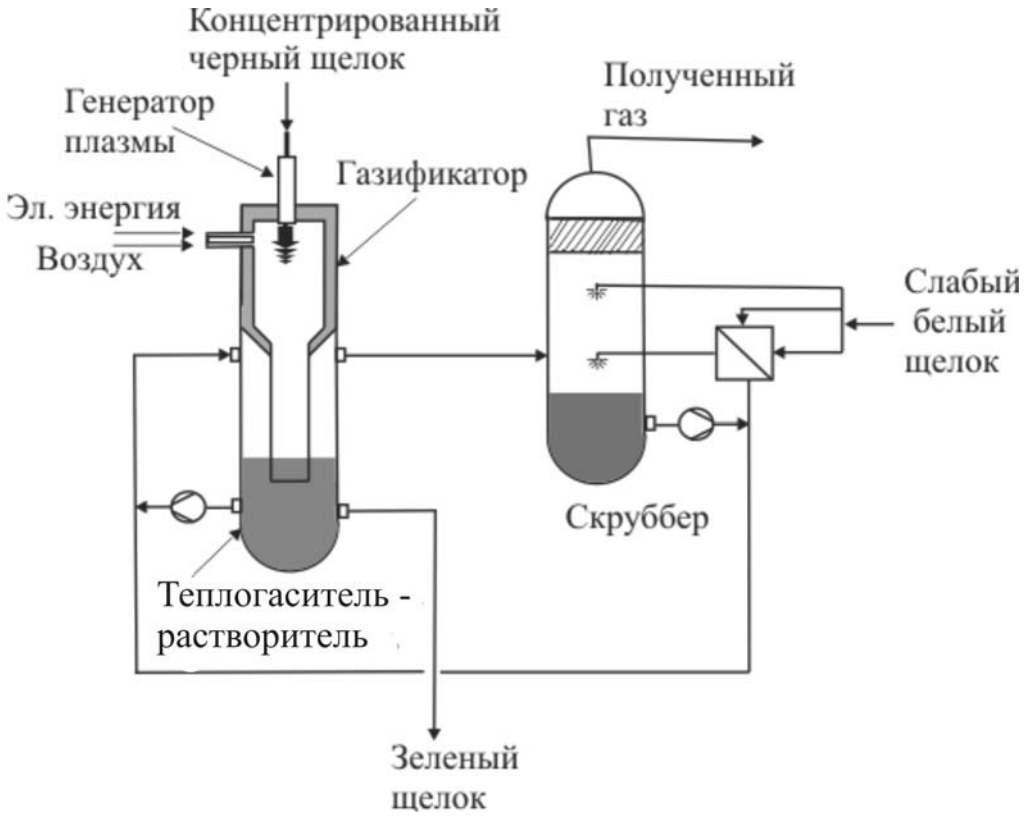


Рис.48. Процесс Chemrec с газификатором и теплогасителем-растворителем для получения зеленого щелока и со скруббером, орошаемым слабым щелоком для очистки газа от сероводорода

Одна из наиболее интересных возможностей, связанных с процессом газификации черного щелока, представляет собой работу газовой турбины в сочетании с паровой турбиной в объединенном цикле, как показано на рис. 49. Трудность, которую следует преодолеть, заключается, прежде всего, в чистоте газа, необходимой для предотвращения повреждений в газовой турбине.

Первая демонстрационная установка газификации черного щелока с использованием принципа Chemrec была введена в эксплуатацию на заводе Frovifors в Швеции в 1991 г. Показательный, работающий под давлением газификатор подобного типа также эксплуатировался в Стокгольме. Данный тип процесса уже используется в промышленном масштабе в США с 1997 г.

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

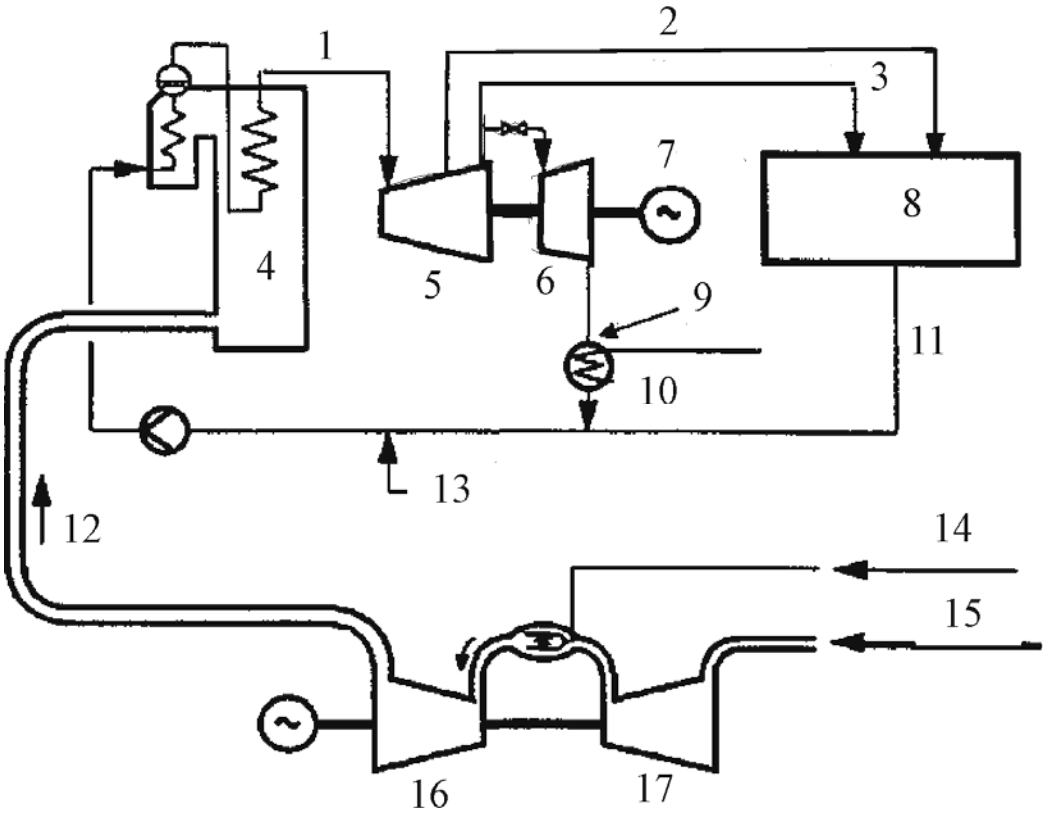


Рис.49. Объединенный цикл для производства энергии посредством газовой турбины и паровой турбиной противодавления с хвостовой конденсационной турбиной:
1 – перегретый пар; 2 – регулируемый отбор пара; 3 – пар противодавления; 4 – паровой котел; 5 – турбина противодавления с регулируемым отбором пара; 6 – хвостовая конденсационная турбина; 7 – генератор; 8 – процессы, потребляющие пар; 9 – конденсатор; 10 – охлаждающая вода; 11 – возвращенный конденсат; 12 – горючие газы; 13 – питательная вода, 14 – генерированный газ; 15 – воздух; 16 – газовая турбина; 17 – компрессор

Возможные преимущества газификаторов черного щелока:

• Повышение производства энергии посредством использования объединенного цикла (газовая турбина плюс паровая турбина). Теоретические расчеты баланса показывают, что утилизация черного щелока на основе этой технологии может привести к повышению энергетической эффективности, рассчитанной, исходя из теплотворной способности черного щелока, примерно на 30 %. Это можно сравнить с повышением на 12-13 % эффективности обычного содорегенерационного котла. Однако, в то же время, общая эффективность (электроэнергия + пар) снизится примерно на 5 % до показателя около 75 %. Таким образом, производство технологического пара снижается. В ситуации, когда имеется избыток пара, данный вариант является интересным при необходимости

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

повышенного производства электроэнергии, например, для использования вне предприятия.

- Низкие выбросы в атмосферу.

Определение состава минеральной части и особенности определения элементного состава органической части щелока

Материальный баланс содорегенерационного котлоагрегатапо натрию и сере

Тепловой баланс содорегенерационного котлоагрегата

, 4.

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие содорегенерационных котлоагрегатов идет в следующих основных направлениях:

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

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Библиографический список

Липовков И.З. Содорегенерационные котлоагрегаты.-М.: Лесная промышленность, 1968.-320 с.

Липовков И.З. Содорегенерационные котлоагрегаты.-М.: Лесная промышленность, 1977.-224 с.

Липовков И.З. Сжигание сульфатного щелока.-М.: Лесная промышленность, 1979.-128 с.

Непенин Ю.Н. Технология целлюлозы.-М..: Гослесбумиздат, 1963. Т.2. - 923 с.

Жучков П.А. Тепловые процессы в ЦБП.-М.: Лесная промышленность, 1978.-398 с.

Глейзер И.Ш., Башмаков Р.А., Куклев Ю.И. Энерготехнологические агрегаты сульфатного производства.-М.:Лесная промышленность, 1984.-184 с.

Глейзер И.Ш., Куклев Ю.И. Повышение эффективности энерготехнологического оборудования целлюлозно-бумажного производства.-М.:Лесная промышленность, 1990.-208 с.

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Оглавление

Предисловие 3
Общая характеристика процесса сульфатного производства 4
Теплофизические свойства черного щелока 7
Организация топочных процессов в СРК 13
Технологические схемы. Оборудование 20
Конструкции содорегенерационных котлов и вспомогательное оборудование 33
Подача и регулирование воздуха 66
Очистка газовых выбросов содорегенерационных котлоагрегатов 69
Технологические и конструктивные характеристики некоторых содорегенерационных котлоагрегатов 80
Оптимизация параметров сжигания щелока 94
Взрывобезопасность содорегенерационных котлоагрегатов 110
Рекомендации по проектированию содорегенерационных котлоагрегатов 122
Газификация черного щелока 127
Определение состава минеральной части и особенности определения элементного состава органической части щелока 132
Материальный баланс содорегенерационного котлоагрегата по натрию и сере 135
Тепловой баланс содорегенерационного котлоагрегата 141
Заключение 146
Приложение. Пример расчетов теплового и материального баланса СРК 147
Библиографический список 162

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Учебное издание

Смородин Сергей Николаевич
Иванов Александр Николаевич
Белоусов Владимир Николаевич

СОДОРЕГЕНЕРАЦИОННЫЕ КОТЛОАГРЕГАТЫ

Учебное пособие

Редактор и корректор Новикова Н.П.
Техн. редактор Титова Л.Я. Темплан 2010 г., поз. 45

Подп. к печати 08.11. 2010.
Формат 60х84 /16. Бумага тип. № 1. Печать офсетная.
Уч.-изд.л. 10,5. Усл.печ.л. 10,5 . Тираж 200 экз.
Изд. № 45 . Цена “С”. Заказ

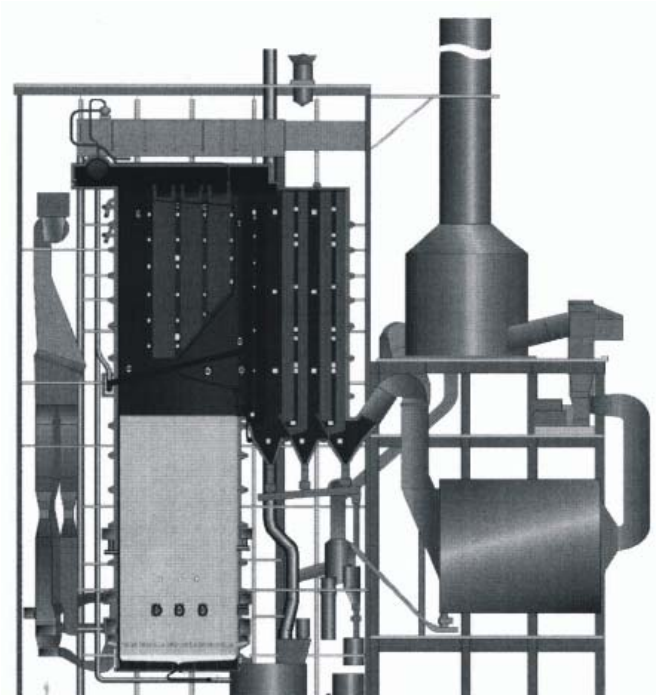
Ризограф ГОУВПО «Санкт-Петербургский государственный технологический университет растительных полимеров». 198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4.

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

С.Н. Смородин, А.Н. Иванов, В.Н. Белоусов

СОДОРЕГЕНЕРАЦИОННЫЕ КОТЛОАГРЕГАТЫ

Учебное пособие



Санкт-Петербург
2010

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Министерство образования и науки Российской Федерации

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Санкт-Петербургский государственный технологический университет растительных полимеров»

С.Н. Смородин, А.Н. Иванов, В.Н. Белоусов

СОДОРЕГЕНЕРАЦИОННЫЕ КОТЛОАГРЕГАТЫ

Учебное пособие

Санкт-Петербург
2010

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

ББК 35.77я7
С 516
УДК 676.05.013.6

Смородин С.Н., Иванов А.Н., Белоусов В.Н.

Содорегенерационные котлоагрегаты: учебное пособие / ГОУВПО СПб ГТУ РП. - СПб., 2010. -164 с.: ил. 50.

В пособии рассмотрены технологические схемы регенерационного цикла, конструктивные особенности СРК отечественного и зарубежного производства, вспомогательное оборудование. Приведены рекомендации по проектированию, эксплуатации и оптимизации процессов сжигания щелоков. Рассмотрены примеры расчетов материального и теплового балансов СРК.

Настоящее пособие предназначается для студентов всех форм обучения по специальностям 140104 «Промышленная теплоэнергетика» и 140105 «Энергетика теплотехнологий».

Рецензенты: д-р техн. наук, профессор кафедры теплотехники и теплоэнергетики Северо-Западного государственного технического университета **Каримов З.Ф.;**

канд. техн.наук, доцент, технический директор ООО «Гарант -Проект» **Мишин О.Н.**

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом университета в качестве учебного пособия.

© Смородин С.Н., Иванов А.Н., Белоусов В.Н., 2010
© ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный технологический университет растительных полимеров», 2010