

На правах рукописи

**Сморodin Сергей Николаевич**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТОПОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СЖИГАНИИ  
СУЛЬФАТНОГО ЩЕЛОКА В ВИХРЕВОЙ ТОПКЕ СОДОРЕГЕНЕРАЦИОННОГО  
КОТЛОАГРЕГАТА С ЦЕЛЮ ПОВЫШЕНИЯ ЕЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ**

Специальность: 05 14 04 – Промышленная теплоэнергетика

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург  
2000 г

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном технологическом университете растительных полимеров.

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор **П.А.Жучков**

Официальные оппоненты – доктор технических наук, профессор  
**С.М.Шестаков**;  
кандидат технических наук, доцент  
**Л.М.Исянов**

Ведущая организация: **ЗАО «Гипробум».**

Защита диссертации состоится в 14 часов 28 декабря 2000г. на заседании специализированного Совета К 063.24.02 при Санкт-Петербургском государственном технологическом университете растительных полимеров по адресу: 198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4, зал заседаний Ученого совета, ауд. А-233.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров.

Автореферат разослан «24» ноября 2000г.

Ученый секретарь специализированного Совета  
кандидат технических наук, доцент



А. Ф. Мурзич

A2000  
12717

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В отечественной целлюлозно-бумажной промышленности эксплуатируется большой парк отечественных и зарубежных сордорегенерационных котлоагрегатов. Все они имеют топку прямоугольного сечения, характеризуются большими (по сравнению с энергетическими котлами) размерами и низким тепловым напряжением. Процесс горения организован с подачей воздуха во второй или третий ярусы.

Исследования показали, что эксплуатируемые сордорегенерационные котлоагрегаты имеют следующие недостатки:

- неравномерность подготовки и степени выпорания капель шелока в объеме топки, обусловленную принятой аэродинамической схемой;
- низкую эффективность и высокую неполноту сгорания шелока, обусловленную тем, что при больших сечениях топочных камер СРК горизонтально направленные воздушные струи вторичного дутья даже при тангенциальной подаче воздуха не проникают в центральную часть топочного объема;
- неустойчивость процесса горения шелока, обусловленную рассредоточенной подачей дутьевого воздуха;
- большой вынос минеральных солей из топки в виде частиц, взвешенных в восходящем потоке газов, что создает дополнительные экологические трудности.

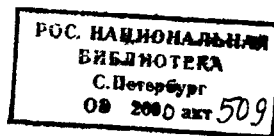
**Цель работы.** Разработка нового топочного устройства для сордорегенерационных котлоагрегатов, обеспечивающего повышение эффективности сгорания сульфатного шелока путем изменения схемы подачи вторичного воздуха.

Для достижения этой цели исследования проведены в следующих направлениях:

- исследование аэродинамики новой топочной камеры СРК,
- разработка методики расчета движения капель шелока в топочной камере;
- исследование кинетики выпорания шелока в условиях новой аэродинамической схемы;
- проверка полученных результатов на реконструированном СРК-200 с вихревой топочной камерой.

**Основные положения методики исследований.** Экспериментальные исследования проводились на реконструированном СРК-200 ТЭС-2 ОАО «Котласский ЦБК». Теоретические исследования выполнены с использованием рабочих гипотез, а также методов математического моделирования на ЭВМ.

Аналитическая обработка результатов проведена с помощью уравнений, полученных на основе кинетических закономерностей теории процессов воспламенения и горения влажных топлив с учетом специфики физико-химических процессов при горении шелока. Достоверность методики и результатов теоретического и экспериментального исследований обеспечена многократностью промышленных экспериментов, а также сравнением расчетных и эксплуатационных характеристик агрегатов.



**Научная новизна.** Впервые разработана методика расчета движения капель шелока в топке содорегенерационного котлоагрегата и методика расчета степени выгорания шелоковых капель, а также разработана новая аэродинамическая схема топки СРК.

**Автор защищает:**

- результаты экспериментального исследования топочных процессов на промышленном СРК;
- результаты анализа экспериментов по изучению топочных процессов при сжигании влажного сульфатного шелока и методы повышения эффективности режимов топок СРК;
- результаты исследования аэродинамики топок СРК и разработанную новую аэродинамическую схему топки.

**Практическая ценность.** Результаты исследований и их аналитическое описание позволили разработать условия оптимизации топочных процессов СРК. Разработанные рекомендации проверены на ряде промышленных агрегатов. При этом было достигнуто снижение химического и механического недожога органических веществ, увеличение полноты регенерации и уменьшение уноса химикатов дымовыми газами.

Разработана новая модель вихревой топки, конструкция которой защищена авторским свидетельством.

**Реализация работы в промышленности.** Автором разработаны условия оптимизации топочных режимов, позволяющие повысить тепловой КПД процессов выжига органических веществ и полноту регенерации химических реагентов, а также уменьшить унос из топки.

Оптимизация режимов сжигания и регенерации сульфатного шелока реализована на ТЭС-2 Котласского ЦБК, где разработанная новая модель вихревой топки воплощена в жизнь на реконструированном СРК-200

**Апробация работы.** Основные результаты работы автор докладывал на научно-технических конференциях:

- «Проблемы энергетики теплотехнологии», Всесоюзная конференция, Москва, 1987 г.;
- «О коренном улучшении использования топливно-энергетических ресурсов на предприятиях отрасли», Всесоюзный семинар, Волжск, 1988г.;
- «Теплообмен в парогенераторах», Всесоюзная конференция, Новосибирск, 1988г.;
- «Проблемы загрязнения и очистки наружных поверхностей нагрева паровых котлов», Республиканские конференции в Батуми в 1988, 1989 г г.;
- Научно-технические конференции профессорско-преподавательского состава ЛТИ ЦБП и ЛТА им.Кирова, 1988-89г г

**Публикации.** По результатам исследований опубликовано 19 печатных работ, получены 4 авторских свидетельства АС СССР № 1367573, 1988г.; АС СССР № 1558130, 1990г., АС СССР № 1617249, 1990г.; АС СССР №1617738, 1990г. , Патент № 2036949 РФ, 1995г.

Личное участие автора заключается в теоретическом описании топочных процессов в СРК, разработке режимов оптимизации топочных процессов, реализованных на ОАО «Котласский ЦБК», разработке и проведении промышленных испытаний, аналитической обработке экспериментов

Новая конструкция вихревой топки разработана в соавторстве с П.А. Жучковым и О.Д. Евсеевым.

**Структура и объем диссертации.** Работа состоит из введения, четырех глав, результатов исследований, 4 приложений, списка использованной литературы, включающего 93 наименования отечественных и зарубежных авторов. Содержит - 112 страниц основного печатного текста, 26 рисунков и таблицу

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** отмечены актуальность проблемы повышения эффективности процесса сжигания шелока в топках содорегенерационных котлоагрегатов за счет создания топочного устройства, основанного на вихревом способе движения потоков газозооушной смеси.

**В первой главе** выполнен обзор отечественной и зарубежной литературы по исследованию процессов сжигания и регенерации сульфатного шелока

Изучение иностранных литературных источников показывает, что в них, главным образом, приводится описание различных конструкций СРК и их эксплуатационных характеристик. Из числа отечественных исследований известны работы Жучкова П.А., Евсеева О.Д., Непенина Ю.Н., Волкова А.Д., Житкова В.В., Липовкова И.З. и др. В этих работах приведены результаты определения физических свойств шелока, изучения кинетики восстановления сульфата натрия, а также результаты пусконаладочных испытаний промышленных СРК. Основы теоретического анализа топочных процессов в СРК разработаны П.А. Жучковым

Однако дальнейшие исследования выявили ряд закономерностей, обусловивших необходимость уточнения и разработки новых математических моделей, положенных в основу теоретического анализа сложных взаимосвязанных термохимических процессов, имеющих место при сжигании и регенерации сульфатного шелока.

В результате анализа литературы была разработана программа исследований, сводящаяся к следующему:

- теоретическое исследование вихревого топочного устройства для сжигания черных сульфатных шелоков;
- экспериментальное исследование разработанного с участием автора вихревого топочного устройства для сжигания черных сульфатных шелоков для СРК-200, ОАО «Котласский ЦБК»;

- исследование аэродинамики газозвушной смеси и капель щелока, а также длительности подготовки капель щелока к горению;
- разработка рекомендаций для внедрения вихревого способа сжигания черных сульфатных щелоков на других СРК.

**Во второй главе** рассматриваются конструктивные и аэродинамические характеристики вихревой топки для сжигания щелока. Легкоплавкость минеральных веществ и длительность реакции восстановления сульфата натрия обуславливают возникновение факельно-слоевого топочного процесса.

В СРК применяется рассредоточенная подача щелока и воздуха. Основная часть горючих веществ сгорает в зоне подвода воздуха и жидкого щелока, в которой газозвушной 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 топki, в результате чего возникает значительный химический и механический недожог горючих веществ;
- обеспечиваются низкие удельные тепловые напряжения топочного объема; за пределы активной зоны горения выносятся мелкие оокосованные щелоковые частицы, увеличивается недожог топлива и потери химикатов;
- агрегаты оборудованы паровыми калориферами, которые обеспечивают нагрев воздуха до сравнительно низкой температуры (140-180 °С). 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 применяют сжигание вспомогательного топлива (газа или мазута).

На кафедре промышленной теплоэнергетики Санкт-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров разработана вихревая топка для сжигания и регенерации отработанных щелоков с сохранением факельно-слоевого способа сжигания. На рис.1 представлена схема вихревой топki содорегенерационного котлоагрегата. Топка представляет собой камеру прямоугольного сечения, нижняя часть которой расширена с образованием боковых карманов. На стенках карманов расположены сопла вторичного воздуха. Первичный воздух подается в нижнюю часть топki. Щелоковые форсунки устанавливаются на противоположных стенках топочной камеры.

Сущность предлагаемого метода основывается на принципиально новой аэродинамической схеме сжигания щелоков в пересекающихся струях с U-образным движением факела. При данной схеме струи распыленного щелока пересекаются воздушными струями, направленными на под топki. При пересечении топливных струй воздушный поток увлекает мелкие капли щелока, не требующие длительного времени на подготовку к воспламенению, в то время как крупные капли по инерции движутся в центральную зону топочного объема, откуда медленно опускаются вниз в восходящем потоке газов под воздействием гравитационных сил.

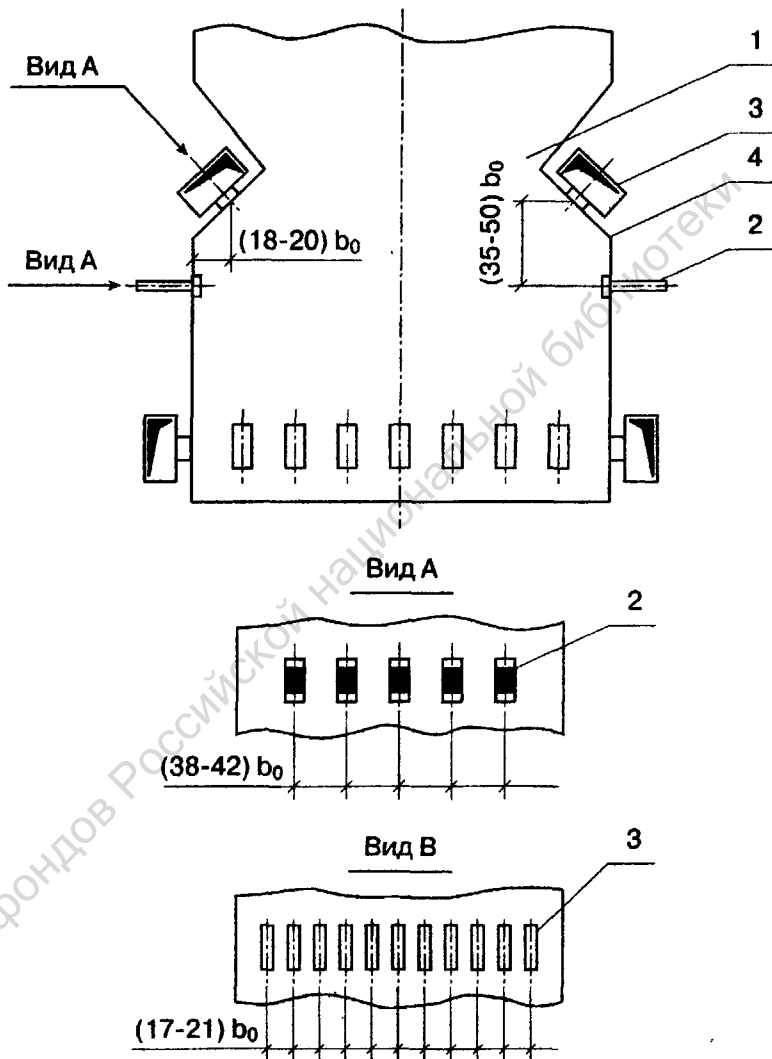


Рис. 1 Схема вихревой топки СРК

Таким образом, в пересекающихся струях происходит 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.

Далее во второй главе автор приводит анализ результатов испытаний традиционной топки СРК-200 ОАО «Котласской ЦБК», которые проводились в течение ряда лет кафедрой промышленной теплоэнергетики совместно с ПТП «Энергобумпром». Из анализа результатов исследований следует вывод: основной недостаток процесса горения – его неустойчивость, выражающаяся в снижении температуры в топочном объеме, в трудностях с выходом плава и восстановлением сульфата натрия. Кроме того, наблюдается значительный химический и механический недожог.

Для повышения устойчивости процесса горения сжигают вспомогательное топливо –мазут (постоянно работают 2-3 форсунки), что приводит к повышению температуры в топке, но вызывает повышенный золовой унос минеральных солей, образование содержащих серу соединений и повышенный расход топлива.

Для устранения имеющихся недостатков было предложено выполнить реконструкцию топочной камеры СРК-200 ОАО «Котласский ЦБК», которая заключалась в организации вихревого движения продуктов сгорания в активной части топочного объема

Оптимальным вариантом явилась реконструкция с выполнением выступов на фронтальной и задней стенах топочной камеры. Выступы были образованы гнутыми экранными трубами 60х5 мм в зоне вторичного дутья ( отметка 7983 мм) Была выполнена реконструкция воздухопроводов вторичного воздуха. Весь вторичный воздух подавался в топку с помощью 20 регулируемых сопел размером 220х56 ( по 10 на каждом выступе). Сопла устанавливались с шагом 560мм. Черный щелок подавался в топку содорегенерационного котлоагрегата щелочковыми форсунками диаметром 8-16 мм, расположенными по 4 на фронтальной и задней стенах топки.

Щелочковые форсунки установлены неподвижно на отметке 6850 мм. с шагом 910, 1050, 1680 мм. Третичное дутье отключено полностью, первичное дутье осталось без изменения.

Вторичный воздух на расстоянии 1,5м от выходного сечения сопел вторичного дутья ( отметка 7783мм.) образует сплошную плоскую струю. Эжектирующее действие этой струи вызывает подсос продуктов сгорания щелока к корню воздушной струи, образуя вихревое движение. Воздушные струи пересекают щелочковые, увлекают мелкие капли щелока в сторону пода, а более крупные покидают центральную зону топочного объема, подсушиваются и под действием гравитационных сил опускаются на слой огарка. Таким образом в топочном объеме обеспечивается сепарация щелочковых капель



**В третьей главе** изложены теоретические основы топочных процессов в СРК. Рассматривается аэродинамика щелочных капель и разрабатывается методика расчета, охватывающая все случаи движения капель щелока в топочном объеме СРК. При разработке методики расчета движения щелочных капель автором диссертации рассматривались три случая:

- нисходящее движение щелочных капель в восходящем потоке газов (противоток);
- восходящее движение капель в восходящем потоке дымовых газов (прямоток);
- нисходящее движение капель в восходящем потоке воздуха (для вихревой топки СРК).

В общем случае движение одиночной капли в газовой среде описывается уравнением

$$m \frac{dv}{dt} = \sum_{i=1}^n \vec{P}_i, \quad (1)$$

где  $m$  – переменная масса щелочной капли, движущейся со скоростью  $v$  под действием внешних сил, результирующая которых представлена вектором  $\vec{P}$ ,  $t$  – текущее время.

Пренебрегая силой Архимеда и реактивной силой применительно к движению щелочной капли в вертикальной плоскости, можно записать

$$\frac{m dv}{dt} = -C_f \frac{\pi d^2}{4} \rho_r \frac{(v_y + w_y)^2}{2} + mg, \quad (2)$$

где  $v_y$  – вертикальная составляющая скорости движения щелочной капли в топке СРК,  $w_y$  – вертикальная составляющая скорости движения дымовых газов;  $\rho_r$ ,  $\rho_k$  – плотность дымовых газов и плотность капли;  $d$  – диаметр щелочной капли,  $g$  – ускорение свободного падения,  $C_f$  – коэффициент формы.

Принимая  $a = \frac{3}{4} \frac{C_f}{d} \frac{\rho_r}{\rho_k}$ , после преобразований получим уравнение

$$\frac{dv_y}{g [a - (v_y - w_y)]} = -a \cdot dt. \quad (3)$$

Интегрируя это выражение, получим

$$\frac{1}{2} \frac{1}{\sqrt{\frac{g}{a}}} \ln \frac{\sqrt{\frac{g}{a}} + (v_y + w_y)}{\sqrt{\frac{g}{a}} - (v_y - w_y)} = -a \cdot t \quad (4)$$

С учетом того, что при  $t = 0$   $v_y = v_{oy}$ , уравнение принимает вид:

$$\frac{\left(\sqrt{\frac{g}{a}} + v_y + w_y\right) \cdot \left(\sqrt{\frac{g}{a}} - v_{oy} - w_y\right)}{\left(\sqrt{\frac{g}{a}} - v_y - w_y\right) \cdot \left(\sqrt{\frac{g}{a}} + v_{oy} - w_y\right)} = e^{-2\sqrt{g \cdot a} \tau} \quad (5)$$

Решая это уравнение относительно  $v_y$ , получим:

$$v_y = \frac{\left(\sqrt{\frac{g}{a}} + w_y\right) \cdot \left(\sqrt{\frac{g}{a}} - v_{oy} - w_y\right) e^{-2\sqrt{g \cdot a} \tau}}{\left(\sqrt{\frac{g}{a}} + v_{oy} + w_y\right) + \left(\sqrt{\frac{g}{a}} - v_{oy} - w_y\right) e^{-2\sqrt{g \cdot a} \tau}} - \frac{\left(\sqrt{\frac{g}{a}} - w_y\right) \cdot \left(\sqrt{\frac{g}{a}} - v_{oy} + w_y\right)}{\left(\sqrt{\frac{g}{a}} + v_{oy} + w_y\right) + \left(\sqrt{\frac{g}{a}} - v_{oy} - w_y\right) e^{-2\sqrt{g \cdot a} \tau}} \quad (6)$$

Принимая  $v_y = \frac{dy}{dt}$  и решая относительно  $y$ , получим

$$y - \frac{1}{a} \cdot \left( \frac{\sqrt{\frac{g}{a}} + v_{oy} + w_y}{2\sqrt{\frac{g}{a}}} + \frac{\sqrt{\frac{g}{a}} - v_{oy} - w_y}{2\sqrt{\frac{g}{a}}} e^{-2\sqrt{g \cdot a} \tau} \right) - \left( \sqrt{\frac{g}{a}} - w_y \right) \cdot \tau \quad (7)$$

Для восходящего прямого тока уравнение (1) имеет вид

$$\frac{m}{dt} \frac{dv_y}{dt} = C_f \frac{\pi d^2}{4} \cdot \rho_r \cdot \frac{(w_y - v_y)^2}{2} - mg \quad (8)$$

Решая данное уравнение, получим

$$v_y = \frac{\left(w_y - \sqrt{\frac{g}{a}}\right) \cdot \left(\sqrt{\frac{g}{a}} - v_{oy} + w_y\right) e^{-2\sqrt{g \cdot a} \tau}}{\left(\sqrt{\frac{g}{a}} - v_{oy} + w_y\right) + \left(\sqrt{\frac{g}{a}} + v_{oy} - w_y\right) e^{-2\sqrt{g \cdot a} \tau}} + \frac{\left(w_y + \sqrt{\frac{g}{a}}\right) \cdot \left(\sqrt{\frac{g}{a}} + v_{oy} - w_y\right)}{\left(\sqrt{\frac{g}{a}} - v_{oy} + w_y\right) + \left(\sqrt{\frac{g}{a}} + v_{oy} - w_y\right) e^{-2\sqrt{g \cdot a} \tau}} \quad (9)$$

$$y = \left( w_y - \sqrt{\frac{g}{a}} \right) \cdot \tau - \frac{1}{a} \ln \left( \frac{\sqrt{\frac{g}{a}} - v_{0y} + w_y}{2\sqrt{\frac{g}{a}}} + \frac{\sqrt{\frac{g}{a}} + v_{0y} - w_y}{2\sqrt{\frac{g}{a}}} e^{-2\sqrt{g \cdot a} \tau} \right) \quad (10)$$

Для нисходящего прямого уравнение (1) запишется в виде

$$\frac{m dv_y}{d\tau} = C_f \frac{\pi d^2}{4} \rho_r \frac{(v_y - w_y)^2}{2} - mg \quad (11)$$

$$v_y = \frac{\left( \sqrt{\frac{g}{a}} - w_y \right) \cdot \left( \sqrt{\frac{g}{a}} - v_{0y} + w_y \right) e^{-2\sqrt{g \cdot a} \tau}}{\left( \sqrt{\frac{g}{a}} + v_{0y} - w_y \right) + \left( \sqrt{\frac{g}{a}} - v_{0y} + w_y \right) e^{-2\sqrt{g \cdot a} \tau}} - \frac{\left( \sqrt{\frac{g}{a}} + w_y \right) \cdot \left( \sqrt{\frac{g}{a}} + v_{0y} - w_y \right)}{\left( \sqrt{\frac{g}{a}} + v_{0y} - w_y \right) + \left( \sqrt{\frac{g}{a}} - v_{0y} + w_y \right) e^{-2\sqrt{g \cdot a} \tau}} =$$

$$= -\frac{1}{a} \ln \left( \frac{\sqrt{\frac{g}{a}} + v_{0y} - w_y}{2\sqrt{\frac{g}{a}}} - \frac{\sqrt{\frac{g}{a}} + v_{0y} - w_y}{2\sqrt{\frac{g}{a}}} \cdot e^{-2\sqrt{g \cdot a} \tau} \right) - \left( \sqrt{\frac{g}{a}} + w_y \right) \quad (12)$$

При рассмотрении движения капли в горизонтальной плоскости применительно к топке СРК должны учитываться случаи, когда горизонтальная составляющая скорости газов меньше или больше скорости движения шлаковых капель в условиях прямого и для противоточного движения

В первом случае уравнение движения шлаковых капель будет иметь вид:

$$\frac{m dv}{d\tau} = -C_f \rho_r \frac{(v_x - w_x)^2}{2} \cdot \frac{\pi d^2}{4} \quad (13)$$

Решая это уравнение, получим

$$v_x = w_x + \frac{v_{0x} - w_x}{1 + a \tau (v_{0x} - w_x)} \quad (14)$$

$$x = w_x \tau + \frac{1}{a} \ln [1 + a \tau (v_{0x} - w_x)] \quad (15)$$

Уравнение движения капель для второго случая

$$\frac{m dv}{d\tau} = \rho_r \cdot C_f \frac{(w_x - v_x)^2}{2} \cdot \frac{\pi d^2}{4} \quad (16)$$

После решения оно примет вид

$$v_x = w_x - \frac{w_x \cdot v_{ox}}{1 + a \tau (w_x - v_{ox})} \quad (17)$$

$$x = w_x \tau - \frac{1}{a} \ln [1 + a \tau (w_x - v_{ox})] \quad (18)$$

Уравнение движения щелоковых капель для противотока

$$\frac{m dv}{dt} = -\rho_r \cdot C_f \frac{(w_x + v_x)^2}{2} \cdot \frac{\pi d^2}{4} \quad (19)$$

$$v_x = \frac{v_{ox} + w_x}{1 + a \tau (v_{ox} - w_x)} - w_x \quad (20)$$

$$x = \frac{1}{a} \ln [1 + a \tau (w_x + v_{ox})] - w_x \tau \quad (21)$$

Представленные выше уравнения охватывают все случаи движения капель щелока в топочном объеме СРК

Входящие в уравнения комплексы  $\sqrt{\frac{g}{a}}$ ,  $\sqrt{g \cdot a}$ ,  $a$  можно записать в виде

$$\sqrt{\frac{g}{a}} = v_B, \quad a = \frac{g}{v_B^2}, \quad \sqrt{g \cdot a} = v_B$$

где  $v_B$  – скорость витания капли щелока.

Далее во втором разделе третьей главы автор рассматривает кинетику нагрева и выгорания капли щелока в вихревой топке. Существующий метод расчета топок СРК требует существенной корректировки в условиях вихревого сжигания щелока. В третьей главе приведены последовательные стадии расчета, позволяющие определить степень выгорания капель щелока в зависимости от времени пребывания в топочной камере. Решая совместно уравнения кинетики горения и движения капель щелока, приведенные в разработанной автором методике расчета аэродинамики частиц сульфатного щелока в топочном объеме можно определить степень выгорания капель щелока по высоте топочной камеры для топок СРК.

В общем случае скорость сгорания капель щелока определяется уравнением

$$\frac{dm}{dt} = - \frac{f \rho_x C}{\left( \frac{1}{k_x} + \frac{1}{\alpha_m} \right) \chi} \quad (22)$$

где  $m$ ,  $f$  – масса и поверхность капли щелока;  $\rho_x$  – плотность кислорода;  $k_x$  – константа скорости химической реакции;  $\alpha_m$  – коэффициент массообмена;  $\chi$  – стехиометрический коэффициент реакции горения углерода;  $C$  – концентрация кислорода в потоке газозвушной смеси.

Исследования показали, что для капель щелока концентрация кислорода пропорциональна изменению толщины оболочки.

При прямомочном движении дифференциальное уравнение процесса горения капле щелока будет для кинетической области иметь вид:

$$d\tau_k = - \frac{\chi \rho_o \delta_o}{k_x \rho_n C (1-a)} \cdot \frac{d\Delta}{b+\Delta}, \quad (23)$$

для диффузионной области с учетом зависимости коэффициента массообмена  $\alpha_m$  от толщины оболочки

$$\frac{\alpha_m}{\alpha_{m0}} = \frac{\delta}{\delta_o} = \frac{1}{\Delta} \quad (24)$$

$$d\tau_d = - \frac{\chi \rho_o \delta_o}{\alpha_{m0} \rho_n C_o (1-a)} \cdot \frac{\Delta \cdot d\Delta}{b+\Delta}, \quad (25)$$

где  $b = \frac{C_a}{C_o - C_a}$ ,  $\Delta = \frac{\delta}{\delta_o}$ ,  $a = \frac{C_a}{C_o}$

Решение этих уравнений:  $\tau_k = A_k \ln \frac{b+1}{b+\Delta}$ ,  $(26)$

$$\tau_d = A_d \left( b \cdot \ln \frac{b+\Delta}{b+1} - \Delta + 1 \right) \quad (27)$$

Применительно к схеме противотока  $C = C_a + (C_o - C_a)(1 - \Delta)$  или

$$C = (d - \Delta)(1 - a) \cdot C_o, \text{ где } d = b + 1$$

При этом дифференциальные уравнения горения имеют вид:

$$d\tau_k = - A_k \cdot \frac{d\Delta}{d-\Delta}, \quad (28)$$

$$d\tau_d = - A_d \cdot \frac{d\Delta}{d-\Delta}, \quad (29)$$

решение их:  $\tau_k = A_k \ln \frac{d-\Delta}{d-1}$ ,  $(30)$

$$\tau_d = A_d \left( d \cdot \ln \frac{d-\Delta}{d-1} + \Delta - 1 \right) \quad (31)$$

В промежуточной области интенсивность гетерогенной реакции определяется уравнением:

$$\frac{dm}{d\tau} = \frac{1}{\frac{1}{k_x} + \frac{1}{\alpha_m}} \cdot C_{об}, \quad (32)$$

где  $\frac{dm}{d\tau}$  – скорость реакции по кислороду.

Данное уравнение может быть представлено в следующем виде:

$$\frac{dm}{dC_{об}} \left( \frac{1}{k_x} + \frac{1}{\alpha_m} \right) = dt \quad (33)$$

$$\text{или} \quad d\tau = \frac{1}{k_x} \cdot \frac{dm}{dC_{об}} + \frac{1}{\alpha_m} \cdot \frac{dm}{dC_{об}} = d\tau_k + d\tau_d \quad (34)$$

Здесь  $\tau_k$ ,  $\tau_d$  - условное время, определяемое кинетическим и диффузионным сопротивлением и рассчитываемое по уравнениям горения для соответствующей области.

Введение понятия условного времени позволяет выполнить расчеты суммарного времени сгорания капель щелока в промежуточной области.

Тогда для условий прямотока уравнение горения будет иметь вид:

$$\tau_{пр} = (A_k - A_d \cdot b) \ln \frac{b+1}{b+\Delta} - A_d \Delta + A_d \quad (35)$$

для условий противотока:

$$\tau_{прт} = (A_k + A_d \cdot d) \ln \frac{d-\Delta}{d-1} - A_d + A_d \Delta \quad (36)$$

Решая эти уравнения относительно  $\Delta$ , можно получить зависимость для определения степени выгорания капель щелока в промежуточной области

$$\Delta_{прт} = d - (d-1) \cdot e^{\frac{\tau + A_d - A_d \Delta}{A_k + A_d d}} \quad (37)$$

$$\Delta_{пр} = \frac{e^{\frac{\tau + A_d - A_d \Delta}{A_k - A_d b}}}{b+1} - b \quad (38)$$

**В четвертой главе** изложены результаты промышленных исследований СРК-200 с вихревой топкой ОАО «Котласский ЦБК», приведена методика проведения промышленных исследований и условия выполнения испытаний, которые охватывали широкий диапазон нагрузок (59-125% от номинальной). В зависимости от нагрузки изменялось количество, производительность и расположение щелочных форсунок на фронтальной и задней стенах топочной камеры. В процессе проведения исследований изменялся и диаметр форсунок  $\varnothing 14 \div 18$  мм.

Для определения эффективности вихревого топочного устройства сравнивались следующие показатели работы:

- изменение температуры по высоте топочной камеры;
- изменение коэффициента полезного действия для различных режимов работы СРК;
- концентрации загрязняющих выбросов в дымовых газах;
- степень восстановления сульфата натрия и сульфидность плава

Программа испытаний приведена в Приложении 3, сводная таблица результатов испытаний представлена в Приложении 4 диссертации.

Во всех сериях испытаний на СРК сжигался черный шлоко картонобумажного производства с периодическим подмешиванием черного шлока производства сульфатной беленой целлюлозы или полным переходом на сжигание последнего. Этим обстоятельством обусловлено колебание качества черного шлока из-за изменения содержания минеральной части от 35 до 45 % сухой массы шлока, что вызывало изменения низшей теплоты сгорания сухой массы шлока от 11288 кДж/кг до 14610 кДж/кг. С учетом изменения влажности черного шлока, поступающего с выпарной станции, от 47 до 54 % низшая теплота сгорания рабочей массы шлока составляла 4898-6331 кДж/кг. Совместно с черным шлоком сжигался мазут, доля которого по теплоте составляла от 0 до 15% для реконструированного СРК и 19-30% для СРК с обычной топкой.

Как показали результаты измерения температуры по высоте топочной камеры, во всем диапазоне нагрузок наличие пережима сократило прямое излучение теплоты в верхнюю часть топки, что привело к снижению температуры газов на выходе из топки. Это является благоприятным фактором для предотвращения шлакования и для оптимизации температурных условий работы пароперегревателя ( рис. 2).

Температура газов на выходе составляет 1130, 1080, 1040К в зависимости от нагрузок, что на 50-70 градусов ниже, чем до реконструкции. Максимум температуры на уровне первичного дутья снижается с 1470 до 1390-1400К, что приводит к снижению эмиссии соединений натрия из плава. Из теплового баланса СРК до и после реконструкции видно, что КПД «брутто» котлов изменялся в больших пределах, при этом для реконструированного СРК он составлял 72-82 %, а для СРК с обычной топкой 69-77 %. Это обуславливается прежде всего потерями теплоты с уходящими газами, которые в зависимости от коэффициента избытка воздуха составляют от 7,5 до 16 % (рис.3, 4).

Как видно из рис.4, при вихревом сжигании шлока потери теплоты с химическим недожогом снижаются в среднем в 3-5 раз и составляют 0,15-0,34 %

Анализ запыленности дымовых газов и газообразных примесей выполнялся совместно с ПТП «Энергобумпром» с использованием утвержденных методик отбора и анализа (рис.5, 6, 7).

Концентрация пылевого уноса перед каскадным испарителем для реконструированного СРК составляет 0,97-2,7 г/м<sup>3</sup>, для СРК с обычной топкой 2,58-4,68 г/м<sup>3</sup>.

Результат газового анализа показал, что до каскадного испарителя содержание выбросов составляет, г/м<sup>3</sup>

	<u>ст. №3</u>	<u>ст. №4</u>
метилмеркаптан	0,0025	0,0067
сероводород	---	---
сернистый ангидрид	0,107-0,161	0,080
окислы азота	0,0045-0,107	0,095
окись углерода	0,006-0,002	0,047

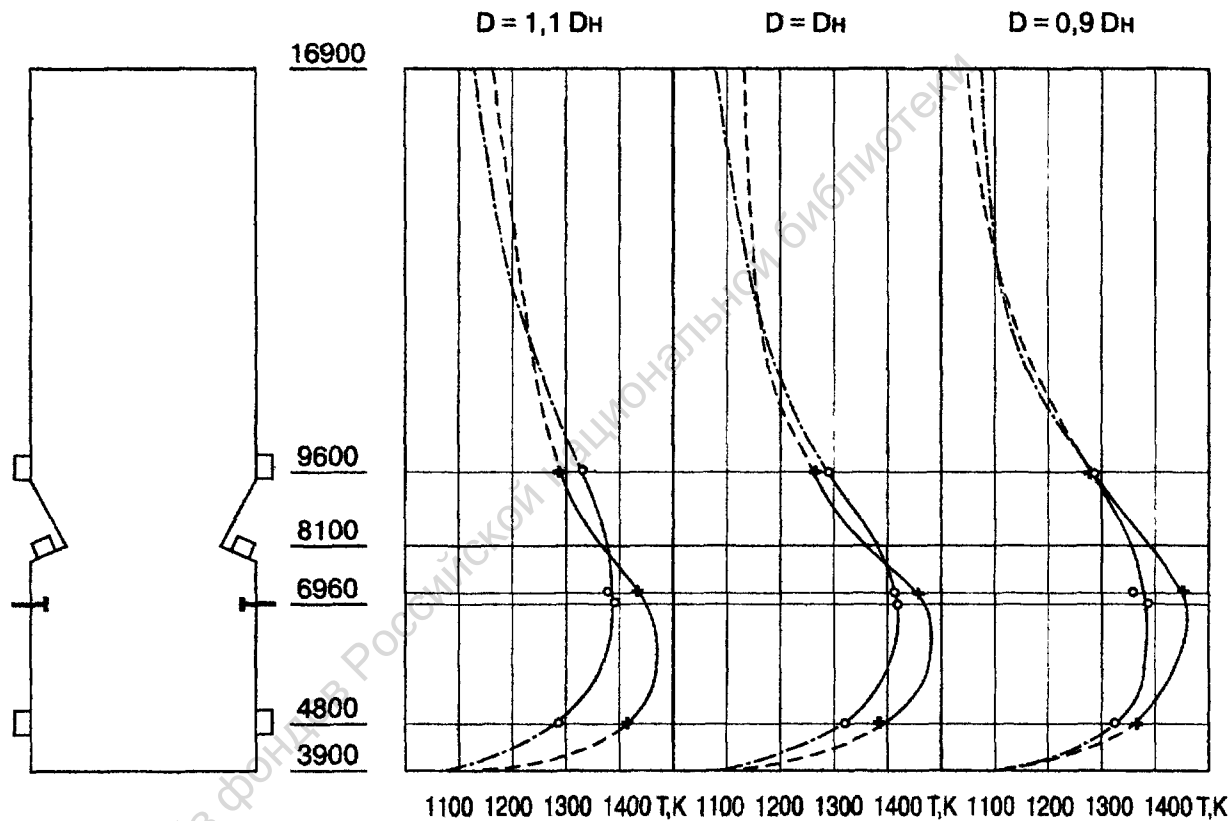


Рис.2. Изменение температуры газов по высоте топочной камеры в зависимости от нагрузки:  
 x – до реконструкции; o – после реконструкции



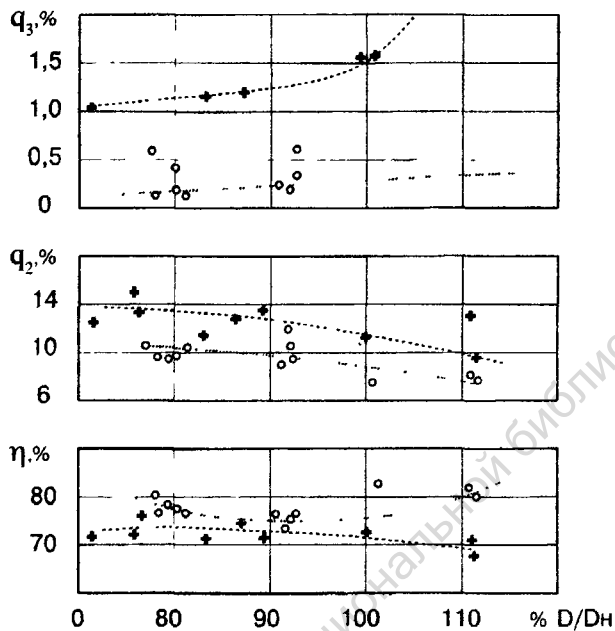


Рис 3 КПД котлоагрегата, потери теплоты химическим недожогом  $q_3$  и уходящими газами  $q_2$  в зависимости от нагрузки котлоагрегата: х, о – до и после реконструкции

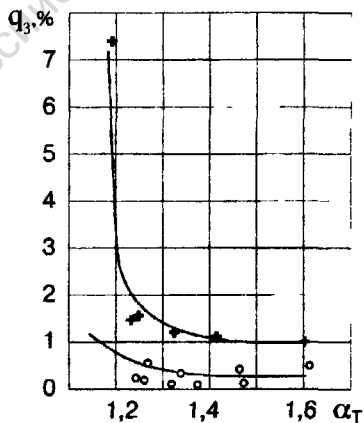


Рис.4. Потери теплоты с химическим недожогом  $q_3$  в зависимости от коэффициента избытка воздуха: х, о - до и после реконструкции

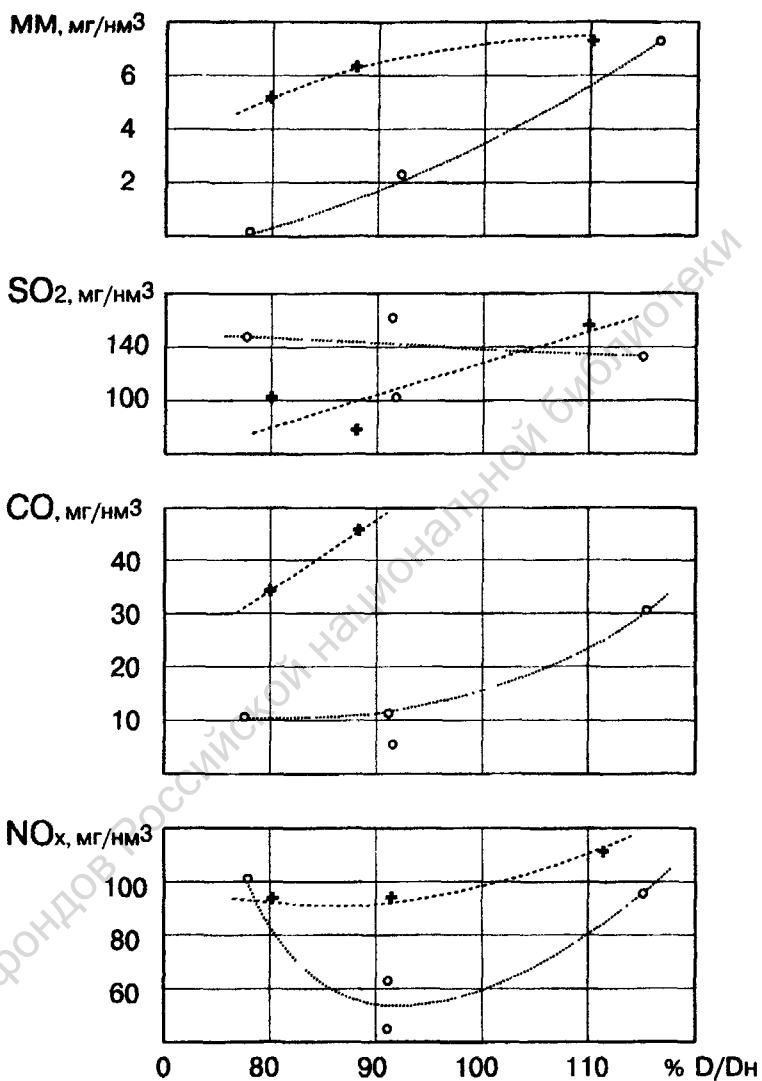


Рис 5. Изменение концентрации метилмеркаптана MM, сернистого ангидрида SO<sub>2</sub>, окиси углерода CO и окислов азота NO<sub>x</sub> в зависимости от нагрузки котлоагрегата:  
 x – до реконструкции; o – после реконструкции

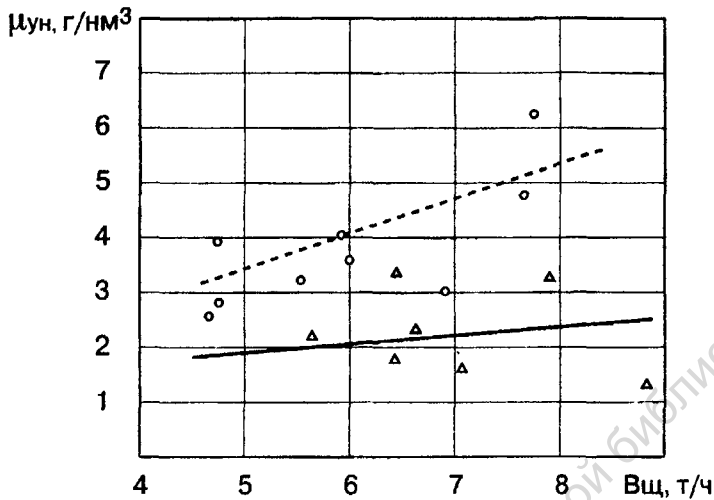


Рис 6. Изменение концентрации пылевого уноса в зависимости от расхода щелока. ----- до реконструкции; — после реконструкции

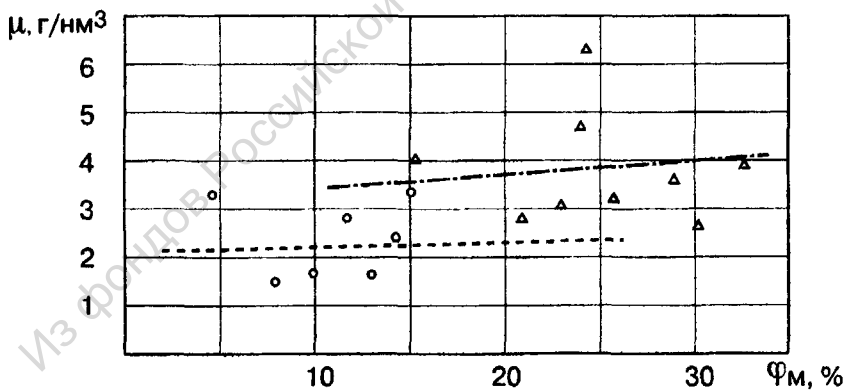


Рис.7 Изменение концентрации пылевого уноса в зависимости от доли сжигаемого мазута.  
- · - до реконструкции; - - - - после реконструкции

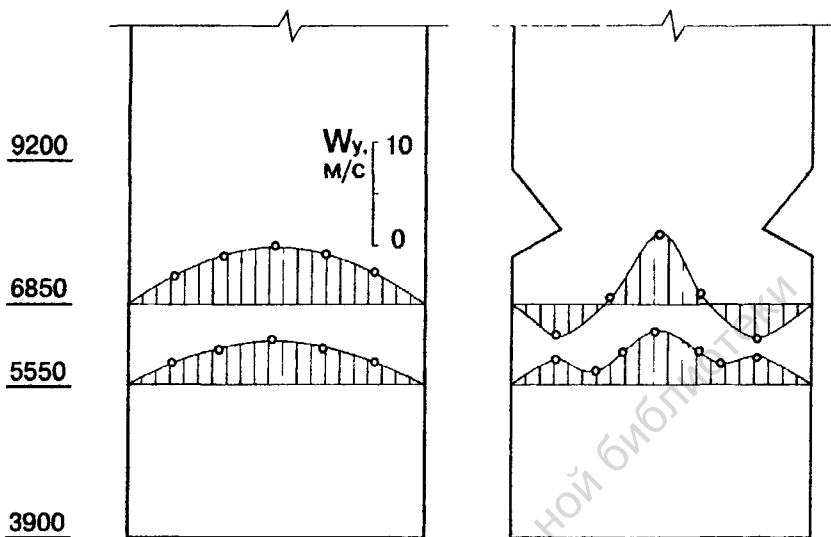


Рис 8. Изменение вертикальной составляющей скорости газов  $W_y$  до и после реконструкции

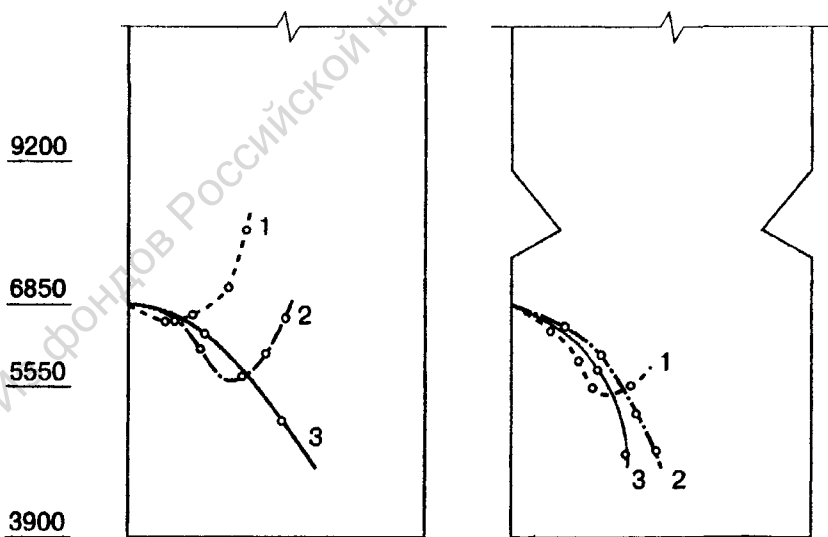


Рис.9 Траектория движения капель шелока в топке СРК до и после реконструкции: 1,2,3 – диаметр капель соответственно 1,2,3 мм

В процессе испытаний была отмечена тенденция к увеличению сопротивления газового тракта СРК с обычной топкой от  $57-60 \text{ кг/м}^2$  до  $70-77 \text{ кг/м}^2$  при одинаковой периодичности включения обдувочных аппаратов (один раз в сутки).

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

Результаты исследования аэродинамики вихревой и обычной топки СРК приведены в виде графиков (рис. 8,9).

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

1. Разработан новый тип вихревой топки содорегенерационного котлоагрегата (А.с.№1558130), обеспечивающий повышение теплового КПД и уменьшающий потери химикатов.
2. Разработана методика расчета движения щелоковых капель, которая учитывает изменение скорости витания капли в процессе горения
3. Получены уравнения для расчета процесса выгорания щелоковых капель в топке, на основании которых можно выполнять позонный расчет топочных камер СРК
4. Выполнены исследования аэродинамики топочной камеры СРК-200 до и после реконструкции.
5. Проведены сравнительные промышленные испытания СРК с обычной и вихревой топками, которые показали преимущества вихревого способа сжигания шелока. Значительно снизились потери теплоты с химическим недожогом, уменьшился вынос минеральных солей из топки СРК, концентрация пылевого уноса снизилась в среднем с  $4,5$  до  $2,0 \text{ г/м}^3$ . Снижение температуры газов на выходе из топки способствовало снижению шлакования пароперегревателя. Анализ дымовых газов показал снижение концентрации выбросов метилмеркаптана и окислов азота при вихревом сжигании шелока. В вихревой топке обеспечивался устойчивый процесс горения шелока без подсветки мазута.
6. Разработанная схема топки с вихревым сжиганием черного сульфатного шелока рекомендуется для внедрения в целлюлозно-бумажной промышленности

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. А с № 1367573 СССР. Способ управления процессом восстановления сульфата натрия в содорегенерационном котлоагрегате / О.Д.Евсеев, С.Н.Сморodin, Б.В.Степанов, А.Д.Волков. Опул. 1988. Бюл №2
2. Евсеев О.Д., Смородин С.Н., Степанов Б.В. Исследование влияния вихревого способа сжигания сульфатных шелоков на образование отложений на поверхностях нагрева содорегенерационных котлоагрегатов // Проблемы загрязнения и отметки наружных поверхностей нагрева паровых котлов. Тез. докл. Республ. конф./ Батуми, 1988.
3. Жучков П.А., Евсеев О.Д., Смородин С.Н., Степанов Б.В. Исследование аэродинамики вихревой топки содорегенерационного котлоагрегата // Теплообмен в парогенераторах :Тез. докл. Всесоюз. конф. /Новосибирск, 1988.

4. Жучков П.А., Евсеев О.Д., Смородин С.Н. Сжигание сульфатных щелоков в пересекающихся струях // О коренном улучшении использования топливно-энергетических ресурсов на предприятиях отрасли: Тез. докл. Всесоюз. сем / Волжск, 1988.
- 5 Жучков П.А., Евсеев О.Д., Смородин С.Н. Использование вторичных топливных ресурсов в целлюлозно-бумажном производстве // Проблемы энергетики теплотехнологии Тез докл Всесоюз. конф./ Москва, 1987.
- 6 Евсеев О.Д., Смородин С.Н., Степанов Б.В. Исследование процессов горения смеси сульфатных и сульфитных щелоков // Проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов на предприятиях и ТЭС: Межвуз. сб науч тр./ ЛТА. Ленинград, 1988.
- 7 Волков А.Д., Евсеев О.Д., Смородин С.Н., Степанов Б.В. Устойчивость процесса сжигания и регенерации сульфатного щелока в топках СРК // Проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов на предприятиях и ТЭС: Межвуз. сб. науч тр / ЛТА. Ленинград, 1988.
- 8 Жучков П.А., Евсеев О.Д., Смородин С.Н. Влияние режимных и аэродинамических факторов на устойчивость топочных процессов // Проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов на предприятиях и ТЭС: Межвуз сб. науч тр./ ЛТА. Ленинград, 1989
- 9 Жучков П.А., Евсеев О.Д., Смородин С.Н., Алексеев Е.В. Вихревое сжигание сульфатного щелока // Бумажная промышленность, 1989 № 2
10. Жучков П.А., Евсеев О.Д., Смородин С.Н., Алексеев Е.В. Исследование аэродинамики вихревой топки СРК-200// Целлюлоза, бумага, картон. 1989 №14
- 11 А с № 1558130 СССР Топка сорегенерационного котлоагрегата / П.А. Жучков, О.Д. Евсеев, С.Н. Смородин Огубл. 1990 Бюл №9
12. Смородин С.Н., Евсеев О.Д. Математическая модель аэродинамических частиц сульфатного щелока в топочном объеме СРК // Проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов на предприятиях и ТЭС: Межвуз. сб. науч. тр / ЛТА. Ленинград, 1990
- 13 Волков А.Д., Евсеев О.Д., Смородин С.Н. Кинетика физико-химических процессов при сжигании смеси щелоков// Проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов на предприятиях и ТЭС: Межвуз сб науч тр / ЛТА. Ленинград, 1990.
- 14 Смородин С.Н. Кинетика процесса горения сульфатного щелока в вихревой топке СРК // Проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов на предприятиях и ТЭС: Межвуз сб. науч. тр./ ЛТИ ЦБП. Ленинград, 1991.
15. Евсеев О.Д., Смородин С.Н., Волков А.Д. Термографическое исследование целлюлозных щелоков // Проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов на предприятиях и ТЭС: Межвуз. сб. науч тр / ЛТИ ЦБП. Ленинград, 1992.
16. Кучин В.А., Смородин С.Н. Очистка паргазовых выбросов растворителей плава СРК от взвешенных частиц в мокром волокнистом фильтре// Проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов на предприятиях и ТЭС: Межвуз. сб. науч. тр./ ЛТИ ЦБП Ленинград, 1992.
17. А.с. № 1617249 СССР Топка сорегенерационного котла / П.А. Жучков, О.Д. Евсеев, С.Н. Смородин, Б.В. Степанов. Огубл. 1990. Бюл. №48.

18 А с. № 1617738 СССР. Способ предотвращения загрязнений поверхности нагрева содорегенерационного котлоагрегата / О.Д.Евсеев, С.Н.Сморозин, А.Д.Волков. Оpubл. 1990. Бюл. №48, ДСП.

19 Патент № 2036949 РФ. Способ получения древесного угля / О.Д.Евсеев, С.Н.Сморозин, А.Д.Волков. Оpubл. 1995 Бюл. №41.

Из фондов Российской национальной библиотеки

-12717  
A2000  

---

12717

Из фондов Российской национальной библиотеки

**БЕСПЛАТНО**

---

Подп. к печати 23.11.2000г. Формат 60x84/16. Бумага тип.1

Печать офсетная. Усл.печ.л. 1,0. Тираж 100 экз.

---

Ризограф Санкт-Петербургского государственного технологического  
университета растительных полимеров. 198095, СПб, ул.И.Черных,4