

На правах рукописи

СУСЛОВ
Вячеслав Александрович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ВЫПАРИВАНИЯ ОТРАБОТАННЫХ ВАРОЧНЫХ
РАСТВОРОВ ЦЕЛЛЮЛОЗНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Специальность: 05.14.04 – промышленная теплоэнергетика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ - 2006

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный технологический университет растительных полимеров» на кафедре промышленной теплоэнергетики, Санкт-Петербург.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук

доктор технических наук, профессор

доктор технических наук, профессор

М.А. Готовский

Л.В. Зысин

О.П. Иванов

Ведущая организация – Всероссийский научно-исследовательский институт целлюлозно-бумажной промышленности.

Защита состоится 28 февраля 2006 года в 10 часов на заседании диссертационного Совета Д 212.229.04 в ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу:

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29
в ауд. 411 ПГК

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан «25» января 2006 г.

Отзыв на автореферат, заверенный печатью учреждения, в двух экземплярах просим направлять по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Факс: (812)5521630

E-mail^kg@kg1210.spb.edu

Ученый секретарь
диссертационного совета

К.А. Григорьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В схеме оборота химикатов при производстве целлюлозы выпарная станция (ВС) – важное звено, крупное самостоятельное технологическое подразделение, подготавливающее отработанные после варки древесной щепы черные щелока к сжиганию в процессе их регенерации. Эффективная и надежная работа ВС обеспечивает бесперебойный оборот химикатов, участвующих в процессе производства целлюлозы, снижение ее себестоимости, улучшение экологической обстановки региона, экономию энергоресурсов, а также устойчивость производственного цикла целлюлозно-бумажного комбината (ЦБК) в целом. Поэтому работы, направленные на повышение надежности работы ВС, ее производительности являются актуальными.

В настоящее время в основном применяются сульфатный и сульфитный способы получения целлюлозы. Доля сульфатной целлюлозы от общего объема ее производства составляет около 90 %. В соответствии с этим в настоящей работе рассматриваются вопросы тепловых и гидродинамических процессов при выпаривании черного сульфатного щелока и водного предгидролизата на выпарных станциях сульфат-целлюлозных заводов.

Процесс выпаривания отличается значительной сложностью, поскольку представляет собой комплекс разнородных и по своей природе трудно исследуемых явлений. Многие режимные параметры и конструктивные факторы влияют на отдельные стороны процесса выпаривания в противоположных направлениях. В этих условиях существует необходимость применения точных методов измерений, возможных лишь на лабораторных стендах. Выпаривание сопровождается накипеобразованием. Интенсивность образования накипи зависит от управления всем процессом получения целлюлозы. При этом термическое сопротивление накипи на отдельных ВС составляет более 50 % от полного термического сопротивления теплопередаче и является существенным тормозом увеличения производительности ВС, всего ЦБК. Несмотря на это, имеется весьма ограниченное количество исследований, посвященных данной проблеме, вследствие отсутствия достаточных и проверенных данных по теплообмену при выпаривании отработанных варочных растворов ЦБК, на основе которых определяется термический коэффициент накипеобразования.

Критериальные полуэмпирические зависимости для расчета теплоотдачи в оптимальных режимах при кипении в трубах получены рядом исследователей на основании теории подобия. Выполненный анализ некоторых критериальных уравнений показал, что распространение зависимостей, полученных для конкретных сред и условий, на область кипения отработанных варочных и других пенообразующих растворов ЦБК неправомерно. Поэтому особую актуальность приобретает разработка вопросов теории теплообмена при выпаривании многокомпонентных, пенящихся отработанных растворов ЦБК на основе новых физических экспериментально полученных представлений, оптимизации температурного и гидравлического режимов, схем выпаривания. Применение разработанного программного метода теплового расче-

та на базе аналитических и экспериментальных исследований позволило обеспечивать наиболее производительные и экономичные режимы работы ВС.

Работа выполнялась в рамках региональной программы фундаментальных и прикладных исследований по проблеме комплексного использования и воспроизводства лесных ресурсов на 1965 - 1990 гг. АН СССР по теме «Исследование процессов и разработка новых видов оборудования для производства бумаги и картона», в рамках общесоюзной научно-технической программы Минлеспрома СССР по созданию и внедрению новой техники и технологии и государственной научно-технической программы "Комплексное использование и воспроизводство древесного сырья" 1991-1996 гг.

В работе приведены результаты исследования промышленных ВС, из анализа которых получены данные по теплообмену при выпаривании сульфатных щелоков. Опыт, накопленный в период промышленных исследований, позволил спроектировать и осуществить монтаж стендовых и пилотных установок с геометрическими размерами кипяtilьных труб, равными размерам труб промышленных выпарных аппаратов (ВА). На стендах проведены экспериментальные исследования различных сторон выпаривания растворов в условиях, близких к условиям работы промышленных ВА во всем диапазоне режимов их работы. Приведенные зависимости позволяют определить значение любой составляющей общего термического сопротивления теплопередаче в ВА и оценить эффективность мероприятий по интенсификации теплообмена. В работе приводятся результаты исследований в области гидродинамики и теплообмена двухфазных потоков применительно к условиям работы ВА ЦБК. Исследования гидродинамики двухфазных потоков выполнялись для определения ее влияния на интенсивность теплообмена.

Целью работы является увеличение производительности ЦБК с одновременным улучшением их экологических показателей при стабилизации и повышении устойчивости всей технологической линии предприятия, более эффективное использование биотоплива за счет увеличения производительности ВС при снижении в них накипеобразования.

Для достижения этой цели определены **главные задачи работы**: провести многоплановые промышленные испытания ряда ВС ЦБК с целью выявления характеристик теплообмена, полученных экспериментальным путем при выпаривании отработанных варочных растворов, и определения диапазона изменения режимных параметров, необходимых для моделирования и изучения теплообмена на стендовых установках; осуществить анализ эффективности применения различных схем ВС и влияния их режимных параметров на интенсивность выпаривания; разработать экспериментальные и теоретические средства, методики исследования процессов теплообмена при выпаривании отработанных варочных растворов в длинных трубах; создать экспериментальный комплекс для проведения лабораторных испытаний; на основе полученных экспериментальных данных разработать физическую модель движения многокомпонентных пенных двухфазных парорастворных потоков в кипяtilьных трубах ВА в условиях восходящего и гравитационного течения; определить влияние на интенсивность выпаривания физико-химических характеристик черного сульфатного щелока, водного предгидро-

лизата и режимных параметров работы выпарных ВА; изучить механизм теплообмена на отдельных стадиях испарения воды из раствора, выявить условия существования отдельных характерных зон в испарительных трубах и разработать на основе экспериментальных данных и их анализа расчетные зависимости для определения интенсивности теплообмена в этих зонах; изучить процесс конденсации пара из парогазовой смеси на вертикальных трубах промышленных ВА и разработать на основе анализа полученных экспериментальных данных расчетные зависимости для определения интенсивности теплообмена; найти оптимальные параметры тепловых и гидродинамических режимов, определяющих максимальные значения коэффициентов теплоотдачи при кипении и конденсации, для обеспечения длительной работы ВА в условиях минимального накипеобразования и высокой производительности станций, разработать методику расчета для определения плановых промывок ВС; создать программный метод теплового расчета ВС; реализовать результаты работы в промышленности.

Научная новизна результатов.

Создан исследовательский комплекс, разработаны экспериментальные и теоретические средства, методики исследования процессов теплообмена, необходимые для проведения испытаний и определения термических сопротивлений теплообмена при выпаривании отработанных варочных растворов.

В результате экспериментального исследования закономерностей теплообмена при кипении, испарении воды и многокомпонентных отработанных варочных двухфазных пенных растворов на локальном и интегральном уровнях разработана физическая модель движения потоков в условиях их восходящего и гравитационного течения в длинных трубах.

Определено влияние физико-химических характеристик, концентрации черного сульфатного щелока и водного предгидролизата, режимных параметров работы выпарных ВА на интенсивность выпаривания.

Установлены границы существования характерных режимов течения и теплообмена для испарительных каналов с подъемным и гравитационным движением двухфазной парощелоковой смеси. Предложены обобщающие зависимости для расчета интенсивности теплоотдачи в каждой из выделенных зон в условиях кипения пенящихся растворов в трубе. Показано, что теплообмен определяется совместным воздействием режимных параметров, которое проявляется через механизм формирования и перераспределения по высоте трубы зон с типовыми режимами кипения. Обнаружено быстрое развитие кризиса теплоотдачи при определенных режимных параметрах как при высоких, так и при низких тепловых потоках. Предложены расчетные зависимости для определения предельного влагосодержания, критического паросодержания и критических тепловых нагрузок. Для испарительных каналов с гравитационно-стекающей пленкой жидкости установлены границы режима испарения с поверхности пленки исследуемых растворов, где теплоотдача определяется скоростью течения пленки. Показано, что при повышении концентрации раствора снижается скорость движения «вязкой» пленки, происходит уменьшение турбулентного обмена в пленке и интенсивности теплообмена.

Рассмотрены и представлены расчетные уравнения, касающиеся отдельных составляющих полного термического сопротивления при конденсации парогазовой смеси.

Экспериментально показана возможность безнакипного выпаривания пенных отработанных растворов ЦБК в длиннотрубных аппаратах с гравитационным течением выпариваемого раствора. Разработаны расчетные зависимости и номограммы с учетом динамики накипеобразования, являющиеся основой для квалифицированного управления работой ВС ЦБК. Применение этих зависимостей обеспечивает максимальную продолжительность работы ВС между промывками при заданной производительности.

Осуществлен теоретический анализ эффективности схем ВС и влияния режимных параметров процесса на интенсивность выпаривания.

На основе выполненных исследований разработаны конструкции перспективных выпарных аппаратов.

Создан программный метод теплового расчета ВС.

Основные методические положения работы. Разработка теоретических основ процесса выпаривания отработанных варочных растворов ЦБК базировалась на фундаментальных уравнениях тепло-и массопереноса с использованием теплофизических свойств пенообразующих растворов. Промышленные исследования теплообмена проведены на действующем оборудовании в производственных условиях на 14 ВС различных ЦБК. Позонное исследование теплообмена и гидродинамики при восходящем потоке парорастворной двухфазной смеси проводилось на стенде с паровым обогревом кипятильной трубы с размерами, равными размерам труб промышленных ВА. Теплоотдача при гравитационном течении испаряющегося раствора исследовалась на стенде с электрообогреваемой трубой. Гидродинамика гравитационно стекающего раствора изучалась на стенде с трубой из кварцевого стекла. Динамика накипеобразования и диффузия пара при конденсации парогазовой смеси изучалась на работающих в промышленных условиях ВС. На пилотном ВА проверялись и отрабатывались эффективность внедряемых разработок: работоспособность распределительных устройств; интенсивность накипеобразования при выпаривании; оптимальные режимы выпаривания. Теоретические исследования проводились с использованием рабочих гипотез, а также с применением методов математического и цифрового моделирования.

Практическая значимость работы. Разработан и предложен программный метод теплового расчета ВС для проектных и конструкторских организаций, позволяющий оптимально проектировать ВС, рассчитывать и управлять их тепловыми режимами с максимальной эффективностью процесса и минимальным накипеобразованием, определять межпромывочные интервалы ВС. На ряд конструкций ВА, обеспечивающих эффективное выпаривание, получены авторские свидетельства.

Реализация работы в промышленности заключается в применении программного метода расчета технологических схем ВС для проектирования нового и модернизации действующего оборудования, определения оптимальных температурных режимов процесса выпаривания, обеспечивающих максимальную производительность ВС в проектно-конструкторских работах

ГУП «ЦНИИБуммаш» и ЗАО «ГИПРОБУМ». Полученные материалы в виде номограмм и расчетных зависимостей с учетом динамики накипеобразования используются как основа для квалифицированного управления работой ВС ЦБК. Результаты работы использовались при оптимизации режимов выпаривания и модернизации ВС Долинского, Архангельского и Котласского ЦБК. Основные положения научных исследований применяются в учебном процессе: при чтении лекций; при курсовом и дипломном проектировании; приведены в четырех учебных пособиях, два из них с грифом Министерства образования РФ.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на ежегодных научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава СПбГТУРП (ранее ЛТИ ЦБП), на Всесоюзной конференции «Теплофизика и гидрогазодинамика процессов кипения и конденсации» (Рига, 1985 г.), на VIII Всесоюзной конференции «Двухфазный поток в энергетических машинах и аппаратах» (Ленинград, 1990 г.), на Первой Всесоюзной национальной конференции по теплообмену «Кипение, кризисы кипения, закризисный теплообмен» (Москва, 1994 г.), на Российской научно-практической конференции «Организация природоохранной деятельности на предприятиях и пути ресурсосбережения» (С.-Петербург, 1996 г.), на научно-практической конференции «Опыт и перспективы развития ресурсосберегающих технологий и утилизации твердых отходов на предприятиях различных форм собственности» (С.-Петербург, 1998 г.), на Второй Российской национальной конференции по теплообмену «Кипение, кризисы кипения, закризисный теплообмен. Испарение, конденсация» (Москва, 1998 г.), на Третьей Российской национальной конференции по теплообмену «Кипение, кризисы кипения, закризисный теплообмен. Испарение, конденсация» (Москва, 2002 г.), на Международной научно-технической конференции «Современная наука и образование в решении проблем экономики европейского севера» (Архангельск, 2004 г.), на Международной научно-технической конференции «Ресурсо- и энергосбережение в целлюлозно-бумажной промышленности и городском коммунальном хозяйстве» (С.-Петербург, 2005 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 49 работ, в числе которых обзорная информация «Выпарные аппараты и схемы выпарных станций ЦБП», 4 учебных пособия, получено 3 авторских свидетельства.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, семи глав, выводов, списка литературы - 394 наименования, 137 рисунков, 20 таблиц. Диссертация включает 250 с. основного текста и приложений.

Автор защищает:

1. Физическую модель движения двухфазного восходящего потока, образованного в результате кипения отработанных варочных пенообразующих растворов в длинных трубах ВА ЦБК.

2. Расчетные зависимости по теплообмену, полученные в результате экспериментальных исследований процессов кипения и испарения отработанных варочных пенообразующих растворов ЦБК в условиях восходящего и гравитационно стекающего двухфазного потока.

3. Результаты экспериментальных исследований по определению предельных характеристик кипения при течении двухфазных потоков, образованных из отработанных варочных пенообразующих растворов, определяющие начало кризисов теплообмена.

4. Результаты теоретико-экспериментальных исследований теплоотдачи при конденсации парогазовой смеси на вертикальном пучке труб.

5. Расчетные зависимости для определения термического сопротивления накипи с учетом положительной динамики накипеобразования.

6. Рекомендации по управлению режимными параметрами с целью поддержания оптимальных режимов выпаривания, определяющие основу автоматизированных систем управления ВС ЦБК.

7. Модернизированную противоточную схему ВС как наиболее оптимальную для процесса выпаривания отработанных варочных растворов ЦБК.

8. Программный метод теплового расчета ВС с обеспечением оптимальных тепловых и гидравлических режимов ее работы при максимальной концентрации выпариваемого раствора с учетом различных видов дополнительного теплотехнологического оборудования и других конструктивных и режимных параметров.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы работы для целлюлозно-бумажной промышленности. Показано отраслевое значение выполненной работы по реализации теоретических положений и практических рекомендаций для производства целлюлозы и экономии топливно-энергетических ресурсов, используемых при ее получении. Сформулированы цель работы и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведены типовые варианты и основные конструктивно-технические характеристики ВС для выпаривания отработанных варочных растворов ЦБК. Дан критический анализ состояния теоретических и экспериментальных исследований по теплообмену при кипении и испарении жидкости в условиях восходящего и гравитационного ее течения в вертикальных трубах. Имеется весьма ограниченное количество исследований, посвященных данной проблеме, вследствие отсутствия достаточных и проверенных данных по теплообмену при выпаривании отработанных варочных растворов ЦБК. Большинство работ по исследованию теплообмена при кипении жидкостей выполнено применительно к чистой воде. Часть работ проведена на растворах, главным образом сахарных. В обоих случаях в основу обработки данных положены закономерности кипения чистых жидкостей. Полученные расчетные формулы для определения интенсивности кипения жидкостей имеют существенные расхождения. Данные по теплообмену при конденсации водяного пара из парогазовых смесей на вертикальных пучках труб практически отсутствуют. На основе опубликованных данных вывести критерии моделирования процессов, протекающих в ВА, не представляется возможным. Поэтому наиболее достоверные экспериментальные данные в настоящее время могут быть получены только при исследовании процессов

выпаривания реальных отработанных варочных растворов ЦБП в трубах с размерами, аналогичными размерам труб промышленных ВА.

На основании вышеизложенного, вопросы, включающие: теоретический анализ эффективности схем ВС; изучение механизма теплообмена и определение его термических сопротивлений при выпаривании отработанных варочных растворов в длинных трубах ВА; разработку физической модели движения многокомпонентных пенных двухфазных парорастворных потоков в кипяtilьных трубах ВА в условиях восходящего и гравитационного течения; определение оптимальных параметров тепловых и гидродинамических режимов для обеспечения длительной работы ВА в условиях минимального накипеобразования и высокой производительности станций; разработку методики расчета для определения плановых промывок ВС; создание программного метода расчета ВС, обеспечивающего оптимальные условия их работы, приводящие к повышенной выработке целлюлозы ЦБК при сокращении их энергетических расходов - являются важной научной проблемой, имеющей крупное хозяйственное и экономическое значение, решение которой обеспечивает устойчивый прогресс при создании новых и, особенно, при реконструкции действующих ЦБК. Этот подход и определил основные задачи исследований.

Вторая глава посвящена вопросам промышленных исследований режимов работы ВС ЦБК.

Представлена разработанная методика проведения теплотехнических исследований режимов работы ВС, в соответствии с которой изучалась теплопередача от насыщенного пара к кипящим растворам на 14 ВС различных ЦБК. ВС укомплектованы длиннотрубными вертикальными однопроводными аппаратами с восходящим движением выпариваемого раствора, длиной кипяtilьных труб $8 \div 9$ м, поверхностью теплообмена до 5500 м^2 . В результате исследований обнаружено, что зависимость интенсивности передачи теплоты от концентрации выпариваемых щелоков обратно пропорциональна. Значения коэффициентов теплопередачи в ВА увеличиваются с увеличением плотности теплового потока. ВС с небольшой поверхностью теплообмена, работающие по противоточным схемам питания, имели наилучший показатель тепловой эффективности.

В третьей главе приведено описание конструкций опытных стендов и методики эксперимента, полностью воспроизводящих процессы теплообмена и гидродинамики при выпаривании растворов ЦБК. Обоснованно приняты математические модели процессов теплообмена и в соответствии с этими моделями спланирован эксперимент. Приведены критерии для оценки соответствия модели результатам исследований. В соответствии с поставленной задачей исследования теплообмена при выпаривании отработанных растворов ЦБП были разработаны методики проведения исследований и обработки полученных опытных данных. Для проведения намеченных экспериментальных исследований были спроектированы и изготовлены:

- стенд с паровым обогревом для изучения теплопередачи при подъемном движении потока; основной рабочей частью стенда являлась кипяtilьная труба диаметром $d = 51 \times 1,5$ мм и длиной $L = 8,5$ м, $L/d = 165$; кипяtilьная труба разделена конденсатосборными стаканами на 19 измерительных

участков; гидродинамические и тепловые параметры стенда позволяли охватить весь диапазон работы промышленных установок;

- установка для исследования гидродинамики гравитационно стекающей пленки жидкости внутри кварцевой трубы, длиной 2 м, $L/d=95$;
- установка для исследования теплоотдачи к стекающей пленке жидкости внутри стальной трубы с электрообогревом, длиной 2 м, $L/d=95$;
- установка для исследования накипи и борьбы с ней, состоящая из однотрубного вертикального однопроходного ВА с принудительной циркуляцией раствора и паровым обогревом трубы длиной $L = 8,5$ м, $L/d = 163$, аппарата магнитной обработки раствора, подогревателя, конденсатора, мерников конденсата, баков, щелоковой ловушки;
- экспериментальный выпарной аппарат с падающей пленкой.

Все установки были укомплектованы контрольно-измерительными приборами и устройствами, обеспечивающими измерение температур стенки трубы и раствора, плотности теплового потока по длине трубы, параметров греющего и вторичного пара, интенсивности теплоотдачи, перепадов давлений на измерительных участках канала и параметров, необходимых в зависимости от назначения установки и задач исследования.

Представлены результаты проведенных поверочных исследований, в процессе которых осуществлялись тарировки смонтированных установок.

Приведены результаты оценки погрешности экспериментов.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований теплоотдачи и гидродинамики при кипении и испарении пенных растворов и воды при низких давлениях и движущихся с малыми скоростями в вертикальных трубах. Исследования проводились на установках в следующем диапазоне режимных параметров: при подъемном течении - концентрация черного сульфатного щелока на входе в трубу $b = 0 \div 50$ % абсолютно сухих веществ (а.с.в.); водного предгидролизата – $0 \div 30$ % а.с.в.; давление греющего пара $P_{гр} = 0,175 \div 0,335$ мПа; давление вторичного пара в сепараторе установки $P_{вт} = 0,081 \div 0,13$ мПа; скорость циркуляции раствора $w_0 = 0,013 \div 0,4$ м/с; температура раствора на входе в трубу поддерживалась равной 96 °С; при этом плотность теплового потока изменялась в пределах $q = 2 \div 100$ кВт/м²; при гравитационном течении – $q = 5 \div 35$ кВт/м²; объемная плотность орошения - $\Gamma_v = 0,0001 \div 0,002$ м³/(м×с). При этом выдерживалось равенство критериев кипения для стендовых установок и промышленных ВА ЦБК, диапазон изменения которых составлял:

$$K_w = \frac{q}{\rho \cdot r \cdot w_0} = 0,14 \div 2,1; \quad Ki = \frac{q}{\rho \cdot w_0 \cdot \Delta i_H} = 0,004 \div 3,6.$$

Установлено, что интенсивность теплообмена α при всех гидродинамических режимах непостоянна по длине трубы. Отношение $\alpha_{max}/\alpha_{min}$ достигало 50. Постоянные значения локальных α наблюдались только в случае течения некипящей жидкости. Во всех опытах, кроме режимов с кажущимся уровнем заполнения кипяточной трубы $L_{ур} = 100$ % при $w_0 > 0,4$ м/с, отмечалось падение теплоотдачи в верхней части трубы. При низких скоростях, менее 0,02 м/с и плотностях теплового потока более 40 кВт/м², падение α отмечалось сразу же после входа раствора в трубу. Соотношение скорости цир-

куляции и плотности теплового потока оказывало решающее влияние на среднюю теплоотдачу и распределение участков по длине трубы с различными режимами течения потока жидкости.

Для выявления типовых режимов течения по данным настоящей работы нами были построены карты режимов течения двухфазного потока в координатах $w_0 - L/d$ и $\rho w - x$ (массовая скорость – паросодержание). Из карт режимов следовало, что выпаривание черных сульфатных щелоков при тепловых режимах, в основном типовых для промышленных ВС, связано с наличием зоны ухудшенной теплоотдачи и, вследствие этого, интенсивным накипеобразованием. Экспериментальные данные, представленные в координатах $\rho w - x$, показали, что возникновение пузырькового режима кипения воды происходит при более низких отрицательных паросодержаниях по сравнению с аналогичным режимом кипения раствора. Возникновение режимов с ухудшенной теплоотдачей возможно как для растворов, так и для воды при аналогичных паросодержаниях. Диапазон критических паросодержаний растворов был ограничен и, в отличие от воды, лежал в пределах нуля. Выделение расчетных участков по таким диаграммам представляется маловероятным.

По полученным данным рассматривались зависимости: истинного ϕ , расходных - объемного β и массового x паросодержаний от режимных параметров процесса по длине трубы L . Как показали эксперименты, влияние паросодержания на теплоотдачу оказывается косвенным путем через изменение скоростей и структур двухфазного потока. Поскольку механизмы передачи теплоты, связанные с q и w_0 , наилучшим способом учитываются

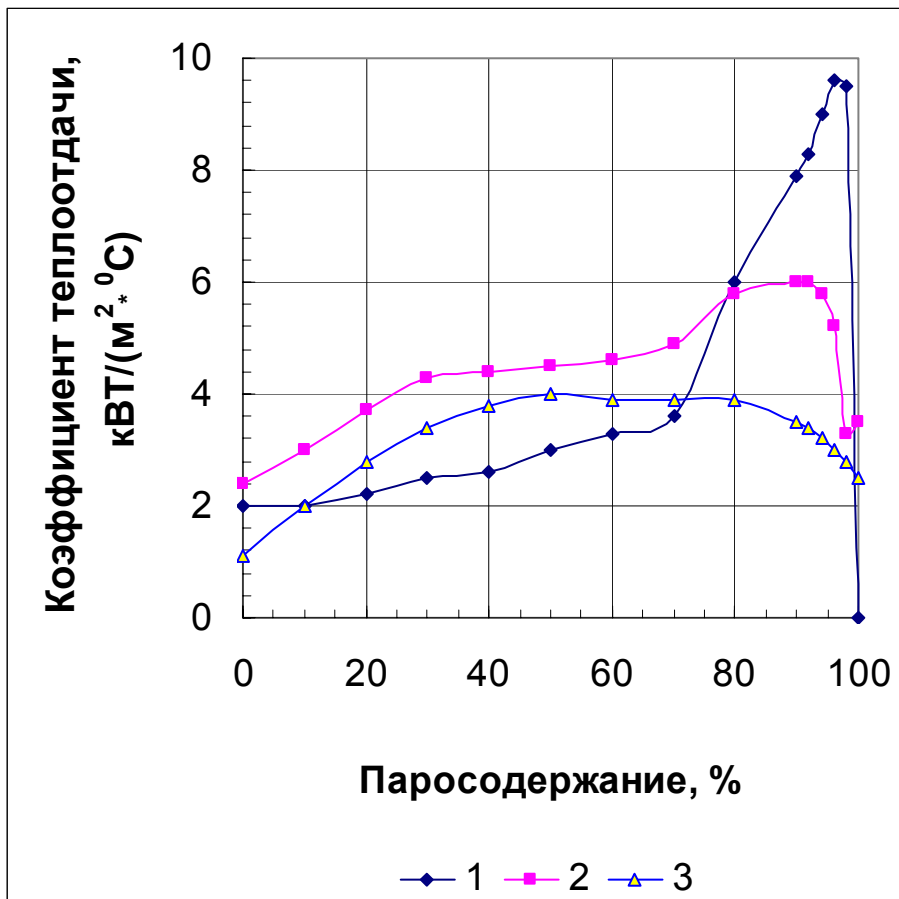


Рис. 1. Изменение интенсивности теплоотдачи в зависимости от паросодержания парожидкостной смеси при $K_W = 0,7$:

- 1 – $b=20\%$ а.с.в.;
- 2 – $b=30\%$;
- 3 – $b=40\%$

критерием K_W , то влияние паросодержания представлено на рис. 1 в функции $\alpha=f(\phi)$ при $K_W=\text{const}$. По

этим кривым и ряду дополнительных признаков выделены четыре основных режима, с характерными соотношениями между q , w_0 , φ , определяющими доминирующее влияние того или иного механизма переноса теплоты на теплоотдачу. Область изменения паросодержаний с $\varphi < 50\%$ и $x < 0,005$ определена как зона пузырькового кипения. При течении парорастворной смеси с низкими скоростями в режиме пузырькового кипения снижение α при увеличении w_0 или недогрева раствора до состояния насыщения Δt_H обусловлено уменьшением интенсивности процесса парообразования. Значительное повышение интенсивности теплоотдачи на участке пузырькового кипения связано с увеличением тепловой нагрузки. Отрицательное влияние на теплоотдачу увеличивающейся концентрации раствора в значительной мере компенсировалось пенообразованием, а независимость интенсивности теплоотдачи от паросодержания или скорости парожидкостной смеси объясняется определяющим влиянием механизма переноса теплоты, обусловленной процессом парообразования. Зависимость коэффициента теплоотдачи от режимных параметров процесса в области пузырькового кипения, представленная на рис. 2, с величиной достоверности аппроксимации $R^2 = 0,69$ обобщается уравнением:

$$\alpha_{\text{пуз}} = 111 \frac{q^{0,75}}{\Delta t_H^{0,19} \cdot w_0^{0,36}}, \quad (1)$$

где $q = (7,0 \div 86,5)$ кВт/м²; $\Delta t_H = (0,1 \div 27)$ °С; $w_0 = (0,01 \div 1)$ м/с.

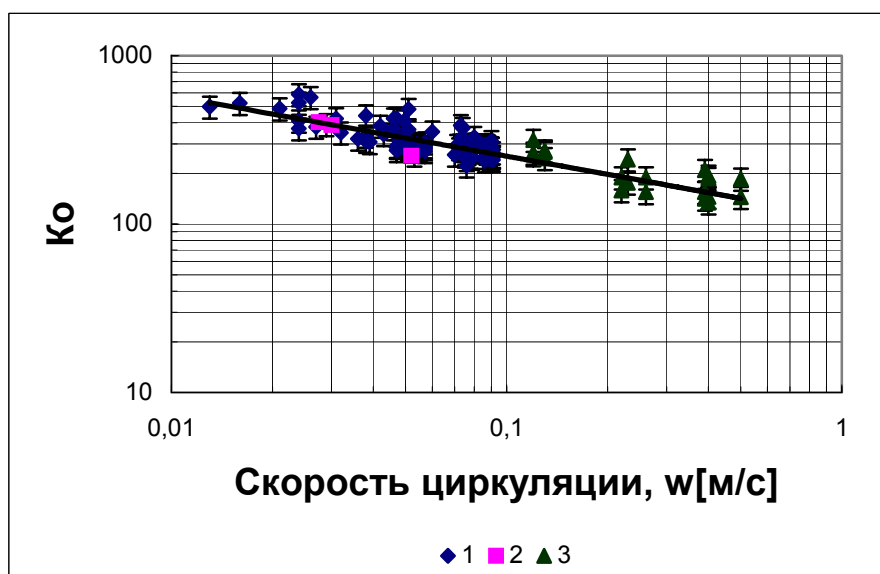


Рис. 2. Зависимость интенсивности теплоотдачи от скорости циркуляции:

$$Ko = \frac{\alpha \cdot \Delta t_H^{0,19}}{q^{0,75}},$$

1 - черный сульфатный щелок;
2 - вода; 3 - водный предгидролизат

Эмульсионный или пенный режим течения определялся в диапазоне параметров $\varphi = (40 \div 70)\%$; $x = (0,005 \div 0,015)$; $We_e < 11$. На этом участке независимость коэффициента теплоотдачи от тепловой нагрузки объясняется низкой теплопроводностью пены. Увеличение скорости двухфазного потока, положительно сказывающееся на испарении между пленочной жидкостью, способствовало разрушению пены и, следовательно, повышению интенсивности теплоотдачи. При возрастании скорости парорастворной смеси происходит наложение механизма турбулентного обмена в однофазной среде на механизм переноса, обусловленный процессом парообразования, в связи с чем α

увеличивается. Приведенная на рис. 3 зависимость интенсивности теплоотдачи от режимных параметров процесса в зоне пенного режима кипения с величиной достоверности аппроксимации $R^2 = 0,54$ описывается эмпирическим уравнением:

$$\alpha_{пен} = 4970 w_{см}^{0,7} \cdot q^{-0,19}, \quad (2)$$

где $w_{см} = (0,045 \div 15,0)$ м/с; $q = (10 \div 110)$ кВт/м².

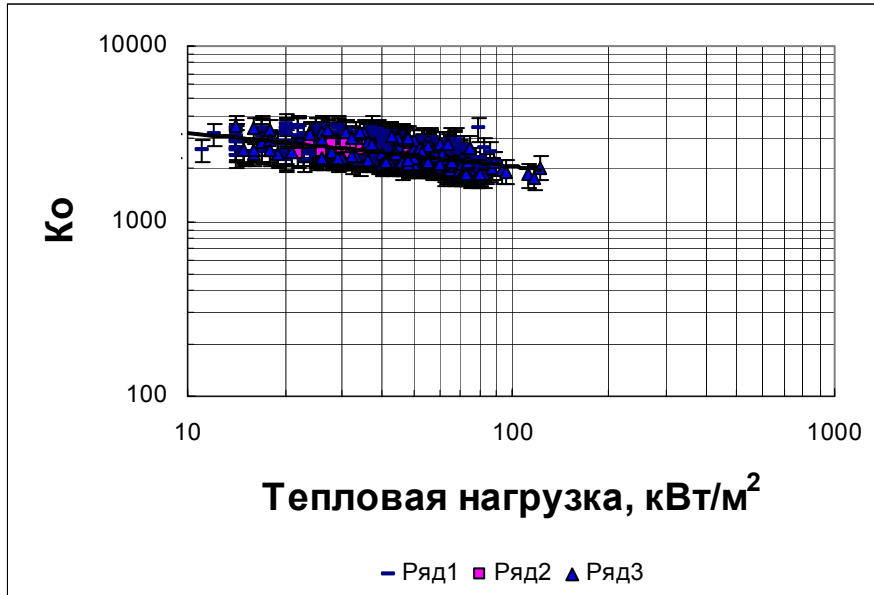


Рис. 3. Зависимость интенсивности теплоотдачи от тепловой нагрузки: $Ko = \alpha w^{-0,687} b^{0,0629}$; 1 – черный сульфатный щелок; 2 – вода; 3 – водный предгидролизат

Область максимальных значений коэффициентов теплоотдачи при φ

$= (80 \div 95) \%$; $x > 0,015$; $We_9 > 11$, предшествующая резкому падению α , определялась как дисперсно-кольцевая. При $q = (40 \div 80)$ кВт/м² тепловая нагрузка практически не влияла на теплообмен. С повышением концентрации раствора снижалась скорость движения его пристенной пленки, поэтому происходило уменьшение турбулентного обмена и, следовательно, интенсивности теплообмена. Приведенная на рис. 4 зависимость интенсивности теплоотдачи от режимных параметров процесса кипения в области дисперсно-кольцевого течения раствора с величиной достоверности аппроксимации

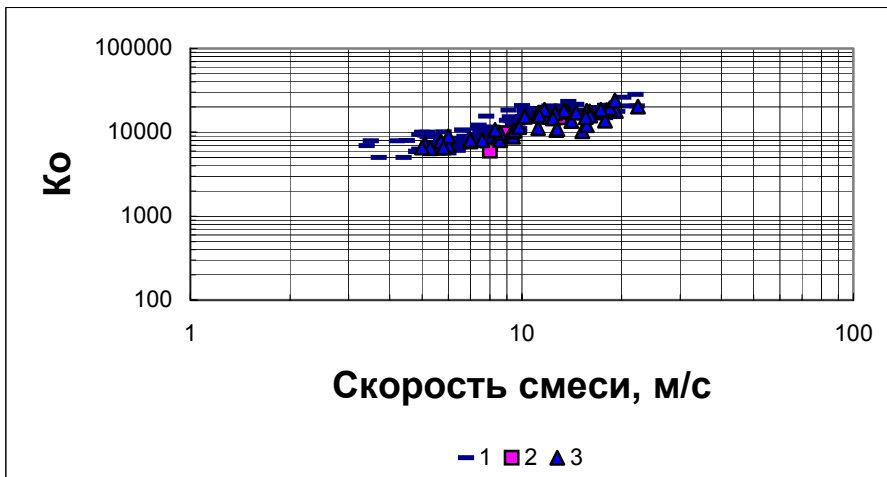


Рис. 4. Изменение интенсивности теплоотдачи в зависимости от изменения скорости парожидкостной смеси: 1 – черный сульфатный щелок; 2 – вода; 3 – водный предгидролизат; $Ko = \alpha q^{-0,02} b^{0,35}$

$R^2=0,71$ описываются эмпирическим уравнением:

$$\alpha_{\text{д.к.}} = 1500 \frac{w_{\text{см}}^{0,7}}{0,1 + b^{0,35}}, \quad (3)$$

где $w_{\text{см}} = (5 \div 30)$ м/с; $b = (0 \div 50)$ % а.с.в.

Анализ опытных данных показал, что теплообмен при кипении пенных отработанных растворов в трубах выпарных аппаратов ЦБП определяется совместным воздействием режимных параметров (q , w , Δt_n , b), которое проявляется через механизм формирования и перераспределения по высоте трубы зон с типовыми режимами кипения. Преимущественное развитие одной из зон может значительно изменить тенденцию теплообмена и быть причиной качественного различия данных, полученных при разных условиях. Длины участков с пузырьковым, эмульсионным и дисперсно-кольцевым режимами течения парощелочного потока увеличивались с повышением w_0 при $q = \text{const}$ и при $w_0 > 0,07$ м/с и $q > 40$ кВт/м² участки могли занимать всю трубу. При повышении q до 100 кВт/м² с одновременным уменьшением до $w_0 = 0,01$ м/с на большей части трубы устанавливался дисперсный режим, и α резко падал. Наоборот, при увеличении w_0 до 0,1 м/с и снижении q до 5 кВт/м² на большей части трубы преобладала экономайзерная зона. При повышении концентрации раствора режим ухудшенной теплоотдачи наступал при меньших q , а снижение α проходило более плавно. В промышленных условиях подобное выделение указанных зон невозможно, в связи с чем управление технологическим процессом осуществляется изменением основных режимных параметров. Основным фактором, определяющим распределение указанных зон при кипении пенных растворов ЦБК, является соотношение между тепловым потоком и скоростью циркуляции раствора, поэтому критерий $Kw = q/(r \cdot \rho'' \times w_0)$ принят в качестве меры, определяющей оптимальность процесса при выпаривании растворов ЦБК. Данные, представленные на рис. 5, дают возможность в зависимости от соотношения q и w во вклад кипения выделить три характерных участка: развитого кипения при $\alpha = f(q)$; участка конвективного теплообмена при $\alpha = (w_{\text{см}})$; участка совместного влияния на теплоотдачу механизмов передачи теплоты за счет парообразования и конвективного обмена. Концентрация и величина недогрева усиливают действие указанных механизмов передачи теплоты за счет зависимости от температуры вязкостных сил и сил межмолекулярного сцепления в растворе.

В области совместного влияния на теплоотдачу кипения раствора и его вынужденного движения для расчета коэффициента теплоотдачи может быть использована зависимость, предложенная А.А. Андреевским, В.М. Боришанским, В.Н. Фромзелем, Б.С. Фокиным:

$$\frac{\alpha}{\alpha_{\text{мп}}} = \sqrt{1 + 7 \cdot 10^{-9} \left(\frac{w_{\text{см}} \cdot r \cdot \rho'}{q} \right)^{3/2} \left(\frac{\alpha_{\text{пуз}}}{\alpha_{\text{конв}}} \right)^2}, \quad (4)$$

где $\alpha_{тр.} = \alpha_{конв.} \sqrt{1 + \left(\frac{\alpha_{пуз}}{\alpha_{конв.}} \right)^2}$; $\alpha_{пуз}$ – коэффициент теплоотдачи при пузырьковом режиме кипения раствора, рассчитанный по зависимости (1); $W_{см}$ – скорость парожидкостной смеси.

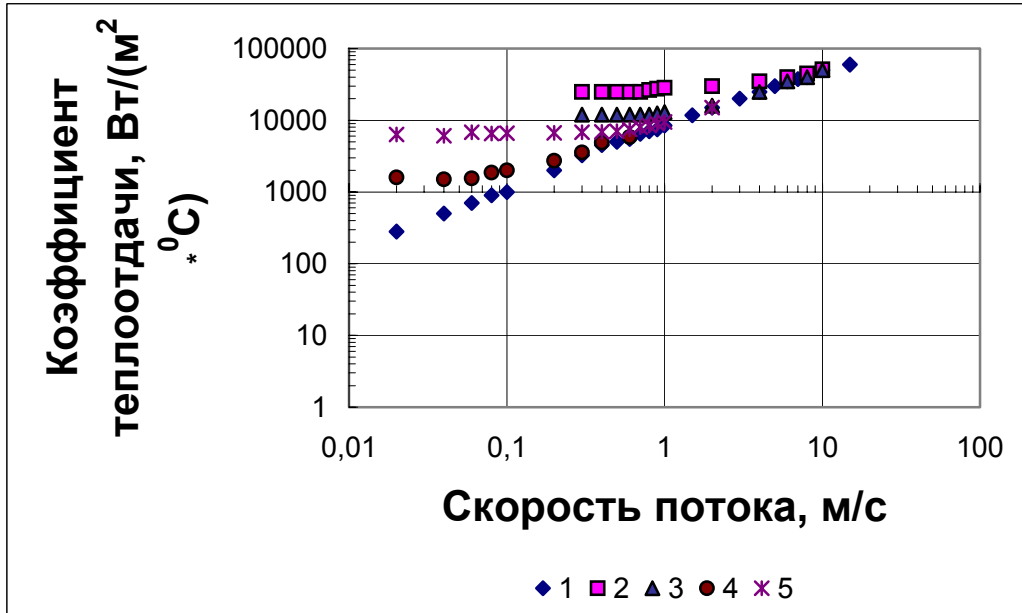


Рис. 5. Теплоотдача при кипении воды и растворов в условиях вынужденного движения: 1 – расчетные данные для вынужденного движения однофазной жидкости; 2 – вода $q=810$ кВт/м² [С.С.Кутателадзе]; 3 – вода $q = 230$ кВт/м² [Д.А.Лабунцов]; 4, 5 – данные по кипящим растворам при $q = 20$ кВт/м² и $q = 80$ кВт/м² соответственно

При кипении в условиях вынужденного движения жидкости в трубах процесс теплообмена описывается известной системой дифференциальных уравнений. Решение этой системы уравнений методом подобия приводит к следующей совокупности обобщенных переменных:

$$\frac{wl}{v}; \frac{w^2}{g \cdot l}; \frac{v}{a}; \frac{q}{r \cdot \rho'' \cdot w}; \frac{r}{c_p \cdot \Delta t}; \frac{r}{c_p \cdot T_s}; \frac{r}{g \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho' - \rho'')}}}; \frac{w_o''}{w_o'}; \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho' - \rho'')}}}; \frac{\rho''}{\rho'}; \frac{\lambda''}{\lambda'}; \varphi; \frac{\Delta p}{\rho' \cdot w^2}; \frac{\alpha l}{\lambda'}, \quad (5)$$

или в критериальной форме:

$$Re, Fr, Pr, Kw, K, Ks, K\sigma, \frac{w_o''}{w_o'}, \frac{l_o}{l}, \frac{\rho''}{\rho'}, \frac{\lambda''}{\lambda'}, \varphi, Eu, Nu. \quad (6)$$

По условиям эксперимента и независимости интенсивности теплообмена от отдельных характеристик исследуемого процесса из совокупности (6) были исключены $Fr, K, Ks, K\sigma, l_o/l, \lambda''/\lambda'$. Вместо них введены комплексы:

$Ki = \frac{q}{\rho' \cdot w_0 \cdot \Delta i_n}$; $Pr_{пл}$; $\alpha/\alpha_{конв}$. При этом $\alpha_{конв}$ рассчитывался по формуле для вынужденной конвекции в соответствии с режимом течения потока.

Для обобщения опытных данных было принято уравнение, состоящее из следующих безразмерных переменных:

$$\bar{\alpha} / \alpha_{конв} = f\left(k_w; ki; Pr_{пл}; \rho'' / \rho'\right) \quad (7)$$

Из результатов проведенного обобщения, представленного на рис. 6, видно, что устанавливаются две характерные области влияния безразмерных переменных в зависимости от критерия ki . Для первой области, определяемой $ki < 0,05$, при относительно низких тепловых нагрузках и высоких значениях недогрева характерно увеличение интенсивности теплоотдачи с уменьшением величины недогрева. Во второй области, характеризующейся высокими тепловыми нагрузками, малыми значениями недогрева и определяемой $ki > 0,05$, интенсивность теплообмена возрастает с увеличением величины недогрева. Полученная зависимость с величиной достоверности аппроксимации $R^2 = 0,59$ описывается уравнением:

$$\bar{\alpha} / \alpha_{конв} = A k_w^{0,453} ki^n Pr_{пл}^{0,6} \left(\rho'' / \rho'\right)^{0,93} \quad (8)$$

где $A = 12,5 \cdot 10^3$, $n = 0,214$ при $ki < 0,05$; $A = 2910$, $n = -0,277$ при $ki > 0,05$; $k_w = 0,1 \div 2,0$; $ki = 0,005 \div 3,5$; $Pr_{пл} = 1,5 \div 25,0$.

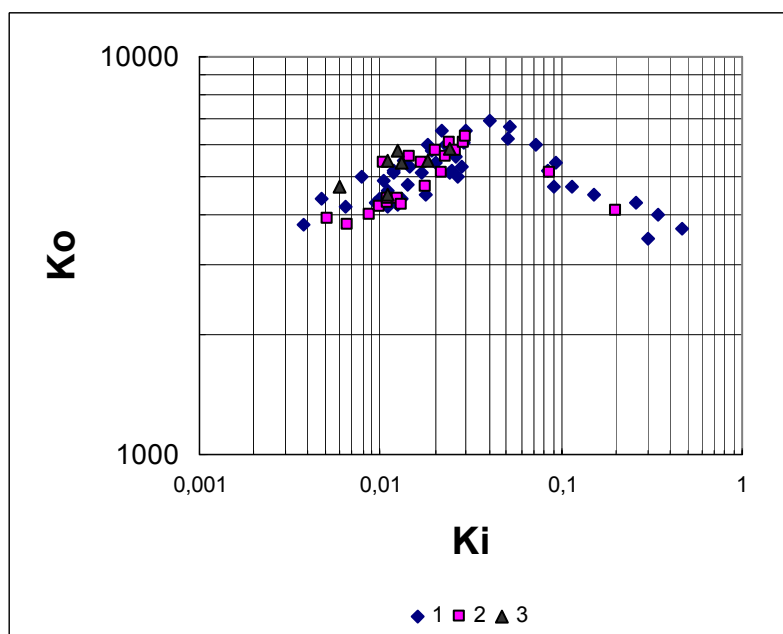


Рис. 6. Обобщение опытных данных по интенсивности теплоотдачи при кипении пенных растворов ЦБК:

$$Ko = \frac{\bar{\alpha}}{\alpha_{конв} k_w^{0,453} Pr_{пл}^{0,6} \left(\frac{\rho''}{\rho'}\right)^{0,93}};$$

1 – черный сульфатный щелок; 2 – водный предгидролизат; 3 – вода;

Опыты для изучения теплообмена при испарении стекающей пленки проводились при $b = (0 \div 60) \%$ а.с.в. и температурах растворов, близких к температурам насыщения. Визуальные наблюдения показали, что процессы теплообмена находились в области нагрева и испарения с поверхности. В результате анализа данных эксперимента получены зависимости для средней и мак-

симальной скоростей пленки. По ним в исследуемом диапазоне значений чисел Рейнольдса идентифицированы характерные режимы течения пленки. Средние значения критических чисел Рейнольдса составили: $Re < 1000$ - ламинарно-волновое течение; $Re > 3000$ - турбулентное течение. На основе данных по средней скорости пленки рассчитаны значения средней толщины пленки (рис.7). Из результата анализа профилей температур гравитационно

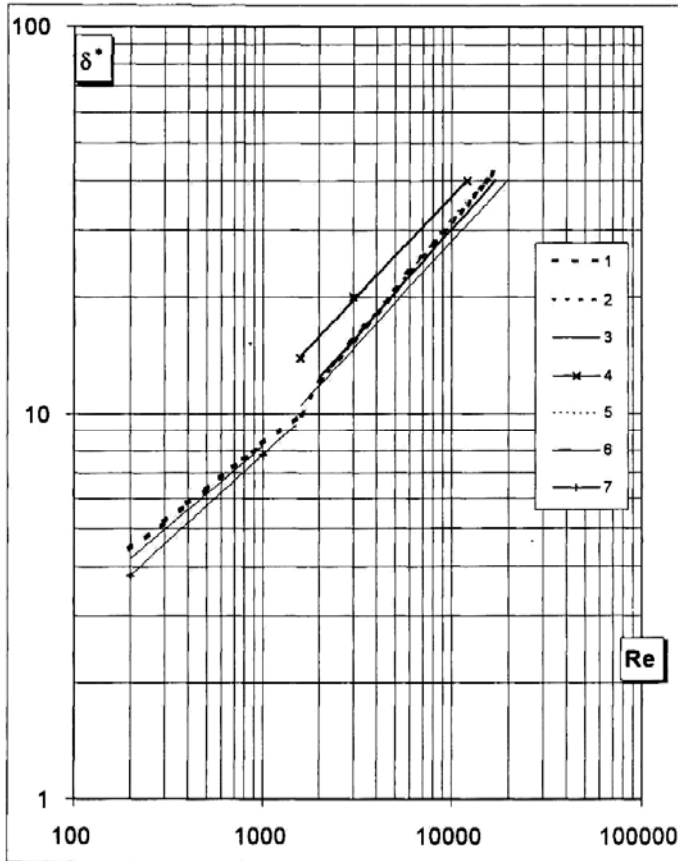


Рис. 7. Зависимость безразмерной средней толщины пленки жидкости δ^* от числа Re : 1 – данные настоящей работы, рассчитанные при $Re < 1600$ по зависимости -

$$\delta^* = \frac{\bar{\delta}}{\left(\frac{v^2}{g}\right)^{1/3}} = 0,56 Re^{0,39};$$

при $Re > 1600$ -

$$\delta^* = \frac{\bar{\delta}}{\left(\frac{v^2}{g}\right)^{1/3}} = 0,14 Re^{0,59};$$

2 – по данным Г. Гимбутиса; 3 – по данным И. Федоткина; 4 – по данным К. Fiend; 5 – по данным Е. Мальцева, В. Тимофеева; 6 – по данным Г. Гребера; 7 – по данным G. Folford

стекающей водяной пленки и локальных значений коэффициентов теплоотдачи при различных числах Рейнольдса следует, что в рассматриваемом диапазоне чисел Рейнольдса от 4×10^3 до 14×10^3 можно выделить два участка. Первый, на котором происходил существенный рост теплоотдачи до максимального значения на некотором расстоянии от входа в трубу до α_{\max} , и второй - за точкой максимума, на котором наблюдалось незначительное снижение теплоотдачи вследствие продолжающегося роста турбулентного пограничного слоя. Затем фиксировалась относительная стабилизация. При более низких числах Рейнольдса проявлялся еще один участок – начальный, на котором теплоотдача уменьшалась сразу, начиная от входа раствора в трубу. Длина начального участка увеличивалась при уменьшении числа Re (рис.8) и с увеличением числа Re .

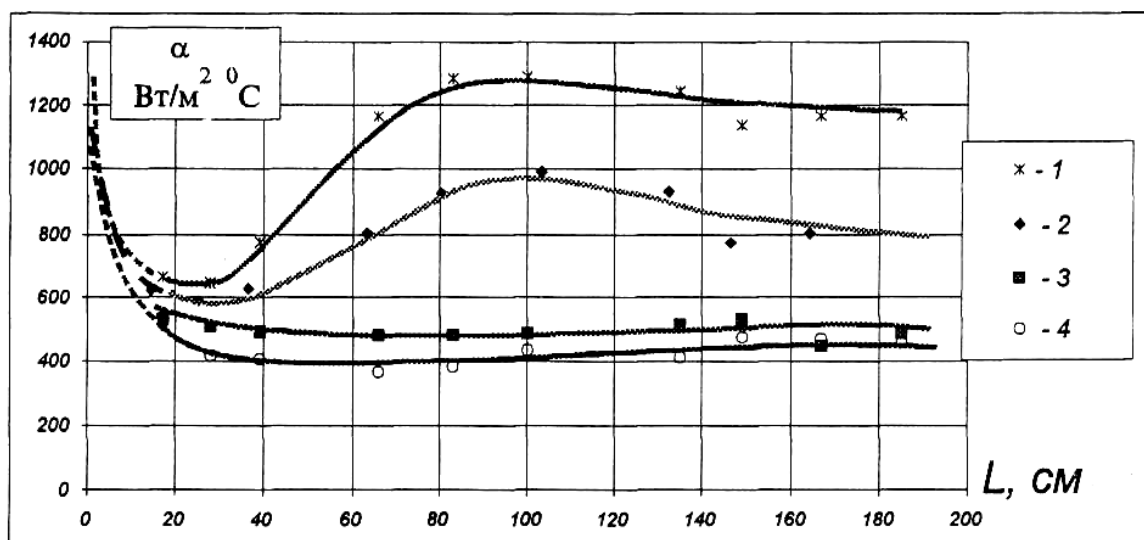


Рис. 8. Локальные коэффициенты теплоотдачи по длине трубы при течении пленки щелока: 1 – $Re = 3045$; 2 – $Re = 430$; 3 – $Re = 255$; 4 – $Re = 182$

Данные по теплоотдаче к стабилизированным испаряющимся пленкам щелоков сульфатного производства с концентрациями до 60 % приведены на рис. 9 в координатах $Ko = f(Re)$, где $Ko = \frac{Nu_M}{Pr^{0,75}}$.

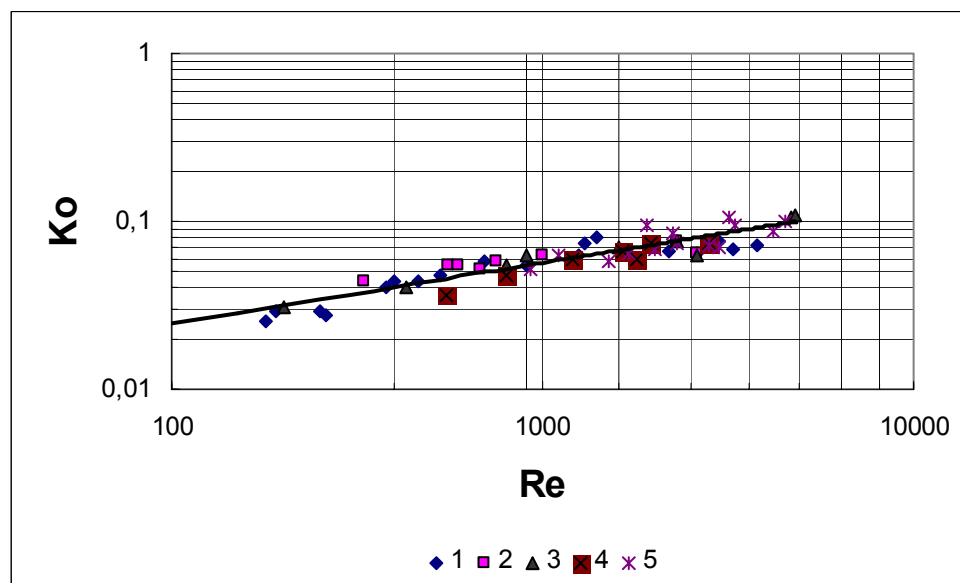


Рис. 9. Зависимость интенсивности теплоотдачи от числа Re :

$$Ko = \frac{Nu_M}{Pr^{0,75}};$$

- 1 – $b = 60$ %
 а.с.в.;
 2 – $b = 50$ %;
 3 – $b = 45$ %;
 4 – $b = 30$ %;
 5 – $b = 20$ %

Представленная на рис. 9 зависимость описывается уравнением:

$$Nu_M = 0,0044 Re^{0,37} Pr^{0,75} k_q^n, \quad (9)$$

где $Re = (0,2 \div 10) \times 10^3$; $Pr = 1,5 \div 25,0$.

Коэффициенты уравнения получены в результате процедуры регрессионного анализа. Величина достоверности аппроксимации составляет $R^2 = 0,83$.

Анализ полученных данных показал неоднозначность влияния плотности теплового потока на теплоотдачу, отличающуюся от зависимостей, которые были получены для воды: для щелоков низкой концентрации и воды интенсивность теплоотдачи снижалась при увеличении плотности теплового потока; для щелоков с $b = (35 \div 50)$ % интенсивность теплоотдачи практиче-

ски не зависела от плотности теплового потока; для щелоков высокой концентрации интенсивность теплоотдачи увеличивалась с возрастанием плотности теплового потока. Показатель степени «n» при критерии K_q изменялся от (-0,19) для случая испарения воды до 0,15 для щелока с $b = 60\%$ и максимальном тепловом потоке.

В пятой главе представлены результаты исследований по динамике накипеобразования. Для определения влияния накипеобразования на тепловой режим работы станции, на изменение нагрузок поверхности испарения, на изменение концентраций щелоков по корпусам проведены годовые исследования режимов работы трех ВС Котласского ЦБК. Для характеристики процесса накипеобразования определялся термический коэффициент накипеобразования:

$$\psi = \frac{R_H}{u \cdot \tau}, \quad (10)$$

где $R_H = \left(\frac{\delta}{\lambda} \right)_H$ - условное термическое сопротивление накипи, $\frac{m^2 \cdot ^\circ C}{Вт}$;

δ_H – толщина слоя накипи, м; λ_H – коэффициент теплопроводности накипи, $Вт/(м \cdot ^\circ C)$; $u = w/F$ – массовое напряжение поверхности теплообмена, $кг/(м^2 \times с)$; $w = S(1 - b/B)$ – количество выпаренной в ВА влаги, кг/с; S – количество раствора, подаваемого в ВА на выпаривание, кг/с; b, B – концентрации раствора на входе и выходе из ВА, % а.с.в.; F – поверхность теплообмена ВА, $м^2$; τ – время работы ВА после промывки, сутки.

Принято, что разность между термическими сопротивлениями теплопередачи, определенными в результате промышленных исследований батарей и их расчетом, является условным термическим сопротивлением накипи:

$$R_H = \frac{1}{Ku} - \frac{1}{Kp}, \quad (11)$$

где Ku, Kp – коэффициент теплопередачи, полученный в результате исследования режимов работы ВС, и теоретический коэффициент теплопередачи, $Вт/(м^2 \times ^\circ C)$.

Результаты исследований показали, что для большинства аппаратов Ku убывал со временем. Регулярные промывки ВА, проводившиеся через десять суток их работы, оказались малоэффективными. Отмечено, что по мере загрязнения ВА персоналу приходилось постепенно увеличивать параметры греющего пара, поступающего в первый корпус ВС, для сохранения ее производительности. При этом изменение температурного режима характеризовалось тем, что в первое время работы после промывки ВС имела определенный запас производительности исходя из разности расчетного и реального температурных напоров:

$$\sum \Delta t_{зан} = \sum \Delta t_{расч} - \sum \Delta t_0, \quad (12)$$

где $\sum \Delta t_{расч}$ - расчетный температурный напор; $\sum \Delta t_0$ - реальный температурный напор.

При достижении $\sum \Delta t_{зан} = 0$ обеспечение производительности ВС становится невозможным и, либо происходит очистка ее поверхности от накипи,

либо она будет работать с постепенно уменьшающейся производительностью.

Приведенные экспериментальные данные показывают, что условные термические сопротивления накипи составляют для большинства корпусов примерно 20 % (45 % - для отдельных) от полного термического сопротивления теплопередаче. На основании представленных данных появляются дополнительные возможности для применения наиболее рациональных мероприятий по экономии энергоресурсов, увеличения производительности ВС ЦБК, достигаемых при уменьшении накипи. По полученным данным определялся ежесуточный прирост термического сопротивления накипи для каждо-

го корпуса по зависимости:

$$\Delta R_n = \frac{R_k - R_1}{\tau}, \quad (13)$$

где R_k, R_1 – условные термические сопротивления накипи в ВА в конце и в начале эксперимента.

Постепенное увеличение R_n связано с увеличением содержания накипеобразователей в сульфатном щелоке и зависит главным образом от увеличения их концентрации в растворе. Среднесуточный прирост накипи

(рис. 10) определяется зависимостью: $R_n = 1,658 \times 10^{-3} \times u \times b^{0,37}$. (14)

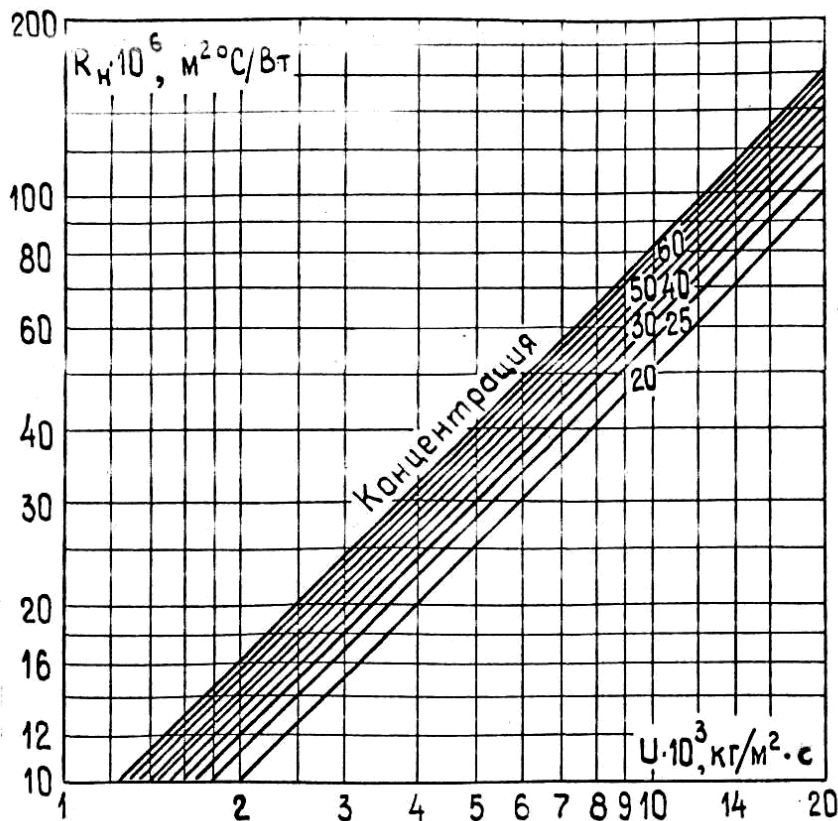


Рис. 10. Среднесуточный прирост термического сопротивления накипи

Составлены номограммы для расчета оптимального периода работы между промывками ВС ЦБК.

Приведенные номограммы и расчетные зависимости являются основой для квалифицированного управления работой ВС ЦБК, обеспечивают максимальную продолжительность их эксплуатации между стадиями промывки

при заданной производительности и, соответственно, повышение производительности всего комбината.

В шестой главе рассматриваются термические сопротивления передаче теплоты при конденсации $R_{см} = 1/\alpha_{см}$: термическое сопротивление пленки конденсата R_k , термическое сопротивление фазового перехода R_f и диффузионное термическое сопротивление R_d . Гидродинамика течения пленки конденсата, определяющая интенсивность теплообмена при пленочной конденсации, имеет сходство вследствие постоянства плотности теплового потока с условиями течения и теплообменом при поверхностном испарении пленки, нагретой до температуры насыщения. Исходя из этого, а также считая, что физические параметры пленки конденсата по высоте трубы постоянны, коэффициент теплоотдачи при конденсации при указанных допущениях не будет зависеть от характера изменения температуры поверхности трубы. Следовательно, методика и результаты исследований гидродинамики и теплоотдачи от гравитационно стекающей и испаряющейся пленки воды внутри трубы могут быть использованы для определения термического сопротивления α пленки конденсата $R_k = 1/\alpha$ на наружной поверхности вертикальных труб. В исследуемом диапазоне значений чисел Рейнольдса нами было рекомендовано эмпирическое уравнение (9). На рис. 11 представлена эта зависимость в координатах $Nu_m = f(Re_m)$ и сопоставлена с данными, рассчитанными по уравнению Гимбутиса.

При продольном и направленном вниз движении пара силы трения,

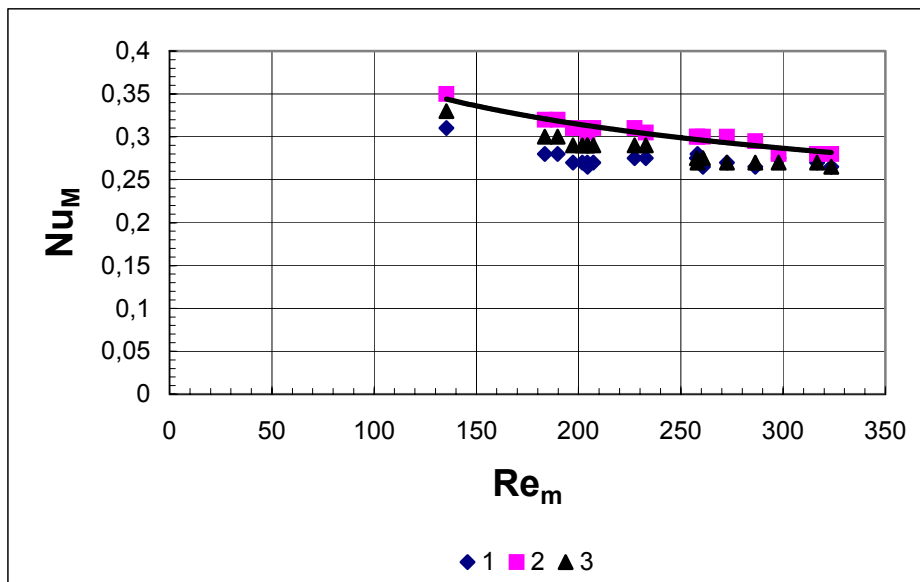


Рис. 11. Теплоотдача при конденсации пара на поверхности вертикальной трубы: 1-данные эксперимента; 2 - теоретические данные, рассчитанные по уравнению Гимбутиса; 3 - данные, рассчитанные по уравнению (9)

возникающие на границе раздела фаз, могут ускорять пленку конденсата. Существенным эффектом направленного вниз сдвигающего усилия пара на границе раздела может являться снижение числа критического $Re_{кр}$ при возникновении турбулентности. Показано, что в пределах изменения режимных параметров работы ВС влияние касательных напряжений на границе раздела на $Re_{кр}$ пренебрежимо мало.

Появление термического сопротивления фазового перехода обусловлено скачком температуры на границе раздела паровой и жидкой фаз. При малом коэффициенте конденсации скачок может быть значительным, особенно при низких давлениях. Сопротивление R_{ϕ} может быть сопоставимо с термическим сопротивлением пленки конденсата R_k . Известно, что при конденсации чистого водяного пара при давлении $P > 10^4$ Па в диапазоне работы ВС значением температурного скачка на границе раздела фаз пренебрегают.

Основные отличия конденсации парогазовой смеси от конденсации чистого пара заключаются в изменении по поверхности теплообмена температуры, при которой протекает процесс конденсации, и наличии, кроме переноса теплоты, переноса массы, что в конечном счете, приводит к уменьшению интенсивности теплообмена. Неконденсирующийся газ увлекается по направлению к границе раздела потоком пара, оставаясь там во время конденсации пара. Более легкие компоненты в сравнении с паром будут накапливаться на границе раздела, образуя там слой, через который менее летучие компоненты должны диффундировать, преодолевая дополнительное сопротивление. Поэтому пар, двигаясь под действием градиента своего парциального давления, преодолевает поток неконденсирующегося газа. В связи с этим возникновение температурного градиента Δt_{ϕ} необходимо рассматривать как введение дополнительного термического сопротивления, снижающего интенсивность теплоотдачи. Диффузионное термическое сопротивление слоя определяется по уравнению:

$$R_D = \frac{t_{n0} - t_{n.нов}}{\alpha_D(t_{n0} - t_{n.нов}) + r \cdot j_{n.нов}} = \frac{t_{n0} - t_{n.нов}}{\alpha_D(t_{n0} - t_{n.нов}) + r \cdot \beta(m_{n0} - m_{n.нов})[r + (i_{ж.нов} - i_{ж.0})]} \quad (15)$$

где α_D – конвективный коэффициент теплоотдачи от парогазовой смеси к пленке конденсата; r – теплота парообразования; $j_{n.нов}$ – поток массы пара у поверхности пленки конденсата; β – коэффициент массоотдачи; m_{n0} и $m_{n.нов}$ – относительные массовые концентрации пара в объеме и у поверхности.

Из уравнения (15) следует, что коэффициент теплоотдачи $\alpha_{см}$, куда входит R_D , зависит от интенсивности взаимосвязанных процессов тепло- и массообмена в парогазовой смеси и в пленке. Для расчета коэффициента $\alpha_{см}$ предварительно определяют на основании аналогии процессов тепло- и массообмена коэффициент массоотдачи β . Как следует из рис. 12, средний коэффициент массоотдачи для вертикального пучка труб в диапазоне изменения параметров работы ВС ЦБК определяется по зависимости В. А. Блюхина (16) с учетом полученного в результате исследований коэффициента $c = 0,46$:

$$Nu_D = C \frac{\sqrt{Re}}{\varepsilon_{ГО}^{0,5} \cdot \pi_D^{1/3}}, \quad (16)$$

где $c = 0,46$; $\pi_D = (p_{п0} - p_{п.пов})$; $d_{эКВ} = 4f/\Pi$; $\varepsilon_{ГО} = \frac{p_{г0}}{p}$ – количество неконденсирующихся газов.

В седьмой главе анализируются и выбираются оптимальные условия выпаривания из рассмотренных. Проведенные опыты при кипении в трубе

воды и растворов показывают, что, устанавливая правильные соотношения между количествами теплоты и раствора, подаваемых в аппарат, можно добиться высоких коэффициентов теплоотдачи, в том числе и в аппаратах, выпаривающих раствор высокой концентрации. Характеристикой этих соотношений является кажущийся уровень заполнения трубы, измеряемый наиболее просто по водомерному стеклу. Используя экстремальный характер зависимости $\bar{\alpha} = f(L_k)$, представленной на рис. 13, можно определить наиболее экономичные, с точки зрения передачи теплоты, режимы работы кипяtilьных труб. Для концентрации щелока до 35 % оптимальными являются

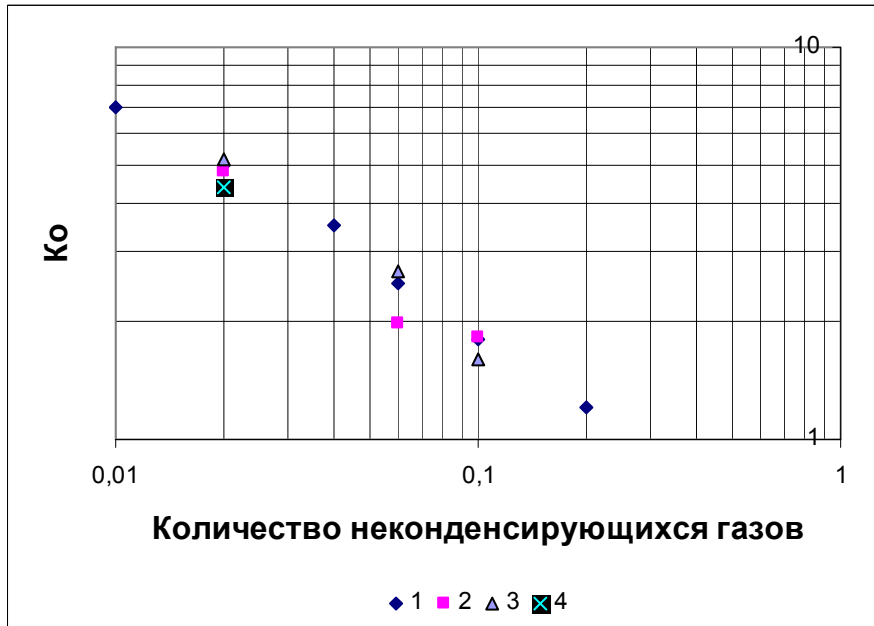


Рис. 12.
Массоотдача при конденсации пара из парогазовой смеси на трубах ВА:

$$Ko = \frac{Nu_D \cdot \pi_D^{1/3}}{Re^{0,5}};$$

1 – расчет по (16);
2, 3, 4 – данные эксперимента – ВС – 1, ВС – 2 и ВС – 3

уровни, составляющие 20 ÷ 40 % высоты трубы, а для щелоков более высокой концентрации – уровни порядка 50 ÷ 70 %. Таким образом, в аппаратах, выпаривающих плотные щелока, следует поддерживать повышенный кажущийся уровень.

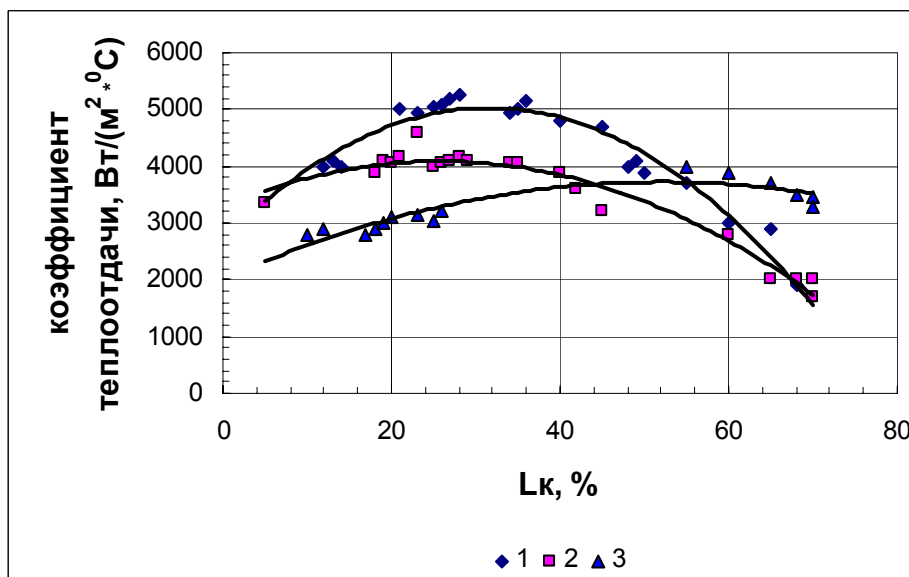


Рис. 13.
Изменение среднего коэффициента теплоотдачи в зависимости от кажущегося уровня заполнения кипяtilьной трубы щелоком концентрацией:
1 – 20 % а.с.в.;
2 – 30 %;
3 – 40 %

Из рис. 13 следует также, что в зависимости от L_k для концентрированных щелоков значение $\bar{\alpha}$ может быть выше, чем для средних и разбавленных. Кажущийся уровень в однопроходных ВА можно определить, кроме показаний водомерного стекла, по показанию специально установленного измерительного прибора. По этому показателю можно управлять режимами работы ВС с помощью средств автоматического регулирования.

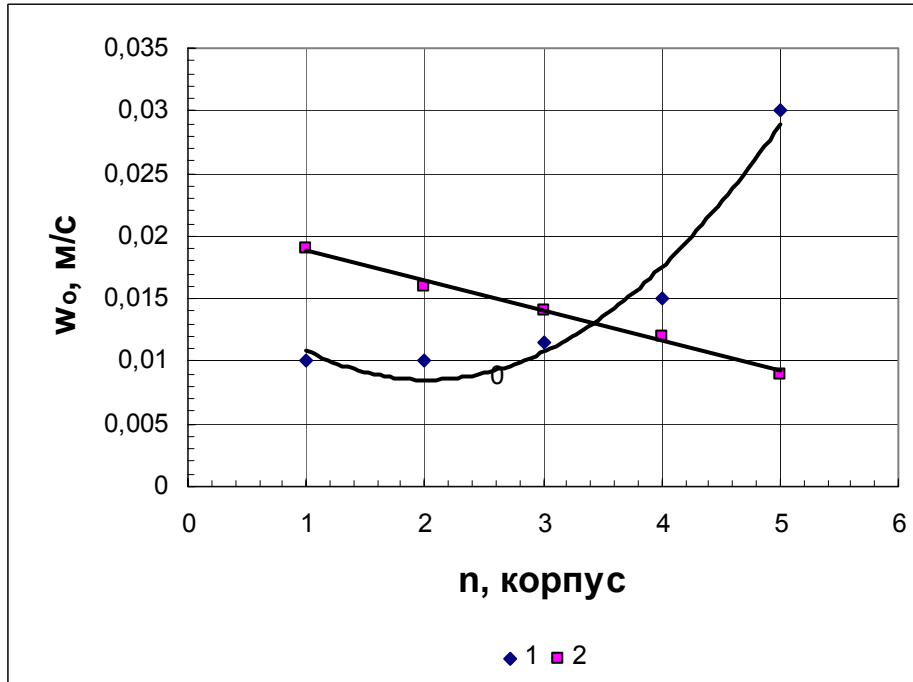


Рис. 14. Значения необходимого (1) и реального (2) изменения скорости циркуляции раствора в ВА по мере его выпаривания: n – номер корпуса ВС по ходу движения раствора

Уменьшение расхода раствора, связанное с выпариванием по мере прохождения им ВС, вызывает снижение скорости циркуляции w_0 (рис. 14, кривая 2) в однопроходных аппаратах. Уменьшение величины w_0 ниже определенного предела является одной из причин возникновения кризиса теплообмена, в результате которого наблюдается интенсивное накипеобразование. Получено уравнение, позволяющее по предельным значениям выходных паросодержаний определять оптимальную скорость циркуляции

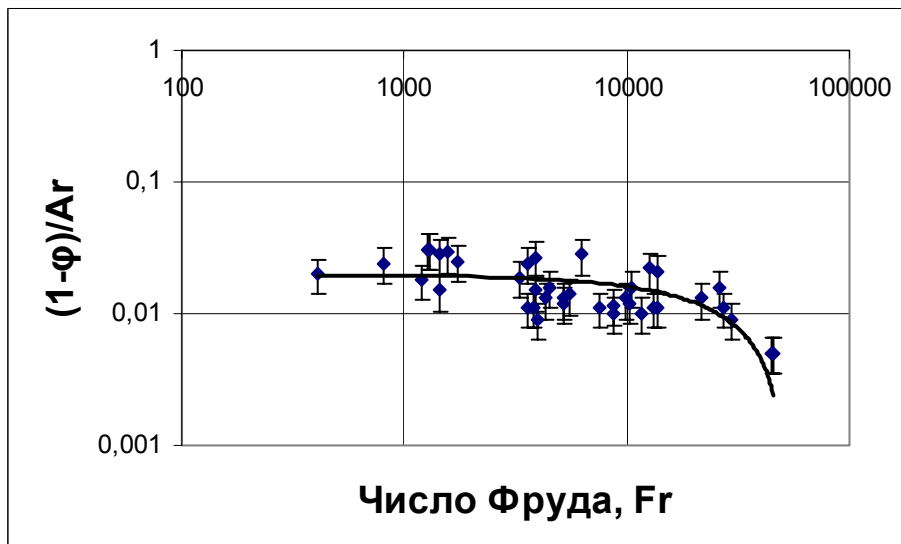


Рис. 15. Зависимость предельного влагосодержания от критериев Ag и Fr

раствора в кипятильных трубах и устанавливать необходимый для обеспечения данного режима кажущийся уровень выпарного аппарата:

$$(1 - \varphi)_{np} = 0,35 \text{Ar}^{0,22} / \text{Fr}^{0,46} . \quad (17)$$

Зависимость, характеризующая уравнение (17), представлена на рис. 15.

Механизм кризиса кипения рассматривают, как правило, в координатах $q_{кр} - x_{кр}$. Величиной, характеризующей начало кризиса теплообмена первого

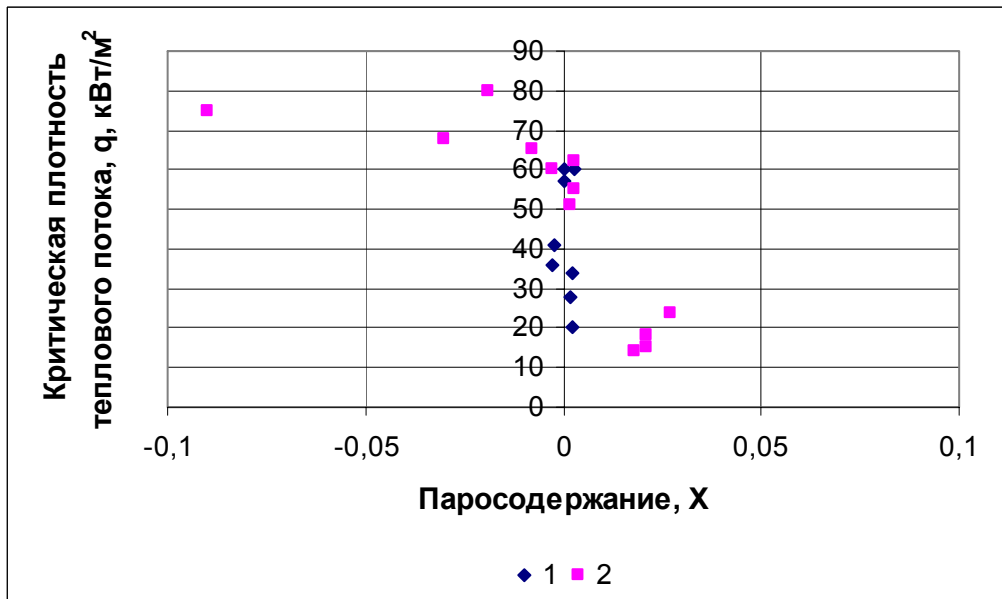


Рис. 16. Зависимость $q_{кр} = f(x)$ при кипении сульфатного щелока:
1– $b < 20\%$;
2– $b > 30\%$

рода в области отрицательных и малых значений паросодержаний, может являться паросодержание $x_{кр}$. На основании опытных данных, полученных на стендовой установке с разной концентрацией раствора и $w_0 = 0,015 \div 0,025$ м/с, $\rho w = 25$ кг/(м²×с), на рис. 16 построена зависимость $q = f(x)$ для кризисных условий при кипении пенообразующих растворов ЦБК. Кризис фиксировался в точке роста температуры стенки трубы и одновременного падения коэффициента теплоотдачи. На рис. 16 показано, что изменения величины критической плотности теплового потока находятся в очень малом интервале значений паросодержания x вследствие пенообразующих свойств растворов.

При отрицательных и малых значениях x , когда жидкая фаза занимает значительную часть поперечного сечения канала, кризис теплообмена возникает, как и при кипении в большом объеме, вследствие появления пленочного режима кипения у стенки трубы. Если раствор при входе в трубу перегрет относительно температуры кипения, наблюдается другая модель образования кризиса. Перегретый раствор при входе в кипятильную трубу вскипает. Образующаяся при кипении раствора пена, возникновение которой носит взрывной характер, способствует разрушению пленки жидкости в пристенной области. Кроме того, наличие пены затрудняет обмен жидкостью между

пристенной областью и ядром потока. Нарушается гидродинамическая устойчивость встречных потоков. При достижении критической плотности теплового потока устойчивость жидких пленок, пронизывающих двухфазный пограничный слой, нарушается, и стенка покрывается сплошным слоем пара. Условия обмена жидкостью между пленкой и ядром потока с понижением давления ухудшаются. Поэтому в аппаратах, работающих под вакуумом, где щелока имеют наименьшую концентрацию, кризис проходил более резко.

Перечисленные механизмы образования кризиса теплообмена при кипении пенообразующих растворов наблюдаются до значений паросодержаний $x \approx 0,05$. Для первой рассмотренной области кризиса теплообмена первого рода при $x < 0,001$ получено уравнение

$$q_{кр} = 0,56(1+b)^{1,1}(\delta t_n + 0,5)^{0,1}, \text{ [кВт/м}^2\text{] } , \quad (18)$$

где $b = 10 \div 60$ % а.с.в. – концентрация раствора; $\delta t_n = 1 \div 30$ °С – недогрев раствора до температуры кипения.

Из приведенной зависимости следует, что критическая плотность возрастает с увеличением концентрации, поскольку увеличиваются силы, повышающие устойчивость пристенной пленки с увеличением недогрева раствора до температуры кипения. Паросодержание и массовая скорость парощелочковой смеси в данном диапазоне параметров практически не влияют на критическую плотность теплового потока.

Критическая плотность теплового потока при кипении пенообразующих растворов ЦБК на участке $x = 0,001 \div 0,005$, где кризис теплообмена первого рода возникает в случае образования в парогенерирующей трубе микропленки в условиях неравновесного изменения расхода жидкости в пристенной пленке и ее высыхания, описывается уравнением:

$$q_{кр} = 525 \cdot 10^{-5} \frac{(\rho w)^{0,31} (b+1)^{0,88}}{x^{0,75}} . \quad (19)$$

Из приведенной зависимости следует, что критическая плотность теплового потока растет с увеличением концентрации раствора и скорости раствора. С ростом паросодержания критическая плотность уменьшается.

Поскольку исследовались режимы кипения растворов в диапазоне изменения параметров работы ВА ЦБК, область кризисных явлений, соответствующая дальнейшему увеличению паросодержания не изучалась.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

По результатам проведенных промышленных, стендовых и теоретических исследований режимов работы ВС сделаны следующие выводы:

1. Предложены пути совершенствования энергоиспользования при применении противоточной схемы ВС на ЦБК. Экспериментально показана возможность и даны параметры безнакипного выпаривания пенных отработанных

ных растворов ЦБП в длиннотрубных аппаратах с гравитационным течением выпариваемого раствора.

2. Разработаны средства, методики для экспериментального исследования процессов теплообмена, создан экспериментальный комплекс для проведения стендовых испытаний и проведены комплексные исследования теплопередачи при выпаривании восходящих и гравитационно-стекающих пенных растворов ЦБК на стендовых установках и промышленных ВС.

3. На основе экспериментальных данных разработаны: физическая модель движения многокомпонентных пенных двухфазных парорастворных потоков в кипятильных трубах ВА в условиях восходящего и гравитационного течения; определено влияние физико-химических характеристик черного сульфатного щелока, водного предгидролизата и режимных параметров работы ВА на интенсивность выпаривания.

4. Установлены границы существования характерных режимов течения двухфазной смеси и теплопереноса в испарительных каналах с подъемным и гравитационным движением. Изучен механизм теплообмена на отдельных стадиях испарения воды из раствора, выявлены условия стабильности выделенных зон в испарительных трубах и получены на основе экспериментальных данных и их анализа обобщающие зависимости для расчета интенсивности теплоотдачи в каждой из этих зон.

5. Определены оптимальные параметры тепловых и гидродинамических режимов, определяющих максимальные значения коэффициентов теплоотдачи при кипении и конденсации, для обеспечения длительной работы ВА в условиях минимального накипеобразования и высокой производительности.

6. Предложена методика расчета для определения плановых промывок ВС.

7. Экспериментально установлены особенности теплоотдачи к кипящим сильнопенящимся растворам в трубе: отмечено быстрое развитие кризиса теплоотдачи как при высоких ($q < 100$ кВт/м²), так и при низких ($q < 10$ кВт/м²) тепловых потоках при определенных режимных параметрах; в качестве параметров, характеризующих предельный режим работы испарительных каналов с подъемным движением двухфазного потока, рекомендовано принимать предельное влагосодержание $(1-\varphi)_{np}$ и критические тепловые нагрузки $q_{кр}$; для каналов с гравитационно-стекающей пленкой жидкости режим начала ухудшения теплоотдачи характеризуется предельной плотностью орошения $\Gamma_{пред.}$; предложены расчетные зависимости для определения величин $(1-\varphi)$, $q_{кр.}$, $\Gamma_{пред.}$.

8. Изучен процесс конденсации пара из парогазовой смеси на вертикальных трубах ВА. На основе промышленных экспериментальных данных и их анализа получена расчетная зависимость для определения интенсивности теплоотдачи.

9. Результаты исследований по динамике накипеобразования, приведенные в настоящей работе в виде номограмм и расчетных зависимостей, являются основой для управления работой ВУ ЦБК, обеспечивают максимальную продолжительность их эксплуатации между стадиями промывки, в результате чего повышается производительность ВС и всего комбината.

10. Обобщенные методы расчета теплогидродинамических процессов, основные концепции комплексной оптимизации энергоемких технологических звеньев теплотехнологических схем, предложения по снижению накипеобразования на кипящих поверхностях труб в виде программного метода расчета ВС используются при модернизации, разработке, внедрении и промышленной отладке ВС ЦБК, ЗАО «ГИПРОБУМ», ГУП «ЦНИИБуммаш». Результаты исследований используются в учебном процессе СПбГТУРП.

Основные положения и результаты диссертационной работы изложены в следующих публикациях:

1. Суслов В.А. Сопоставление тепловой эффективности выпарных станций сульфатного производства, поставляемых на предприятия ЦБП зарубежными фирмами [Текст] / В.А. Суслов, С.В. Антуфьев, В.Л. Мовсесян // Машины и оборудование ЦБП: межвуз. сб. научн. тр., вып. 5.-Л., ЛТА, 1977.-С. 131-133.

2. Суслов В.А. Результаты сопоставления опытных и расчетных данных по теплообмену при кипении сульфатного щелока [Текст] / В.А. Суслов // Машины, конструирование, расчеты и оборудование ЦБП: межвуз. сб. научн. тр., вып. 6.- Л., ЛТА, 1978.-С. 96-101.

3. Суслов В.А. Стенд для исследования механизма теплообмена и гидродинамики при пленочном кипении сульфатного щелока [Текст] / В.А. Суслов, В.И. Кушнир // Машины, конструирование, расчеты и оборудование ЦБП: межвуз. сб. научн. тр., вып. 6.-Л., ЛТА, 1978.-С. 102-106.

4. Мовсесян В.Л. Выпарные аппараты и схемы выпарных станций ЦБП [Текст] : обзорн. информ. ЦИНТИхимнефтемаш / Мовсесян В.Л., Суслов В.А.-М., 1979.- 50 с.

5. Суслов В.А. Анализ процесса теплоотдачи при кипении в вертикальных трубах пленочных выпарных аппаратов [Текст] / В.А. Суслов, В.А. Веденеев, Г.В. Рижинашвили // Машины, конструирование, расчеты и оборудование целлюлозно-бумажных производств: межвуз. сб. научн. тр., вып. 7.- Л., ЛТА, 1979.-С. 127-130.

6. Суслов В.А. Исследование теплообмена при кипении слабого черного сульфатного щелока в вертикальных трубах выпарных аппаратов [Текст] / В.А. Суслов // Машины и аппараты ЦБП: межвуз. сб. научн. тр., вып. 8.- Л., ЛТИ ЦБП, 1980.-С. 102-105.

7. Суслов В.А. Исследование процессов теплообмена при испарении щелочных растворов в производстве бумаги [Текст] / В.А. Суслов // Химия и технология бумаги: межвуз. сб. научн. тр., вып. 9.-Л., ЛТИ ЦБП, 1981.-С. 137-141.

8. Суслов В.А. Исследование теплоотдачи при выпарке черного сульфатного щелока [Текст] / В.А. Суслов, Г.В. Рижинашвили // Бумажная промышленность.- 1981.-№ 12.-С. 20-21.

9. Суслов В.А. Результаты промышленных исследований режимов работы выпарных станций ЦБП [Текст] / В.А. Суслов // Машины и аппараты ЦБП : межвуз. сб. научн. тр., вып. 10.-Л., ЛТИ ЦБП, 1982.-С.133-135.

10. Суслов В.А. Анализ теплообмена при кипении сульфатного щелока по усредненным опытным данным [Текст] / В.А. Суслов // Машины и аппараты ЦБП : межвуз. сб. научн. тр., вып. 11.-Л., 1983.-С. 113-115.

11. Суслов В.А. Позонное исследование теплоотдачи при кипении водного предгидролизата в вертикальной трубе [Текст] / В.А. Суслов, В.И. Кушнир ; ВНИПИЭИлеспром. – М., 1985.- Деп. № 1649-лб.

12. Суслов В.А. Исследование теплообмена при выпаривании черных сульфатных щелоков [Текст] / В.А. Суслов // Теплофизика и гидродинамика процессов кипения и конденсации : материалы Всесоюзн. конф., т.1, ч.4- Рига, РПИ, 1985.-С. 117-119.

13. Суслов В.А. Проектирование выпарных установок [Текст] : учеб. пособие / В.А. Суслов, В.Л. Мовсесян, А.Ф. Мурзич, В.А. Ганичев.-Л.: ЛТА., 1987.- 84 с.

14. Суслов В.А. Интенсификация работы выпарных установок глиноземного производства [Текст] / В.А. Суслов, Е.М. Милин, А.М. Насопов, А.А. Яновский, Д.Р. Сандлер // Цветная металлургия.- 1988.- № 6.- С.31-35.

15. А.с. 1432122 СССР. Устройство для регенерации тепла и химикатов и парогазовых выбросов растворителя плава содорегенерационного котлоагрегата [Текст] / Л.В. Романова , А.В. Наумов, В.А. Суслов и др.(СССР).- 1988.

16. Суслов В.А. Ступенчатый метод расчета выпарных аппаратов [Текст] / В.А. Суслов // Проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов на промпредприятиях и ТЭС: межвуз. сб. научн. тр.- Л., ЛТИ ЦБП, 1988.-С. 8-13.

17. Мурзич А.Ф. Промышленные тепломассообменные процессы и установки в ЦБП [Текст] : учеб. пособие / А.Ф. Мурзич, В.Л. Мовсесян, В.А. Суслов, Е.К. Гусев.-Л.: ЛТИ ЦБП, 1989.- 80 с.

18. Суслов В.А. Исследование теплоотдачи при кипении черного сульфатного щелока в экономайзерной зоне выпарных аппаратов [Текст] / В.А. Суслов // Проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов на промпредприятиях и ТЭС : межвуз. сб. научн. тр.- Л., ЛТИ ЦБП, 1989.-С. 10-13.

19. Суслов В.А. Расчет коэффициента теплопередачи в выпарных аппаратах отрасли [Текст] / В.А. Суслов, Е. В. Алексеев // Бумажная промышленность.- 1989.- № 2.-С. 30-31.

20. Суслов В.А. Стенд для исследования процесса накипеобразования в кипящих трубах выпарных аппаратов ЦБП [Текст] / В.А. Суслов, В.В. Семенов // Машины и аппараты целлюлозно-бумажного производства: межвуз. сб. научн. тр.- Л., ЛТИ ЦБП, 1989, с. 91-92.

21. Суслов В.А. Теплоотдача при кипении черного сульфатного щелока в вертикальных трубах выпарных аппаратов целлюлозно-бумажной промышленности [Текст] / В.А. Суслов // Двухфазный поток в энергетических машинах и аппаратах : тез. докл. 8-й Всесоюзн. конф. - Л., 1990.-С. 352.

22. Суслов В.А. Исследование процесса накипеобразования в трубах выпарных аппаратов батарей Котласского ЦБК [Текст] / В.А. Суслов , В.В. Семенов, Л.А. Михайлов // Проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов на промпредприятиях и ТЭС : межвуз. сб. научн. тр. – Л., ЛТИ ЦБП, 1990. -С. 6-9.

23. Романова Л.В. Установка для конденсации парогазовой смеси из бака плава содорегенерационных котлоагрегатов [Текст] / Л.В. Романова, В.А. Суслов // V Минский международный форум по тепло-и массообмену : тез. докл. и сообщ.- Минск, 2004.-С. 119-120.

24. Суслов В.А. Обобщение усредненных по поверхности теплообмена опытных данных, полученных при выпаривании водного предгидролизата [Текст] / В.А. Суслов // Проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов на промпредприятиях и ТЭС : межвуз. сб. научн. тр. – Л., ЛТИ ЦБП, 1990.-С. 9-12.

25. А.с. 1646087 СССР. Выпарной аппарат [Текст] / В.А. Суслов и др.(СССР) .- 1991.

26. Суслов В.А. Оптимальные скорости подачи щелока в трубы выпарных аппаратов сульфат-целлюлозного производства [Текст] / В.А. Суслов, Г.В. Рижинашвили // Проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов на промпредприятиях и ТЭС : межвуз. сб. научн. тр.- СПб., СПбТИ ЦБП, 1992.- С. 19-21.

27. А.с. 1829154. Выпарной аппарат для кристаллизующихся растворов [Текст] / В.А. Суслов и др. -1992.

28. Суслов В.А. Параметрическое уравнение для расчета коэффициента теплопередачи при выпаривании черных сульфатных щелоков [Текст] / В.А. Суслов, Г.В. Рижинашвили // Проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов на промпредприятиях и ТЭС : межвуз. сб. научн. тр. – СПб., СПбГТУ РП, 1993. - С. 14-18.

29. Суслов В.А. Теплообмен и гидродинамика пленочного течения в выпарных аппаратах целлюлозного производства [Текст] / В.А. Суслов, Г.В. Рижинашвили // Кипение, кризисы кипения, закризисный теплообмен : тр. 1-й Рос. нац. конф. по теплообмену . Т. 4.- М., МЭИ, 1994.- С. 225 -229.

30. Суслов В.А. Анализ технико-экономических показателей различных схем выпарных установок целлюлозного производства [Текст] / В. А. Суслов, Г.В. Рижинашвили // Целлюлоза, бумага, картон. – 1994.- № 11-12.- С. 21-22.

31. Суслов В.А. Способ перевода выпарных аппаратов на режим работы с нисходящей пленкой раствора [Текст] / В.А. Суслов, Г.В. Рижинашвили // Организация природоохранной деятельности на предприятиях и пути ресурсосбережения: тез. докл. Рос. научно-практ. конф.- СПб., 1996.-С. 23-25.

32. Суслов В.А. Влияние термокапиллярного эффекта на теплопередачу в гравитационно стекающей пленке жидкости [Текст] / В.А. Суслов, В.Ю. Бойков, Г.В. Рижинашвили // Проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов на промпредприятиях и ТЭС : межвуз. сб. научн. тр.- СПб., СПбГТУ РП, 1997.- С. 82-86.

33. Суслов В.А. Особенности работы распределительных устройств типа спиральных вставок для выпарных аппаратов с падающей пленкой [Текст] / В.А. Суслов, Г.В. Рижинашвили, В.Ю. Бойков // Проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов на промпредприятиях и ТЭС : межвуз. сб. научн. тр.- СПб., СПбГТУ РП, 1997.- С. 51-55.

34. Суслов В.А. Исследование теплоотдачи при кипении сульфатного щелока в трубах выпарных аппаратов в зоне кольцевого течения [Текст] / В.А. Суслов // Проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов на предприятиях и ТЭС : межвуз. сб. научн. тр.- СПб., СПбГТУ РП, 1997.-С. 10-13.

35. Суслов В.А. Основные процессы при выпаривании щелоков целлюлозного производства [Текст] : учеб. пособие для вузов /В.А. Суслов. – СПб.: СПбГТУ РП, 1998.- 92 с.

36. Суслов В.А. Повышение эффективности сжигания сульфатных щелоков целлюлозно-бумажного производства [Текст] / В.А. Суслов, Г.В. Рижинашвили, В.Ю. Бойков // Опыт и перспективы развития ресурсосберегающих технологий и утилизации твердых отходов на предприятиях различных форм собственности: материалы научно-практ. конф.- СПб., СПбГТУ РП, 1998.-С. 94-96.

37. Суслов В.А. Теплообмен на начальном участке трубы при нагревании падающей пленки жидкости [Текст] / В.А. Суслов, Г.В. Рижинашвили, В.Ю. Бойков // Кипение, кризисы кипения, закризисный теплообмен. Испарение.

Конденсация : тр. 2-й Рос. нац. конф. по теплообмену . Т.4.- М., МЭИ, 1998.-С. 362-363.

38.Суслов В.А. Оптимизация работы выпарных станций ОАО «Котласский ЦБК»[Текст] / В.А. Суслов, М.А. Чайка // Проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов на промпредприятиях и ТЭС: межвуз. сб. научн. тр.-СПб., СПбГТУ РП, 2002.-С. 64-69.

39.Суслов В.А. Исследование паросодержания двухфазного потока при кипении щелока целлюлозно-бумажной промышленности в длинных трубах [Текст] / В.А. Суслов, М.И. Чайка // 3-я Российская национальная конференция по теплообмену : программа. - М., МЭИ, 2002.-С. 48.

40.Романова Л.В. Установка для конденсации парогазовой смеси из бака плава содорегенерационных котлоагрегатов [Текст] / Л.В. Романова, В.А. Суслов // V Минский международный форум по тепло-и массообмену : тез. докл. и сообщ.- Минск, 2004.- С. 119-120.

41.Суслов В.А. Кризисы теплообмена при кипении щелочных растворов в трубах выпарных аппаратов ЦБП [Текст] / В.А. Суслов // Современная наука и образование в решении проблем экономики европейского севера: материалы Международной научно-техн. конф., посвященной 75-летию АЛТИ-АГТУ. Т. 1. - Архангельск, 2004.- С. 371-373.

42.Суслов В.А. Повышение надежности выпарных аппаратов при выпаривании черных сульфатных щелоков [Текст] / В.А. Суслов // Целлюлоза, бумага, картон.- 2004.- № 10.- С. 58-61.

43.Суслов В.А. Основные процессы при выпаривании щелоков целлюлозного производства [Текст]: учеб. пособие для вузов / В.А. Суслов. – СПб.: СПбГТУ РП, 2004.- 102 с.

44.Суслов В.А. Результаты промышленных исследований режимов работы выпарных станций ЦБП и их сопоставление по эффективности выпаривания [Текст] / В.А. Суслов // Изв. ВУЗов. Лесной журнал.- 2005.- № 1-2.- С. 168-172.

45.Суслов В.А. Определение коэффициентов накипеобразования на выпарных батареях целлюлозно-бумажных комбинатов [Текст] / В.А. Суслов // Изв. ВУЗов. Лесной журнал.- 2005.- № 1-2.- С. 86-99.

46.Суслов В.А. Исследование теплообмена при кипении отработанных щелочных растворов в трубах выпарных аппаратов [Текст] / В.А. Суслов // Теплоэнергетика.- 2005.- № 8.- С. 68-71.

47.Суслов В.А.Зависимость локальных коэффициентов теплоотдачи при кипении от параметров и структур двухфазных пенообразующих водных растворов [Текст] / В.А. Суслов // Теплоэнергетика .- 2005.- № 9.- С. 74-77.

48.Суслов В.А. Исследование гидродинамики и теплоотдачи при гравитационном стекании пленки сульфатного щелока в вертикальной трубе выпарного аппарата [Текст] / В.А. Суслов, Г.В. Рижинашвили // Целлюлоза, бумага, картон.-2005.- № 5.-С. 68-71.

49.Суслов В.А. Определение коэффициента теплоотдачи при конденсации парогазовой смеси на вертикальном пучке труб выпарных аппаратов [Текст] / В.А. Суслов // Ресурсо- и энергосбережение в целлюлозно-бумажной промышленности и городском коммунальном хозяйстве: материалы Международной научно-практической конференции: сборник трудов, СПб., 2005.-С. 295-300.

Условные обозначения

q – плотность теплового потока, Вт/м²; r – скрытая теплота парообразования, кДж/кг; ρ'' – плотность пара, кг/м³; w_0 – скорость циркуляции жидкости, м/с; α – коэффициент теплоотдачи при кипении раствора в трубе; $\alpha_{\text{конв}}$ – коэффициент теплоотдачи при вынужденном движении однофазной жидкости, Вт/(м²°С); σ – коэффициент поверхностного натяжения, н/м; ρ – плотность жидкости, кг/м³; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м°С); ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с; a – коэффициент температуропроводности, м²/с; Δt_H – недогрев жидкости до состояния насыщения, °С; C_p – теплоемкость жидкости, кДж/(кг°С); φ – истинное объемное паросодержание; β – расходное объемное паросодержание; d – диаметр трубы, м; L – длина кипяtilьной трубы; x – весовое паросодержание потока; $w_{\text{см}}$ – скорость парожидкостной смеси, м/с; V – концентрация раствора, % а.с.в.; ρw – массовая скорость потока, кг/(м²с); g – ускорение свободного падения, м/с; Γ_v – объемная плотность орошения, м³/(м·с); δ^* – средняя толщина пленки при стабилизированном течении, м; $L_{\text{вп}}$ – кажущийся уровень заполнения кипяtilьной трубы, м.

Критерии подобия

$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda}$ – критерий Нуссельта; $Nu_m \equiv Nu_m = \frac{\alpha}{\lambda} \left(\frac{v^2}{g} \right)^{1/3}$ – модифицированное число Нуссельта; $Ki = \frac{q}{\rho' \cdot w_0 \cdot \Delta i_n}$; $Kw = \frac{q}{r \cdot \rho'' \cdot w_0}$; $Kq = \frac{q \ell}{r \cdot \rho \cdot v}$; $K = \frac{r}{c \cdot \Delta t}$ – критерии фазового превращения; $K_H = \frac{r}{\Delta i_n}$ – критерий недогрева; $Re = \frac{wd}{\nu} = \frac{4\Gamma}{\rho\nu} = \frac{4\Gamma_v}{\nu}$ – критерий Рейнольдса; $Fr = \frac{w^2}{gd}$ – критерий Фруда; $Pr = \nu/a$ – критерий Прандтля; $W_3 = \frac{(w_{\text{отн}}'')^2 \rho''}{\sqrt{\sigma \cdot g \cdot \rho'}}$ – эмульсионное число Вебера.

СУСЛОВ Вячеслав Александрович

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫПАРИВАНИЯ ОТРАБОТАННЫХ ВАРОЧНЫХ РАСТВОРОВ ЦЕЛЛЮЛОЗНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Автореферат

Подп. к печати

06. Формат 60x84/16

Уч.-изд. л. 2,0. Тираж 100 экз. Заказ

Ризограф ГОУ ВПО СПбГТУРП. 198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4.