

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН
ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АБУ РАЙХАНА БЕРУНИ**

На правах рукописи
УДК 536.423.1:66.048.541

БАХРОНОВ Хошим Шайимович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫПАРИВАНИЯ
КРИСТАЛЛИЗУЮЩИХСЯ РАСТВОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ПСЕВДООЖИЖЕННОГО СЛОЯ**

**Специальность 05.17.08 – «Процессы и аппараты химической
технологии»**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Ташкент – 2009

Работа выполнена на кафедре «Химия и химическая технология»
Навоийского государственного горного института и на ОАО «Навоиазот».

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Закиров Санат Гапурович.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Нурмухамедов Хабибулло Саъдуллаевич

доктор технических наук, профессор
Мирзарахимов Мирсолих Султонович

доктор технических наук
Маннанов Улугбек Васикович

Ведущая организация: **ГАК «Узкимёсаноат»**

Защита диссертации состоится «___» _____ 2009 г. в 10⁰⁰ часов на заседании специализированного совета Д 067.07.01 при Ташкентском государственном техническом университете имени Абу Райхана Беруни по адресу: 100095, г. Ташкент, ул. Университетская, 2, факультет «Электроника и автоматика», ауд. 418.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке Ташкентского государственного технического университета имени Абу Райхана Беруни (г. Ташкент, ул. Университетская, 2)

Автореферат разослан «___» _____ 2009 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
доктор технических наук, профессор

Азимов Р.К.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность работы. В процессе работы теплообменного оборудования при работе с высокосоленой водой и кристаллизующимися растворами на поверхностях нагрева образуются твердые отложения, которые являются основной причиной уменьшения эффективности их работы. В связи с этим, разработка новых высокоэффективных способов интенсификации теплообмена и защиты теплообменных поверхностей от накипи является сложной, но актуальной и практически важной научно-технической задачей.

Организация псевдооживления твердых частиц в трубах теплообменного аппарата позволяет исключить отложения солей на поверхности теплообмена. Хаотическое движение твердых частиц создает высокую турбулентность потока по всей длине трубы и разрушает пристенный слой жидкости, что не только исключает загрязнение поверхностей, но также повышает коэффициент теплоотдачи со стороны раствора.

Степень изученности проблемы. Анализ научно-технической литературы, касающейся исследований гидродинамики и внешнего теплообмена в аппаратах с взвешенным слоем зернистого материала показал, что жидкостное псевдооживление в узких трубках недостаточно изучено. В литературе отсутствует информация об эффективности применения метода псевдооживления при выпаривании кристаллизующихся растворов.

Связь диссертационной работы с тематическими планами НИР. Диссертационная работа выполнена в соответствии с тематическим планом государственной научно-технической программы Государственного Комитета по координации и развитию науки и технологий при Кабинете Министров Республики Узбекистан, а также хоздоговорной работы с ОАО «Навоизот» и является результатом научных исследований автора, проводившихся в период с 1988 по 2009 гг.

Цель исследования. Обобщение и развитие научных достижений в области гидродинамики, структуры и внешнего теплообмена в дисперсных средах, создание высокоэффективного оборудования для выпаривания кристаллизующихся растворов в псевдооживленных средах, направленных на интенсификацию теплообмена, а также снижения накипеобразования и разработка методов расчета выпарных аппаратов с взвешенным слоем твердых частиц.

Задачи исследования. Для достижения указанной цели поставлены и решены следующие задачи.

Проведены комплексные экспериментальные исследования:

1. Порозности и гидравлического сопротивления неподвижного монодисперсного слоя сферических частиц, которые существенно влияют на основные технологические параметры процесса псевдооживления; получено эмпирическое уравнение для расчета порозности зернистого материала в стесненных условиях.

2. Гидродинамики и структуры псевдооживленного жидкостью слоя в узких трубах и определены их закономерности, получена зависимость для

определения скорости начала жидкостного псевдооживления и расширения слоя, теоретически выведены уравнения гидромеханики дисперсных систем.

3. Внешнего конвективного теплообмена в выпарном аппарате с вынесенной зоной кипения с учетом структурных и гидродинамических эффектов, реализуемых у поверхности стенки трубы, получена формула для расчета коэффициента теплоотдачи от стенки к жидкостному псевдооживленному слою. Интенсификации теплообмена в выпарном аппарате с использованием метода псевдооживления твердых частиц по общим показателям работы.

4. Интенсивности теплообмена при кипении; влияния на величину теплоотдачи гидродинамических и тепловых режимов работы выпарного аппарата; степени интенсификации теплоотдачи при кипении с использованием псевдооживленного слоя твердых частиц, а также влияния геометрических, структурных и теплофизических параметров последних на интенсивность теплоотдачи; получено эмпирическое уравнение для расчета коэффициента теплоотдачи в выпарных аппаратах с кипением в трубах с псевдооживленным слоем зернистого материала.

5. Закономерностей отложения накипи на экономайзерном и испарительном участках кипяточной трубы; выяснения зависимостей коэффициента накипеобразования от удельной тепловой нагрузки и скорости циркуляции; влияния концентрации раствора, скорости циркуляции, а также геометрических и структурных параметров псевдооживленного слоя на динамику накипеобразования.

Проведены промышленные испытания:

1. Выпарного аппарата с естественной циркуляцией и кипением в трубах при выпаривании раствора роданистого аммония, установлено влияние уровня однофазной жидкости на теплотехнические показатели аппарата и на скорость солеотложения.

2. Выпарного аппарата с принудительной циркуляцией и вынесенной зоной кипения при выпаривании раствора поваренной соли для определения эффективности введения в поток циркулирующего раствора кристаллов хлористого натрия (метод «затравки») и организации в греющих трубах псевдооживления инертных частиц.

Разработаны:

1. Эффективный способ снижения солеотложения и интенсификации внешнего теплообмена (при кипении и конвективном теплообмене) в псевдооживленных средах, позволяющий уменьшить расход энергии, капитальные затраты и стоимость обслуживания.

2. Гидродинамическая модель псевдооживленной жидкостью среды в узких трубах; модель переноса теплоты с учетом структурных и гидродинамических эффектов, реализуемых в трубе с взвешенным слоем; теоретическое описание процесса накипеобразования.

3. Методика инженерного расчета выпарного аппарата с псевдооживленным слоем зернистого материала.

Объект и предмет исследования. Процессы переноса теплоты в условиях солеотложения при нагревании и кипении, в псевдооживенных жидкостью или парожидкостной смесью средах. Установление закономерностей влияния геометрических, теплофизических и структурно-гидродинамических параметров на теплообмен между стенкой трубы и движущимся в ней псевдооживенным слоем, а также на интенсивность отложения солей на поверхности теплообмена.

Методы исследований. Экспериментальные и теоретические исследования гидродинамики, внешнего теплообмена и солеотложения в аппарате с псевдооживенным слоем твердых частиц. В этих исследованиях использованы методы теории планирования экспериментов, статистической обработки результатов, частные методики, электронные измерительные системы и приборы. При теоретических исследованиях использованы законы сохранения массы и количества движения, методы математической статистики, моделирования. Проверка результатов лабораторных исследований проводилась в производстве на промышленных аппаратах.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Результаты исследования гидродинамики и структуры неподвижного и псевдооживенного жидкостью слоев зернистого материала в узких трубах.

2. Результаты комплексного исследования внешнего конвективного теплообмена от стенки трубы к псевдооживенному слою, в выпарном аппарате с вынесенной зоной кипения.

3. Результаты исследования по определению эффективности применения метода псевдооживения в выпарных аппаратах с кипением в трубах.

4. Результаты исследования интенсивности солеотложения в выпарных аппаратах с кипением в трубах и с вынесенной зоной кипения и эффективности способа предотвращения отложений с помощью дисперсных систем.

5. Полученные выражения для определения порозности зернистого материала в узких трубках, скоростей начала псевдооживения и поршнеобразования, расширения взвешенного слоя, коэффициента теплоотдачи при нагревании и кипении.

6. Разработанные методы расчета и усовершенствования оборудования для выпаривания кристаллизующихся растворов в псевдооживенных средах.

Научная новизна:

– впервые проведены комплексные теоретические и экспериментальные исследования гидродинамики, структуры, теплообмена и накипеобразования в жидкостном псевдооживенном слое зернистого материала в узких трубках;

– установлено влияние отношения диаметра аппарата к диаметру частиц на порозность неподвижного слоя зернистого материала в стесненных условиях и предложено эмпирическое уравнение для ее расчета;

– исследована гидродинамика неподвижного и псевдооживенного жидкостью слоев в стесненных условиях; определены основные технологические параметры, такие как гидравлическое сопротивление слоя, скорость, при которой неподвижный слой зернистого материала переходит в

псевдооживленное состояние, расширение взвешенного слоя, перемешивание твердой фазы и унос частиц из аппарата;

– получены эмпирические зависимости для определения скорости начала псевдооживления и начала режима поршнеобразования, а также порозности взвешенного слоя в стесненных условиях; теоретически выведены уравнения гидромеханики дисперсных систем с учетом влияния поверхности стенки;

– впервые исследована конвективная теплоотдача от внутренней поверхности стенки трубы к псевдооживленному жидкостью слою, выявлено влияние размеров, теплофизических свойств и концентрации твердых частиц на интенсивность переноса тепла и получено выражение для расчета теплоотдачи внутри трубы с взвешенным слоем зернистого материала;

– впервые применен метод интенсификации теплообмена при кипении в трубах, заключающийся в использовании дисперсных систем в качестве промежуточного теплоносителя, получено уравнение подобия для расчета коэффициента теплоотдачи при кипении жидкостей с инертными частицами, установлена закономерность повышения интенсивности теплообмена при кипении;

– изучены и установлены факторы, влияющие на процесс солеотложения в выпарных аппаратах, как без дисперсных систем, так и с псевдооживленным слоем зернистого материала;

– промышленные, экспериментальные и теоретические исследования позволили установить закономерности тепло- и гидродинамических процессов в выпарных аппаратах в зависимости от режимных факторов, расходных параметров, геометрических и структурных характеристик и физических свойств частиц зернистого материала и получить обобщающие зависимости, охватывающие диапазон режимных параметров работы выпарных аппаратов в практике.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Проведенные экспериментальные и теоретические исследования, полученные эмпирические и аналитические зависимости и анализ литературных данных позволили:

– разработать метод расчета порозности неподвижного слоя зернистого материала в стесненных условиях;

– разработать практические рекомендации и методы расчета гидравлического сопротивления неподвижного и псевдооживленного слоев зернистого материала, скорости начала псевдооживления, поршнеобразования и уноса, расширения кипящего слоя и перемешивания твердых частиц в слое, псевдооживленным жидкостью в стесненных условиях;

– установить закономерности повышения интенсивности внешнего конвективного теплообмена в трубчатых аппаратах с псевдооживленным зернистым материалом, разработать методы расчета гидродинамики и теплообмена в указанных аппаратах;

– разработать способ интенсификации теплообмена при кипении в выпарных аппаратах, заключающейся в использовании дисперсных систем в качестве теплоносителей, а также методы расчета этих процессов;

– установить факторы, влияющие на интенсивность процесса солеотложения в выпарных аппаратах с кипением в трубах и с вынесенной зоной кипения и разработать методы снижения скорости накипеобразования в указанных аппаратах;

– разработать методы расчета выпарных установок с псевдооживленным слоем твердых частиц с высокими теплотехническими и энергетическими показателями, предназначенных для выпаривания кристаллизующихся и накипеобразующих растворов.

Реализация результатов. Материалы диссертационной работы использованы:

– в СП – ЗАО «Электрохимзавод» для повышения эффективности работы выпарных аппаратов для выпаривания раствора поваренной соли, что позволило существенно снизить солеотложения и интенсифицировать перенос тепла;

– на ООО «Пирит-М», г. Москва (Россия) для увеличения производительности оборудования за счет снижения накипеобразования и увеличения интенсивности теплообмена с экономическим эффектом 4,2 млн. рублей за 2007 год;

– на ОАО «Щелковский завод вторичных драгоценных металлов» (Россия) для увеличения производительности, снижения выбросов в атмосферу и уменьшения потерь серебра с годовым экономическим эффектом 7 млн. рублей в год (в ценах 2008 года);

– в учебном процессе Навоийского государственного горного института при чтении дисциплин «Основные технологические процессы и аппараты», «Оборудования и основы проектирования» и «Оборудования предприятий».

Результаты диссертационной работы планируется внедрить в конце 2010 года на ОАО «Навоизот» для усовершенствования 4 – х корпусной выпарной установки, с ожидаемым экономическим эффектом – 209 млн. сумов (в ценах 2008 года) в год.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на: научно-технических конференциях «Истиклол» с 1993 по 2008 годы; международной научно-практической конференции «Инновация - 2003» (г. Ташкент, 2003 г.); республиканской научно-технической конференции «Современные проблемы химии и химической технологии» (г. Фергана, 2004 г.); республиканской научно-технической конференции “Ишлаб чиқариш корхоналарининг экологик муаммолари ечимини топишда кимёвий технологияни қўллаш” (г. Карши, 2004 г.); IV - Российской национальной конференции по теплообмену (г. Москва, 2006 г.); международной научной конференции «Актуальные проблемы науки и образования в современных условиях» (г. Шымкент, 2008 г.); V - Международной конференции студентов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (г. Томск, 2008 г.).

Опубликованность результатов. Основные положения и результаты исследований, которые выносятся на защиту и которые определяют научную новизну диссертации, принадлежат автору. По результатам исследований опубликованы 1 монография, 2 брошюры и 56 научных статей и тезисов, в том

числе 19 в зарубежных журналах и сборниках научных трудов, подана заявка на патент (IAP 20080403).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 6 глав и заключения на 248 страницах машинописного текста, включая 74 иллюстраций, 5 таблиц, 200 наименований использованной литературы, а также приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении определена актуальность проблемы, сформулированы цель и основные задачи диссертационной работы, отмечена её научная новизна и практическая значимость. Обоснована необходимость комплексного экспериментального исследования гидродинамики, структуры, теплообмена и накипеобразования в псевдооживленном жидкостью слое зернистого материала в узких трубах.

В первой главе рассматривается современное состояние вопроса выпаривания кристаллизующихся растворов. Проведен анализ современных методов снижения солеотложения, интенсификации гидродинамических и теплообменных процессов в выпарных аппаратах. На его основе выбраны наиболее перспективные способы для исследования их эффективности и отработки режимов оптимальной эксплуатации выпарных аппаратов.

Вторая глава посвящена экспериментальному исследованию гидродинамики и структуры неподвижного и псевдооживленного слоев зернистого материала. Основные технологические параметры слоя зернистого материала непосредственно связаны с порозностью слоя. Проведенные опыты показали, что на величину порозности оказывает существенное влияние отношение диаметра аппарата к диаметру частиц $n = D/d$, что не указывается в литературе.

Обработкой экспериментальных данных получено уравнение для расчета среднего по сечению аппарата порозности $\varepsilon_{0,ср}$ зернистых материалов в диапазоне $n = 3 - 15$:

$$\varepsilon_{0,ср} = 0,39 + 0,47 \cdot n^{-1,35} \quad (1)$$

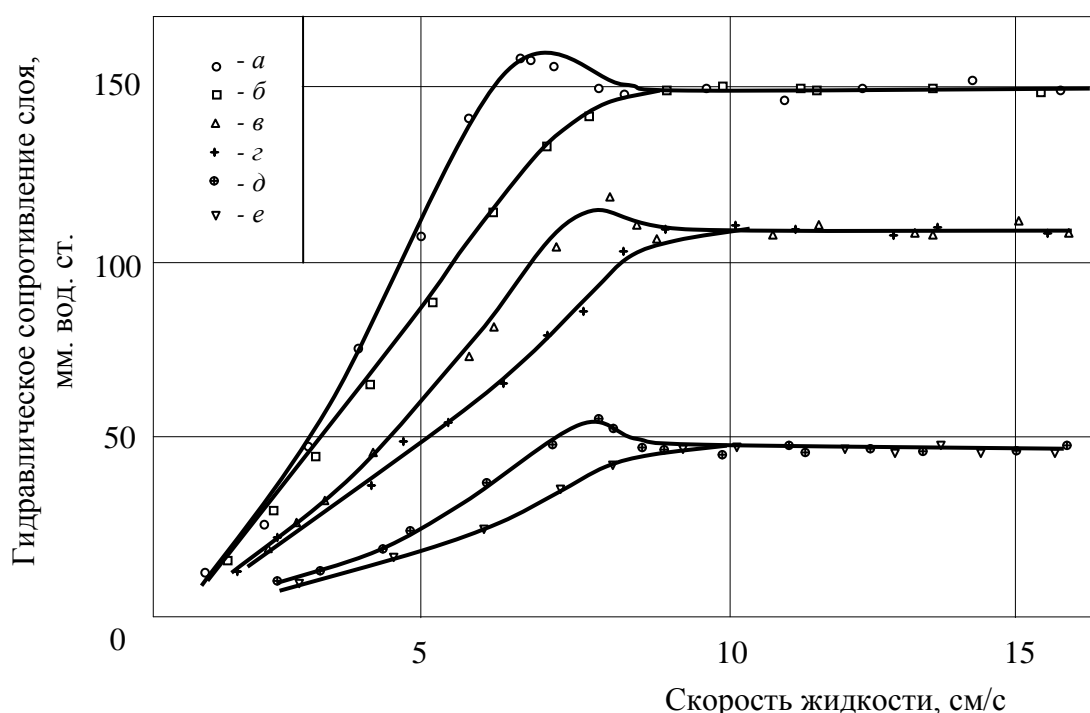
Экспериментальные точки описываются уравнением (1) со средним отклонением $\pm 3\%$ и максимальным $\pm 7\%$.

Основным элементом экспериментальной установки для исследования гидродинамики зернистого материала являются цилиндрические стеклянные трубки диаметром 21, 22, 29,5, 36, 45,1 и 79,4 мм. В качестве твердых частиц использованы сферические полихлорвиниловые и стальные шарики.

Кривые псевдооживления, полученные экспериментальным путем для модели аппарата диаметром 22 мм и при псевдооживлении полихлорвиниловых частиц диаметром 6 мм изображены на рис. 1. Как видно, гидравлическое

сопротивление неподвижного слоя увеличилось прямо пропорционально увеличению скорости оживающей среды.

При уменьшении скорости потока U , гидравлическое сопротивление ΔP в области неподвижного слоя и в области, близкой к началу оживления, значительно ниже, чем при возрастании скорости. Это объясняется необходимостью преодоления сил пристеночного трения, сохраняющихся в системе к моменту достижения потоком минимальной скорости псевдооживления, без чего полное псевдооживление слоя оказывается невозможным. При уменьшении скорости потока высота кипящего слоя снижается и направленные при этом вверх силы пристеночного трения препятствуют достижению слоем первоначальной порозности.



$a, в, д$ – прямой ход; \bar{b}, \bar{z}, e – обратный ход; при высоте неподвижного слоя H_0 : a и \bar{b} – $H_0 = 29,4$ см; $в$ и \bar{z} – $H_0 = 22,3$ см; $д$ и e – $H_0 = 10$ см.

Рис. 1. Зависимость гидравлического сопротивления слоя полихлорвиниловых шариков диаметром 6 мм от скорости воды

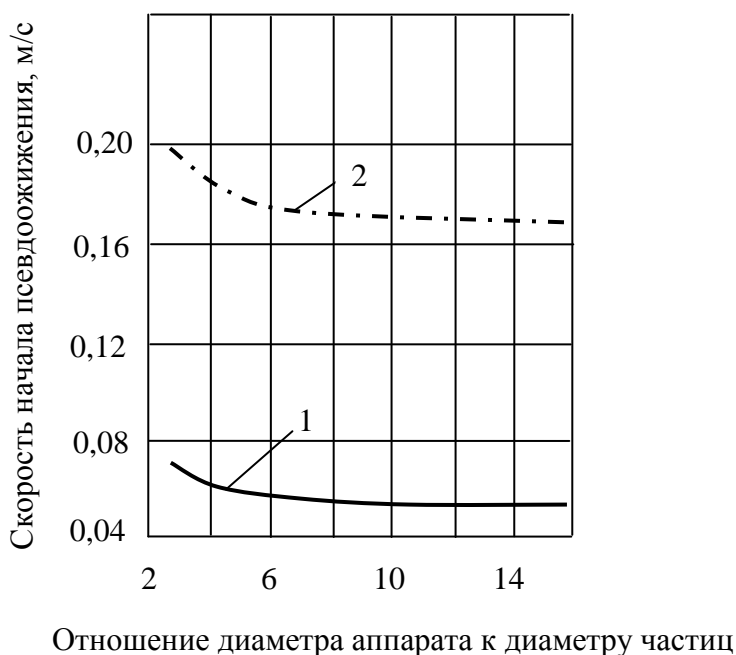
Анализ полученных опытных данных показал, что основным фактором, существенно влияющим на значение скорости начала псевдооживления U_1 является порозность ϵ_0 неподвижного слоя. Скорость начала псевдооживления зависит также от физических свойств оживающего агента, свойств и размеров частиц зернистого материала и наконец от размеров аппарата. Как видно из данных, представленных на рис. 2, в стесненных условиях, величина скорости начала псевдооживления U_1 зависит также от отношения n . В пределах $D/d = 3 - 8$ скорость начала псевдооживления интенсивно снижается с ростом D/d , а при

$D/d > 8$ влияние этого безразмерного отношения уменьшается. Такая картина видимо, связана с изменением порозности слоя в зависимости от размеров аппарата и частиц.

В результате обработки опытных данных получено эмпирическое уравнение для расчета скорости начала псевдооживления:

$$Re_1 = 0,98Ar^{0,5} \cdot \varepsilon_0^{1,7} \quad (2)$$

Отклонения опытных значений критерия Рейнольдса от вычисленных по формуле (2) не превышают $\pm 9\%$. Формула (2) справедлива в диапазоне $200 < Re < 700$



1 – полихлорвиниловые частицы; 2 – стальные частицы.

Рис. 2. Зависимость скорости начала псевдооживления от отношения диаметра аппарата к диаметру частиц

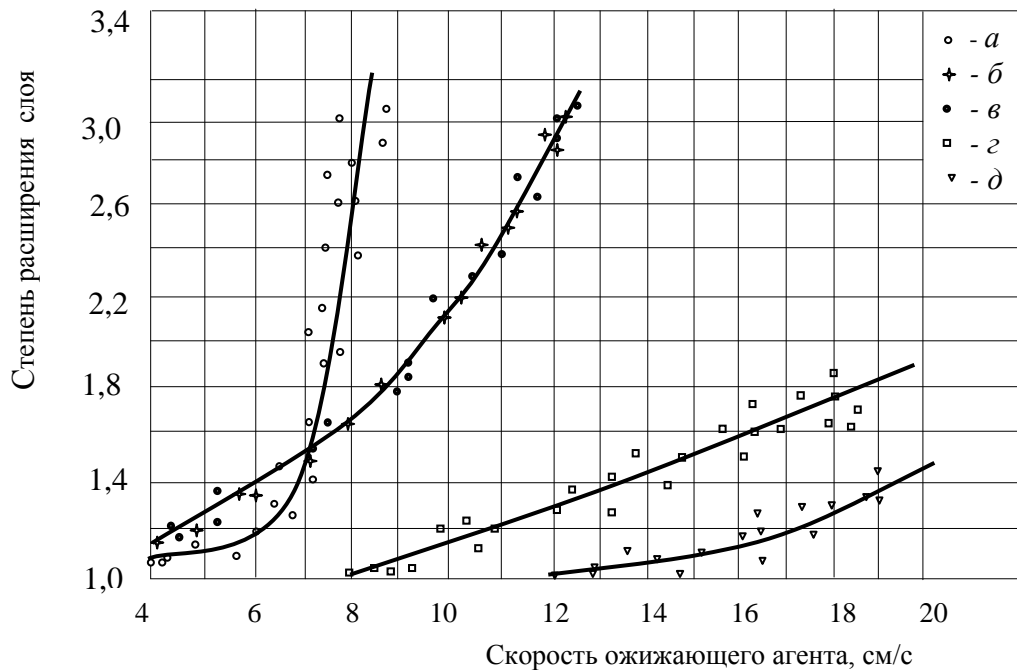
На рис. 3 показано изменение степени расширения псевдооживленного слоя H/H_0 различных сферических частиц при увеличении скорости оживающего агента. Видно, что расширение более легких частиц гораздо интенсивнее, чем тяжелых частиц. Разброс опытных данных при псевдооживлении в трубках диаметром 21 и 22 мм связан пульсационным изменением высоты слоя, вследствие поршнеобразования. При исследовании псевдооживления в условиях $D/d > 10$, поршневой режим не обнаружен, и наблюдалось равномерное расширение слоя.

В результате математической обработки опытных данных получена формула для приближенной оценки скорости жидкости U_n , при которой начинается поршнеобразование:

$$U_{н} = U_1 \sqrt{1 + 0,9 \cdot 10^{-2} \frac{D}{d^{0,85}} + 0,1 \frac{D^2 \cdot \varepsilon^{40 H_0}}{d^{1,7}}} \quad (3)$$

где U_1 – скорость начала псевдооживления.

Сравнение экспериментальных данных с результатами расчетов по формуле (3) показало их хорошее соответствие в исследованном диапазоне изменения переменных факторов, т.е. отклонение не превышает $\pm 12\%$.



Полихлорвиниловые шарики $d = 6$ мм и плотностью $\rho = 1700$ кг/м³: а - $D = 22$ мм; б - $D = 45,1$ мм; в - $D = 79,4$ мм; г - свинцовые шарики $d = 2,4$ мм $D = 21$ мм; д – стальные шарики $d = 5$ мм $D = 21$ мм.

Рис. 3. Зависимость степени расширения слоя от скорости оживающего агента

Обработывая опытные данные, получены следующие зависимости для расчета величины порозности при текущем значении скорости оживающего агента:

- для переходного режима течения

$$\varepsilon = \left(\frac{8,3Re}{Ar^{0,78}} \right)^{0,27} \quad (4)$$

- для турбулентного режима

$$\varepsilon = \left(\frac{0,74Re^{0,98}}{Ar^{0,5}} \right)^{0,42} \quad (5)$$

Проведены исследования перемешивания твердой фазы в псевдооживленных слоях «жидкость – твердое тело», методом меченых частиц. Установлено, что с ростом скорости оживающего агента коэффициент перемешивания D_{Π} в псевдооживленном слое сначала резко возрастает, а начиная с некоторого значения скорости D_{Π} падает.

Теоретически уравнения гидромеханики многофазных систем выводятся из системы уравнений баланса массы и количества движений для i - ой фазы многофазной системы:

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_i \vec{g}_i) = \sum_{j=1; j \neq i}^m J_{ji} \quad (i = 1, \dots, m) \quad (6)$$

$$\rho_i \frac{d_i \vec{g}_i}{dt} = \nabla \cdot \sigma_i + \rho_i \vec{F}_i + \sum_{j=1; j \neq i}^m (\vec{P}_{ji} - J_{ji} \vec{g}_i) \quad (7)$$

где ρ_i – плотность i - ой фазы; g_i - скорость i - ой фазы; ∇ - оператор Гамильтона, т.е. вектор с компонентами $\frac{\partial}{\partial x}$, $\frac{\partial}{\partial y}$, $\frac{\partial}{\partial z}$; σ_i - напряжения i - ой фазы (поверхностные силы в расчете на единицу поверхности); \vec{F}_i - внешняя массовая сила i - ой фазы; \vec{P}_{ji} - количества движения, переходящая из j – ой фазы смеси в i – ую фазу в единице объема в единицу времени; J_{ji} – величина, характеризующая интенсивности перехода массы из j – ой фазы смеси в i – ую фазу, равная массе переходящей из j – фазы смеси в i – ую фазу в единицу времени.

Для двухфазных систем «жидкость – твердое тело», уравнения баланса массы сплошной и дисперсной фаз можно записать в виде:

$$(\partial \varepsilon_1 / \partial t) + \nabla \cdot (\varepsilon_1 \vec{g}_1) = 0 \quad (8)$$

$$(\partial (1 - \varepsilon_1) / \partial t) + \nabla \cdot [(1 - \varepsilon_1) \vec{g}_2] = 0 \quad (9)$$

где ε – объемная доля сплошной фазы, (индекс 1 будет относиться к сплошной фазе, индекс 2 – к дисперсной).

Силу межфазного взаимодействия можно представить в виде суммы двух слагаемых:

$$\vec{P}_{12} = -(1 - \varepsilon_1) \nabla p + \vec{P}_{12}^* \quad (10)$$

где p – давление в сплошной фазе.

Предположим, что единственной внешней массовой силой, действующей на сплошную и дисперсную фазу рассматриваемой двухфазной системы, является

сила тяжести. При сделанных допущениях уравнения баланса количества движения сплошной и дисперсной фаз будут иметь вид:

$$\rho_1^* \varepsilon_1 \frac{d_1 \vec{g}_{1_1}}{dt} = \nabla \cdot \sigma_1 + \rho_1^* \varepsilon_1 \vec{g} + \vec{P}_{12} \quad (11)$$

$$\rho_2^* (1 - \varepsilon_1) \left(d_2 \vec{g}_2 / dt \right) = \nabla \cdot \sigma_2 + \rho_2^* (1 - \varepsilon_1) \vec{g} + \vec{P}_{12} \quad (12)$$

Если изменение порозности слоя с течением времени не происходит, уравнения (8), (11) можно записать в виде

$$\nabla \cdot \left(\varepsilon \vec{g} \right) = 0 \quad (13)$$

$$\rho \varepsilon \left(d \vec{g} / dt \right) = \nabla \cdot \sigma_1 + \rho \varepsilon \vec{g} - \vec{P}_{12}, \quad (14)$$

где ρ – плотность жидкости (газа); \vec{g} - скорость жидкости.

Обычно предполагают, что вязкость жидкости можно учитывать только при вычислении силы межфазного взаимодействия. Тогда,

$$\sigma_1 = -p \cdot I \quad (15)$$

Силу межфазного взаимодействия \vec{P}_{12} представим в виде двух слагаемых, одно из которых пропорционально градиенту давления (сила Архимеда), а второе пропорционально скорости жидкости:

$$\vec{P}_{12} = -(1 - \varepsilon) \nabla p + \varepsilon \beta (\varepsilon, \vec{g}) \vec{g} \quad (16)$$

Инерционными членами, стоящими в левой части уравнения (14), обычно пренебрегают. С учетом этого допущения и соотношений (15), (16) получим следующее уравнение:

$$\nabla p = -\beta (\varepsilon, \vec{g}) \vec{g}. \quad (17)$$

Из (17), перепад давлений Δp на участке слоя длиной L равен:

$$\Delta p = \beta (\varepsilon, \vec{g}) \vec{g} \cdot L \quad (18)$$

Для того чтобы использовать уравнение (18), необходимо располагать явным выражением для величины $\beta (\varepsilon, \vec{g})$. Физически строгая теория, которая позволяла бы получить такое выражение, в настоящее время отсутствует. Рассмотрим некоторые полуэмпирические подходы к нахождению перепада давлений в зернистом слое.

При ламинарном движении жидкости в круглой трубе радиуса R средняя, по сечению трубы скорость жидкости связана с перепадом давления $\Delta p = p_0 - p_L$ на участке трубы длиной L

$$g = \Delta p \cdot R^2 / (8L \cdot \mu) \quad (19)$$

Для зернистого слоя гидравлический радиус составляющих его извилистых трубок можно выразить через порозность ε и удельную поверхность, a следующим образом: $R_m = \varepsilon/a$. Поэтому, $g = \Delta p \cdot \varepsilon^2 / (K' \cdot a^2 \cdot \mu \cdot L)$. Так как жидкость движется не по прямым, а по извилистым трубкам, длина L_e которых превосходит величину L , в последнем соотношении вместо величины L должна была бы стоять величина L_e . Предполагается, что длина извилистых трубок L_e пропорциональна L и постоянный коэффициент извилистости L_e/L включен в константу K' .

Полученное соотношение можно переписать так:

$$\frac{\Delta p}{F} = K' \cdot \mu \cdot a^2 \cdot U / \varepsilon^3 \quad (20)$$

Для монодисперсного слоя сферических частиц удельная поверхность, a выражается через порозность ε и диаметр частиц d при помощи формулы $a = 6(1 - \varepsilon)/d$. Тогда получим:

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{36 K' \cdot \mu \cdot U \cdot (1 - \varepsilon)^2}{d^2 \cdot \varepsilon^3} \quad (21)$$

Анализ большого количества экспериментальных данных показывает, что $36 K' = 150$.

Перепад давления на единицу высоты сферических частиц может быть вычислен при помощи формулы

$$\frac{\Delta p}{F} = n \cdot F \quad (22)$$

Здесь $n = 6(1 - \varepsilon)/(\pi d^3)$ – число частиц в единице объема; F – сила, действующая на частицу в зернистом слое. Таким образом,

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{18(1 - \varepsilon) \cdot \mu \cdot U}{d^2} a(\varepsilon) \quad (23)$$

где
$$a(\varepsilon) = \frac{1 + 2/3(1 - \varepsilon)^{5/3}}{1 - 3/2(1 - \varepsilon)^{1/3} + 3/2(1 - \varepsilon)^{5/3} - (1 - \varepsilon)^2} \quad (24)$$

В отличие от уравнения Козени – Кармана (21), формула (23) не содержит эмпирически определяемых параметров. Сравнение соотношения (21) и (23) показывает, как в первом, так и во втором соотношениях в правой части имеется множитель $\mu U / d^2$, однако коэффициенты перед этим множителем различные. Рассмотрим соотношение указанных коэффициентов:

$$18 \cdot (1 - \varepsilon) \cdot a(\varepsilon) / \frac{36 K' \cdot (1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} = \varepsilon^3 \cdot a(\varepsilon) / [2 K' \cdot (1 - \varepsilon)].$$

При развитом турбулентном течении в зернистых слоях коэффициент сопротивления определяется из уравнения $\Delta p = \lambda(L/D)(\rho v^2/2)$ и зависит только от значения относительной шероховатости. С учетом последних уравнений

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{\lambda}{8} a \frac{\rho \cdot U^2}{\varepsilon^3} \quad (25)$$

Выражая коэффициент сопротивления λ через эквивалентный коэффициент сопротивления f_3 по формуле $\lambda = 4f_3$, получаем формулу для расчета гидравлического сопротивления в стесненных условиях

$$\frac{\Delta p}{L} = f_3 \cdot a \frac{\rho \cdot U^2}{2\varepsilon^3} \quad (26)$$

Отклонения опытных значений гидравлического сопротивления неподвижного слоя зернистого материала, от рассчитанных по формуле (26) не превышают $\pm 5\%$.

В момент перехода слоя в псевдооживленное состояние перепад давлений равен весу слоя (твердых частиц и оживающего агента) в расчете на единицу площади поперечного сечения

$$f_3 \cdot a \cdot \frac{\rho \cdot U^2}{2\varepsilon^3} = g \cdot (\rho_4 - \rho) \cdot (1 - \varepsilon) \quad (27)$$

Зависимость для эквивалентного коэффициента гидравлического сопротивления в стесненных условиях имеет вид

$$f_3 = \frac{8 \cdot 5,1}{Re_3} + 0,5 \quad (28)$$

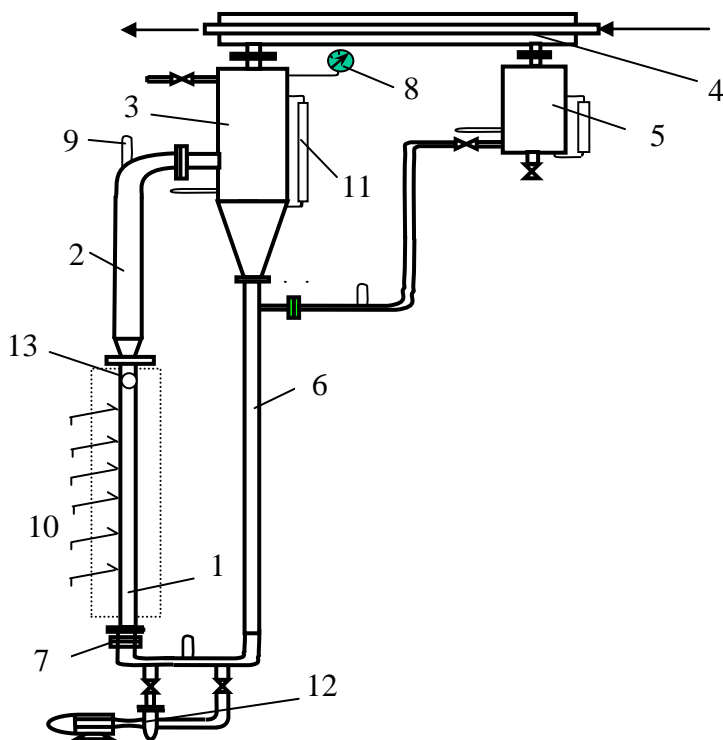
Подставив значение f_3 и умножив левую и правую части уравнения (27) на $d^3 \cdot \rho / [\mu^2 \cdot (1 - \varepsilon)]$ после математических решений получим выражение для расчета скорости начала псевдооживления:

$$Re_1 = -10,1 a \cdot d + \left(102,23 a^2 \cdot d^2 + 0,74 \varepsilon_0^3 \cdot Ar \right)^{0,5} \quad (29)$$

Отклонения опытных значений скорости начала псевдооживления, от вычисленных по формуле (29) не превышают $\pm 7\%$.

В третьей главе приведены схема и описание опытной установки, порядок проведения экспериментов в выпарном аппарате с вынесенной зоной кипения. Принципиальная схема экспериментального стенда представлена на рис. 4.

Путем отсоединения или подключения циркуляционного насоса соответствующими вентилями создавалась возможность работы аппарата, как с принудительной, так и с естественной циркуляцией. Исследование выпарного аппарата проводили при атмосферном давлении в сепараторе и различных давлениях греющего пара. В качестве рабочей среды использовали воду, 10 и 20 % масс. раствор поваренной соли. Для изучения характера изменения температуры стенки, по высоте теплообменной трубы использованы хромель-копелевые термопары с диаметром термоэлектродов 0,2 мм.

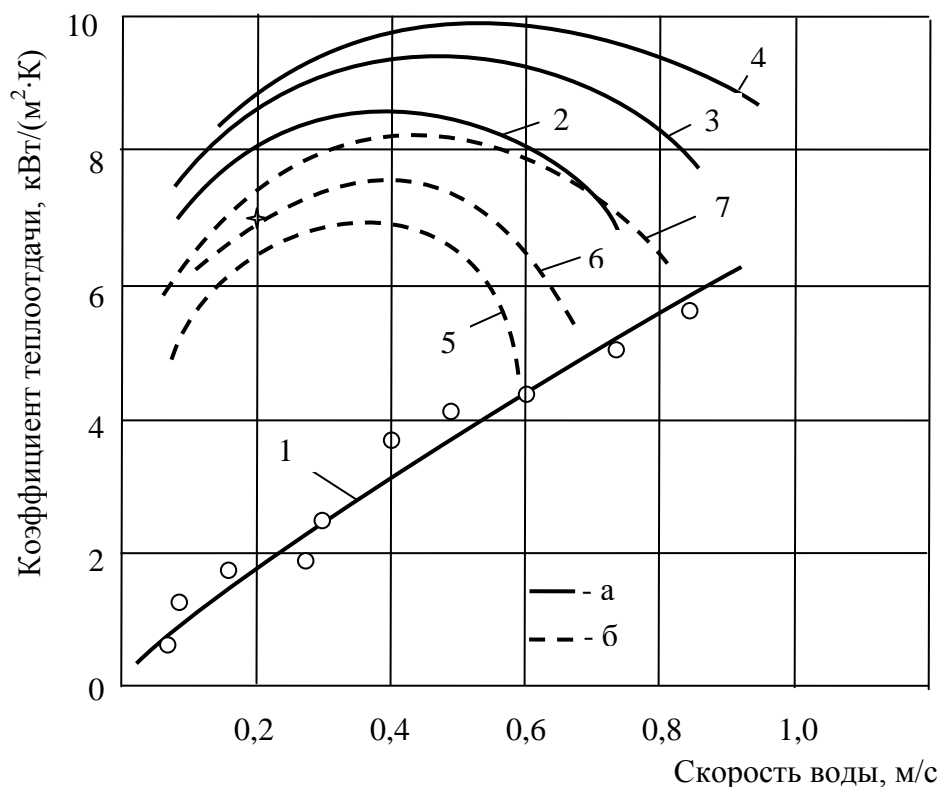


1 - греющая камера; 2 - труба вскипания; 3 - сепаратор; 4 - конденсатор; 5 - мерный бак; 6 - циркуляционная труба; 7 - диафрагма; 8 - мановакуумметр; 9 - термометры; 10 - термопары; 11 - уровномеры; 12 - циркуляционный насос, 13 - смотровое окно.

Рис. 4. Схема экспериментальной установки

Экспериментальные данные, в виде зависимости коэффициента теплоотдачи от скорости воды, при псевдооживлении водой стальных шаров различных диаметров приведены на рис. 5. Существование максимума на кривых $\alpha = f(w)$ объясняется одновременным и противоположным действием на теплообмен двух факторов: повышением интенсивности движения частиц

около поверхности теплообмена и возрастанием порозности слоя с увеличением скорости w оживающего агента. Первый из этих факторов способствует увеличению интенсивности переноса тепла, а второй вызывает уменьшение α вследствие снижения концентрации твердых частиц у поверхности теплообмена. Вблизи начала псевдооживения и при относительно небольших скоростях оживающего агента доминирующую роль играет первый фактор, а с увеличением w начинает превалировать второй.



1 – в аппарате без твердых частиц; а – стальные шарики: 2 – $d = 2$ мм; 3 – $d = 4$ мм; 4 – $d = 5$ мм; б – стеклянные шарики: 5 – $d = 1,6$ мм; 6 – $d = 2,54$ мм; 7 – $d = 4,84$ мм.

Рис. 5. Зависимость коэффициента теплоотдачи от скорости воды

Анализ литературных данных показывает, что влияние размера частиц должно по-разному проявляться в различных диапазонах этого размера, причем характер изменения коэффициента теплоотдачи α с изменением диаметра частиц d зависит от физических свойств оживающего агента и частиц. Более правомерно будет рассматривать влияние d на α при одинаковых числах псевдооживения. Обработка опытных данных в виде зависимости коэффициента теплоотдачи от скорости воды при числе псевдооживения $K_w = 2$ показала, что при одном и том же числе псевдооживения, как для стальных, так и для стеклянных частиц их размер не оказывает влияние на интенсивность теплообмена. Это очевидно связано с тем, что при $K_w = 2$ порозность слоев всех исследованных частиц практически одинакова ($\epsilon \approx 0,65$).

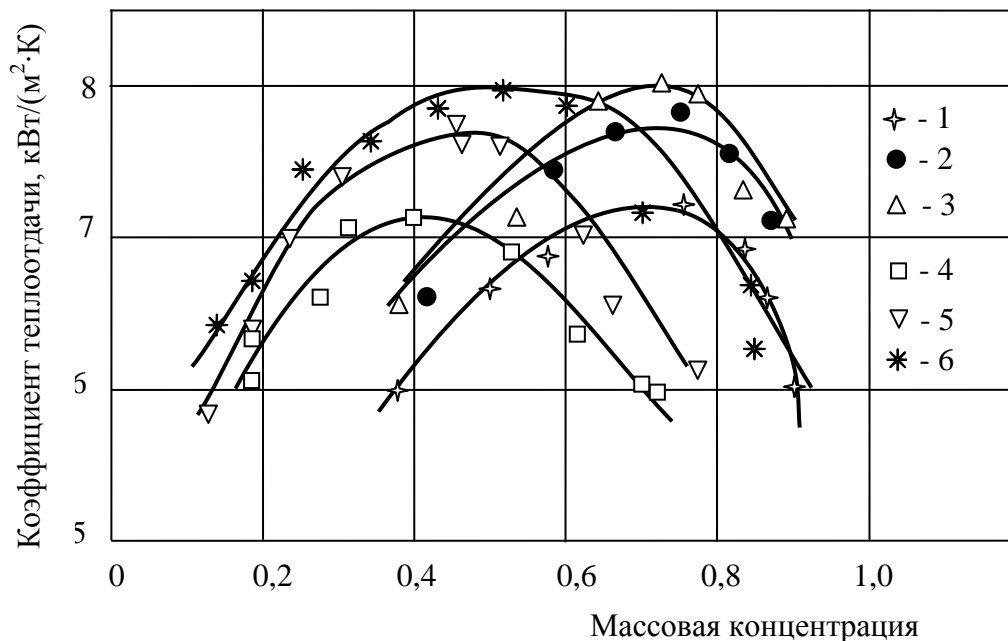
Плотность частиц может оказывать влияние на теплоперенос, поскольку от нее в определенной степени зависит гидродинамический режим в кипящем слое. При постоянной скорости оживающего агента рост плотности частиц приводит к уменьшению интенсивности движения частиц. В случае же постоянного числа псевдооживения, напротив, интенсивность движения более тяжелых частиц возрастает, что показали визуальные наблюдения.

По вопросу о влиянии теплоемкости частиц зернистого материала на теплообмен нет единого мнения. Так по данным отдельных исследователей коэффициент теплоотдачи растет с увеличением теплоемкости в степени 0,36 - 0,4 для газового псевдооживения и 0,28 для псевдооживения капельной жидкостью. Возможно, более правомерно рассматривать влияние теплоемкости материала частиц c_p на α через объемную теплоемкость $c_p \gamma_p$ (где γ_p - удельный вес частиц), что делают некоторые авторы. Различная интенсивность теплоотдачи при псевдооживении стальных и стеклянных частиц, видимо объясняется характером влияния $c_p \gamma_p$ на коэффициент теплоотдачи (рис. 5).

Повышение интенсивности теплообмена в слоях, оживаемых капельными жидкостями, связано с возмущающим действием частиц в пограничной области, повышением пристенной турбулентности и обмена. Снижение концентрации частиц повышением порозности слоя приводит к уменьшению влияния твердого материала на снижение толщины пограничной пленки, так как ослабляется их «соскабливающее» действие. Коэффициент теплоотдачи существенно увеличивается только в условиях, при которых слой еще довольно плотный, но в то же время настолько расширен, что скорости твердых частиц достаточно высоки.

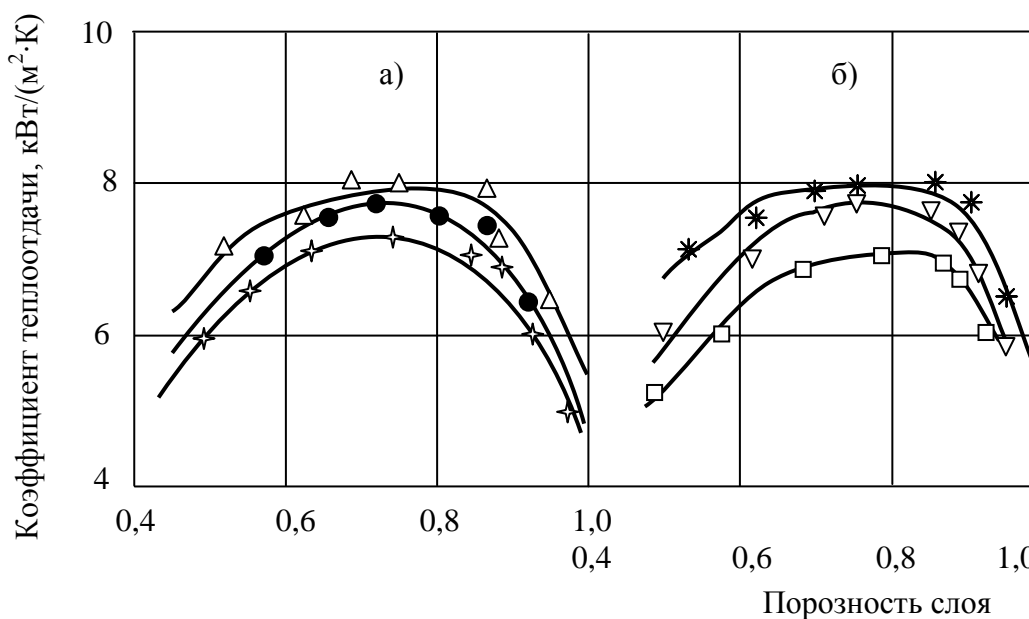
Влияние массовой концентрации \bar{x} частиц на интенсивность теплоотдачи приведено на рис. 6. Видно, что при повышении концентрации твердых частиц в слое наблюдается увеличение коэффициента теплоотдачи. С дальнейшим повышением \bar{x} коэффициент теплоотдачи α достигает своего максимального значения, после чего α плавно понижается. Наблюдаемый характер изменения коэффициента теплоотдачи в зависимости от концентрации частиц связан одновременным и противоположным действием на теплоотдачу двух основных факторов: повышением относительной скорости частиц и снижением интенсивности фильтрационного перемешивания. Первый из этих факторов способствует разрушению толщины лимитирующего пограничного слоя, а второй вызывает уменьшения α вследствие снижения турбулентности потока. При относительно небольших скоростях оживающего агента (при наименьших порозностях или наибольших концентрациях) доминирующую роль играет второй фактор, а с увеличением w начинает превалировать первый.

Порозность определяет структуру кипящего слоя и тем самым гидродинамическую обстановку у поверхности теплообмена и интенсивности теплопереноса. Приведенные данные показывают, что наибольший эффект достигается при порозности слоя $\varepsilon = 0,7 - 0,8$ (рис. 7). Такая картина связана с тем, что в указанном пределе значения порозности слоя твердые частицы оказывают более интенсивное возмущающее действие на пограничный слой и повышают пристенную турбулентность.



Стальные шарики: 1 – d = 2 мм; 2 – d = 4 мм; 3 – d = 5 мм;
 стеклянные шарики: 4 – d = 1,6 мм; 5 – d = 2,54 мм; 6 – d = 4,84 мм.

Рис. 6. Зависимость коэффициента теплоотдачи от массовой концентрации частиц в слое



Стальные шарики: 1 – d = 2 мм; 2 – d = 4 мм; 3 – d = 5 мм;
 стеклянные шарики: 4 – d = 1,6 мм; 5 – d = 2,54 мм; 6 – d = 4,84 мм.

Рис. 7. Зависимость коэффициента теплоотдачи от порозности слоя

Обработка экспериментальных данных по интенсивности конвективного теплообмена по методу наименьших квадратов привела к следующему уравнению подобия

$$Nu_{\text{кв.пс}} = 0,05Re_{\varepsilon}^{0,73} \cdot Pr^{0,4} \cdot (D/d)^{0,1} \quad (30)$$

Среднее отклонение опытных данных по коэффициенту теплоотдачи от стенки трубы к псевдооживленному слою от рассчитанных по формуле (30) составляет $\pm 11\%$. Данное уравнение получено в следующих диапазонах изменения определяющих критериев и параметров: $Re_{\varepsilon} = 80 - 80000$, $Pr = 1 - 10$ и $\varepsilon = 0,5 - 0,95$.

Из предложенных теоретических моделей, представляющие собой попытки с определенных позиций описать механизм теплообмена между псевдооживленным слоем и поверхностью нагрева, для систем псевдооживленных жидкостью, наиболее подходит пленочная теория. По данной модели предполагается, что основным термическим сопротивлением является пленка жидкости около поверхности теплообмена. От толщины этой пленки $\delta_{\text{п}}$, через которую тепло передается путем теплопроводности, и зависит, при прочих равных условиях, величина коэффициента теплоотдачи

$$\alpha = \lambda / \delta_{\text{п}} \quad (31)$$

где λ – теплопроводность оживжающего агента.

Исходя из пленочной теории применительно к жидкостному псевдооживлению, было сделано предположение, что коэффициенты теплоотдачи к потоку оживжающего агента $\alpha_{\text{а}}$ и к псевдооживленному слою α пропорциональны соответствующим толщинам пограничных пленок $\delta_{\text{а}}$ и $\delta_{\text{п}}$:

$$\alpha = \alpha_{\text{а}} \cdot \delta_{\text{а}} / \delta_{\text{п}} \quad (32)$$

Задача сводится к определению среднеинтегральной толщины пограничной пленки $(\delta_{\text{п}})_{\text{ср}}$ и последующему определению α по формуле:

$$\alpha_{\text{ср}} = \left(\frac{\lambda}{\delta_{\text{п}}} \right)_{\text{ср}} = \lambda \left(\frac{1}{\delta_{\text{п}}} \right)_{\text{ср}} \quad (33)$$

После подстановки величины $(\delta_{\text{п}})_{\text{ср}}$ и некоторых преобразований получено следующее безразмерное выражение:

$$\frac{\pi \cdot d \cdot \alpha}{6\lambda(1 - \varepsilon)} = 0,55 \left[\frac{\pi \cdot d \cdot U \cdot \rho}{6(1 - \varepsilon)\mu} \right]^{0,5} \quad (34)$$

С учетом значения критерия Рейнольдса $Re = U d \rho / \mu$

$$\frac{\pi \cdot d \cdot \alpha}{6\lambda(1 - \varepsilon)} = 0,55 \left[\frac{\pi \cdot Re}{6(1 - \varepsilon)} \right]^{0,5} \quad (35)$$

Для упрощения уравнения (35) вместо Re воспользуемся эквивалентным критерием Рейнольдса Re_3 , которые связаны соотношением

$$\frac{Re_3}{Re} = \frac{4}{a \cdot d} = \frac{4}{6 \cdot (1 - \varepsilon)}$$

После подстановки величины Re_3 в уравнение (35) и некоторых математических преобразований получим

$$\alpha = 0,15a \cdot \lambda \cdot Re_3^{0,5} \quad (36)$$

Формула (36) удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными при $Re_3 < 40000$. Поэтому при расчете теплообмена в аппаратах с жидкостным псевдооживленным слоем твердых частиц рекомендуем пользоваться критериальным уравнением (30), которое правомерно для более широкого диапазона изменения критерия Re_3 .

Использование дисперсных систем в качестве теплоносителей в выпарном аппарате с вынесенной зоной кипения обеспечивает существенное увеличение интенсивности теплопередачи. При этом общий коэффициент теплопередачи для аппарата с твердыми частицами составил $K = 2800 - 3600 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ против $K = 1400 - 2800 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ для аппарата без зернистого материала.

Результаты экспериментов подтвердили, что применение в качестве теплоносителей псевдооживленного слоя зернистого материала перспективно для трубчатых выпарных аппаратов, так как позволяет примерно в три раза сократить потребление электроэнергии в выпарных аппаратах с принудительной циркуляцией за счёт понижения скорости циркуляции с $2 - 2,5 \text{ м}/\text{с}$ до $0,8 - 1 \text{ м}/\text{с}$, при сохранении производительности, а также уменьшить массу установки в результате замены осевых насосов на насосы меньшей производительности и снижения требуемой поверхности теплообмена.

В четвертой главе изложены результаты экспериментальных исследований теплообмена при кипении. На рис. 8 представлена зависимость интенсивности теплоотдачи при кипении воды от удельной тепловой нагрузки при значениях скорости циркуляции $w = 0,2 \text{ м}/\text{с}$ и $w = 0,5 \text{ м}/\text{с}$, для стальных и стеклянных частиц различного размера. Эксперименты показали, что при $w = 0,2 \text{ м}/\text{с}$ размер частиц как стальных, так и стеклянных частиц практически не влияет на интенсивность теплоотдачи. При скорости циркуляции, равной $w = 0,5 \text{ м}/\text{с}$, с увеличением диаметра частиц коэффициент теплоотдачи существенно растет. При скорости циркуляции $w = 0,2 \text{ м}/\text{с}$ и плотности теплового потока $q > 20000 \text{ Вт}/\text{м}^2$ коэффициент теплоотдачи практически не зависит от скорости. При таком режиме паросодержание потока высокое и интенсивность переноса тепла определяется плотностью теплового потока. Кроме того при $w = 0,2 \text{ м}/\text{с}$ слой зернистого материала не расширяется до оптимального значения. По этому при развитом пузырьковом кипении воды в трубе при низких значениях скорости потока и высоких паросодержаниях диаметр частиц не оказывает влияние на теплоотдачу, хотя интенсифицирующая роль зернистого материала

остается ощутимой. Наоборот, при достаточно больших скоростях циркуляции с увеличением диаметра частиц интенсивность переноса тепла возрастает.

Зависимость коэффициента теплоотдачи α от скорости циркуляции имеет экстремальный характер. Наличие максимума коэффициента теплоотдачи объясняется двумя факторами: изменением порозности кипящего слоя и снижением интенсифицирующей роли твердых частиц при повышении скорости. Повышение порозности кипящего слоя с увеличением скорости приводит к снижению интенсивности теплообмена.

Относительное увеличение коэффициента теплоотдачи при пузырьковом кипении объясняется тем, что в зернистой среде частицы оказывают ускоряющее действие на движение пузырей от поверхности нагрева.

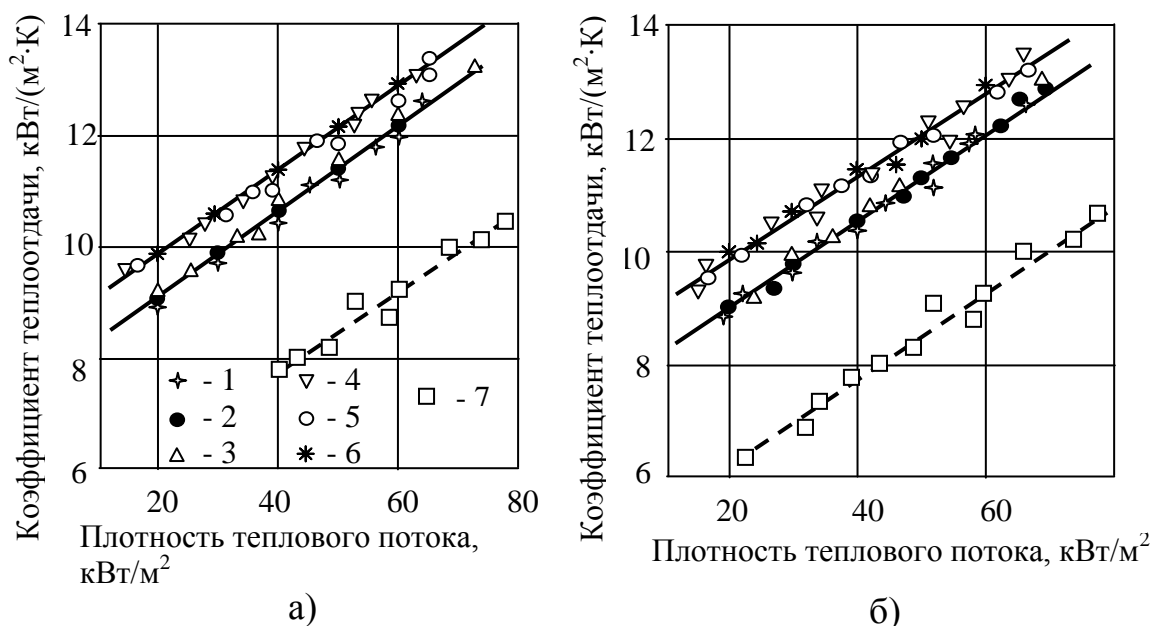


Рис. 8. Зависимость коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока

Относительное увеличение коэффициента теплоотдачи при кипении в аппарате с псевдооживленным слоем твердых частиц α/α_0 существенно снижается с ростом плотности теплового потока. Изменение α/α_0 в зависимости от скорости циркуляции имеет экстремальный характер. Незначительное увеличение эффективности применения псевдооживления твердых частиц, с ростом скорости жидкости связано, с повышением порозности слоя до оптимального значения. Снижение степени интенсификации теплоотдачи при кипении с увеличением скорости циркуляции происходит, во-первых, из-за повышения интенсивности теплообмена в трубе без твердых частиц, во-вторых, повышением порозности кипящего слоя до единицы.

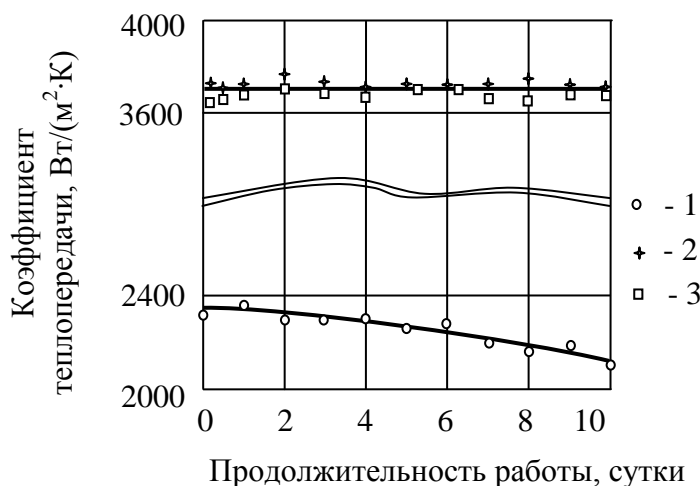
Наибольший эффект интенсификации теплообмена при кипении достигается при порозности слоя $\varepsilon = 0,7 - 0,8$, что связано с тем, что в указанном пределе значения порозности слоя твердые частицы оказывают более интенсивное возмущающее действие на пограничный слой и повышают пристенную турбулентность. Следует отметить, что с ростом диаметра d исследованных стальных и стеклянных частиц степень интенсификации теплообмена при кипении увеличилась.

Данные по средней интенсивности теплообмена при пузырьковом кипении обобщены и для кипения в псевдооживленном слое зернистого материала получена следующая зависимость:

$$\alpha_{\text{кп.пс}} = \alpha_{\text{кв.пс}} [1 + (\alpha_{\text{кп}}/\alpha_{\text{кв.пс}})^{1,4}]^{0,71} \quad (37)$$

где $\alpha_{\text{кв.пс}}$ и $\alpha_{\text{кп}}$ – коэффициенты теплоотдачи соответственно к вынужденному потоку жидкости с зернистым материалом и при развитом пузырьковом кипении, когда интенсивность теплообмена зависит от плотности теплового потока. Все коэффициенты теплообмена, входящие в формулу (37) отнесены к разности температуры теплоотдающей поверхности и среднemasсовой температуре жидкости. Коэффициент конвективной теплоотдачи без кипения и с зернистым материалом определяется из уравнения (30).

Пятая глава посвящена исследованию отложения солей на поверхности теплообмена. Экспериментальные данные подтвердили, что вынос зоны кипения из трубок способствует снижению интенсивности солеотложения. Из данных представленных на рис. 9. следует, что коэффициент теплопередачи



1 – в трубе без твердых частиц; в трубе с зернистым материалом: 2 – стальные шарики; 3 – стеклянные шарики;

Рис. 9. Изменение коэффициента теплопередачи в зависимости от продолжительности работы аппарата при $q = 40 \text{ кВт/м}^2$

выпарного аппарата с инертным дисперсным материалом находился в пределах $K = 3600 - 3800 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$, при $q = 40 \text{ кВт/м}^2$. Так называемый

«эксплуатационный» коэффициент теплопередачи в трубе с псевдооживленным слоем твердых частиц практически не уменьшался во времени, что подтверждает отсутствие отложения накипи на поверхности теплообмена.

В аппарате с псевдооживленным слоем твердых частиц наблюдается рост коэффициента теплопередачи на 40 – 60%, по сравнению с аппаратом без инертных частиц, при скорости циркуляции – 0,8 м/с и полезной разности температур 20°С. Эффективность метода введения инертных частиц в раствор возрастает при наличии солеотложений. Если при отсутствии накипеобразования (в начале опыта) относительное увеличение $K_{пс0}/K_0 = 1,5 – 1,6$, то в конце опыта (за 10 суток) $K_{пс}/K = 1,7 ÷ 1,8$.

Скорость роста отложений можно представить уравнением массопереноса:

$$\frac{dm}{d\tau} = \Phi_0 - \Phi_y = \beta \cdot \Delta C \quad (38)$$

где m – масса солей, переносимых к поверхности; τ – время; Φ_0 – функция скорости накопления отложений; Φ_y – функция скорости удаления (смыва) отложений; β – коэффициент массопереноса; $\Delta C = C_0 - C_{ст}$ – пересыщение раствора; C_0 и $C_{ст}$ – соответственно концентрация солей в ядре потока и непосредственно у поверхности.

Главным фактором, определяющим растворимость, является температура. Если ограничимся линейной зависимостью растворимости солей от температуры, то из равенства (38) получим следующее выражение для массопереноса:

$$\frac{dm}{d\tau} = \beta \cdot b \cdot (t_{ст} - t_s) \quad (39)$$

где b – константа растворимости солей; $t_{ст}$ – температура поверхности нагрева; t_s – температура, при которой раствор с начальной концентрацией C_0 достигает насыщенного состояния.

Количества солей, образующихся на единице поверхности в единицу времени, можно выразить через толщину слоя отложений, т. е.

$$\frac{dm}{d\tau} = \rho_n \frac{d\delta_n}{d\tau}$$

Тогда скорость роста отложений представится выражением

$$\frac{d\delta_n}{d\tau} = \frac{\beta \cdot b}{\rho_n} (t_{ст} - t_s)$$

Из уравнения теплоотдачи удельный тепловой поток $q = \alpha(t_{ct} - t)$. Совместим два последних уравнения и получим

$$\frac{d\delta_n}{d\tau} = \frac{\beta \cdot b \cdot q}{\rho_n \cdot \alpha} \left(\frac{t_{ct} - t_s}{t_{ct} - t} \right)$$

Обозначим $\varphi = \frac{t_{ct} - t_s}{t_{ct} - t}$. Величина этого отношения характеризует взаимное положение теплового и диффузионного слоев. Для ненасыщенного водного раствора диффузионный пограничный слой находится внутри теплового, поскольку $t_s > t$. Тогда,

$$\frac{d\delta_n}{d\tau} = \frac{\beta \cdot b \cdot q}{\rho_n \cdot \alpha} \varphi \quad (40)$$

Удельный тепловой поток можно представить уравнением теплопередачи $q = K\Delta t_{cp}$. Коэффициент теплопередачи после образования солеотложений на поверхности нагрева равен:

$$\frac{1}{K_\tau} = \frac{1}{K_0} + \frac{\delta_n}{\lambda_n} \quad (41)$$

Подставив в уравнение (40) значение плотности теплового потока, после преобразований получим:

$$\left(\delta_n + \frac{\lambda_n}{K_0}\right) d\delta_n = \frac{b \cdot \varphi \cdot \beta \cdot \Delta t_{cp} \cdot \lambda_n}{\alpha \cdot \rho_n} d\tau \quad (42)$$

Интеграл этого уравнения позволяет найти толщину слоя отложений на единице поверхности нагрева за любой промежуток времени, т. е.

$$\int_0^{\delta} \left(\delta_n + \frac{\lambda_n}{K_0}\right) d\delta_n = \int_0^{\tau} \frac{b \cdot \varphi \cdot \beta \cdot \Delta t_{cp} \cdot \lambda_n}{\alpha \cdot \rho_n} d\tau \quad (43)$$

Поскольку $q = K_0\Delta t_0 = K_\tau\Delta t_\tau$; где Δt_0 и Δt_τ – соответственно средние логарифмические разности температур чистой и загрязненной отложениями поверхности, после преобразований с использованием уравнения (41) получим

$$\Delta t_\tau = \frac{q}{\lambda_n} \left(\delta_n + \frac{\lambda_n}{K_0}\right)$$

Подставив это выражение в уравнение (42), получим:

$$d\delta_n = \frac{b \cdot \varphi \cdot \beta \cdot q}{\alpha \cdot \rho_n} d\tau$$

После интегрирования найдем выражения, характеризующие изменения толщины и термического сопротивления слоя солеотложений за время τ :

$$\delta_\tau = \frac{b \cdot \beta}{\rho_n} (t_{cr} - t_s) \tau \quad (44)$$

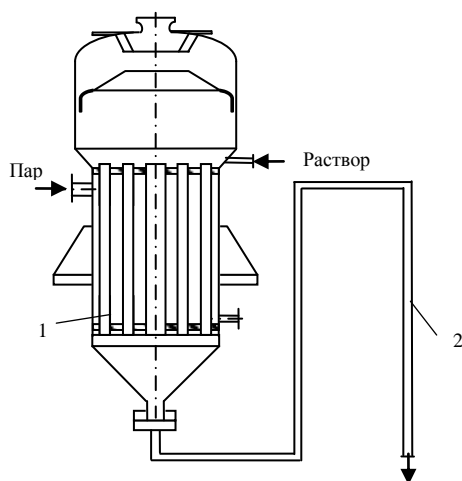
и

$$R_\tau = \frac{b \cdot \beta}{\rho_n \cdot \lambda_n} (t_{cr} - t_s) \tau \quad (45)$$

Среднее отклонение опытных значений приращения термического сопротивления накипи R_τ от рассчитанных по формуле (45) составляет $\pm 7\%$.

В шестой главе изложены результаты промышленных испытаний выпарных аппаратов с кипением в трубах и с вынесенной зоной кипения. Исследуемый выпарной аппарат с внутренней греющей камерой и центральной циркуляционной трубой при высоте теплообменных труб равной 2 м, имел поверхность теплообмена 28 м² (рис. 10). В процессе испытаний выпарная установка оборудована дополнительными измерительными приборами. Эксперименты проведены при атмосферном давлении в сепараторе, при различных величинах температурного напора и расхода исходного раствора. В качестве рабочей среды использована вода и 40% - ный раствор роданистого аммония. Исследования проводились при различных уровнях однофазной жидкости в трубе в условиях накипеобразования.

С целью улучшения распределения раствора по трубам и определения оптимального уровня кипящей жидкости в кипятильных трубах, к штуцеру на выходе выпаренного раствора из аппарата соединили гидравлический затвор (рис. 10). Конструкция гидрозатвора позволила испытать аппарат при различных уровнях раствора в греющих трубах.

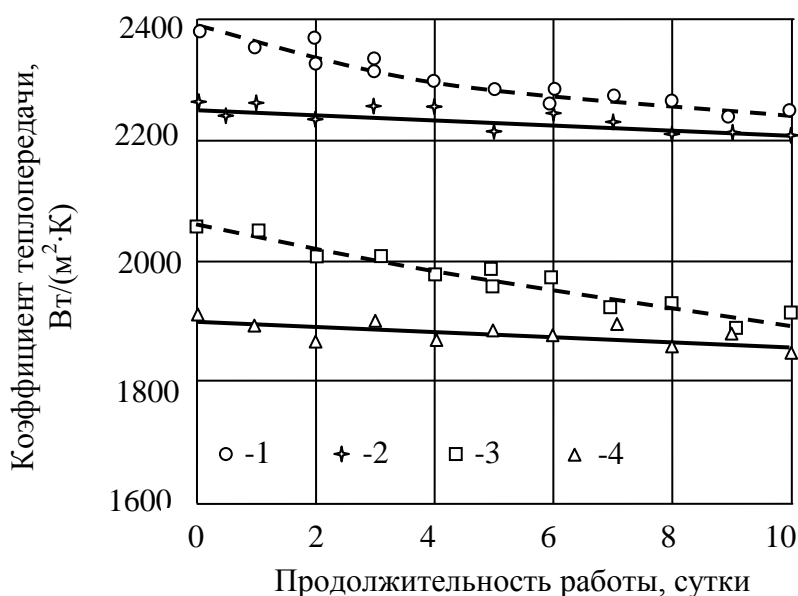


1 – выпарной аппарат; 2 – гидравлический затвор.

Рис. 10. Схема промышленной выпарной установки

Изменение коэффициента теплопередачи во времени при плотности теплового потока $q = 28 - 30 \text{ кВт/м}^2$ приведено на рис. 11. При работе с водой в аппарате с оптимальным уровнем при $\Delta t = 20^\circ\text{C}$ коэффициент теплопередачи уменьшается от $K = 2420 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ в начальный период ($\tau = 0$) до $K = 2230 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ при $\tau = 10$ суток. При выпаривании раствора роданистого аммония в аппарате с оптимальным уровнем коэффициент теплопередачи K в течении 10 суток уменьшился с $2040 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ до $1880 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$.

При тех же условиях, но при работе с вынесенной зоной кипения за пределы кипяtilьной трубы, коэффициент теплопередачи для чистой поверхности нагрева при $\tau = 0$ несколько ниже – $K = 2220 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ при выпаривании воды, $K = 1880 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ при работе с раствором роданистого аммония, за счет уменьшения коэффициента теплоотдачи внутри трубы. Однако при работе аппарата с развитым экономайзерным участком коэффициент теплопередачи K во времени снижается медленнее, чем в аппарате с оптимальным уровнем жидкости в кипяtilьных трубах.



1 и 3 – при оптимальном уровне; 2 и 4 – с развитым экономайзерным участком; 1 и 2 – вода; 3 и 4 – 40% - раствор роданистого аммония.

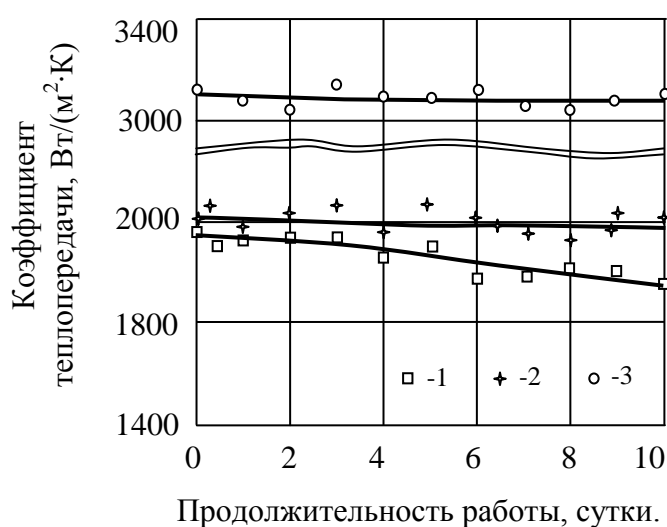
Рис. 11. Изменение коэффициента теплопередачи в зависимости от продолжительности работы аппарата

Таким образом, в выпарном аппарате работающем при оптимальных уровнях однофазной жидкости в кипяtilьных трубах интенсивность переноса тепла, но и также скорость накипеобразования больше, чем в аппарате с развитым экономайзерным участком.

Для изучения процесса теплообмена при выпаривании раствора поваренной соли, получения данных для определения диапазона изменения режимных параметров работы выпарного аппарата с принудительной циркуляцией и вынесенной зоной кипения, проведены исследования их режимов работы в промышленных условиях на СП-ЗАО «Электрохимзавод».

Целью исследований являлась изучение интенсивности теплообмена и солеотложения в выпарном аппарате с низким и высоким содержанием кристаллов соли, а также с псевдооживленным слоем инертных частиц.

Изменение коэффициента теплопередачи во времени в выпарном аппарате при исследованных условиях приведено на рис. 12. Отмечено существенное увеличение интенсивности теплообмена в аппарате с инертными частицами. В аппаратах с инертными частицами зернистого материала и высоким содержанием кристаллов соли, коэффициенты теплопередачи за 10 суток практически не снижались, что свидетельствует об отсутствии солеотложения в трубках греющей камеры. Наилучшую эффективность по интенсивности теплообмена и предупреждения солеотложения показал выпарной аппарат с псевдооживленным слоем инертных частиц.



Содержание кристаллов соли в растворе: 1 – 2%; 2 – 60%; 3 – аппарат с инертными частицами.

Рис. 12. Изменение коэффициента теплопередачи в зависимости от продолжительности работы аппарата при $q = 40 \text{ кВт/м}^2$.

Таким образом, испытания промышленной установки продемонстрировали высокую эффективность работы выпарного аппарата с псевдооживленным слоем инертных частиц. Эта установка в период испытаний работала в непрерывном режиме без промывок и без снижения производительности. При работе аппаратов с твердой дисперсной фазой, за счет интенсификации теплопередачи и исключения солеотложения в них, удельная производительность аппарата по выпаренной воде в 1,6 – 1,7 раза превышала аналогичный показатель действующей установки.

В данной главе приведена также инженерная методика расчета выпарного аппарата с псевдооживленным слоем зернистого материала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе впервые проведены комплексные исследования гидродинамики, структуры, теплообмена и накипеобразования в узких трубах с псевдооживенным жидкостью слоем зернистого материала. Промышленные, экспериментальные и теоретические исследования позволили установить закономерности тепло- и гидродинамических процессов в выпарных аппаратах в зависимости от режимных факторов, расходных параметров, геометрических характеристик и физических свойств частиц зернистого материала и получить обобщающие зависимости, охватывающие диапазон режимных параметров работы выпарных аппаратов в практике.

Основные научные результаты, выводы и рекомендации работы заключается в следующем.

1. Комплексные исследования гидродинамики дисперсных систем позволили получить эмпирическое уравнение для расчета порозности неподвижного слоя зернистого материала с учетом влияния отношения диаметра аппарата к диаметру частиц; установить, что опытные данные по гидравлическому сопротивлению неподвижного слоя зернистого материала в стесненных условиях согласуются с результатами расчета по уравнению, в котором учтено влияние стенки трубы; экспериментальные значения скорости начала псевдооживения отличались от вычисленных по известным уравнениям, что, связано с начальной порозностью слоя, которая существенно зависит от размеров аппарата и частиц и предложено эмпирическое и теоретическое уравнения для расчета скорости начала псевдооживения при жидкостном псевдооживении в стесненных условиях.

2. Установлены особенности теплоотдачи от внутренней поверхности стенки трубы к нагревающим и кипящим растворам с твердыми частицами. Интенсивность конвективного теплообмена в псевдооживенном слое значительно выше, чем в однофазном жидкостном потоке в трубе. При одном и том же числе псевдооживения, как для стальных, так и для стеклянных частиц размеры частиц не оказывают влияния на интенсивность теплообмена.

3. Обнаружено незначительное увеличение степени интенсификации теплообмена с ростом диаметра частиц при псевдооживении зернистого материала одинаковой плотности. Установлено, что с увеличением скорости оживающего агента из-за уменьшения концентрации частиц у поверхности теплообмена и интенсивного роста коэффициента теплоотдачи в трубе без твердых частиц степень эффективности псевдооживения существенно снижается. Результаты опытов показали, что наибольший эффект достигается при порозности слоя $\varepsilon = 0,7 - 0,8$.

4. Получено критериальное уравнение для расчета коэффициента теплоотдачи при конвективном теплообмене от стенки к жидкостному псевдооживенному слою.

5. Выявлено, что теплопроизводительность выпарного аппарата с вынесенной зоной кипения с твердыми частицами в 1,5 – 2,0 раза выше, чем в

аппарате без дисперсных систем при $\Delta t_0 < 10^\circ\text{C}$ на воде и в 1,8 – 2,2 раза на растворе хлористого натрия.

6. Применение метода псевдооживления в выпарном аппарате с кипением раствора в трубах, позволило увеличить коэффициенты теплоотдачи до 2 - х раз со стороны кипящей жидкости. С ростом диаметра частиц степень интенсификации теплообмена при кипении $\alpha_{\text{кп.пс}}/\alpha_{\text{кп}}$ увеличилась в 1,15 раза.

7. Установлено, что при низких скоростях циркуляции размер как стальных, так и стеклянных частиц практически не влияет на интенсивность теплоотдачи при кипении. При скорости циркуляции, равной и больше 0,5 м/с с увеличением диаметра частиц коэффициент теплоотдачи растет. Наиболее оптимальными с точки зрения интенсивности теплообмена при кипении являются скорости циркуляции $w = 0,7 - 0,8$ м/с для стальных шариков, $w = 0,5 - 0,7$ м/с для стеклянных частиц. Среди других факторов на интенсивность теплообмена наибольшее влияние оказывает порозность слоя.

8. Опытные данные по интенсивности теплообмена при пузырьковом кипении обобщены и для случая кипения в псевдооживленном слое зернистого материала получена зависимость для расчета коэффициента теплоотдачи.

9. Проведены исследования на выпарном аппарате с вынесенной зоной кипения, для определения эффективности применения метода «затравки». При содержании твердой фазы своего состава раствора в циркулирующей суспензии 50 - 100 кг/м³ внутренняя поверхность трубок подвергалась сильнейшей инкрустации. При увеличении концентрации твердой фазы до 800 - 950 кг/м³ наблюдалось резкое снижение интенсивности отложений.

10. Выявлено, что в выпарном аппарате с вынесенной зоной кипения и с псевдооживленным слоем инертных твердых частиц наблюдался рост коэффициента теплопередачи K на 50 – 60%, по сравнению с аппаратом без частиц, при скорости циркуляции $w = 0,8$ м/с и плотности теплового потока $q = 40$ кВт/м². Эффективность метода введения инертных частиц в раствор возрастает при наличии солеотложений. Так, при отсутствии накипеобразования (в начале опыта) $K_{\text{пс.0}}/K_0 = 1,5 - 1,6$, то в конце опыта (за 10 суток) $K_{\text{пс}}/K = 1,7 - 1,8$. Установлено, что солеотложения в условиях движения дисперсных систем внутри труб, за счет механического воздействия инертных частиц со стенкой трубы и увеличения турбулентности потока жидкости, значительно меньше, чем в трубах без зернистого материала.

11. Промышленные испытания подтвердили, что в выпарном аппарате с высоким содержанием кристаллов своего состава раствора, накипеобразование практически предотвращается, а в аппарате с инертными частицами не только прекращается солеотложение, но и существенно интенсифицируется теплообмен.

12. Результаты исследований по накипеобразованию в выпарных аппаратах обеспечивают максимальную продолжительность их эксплуатации между стадиями промывки, в результате повышается производительность выпарных установок и уменьшаются затраты на техническое обслуживание. На основе полученных результатов разработаны рекомендации, которые использованы производством. Разработаны инженерные методы расчета выпарных аппаратов

с псевдооживленным слоем твердых частиц для выпаривания кристаллизующихся растворов. Экспериментально показана возможность и даны параметры выпаривания кристаллизующихся растворов без солеотложения на поверхности теплообмена.

13. Ожидаемый годовой экономический эффект от применения рекомендаций переданных на ОАО «Навоиазот» составляет 209 млн. сумов в год. Внедрение результатов работы позволило в СП – ЗАО «Электрохимзавод» увеличить межпромывочный пробег оборудования, а также получить годовой экономический эффект на ООО «Пирит-М» (Россия) в размере 4,2 млн. рублей, а на ОАО «Щелковский завод вторичных драгоценных металлов» (Россия) 7 млн. рублей.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

Монографии и статьи, опубликованные в научных журналах

1. Бахронов Х.Ш. Гидродинамика и внешний теплообмен в аппаратах с псевдооживленным зернистым слоем. – Москва: МИСиС, 2008. - 210 с.

2. Закиров С.Г., Бахронов Х.Ш. и др. Интенсификация теплообмена в выпарных аппаратах с вынесенной зоной кипения и естественной циркуляцией // Химическое и нефтяное машиностроение. - Москва, - 1993. - № 1. - С. 10-13.

3. Бахронов Х.Ш., Худойбердиева Н.Ш. Интенсификация теплообмена в выпарных аппаратах // Горный вестник Узбекистана. - Навои, 2004. - № 1. -С. 28-30.

4. Бахронов Х.Ш., Закиров С.Г. Худойбердиева Н.Ш. Буғлатиш аппаратининг ишлашини саноат шароитида текшириш // Узбекский химический журнал. - Тошкент, 2004. - № 3. - С. 76-78.

5. Бахронов Х.Ш. Интенсификация работы промышленного выпарного аппарата // Химическое и нефтегазовое машиностроение. - Москва, - 2006. - № 8. - С. 13-14.

6. Bakhronov Kh. Sh. Intensification of the operation of an industrial evaporator // Chemical and petroleum engineering. 2006. - Vol. 42. - N 7 – 8. - P.433-434.

7. Бахронов Х.Ш. Гидродинамическое обоснование применения зернистых материалов в выпарных аппаратах // Химическая технология. - Москва, 2006. - № 11. - С. 38-39.

8. Бахронов Х.Ш. Исследование солеотложения в теплообменном аппарате с зернистым материалом // Химическая технология. - Москва, 2006. - № 12. - С. 30-31.

9. Бахронов Х.Ш. Гидродинамика стационарных и кипящих зернистых слоев // Химическая технология. Контроль и управление. - Ташкент, 2007. - № 2. - С. 8-11.

10. Бахронов Х.Ш., Саидов А.Х. и др. Исследование гидродинамических характеристик системы жидкость – твердое // Научно - технический журнал ФерПИ. - Фергана, 2007. - № 2. - С.45-48.
11. Бахронов Х.Ш. Закиров С.Г., Саидов А.Х. Определение коэффициентов гидравлического сопротивления зернистого слоя // Узбекский химический журнал. - Ташкент, 2007. - № 5. - С. 33-36.
12. Бахронов Х.Ш. Худойбердиева Н.Ш. Гидравлическое сопротивление зернистого слоя при восходящем потоке жидкости // Химическое и нефтегазовое машиностроение. - Москва, 2007. - № 12. - С. 12-13.
13. Бахронов Х.Ш. Гидравлическое сопротивление полидисперсного катионита КУ-2-8 // Узбекский химический журнал. - Ташкент, 2008. - № 1. - С. 39-43.
14. Бахронов Х.Ш. Саидов А.Х. Худойбердиева Н.Ш. Эффективность использования псевдооживления для интенсификации конвективного теплообмена // Химия и химическая технология. – Ташкент, 2008. - № 2, - С. 69-71.
15. Бахронов Х.Ш. Худойбердиева Н.Ш. Интенсификация кипения жидкостей в вертикальной трубе // Химическая технология. Контроль и управление. - Ташкент, 2008. - № 3, - С. 26-28.
16. Бахронов Х.Ш. Высота жидкостного псевдооживленного слоя сферических частиц // Горный вестник Узбекистана, - Навои, 2008. - № 3. - С. 101-103.
17. Бахронов Х.Ш. Тепловая эффективность кипящего слоя как промежуточного теплоносителя // Химическая технология. Контроль и управление. – Ташкент, 2008. - № 4. - С. 23-27.
18. Бахронов Х.Ш. Порозность неподвижного слоя зернистых материалов // Химическая промышленность сегодня. - Москва, 2008. - № 6. - С. 55-56.
19. Бахронов Х.Ш. Расширение однородного слоя // Химическая промышленность сегодня. - Москва, 2008. - № 7. - С. 53-56.
20. Бахронов Х.Ш. Расширение жидкостного псевдооживленного слоя сферических частиц в стесненных условиях // Химия и химическая технология. – Ташкент, 2008. - № 4, - С. 56-58.
21. Бахронов Х.Ш. Перемешивание твердой фазы при жидкостном псевдооживлении // Химическая технология. Контроль и управление. - Ташкент, 2009. - № 1. - С. 14-16.
22. Бахронов Х.Ш. Интенсивность переноса теплоты в трубе с псевдооживленным слоем // Химическое и нефтегазовое машиностроение. - Москва, - 2009. - № 2. - С. 5-6.
23. Бахронов Х.Ш. Скорость начала жидкостного псевдооживления в аппарате небольшого диаметра // Химия и химическая технология. – Ташкент, 2009. - № 1, - С. 68-70.
24. Бахронов Х.Ш. Исследование концентрирования кристаллизующихся растворов // Химическая технология. Контроль и управление. - Ташкент, 2009. - № 2. - С. 23-25.

25. Бахронов Х.Ш. Гидродинамические процессы в выпарном аппарате с твердой фазой // Химическое и нефтегазовое машиностроение. - Москва, - 2009. - № 5. - С. 13-14.

26. Бахронов Х.Ш. Интенсификация выпаривания в аппаратах с кипением в трубах // Горный вестник Узбекистана, - Навои, 2009. - № 2. - С. 101-104.

27. Бахронов Х.Ш. Теплоотдача при кипении в жидкостном псевдооживленном слое // Химия и химическая технология. – Ташкент, 2009. - № 2, - С. 75-79.

Перечень статей, опубликованных в сборниках научных трудов, тезисов и депонированных научных работ

28. Закиров С.Г., Бахронов Х.Ш. и др. Исследование конвективной теплоотдачи в гладкой и накатанных трубах // VIII Республиканская конференция «Повышение эффективности, совершенствование процессов и аппаратов химических производств»: Тез. докл. – Днепропетровск, 1991. – С. 69-70.

29. Бахронов Х.Ш., Атауллаев О.Х., Рахматов А.М. Повышение эффективности теплообменников работающих в условиях солеотложения // Технические, социально - экономические и экологические проблемы развития Навоийской области: Тез. докл. Респ. науч. - техн. конф. – Навои, 1993. - С. 54.

30. Бахронов Х.Ш., Закиров С.Г., Ботиров Б.Б. Интенсификация теплообмена при конденсации // «Истиклол-4»: Тез. докл. Респ. науч. - техн. конф. - Навои, 1995. - С. 9-10.

31. Бахронов Х.Ш., Джураев У.Б. и др. Интенсификация процесса обезвоживания раствора роданистого аммония // Проблемы и перспективы химии и химической технологии: Тез. докл. Респ. науч. - техн. конф. - Навои, 1998. - С. 77.

32. Бахронов Х.Ш., Худойбердиева Н.Ш. и др. Исследование работы промышленного выпарного аппарата // Нетрадиционные технологии добычи и переработки полезных ископаемых - прогресс горной науки XXI века: Тез. докл. Респ. науч. - техн. конф. - Навои, 2000. - С. 139.

33. Бахронов Х.Ш., Атауллаев О.Х., Худойбердиева Н.Ш. Буғлатиш ускуналарининг ишлашини яхшилаш // Актуальные задачи современных горно-технологических комплексов и пути их решения: Тез. докл. Респ. науч. - техн. конф. «Истиклол». - Навои, 2002. - С. 72.

34. Бахронов Х.Ш., Закиров С.Г., Худойбердиева Н.Ш. Табиий циркуляцияли буғлатиш ускуналарида иссиқлик бериш жараёнини тадқиқ қилиш // Ўзбекистонда кимё таълими, фани ва технологияси: Тез. тўпл. – Тошкент, 2002. - Б. 200-201.

35. Бахронов Х.Ш., Атауллаев О.Х., Худойбердиева Н.Ш. Интенсификация теплообмена в выпарных аппаратах с кипением в трубах // Инновация — 2003: Сб. науч. ст. ТашГТУ. - Тошкент, 2003. - С. 135.

36. Бахронов Х.Ш., Худойбердиева Н.Ш. Табиий циркуляцияли буғлатиш аппаратларининг гидродинамикасини яхшилаш // Кимё ва кимёвий технологиянинг замонавий муаммолари: 3 - Респ. илм. - техн. конф. тез. тўпл. - Фарғона, - 2004. - С. 174.

37. Бахронов Х.Ш., Худойбердиева Н.Ш. Буғлатиш аппаратларининг унумдорлигини ошириш // Ишлаб чиқариш корхоналарининг экологик муаммолари ечимини топишда кимёвий технологияни қўллаш: Респ. илм. - техн. конф. тез. тўпл. - Қарши, - 2004. - С. 212 -213.

38. Бахронов Х.Ш. Исследование предотвращения отложений в выпарных аппаратах // «Истиклол»: Тез. докл. Респ. науч. - техн. конф. - Навои, - 2004. - С. 93-94.

39. Бахронов Х.Ш., Худойбердиева Н.Ш. Исследование теплоотдачи от стенки к кипящей жидкости в выпарном аппарате // Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр: Тез. докл. Респ. науч. - техн. конф. - Москва - Навои, - 2005. - С. 238-242.

40. Бахронов Х.Ш. Интенсификация работы выпарных аппаратов естественной циркуляции // Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр: Тез. докл. Респ. науч. - техн. конф. - Москва - Навои, 2005. - С. 242-244.

41. Бахронов Х.Ш., Эшмуродов З.А. Снижение накипеобразования в теплообменных аппаратах с водяным охлаждением // Энергосберегающие технологии в животноводстве и стационарной энергетике: Труды 5-й Международной науч. - техн. конф. - Москва, - 2006. - Ч. 3. - С. 310-312.

42. Бахронов Х.Ш. Қайнашда иссиқлик бериш жараёнини тадқиқ қилиш // Современная техника и технология горно-металлургической отрасли и пути их развития»: Материалы Респ. науч. - техн. конф. – Навои, 2006. - С. 168-169.

43. Бахронов Х.Ш. Буғлатиш аппаратларида чўкма ҳосил бўлишини камайтириш усули // Современная техника и технология горно-металлургической отрасли и пути их развития: Материалы Респ. науч. - техн. конф. – Навоий, 2006. - С. 169-170.

44. Бахронов Х.Ш. Мавҳум қайнаш қатламининг бир жинслилигини ошириш // Современная техника и технология горно-металлургической отрасли и пути их развития: Материалы Респ. науч. - техн. конф. – Навоий, 2006. - С. 173-174.

45. Бахронов Х.Ш. Результаты испытания промышленного выпарного аппарата // Четвертая Российская национальная конференция по теплообмену: Тез. докл. – Москва: МЭИ, 2006. – Т. 4. - С. 47-48.

46. Бахронов Х.Ш. Экспериментальное исследование теплоотдачи при кипении жидкостей // Четвертая Российская национальная конференция по теплообмену: Тез. докл. – Москва: МЭИ, 2006. – Т. 4. - С. 49-50.

47. Бахронов Х.Ш., Худойбердиева Н.Ш. Высокоэффективные самоочищаемые теплообменники // Геотехнология: инновационные методы недропользования в XXI веке Материалы Респ. науч. - техн. конф. – Москва - Навои, - 2007. - С. 153.

48. Бахронов Х.Ш. Определение теплофизических свойств воды // Геотехнология: инновационные методы недропользования в XXI веке: Материалы Респ. науч. – техн. конф. (с международным участием) – Москва - Навоий, 2007. - С. 153.

49. Бахронов Х.Ш., Саидов А.Х. Критическая скорость жидкостного псевдоожигения // Геотехнология: инновационные методы недропользования в XXI веке: Материалы Респ. науч. – техн. конф. (с международным участием) – Москва - Навоий, 2007. - С. 161-163.

50. Бахронов Х.Ш., Закиров С.Г. Экспериментальное исследование скорости начала псевдоожигения зернистого материала // Актуальные проблемы науки и образования в современных условиях: Тез. докл. Международной науч. конф. – Шымкент, 2008. - С. 57-60.

51. Бахронов Х.Ш., Закиров С.Г., Пиримов А. П. Расчет скорости начала псевдоожигения в стесненных условиях // Актуальные проблемы науки и образования в современных условиях: Тез. докл. Международной науч. конф. – Шымкент, 2008. - С. 84-87.

52. Бахронов Х.Ш., Худойбердиева Н.Ш. Исследование интенсификации кипения воды в вертикальной трубе // Перспективы развития фундаментальных наук: Тез. докл. V Международной конференции студентов и молодых ученых. - Томск, 2008. – С. 121-122.

53. Бахронов Х.Ш. Высота жидкостного псевдоожигенного слоя сферических частиц // Перспективы развития фундаментальных наук: Тез. докл. V Международной конференции студентов и молодых ученых. - Томск, 2008. - С. 123-124.

54. Бахронов Х.Ш. Повышение эффективности выпаривания кристаллизующихся растворов с использованием псевдоожигенного слоя // Современная техника и технология горно-металлургической отрасли и пути их развития: Материалы международной науч. – техн. конф. – Навои, 2008. - С. 141-144.

55. Бахронов Х.Ш., Худойбердиева Н.Ш. Саидов А.Х. Зависимость интенсивности внешнего теплообмена от размеров и свойств твердой фазы // Современная техника и технология горно-металлургической отрасли и пути их развития: Материалы международной науч. – техн. конф. – Навои, 2008. - С. 144-146.

56. Бахронов Х.Ш. Интенсивность процесса выпаривания растворов с твердой фазой // Современная техника и технология горно-металлургической отрасли и пути их развития: Материалы международной науч. – техн. конф. – Навои, 2008. - С. 158-159.

57. Бахронов Х.Ш. Скорость естественной циркуляции раствора с твердой фазой // Современная техника и технология горно-металлургической отрасли и пути их развития: Материалы международной науч. – техн. конф. – Навои, 2008. - С. 161-162.

Техника фанлари доктори илмий даражасига талабгор Бахронов Ҳошим Шайимовичнинг 05.17.08 «Кимёвий технология жараёнлари ва ускуналари» ихтисослиги бўйича «Мавҳум қайнаш қатламини қўллаб кристалланувчи эритмаларни буғлатишнинг самарадорлигини ошириш» мавзусидаги диссертациянинг

РЕЗЮМЕСИ

Таянч сўзлар: донадор материал, заррачалар, ғоваклик, мавҳум қайнаш, критик тезлик, қаршилиқ, кенгайиш, аралашиш, ташиб кетиш, ташқи иссиқлик алмашилиш, буғлатиш, кристаллизация, туз чўкиши.

Тадқиқот объектлари: кристалланувчи эритмаларни буғлатиш жараёни.

Ишнинг мақсади: дисперс муҳитлардаги гидродинамика, структура, ташқи иссиқлик алмашилиш ва қасмоқ ҳосил бўлишини тадқиқ қилиш, кристалланувчи эритмаларни буғлатувчи, мавҳум қайнаш қатлами бўлган юқори самарали жиҳоз яратиш ва қаттиқ заррачалар мавҳум қайнаш қатламига эга буғлатиш аппаратларини ҳисоблаш методини яратиш.

Тадқиқот усуллари: донадор заррачалар мавҳум қайнаш қатлами бўлган буғлатиш аппаратлари гидродинамикасини, улардаги иссиқлик алмашилишни ва тузларнинг чўкишини экспериментал ва назарий тадқиқ қилиш ва натижаларни sanoatдаги ускунада текшириш.

Олинган натижалар ва уларнинг янгилиги. Доновдор материалнинг ингичка трубалар ичидаги мавҳум қайнаш қатлами гидродинамикаси, структураси, ташқи иссиқлик алмашилиши ва чўкма чўкиши жадаллиги биринчи марта комплекс тадқиқ қилинган. Sanoatдаги, экспериментал ва назарий тадқиқотлар, буғлатиш аппаратларидаги гидродинамика ва иссиқлик ўтказиш жараёнларининг, режим омиллари, сарф параметрлари, донадор материал заррачаларининг геометрик характеристикалари ва физик хоссаларига боғлиқлик қонуниятларини ўрнатишни ва буғлатиш аппаратларининг амалдаги иш тартиби параметрлари диапазонини қамраб оладиган умумлаштирувчи боғлиқликлар олишни таъминлади.

Амалий аҳамияти. Кристалланувчи эритмаларни буғлатишнинг унумдорлигини оширишнинг, иссиқлик ўтказишни жадаллаштириш, таъмирлар оралиғидаги иш даврини узайтириш ва шунга мос равишда жиҳозларни тозалаш харажатларини ва энергия сарфининг камайишини таъминлайдиган, катта капитал харажатлар талаб қилмайдиган усули таклиф қилинган.

Татбиқ этиш даражаси ва иқтисодий самарадорлиги. Диссертация иши материалларини «Навоийазот» ОАЖ даги тўрт корпусли буғлатиш қурилмасини такомиллаштиришда қўллашдан 209 млн. сўм иқтисодий самара олиниши кутилмоқда, «Электрокимёзавод» ЁАЖ-ҚҚда ош тузини кристалловчи буғлатиш аппаратининг самарадорлигини оширишда қўллаш уларнинг қасмоқсиз ишлаш даврининг ошишини таъминлади; олинган натажаларни Москвадаги «Пирит-М» МЧЖда қўллаш иссиқлик алмашилишни жадаллаштириш ва қасмоқ ҳосил бўлишини камайтириш натижасида жиҳозларнинг унумдорлигини ошириш ҳисобига йилига 4,2 млн. рубл миқдорида иқтисодий самара олишни таъминлади; иш натижалари «Щелково иккиламчи қимматбаҳо металллар заводи» ОАЖ да (Россия) унумдорликни ошириш, атмосферага ташланадиган чиқиндиларни камайтириш и йўқотиладиган кумуш миқдорини камайтириш учун қўлланилиб йилига 7 млн. рубл (2008 йил нархларида) иқтисодий самара олинди.

Қўлланиш соҳаси : кимё ва озиқ-овқат sanoati, металлургия.

РЕЗЮМЕ

диссертации Бахронова Хошима Шайимовича на тему: «Повышение эффективности выпаривания кристаллизующихся растворов с использованием псевдооживленного слоя» на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.17.08 – «Процессы и аппараты химической технологии»

Ключевые слова: зернистый материал, частицы, порозность, псевдооживление, критическая скорость, сопротивление, расширение, перешивание, унос, теплообмен, выпаривание, кристаллизация, солеотложение.

Объекты исследования: процесс выпаривания кристаллизующихся растворов.

Цель работы. Исследование гидродинамики, структуры и внешнего теплообмена в дисперсных средах, создание высокоэффективного оборудования для выпаривания кристаллизующихся растворов в псевдооживленном слое и разработка методов расчета выпарных аппаратов с взвешенным слоем твердых частиц.

Методы исследования: Экспериментальные и теоретические исследования гидродинамики, структуры, внешнего теплообмена и солеотложения в выпарном аппарате и проверка результатов на промышленном аппарате.

Полученные результаты и их новизна. Впервые проведены комплексные исследования гидродинамики, структуры, внешнего теплообмена и накипеобразования в псевдооживленном слое зернистого материала в узких трубах. Промышленные, экспериментальные и теоретические исследования позволили установить закономерности теплогидродинамических процессов в выпарных аппаратах в зависимости от режимных факторов, расходных параметров, геометрических характеристик и физических свойств частиц зернистого материала и получить обобщающие зависимости, охватывающие диапазон режимных параметров работы выпарных аппаратов в практике.

Практическая значимость. Предложен не требующий значительных капитальных затрат способ повышения эффективности выпаривания кристаллизующихся растворов, позволяющий существенно увеличить интенсивности теплообмена и межпромысловый пробег работы аппарата, и соответственно снизить расход энергии и затраты на очистку оборудования.

Степень внедрения и экономическая эффективность. Материалы диссертационной работы переданы для использования в ОАО «Навоiazот» для усовершенствования четырехкорпусной выпарной установки, с ожидаемым экономическим эффектом 209 млн. сумов в год; внедрены в СП – ЗАО «Электрохимзавод» для повышения эффективности процесса выпаривания раствора поваренной соли, что позволило увеличить межпромысловый пробег оборудования; внедрение полученных результатов на ООО «Пирит-М» в г. Москве, позволило увеличить производительности оборудования за счет интенсификации теплообмена и уменьшения накипеобразования и получить экономический эффект в размере 4,2 млн. рублей в год; результаты работы внедрены на ОАО «Щелковский завод вторичных драгоценных металлов» (Россия) для увеличения производительности, снижения выбросов в атмосферу и уменьшения потерь серебра и получен годовой экономический эффект 7 млн. рублей в год (в ценах 2008 года);

Область применения: химическая и пищевая промышленность, металлургия.

RESUME

thesis of Bakhronov Khoshim Shaimovich
on the scientific degree competition of the doctor of technical sciences
speciality 05.17.08 – Processes and devices of chemical technology
«Increasing of efficiency of the evaporation crystallizing solution with use fluidized layer»

Key words: granivorous stuff, particles, porosity, fluidisation, critical velocity, resistance, expansion, agitating, entrainment, external heat exchange, evaporation, crystallization, scale.

Subject of inquiry: process of the evaporation crystallizing solution.

Aim of the inquiry: Study of hydrodynamics and external heat exchange in dispersible ambience, creation high performance machinery for evaporation crystallizing solutions in fluidized layer and development of the methods of the calculation evaporating device with weighted layer the hard particles.

Method of inquiry: experimental studies of hydrodynamics, external heat exchange and scale in evaporation device and check result on industrial device.

The results achieved and their novelty: For the first time organized complex studies of hydrodynamics, external heat exchange and scaling in fluidized layer of the granivorous stuff in fine-bored tube. Industrial experimental and theoretical researches have allowed installing the regularities heat hydrodynamic processes in evaporating device depending on operation condition, expense parameter, geometric characteristics and physical feature of the particles of the granivorous stuff and getting the generalizing dependencies, embracing range regime parameter of functioning evaporating device in practice.

Practical value: Offered method of increasing efficiency of the evaporation crystallizing solutions, allowing increase inter – flushing path of functioning device, improve quality of manufacturing product and reduce power consumption and purification equipment, which do not demand considerable expenditures.

Degree of embed and economic effectivity: Materials of thesis are utilized in Joint Stock Company "Navoiazot" for update quadruple-effect evaporator, with expected economic benefit 209 mln. bag; implanted in Joint venture - closed joint-stock company "Electrohimzavod" for increasing of efficiency of functioning evaporating kettle for evaporation of solution of the cookery salt, which allowed increase inter-industry path of equipment; implantation of got results in OJSC "PIRIT-M" in Moscow, allow increase machine capacity by heat exchange intensification and gain economic benefit at a rate of 4,2 mln. rubles in a year; results of work implanted in JSC Shyolkovsky Factory of Secondary Precious Metals (Russia) for increase productivity, decrease air pollution and reduction of silver loss and got annual economic effect at a rate of 7 mln. rubles in a year (in prices 2008).

Sphere of usage: Chemical and food industry, metallurgy.

Соискатель:

Редактор Ф.Ж.Мирзаева. Навоийский государственный горный институт,
г.Навоий, ул.Южная 27а.

Формат 60x84 1/16. Уч.-изд. Л. 7,0. Тираж 100. Заказ 38

Отпечатано в типографии Navoiy-Gold-Servis
г.Навоий, ул.Южная 27а