

536

С-14

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 536.24:66.01

САЕВИЧ
Николай Петрович

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА
ПУТЕМ ВВОДА ОСТРОГО ПАРА В ЖИДКОСТЬ
НА ЭКОНОМАЙЗЕРНОМ УЧАСТКЕ
ВЕРТИКАЛЬНЫХ ТРУБЧАТЫХ АППАРАТОВ**

05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Минск 2004

Работа выполнена в Белорусском государственном технологическом университете на кафедре «Процессы и аппараты химических производств»

Научный руководитель

заслуженный деятель науки Республики Беларусь, доктор технических наук, профессор

Ершов Александр Иванович
БГТУ, кафедра «Процессы и аппараты химических производств»

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор
Плехов Иван Максимович
БГТУ, кафедра «Машины и аппараты химических и силикатных производств»

кандидат технических наук
Короткевич Валентин Алексеевич
зав. лабораторией «Энергосбережение» НИИПКУ РУП МБИ

Оппонирующая организация

Научно-исследовательский центр проблем ресурсосбережения НАН РБ (г. Гродно)

Защита состоится «12» ноября 2004 г., в 14⁰⁰ на заседании совета по защите диссертации Д 02.08.02 Белорусского государственного технологического университета, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, тел. секретаря совета: 2260039, факс: (017) 2276217.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского государственного технологического университета.

Автореферат разослан 5 октября 2004 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций
доктор технических наук, профессор

В. А. Маркон

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Настоящая работа посвящена исследованию закономерностей теплообмена при кипении в вертикальных трубах с интенсификацией процесса за счет подвода острого пара на экономайзерном участке с целью разработки теплообменного оборудования для утилизации низкопотенциального тепла при малых температурных перепадах между теплоносителями.

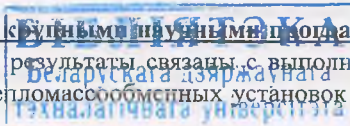
Актуальность темы диссертации. Постоянный рост цен на энергоресурсы вынуждает уделять повышенное внимание снижению энергоемкости производственных процессов и установок. Особо актуальна эта проблема для Республики Беларусь, которая имеет развитую химическую, нефтеперерабатывающую и другие энергоемкие отрасли народного хозяйства при ограниченных топливно-энергетических ресурсах.

Энергоемкость многих производственных процессов может быть снижена за счет рекуперации и утилизации тепла технологических потоков. Утилизация вторичных энергоресурсов (ВЭР) высокого потенциала не требует существенных дополнительных материальных затрат и широко используется при проектировании новых и реконструкции действующих предприятий. При наличии ВЭР низкого потенциала (например, тепло паров низкого давления) прямое их использование затруднительно из-за малого значения движущей силы теплообмена. Для осуществления подобных проектов требуются дорогостоящие, с большими поверхностями теплопередачи аппараты. Чтобы удешевить процессы рекуперации и утилизации тепла ВЭР низкого потенциала, в том числе за счет снижения капитальных затрат на их реализацию, необходима интенсификация теплообмена.

Если в процессе утилизации ВЭР низкого потенциала принимающим теплоносителем является кипящая жидкость, а отдающим — конденсирующийся пар (процессы перегонки и ректификации, выпаривания, теплообмена в холодильной технике, переработки пищевых продуктов и др.), то при малых температурных напорах между ними общую интенсивность процесса, как правило, лимитирует интенсивность теплоотдачи к кипящей жидкости. В этом случае для снижения общего термического сопротивления необходимо интенсифицировать лимитирующую стадию процесса — кипение.

Таким образом, разработка и исследование новых эффективных методов интенсификации теплообмена при кипении в условиях малых температурных напоров, а также разработка аппаратурно-технологических решений использования их в существующих производствах, является актуальной задачей снижения энергопотребления тепломассообменных установок целого ряда производств.

Связь работы с будущими научными программами, темами. Полученные в диссертации результаты связаны с выполнением тем «Разработка энергоэкономичных тепломассообменных установок с исследованием опти-



633ар

мальных режимов ведения процессов и созданием совершенного оборудования» (ГБ № 94-021, 1994-1996), «Разработать энергоэкономичные выпарные установки с минимальными температурными потерями на гидростатический эффект» (ХД № 59-96/96-023, 1996-1998), «Исследование способов интенсификации теплообмена между теплоносителями, имеющими малую разность температур, с целью утилизации и рекуперации низкопотенциального тепла» № гос. регистрации 2000939 (ГБ № 20-028, 2000-2001).

Цель и задачи исследования. Целью настоящих исследований является установление закономерностей теплообмена при кипении жидкостей в вертикальных трубах с подводом острого пара на их экономайзерном участке, как активного способа интенсификации в условиях малых температурных напоров, и разработка аппаратурно-технологических решений его применения в многоступенчатых установках ректификации, выпаривания и др.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Исследовать на разных жидких модельных средах влияние подвода острого пара на интенсивность кипения при сравнительно малых температурных напорах.
2. Определить оптимальные режимные параметры ведения процесса кипения с подводом паровой фазы на экономайзерном участке.
3. Получить расчетные зависимости для определения коэффициента теплоотдачи с интенсификацией теплообмена в вертикальных трубах за счет подвода острого пара в жидкость.
4. Разработать и исследовать конструкцию распределителя, предназначенного для равномерного распределения легкой фазы в многотрубных вертикальных аппаратах.
5. Разработать метод технико-экономических расчетов для оценки целесообразности применения подвода острого пара в качестве интенсифицирующего фактора теплообмена при кипении в вертикальных испарителях различных тепломассообменных установок с целью утилизации низкопотенциального тепла.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования является процесс теплообмена при кипении жидкости в вертикальных трубах с подводом острого пара на их экономайзерном участке с целью интенсификации переноса теплоты при малых температурных напорах.

Методология и методы проведенного исследования. Эксперименты проводились на многофункциональной установке, включающей в себя сменные опытные образцы вертикальных труб с паровыми рубашками и термопарами, а также многотрубный аппарат с распределителем фаз и необходимое стандартное измерительное и другое оборудование, позволившие провести исследования при заданных температурных режимах в условиях минималь-

ных тепловых потерь. Теплотехнические эксперименты выполнялись по общепринятым методикам. Надежность и достоверность полученных данных подтвердились их воспроизводимостью и сходимостью результатов тестовых испытаний по интенсивности теплообмена в трубе без подвода острого пара с результатами других исследователей.

Научная новизна и значимость полученных результатов.

1. Впервые получены экспериментальные данные по интенсивности теплообмена при кипении воды и растворов сахарозы в вертикальных трубах с подводом острого пара на их экономайзерном участке в диапазоне плотностей тепловых потоков $8 \div 90 \text{ кВт/м}^2$ для воды и $5 \div 95 \text{ кВт/м}^2$ для растворов сахарозы при атмосферном давлении. Коэффициенты теплоотдачи с подводом острого пара в жидкость в $1,5 \div 2$ раза превышали значения, полученные при аналогичных температурных напорах без подвода пара.

2. Экспериментально установлена зависимость степени интенсификации теплообмена при кипении от количества подводимого острого пара, высоты уровня светлой жидкости в трубах, величины температурного напора и других параметров.

3. Предложены критериальные зависимости для определения коэффициентов теплоотдачи с интенсификацией теплообмена при кипении в вертикальных трубах путем подвода острого пара в диапазоне плотностей теплового потока $20 \div 80 \text{ кВт/м}^2$ и относительном расходе острого пара $0,1 \div 0,5$. Использование полученных зависимостей позволяет выполнять инженерные расчеты испарителей, предназначенных для утилизации низкопотенциального тепла различных производственных установок, с погрешностью $\pm 7\%$.

4. Разработана и испытана конструкция двухступенчатого распределителя для равномерного распределения легкой фазы в многотрубных вертикальных тепло- и массообменных аппаратах.

5. Разработан метод проведения технико-экономической оценки целесообразности модернизации многоступенчатых тепломассообменных установок с утилизацией низкопотенциального тепла паров в вертикальных трубчатых испарителях и интенсификацией теплообмена в них за счет подвода острого пара в жидкость на экономайзерном участке.

Практическая значимость полученных результатов.

1. Полученные оптимальные значения режимных параметров ведения процесса кипения в вертикальных трубах с подводом острого пара позволяют рекомендовать их при разработке высокоэффективных теплообменных аппаратов — испарителей, предназначенных для установок многоступенчатой ректификации и выпаривания.

2. Предложенные критериальные зависимости для определения коэффициентов теплоотдачи с интенсификацией теплообмена при кипении в вертикальных трубах с подводом острого пара могут быть использованы в инженерных расчетах соответствующих испарителей, работающих в условиях

малых температурных напоров, в частности, реализованы при подготовке технического решения по модернизации установки разделения продуктов окисления циклогексана в производстве капролактама Гродненского ПО «Азот».

3. Разработанная конструкция двухступенчатого распределителя фаз рекомендуется к практическому применению в многотрубных вертикальных тепло- и массообменных аппаратах с многофазными потоками.

4. Предложенный метод технико-экономических расчетов позволяет проводить оценку целесообразности использования острого пара в качестве интенсифицирующего фактора в испарителях при утилизации низкопотенциального тепла в многоступенчатых тепло- и массообменных установках.

5. Результаты диссертации используются в учебном процессе в БГТУ при чтении курса лекций по дисциплине «Процессы и аппараты химической технологии».

Основные положения диссертации, выносимые на защиту.

1. Результаты сравнительных экспериментальных исследований интенсивности теплообмена при кипении жидкости в вертикальных трубах с подводом и без подвода острого пара.

2. Установленные закономерности влияния режимных параметров ведения процесса и свойств системы на интенсивность теплообмена при кипении в трубах с подводом острого пара на их экономайзерном участке.

3. Обобщающие критериальные зависимости для расчета коэффициентов теплоотдачи при кипении жидкости в вертикальных трубах с подводом острого пара на их экономайзерном участке.

4. Результаты исследования конструкции двухступенчатого распределителя фаз и методики его расчета.

5. Метод проведения технико-экономической оценки целесообразности использования подвода острого пара в жидкость, как интенсифицирующего фактора теплообмена при утилизации низкопотенциального тепла в тепло- и массообменных установках.

Личный вклад соискателя. Все изложенные в диссертации положения, выводы и рекомендации получены автором лично на основании описанных в диссертации экспериментальных и расчетных методов. Вклад соавторов в опубликованных в соавторстве работах заключается в научном руководстве, подготовке и планировании опытов, в обсуждении результатов работы.

Апробация результатов диссертации. Результаты исследований, включенные в диссертацию, докладывались на следующих научных конференциях, семинарах:

Областная научно-техническая конференция студентов и молодых ученых «Химия, химическая технология, химическое машиностроение», Днепропетровск, 1991 г.; Научно-техническая конференция «Ресурсосберегающие

и экологически чистые технологии», Гродно, 1994 г.; III Минский международный форум «Тепломассообмен ММФ-96», Минск, 1996 г; Международная научно-техническая конференция «Ресурсо- и энергосберегающие технологии в химической и нефтехимической промышленности», Минск, 1998 г; V Республиканская научная конференция студентов, магистрантов и аспирантов Республики Беларусь (НИРС-2000), Гродно, 2000 г.; IV Минский международный форум «Тепломассообмен ММФ-2000», Минск, 2000 г; Международная научно-техническая конференция «Новые технологии рециклинга вторичных ресурсов», Минск, 2001 г.; III Международная научно-техническая конференция «Техника и технология пищевых производств», Могилев, 2002 г; Международная научно-техническая конференция «Новые технологии в химической промышленности», Минск, 2002 г.; Международная научно-техническая конференция «Ресурсо- и энергосберегающие технологии промышленного производства», Витебск, 2003 г.; 50-67 научно-технические конференции в Белорусском государственном технологическом университете, Минск, 1990-2003 гг.

Опубликованность результатов. По результатам исследований, изложенных в диссертационной работе, опубликовано 19 печатных работ: в научных журналах и сборниках 10 статей, в трудах конференций – 9. Общее количество страниц опубликованных материалов – 77 с.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав основной части, заключения, списка использованных источников и приложений. Общий объем диссертации – 166 с., включая 60 рисунков, 2 таблицы, 184 библиографических ссылки.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе выполнен обзор и анализ работ, посвященных исследованиям интенсификации теплообмена при кипении жидкостей. Из обзора следует, что процесс кипения из-за своей сложности остается недостаточно изученным и пока не имеет общепринятой физической модели описания. Множество факторов, влияющих на теплообмен при кипении, порождает и разнообразие способов воздействия с целью интенсификации процесса.

При выборе для практического использования того или иного метода интенсификации необходимо учитывать в совокупности такие факторы как состояние теплообменной поверхности, технические возможности ее изготовления, технологичность сборки теплообменного аппарата, требования по надежности, загрязненность поверхности, особенности эксплуатации и т.д. Это существенно влияет на обоснованность выбора варианта интенсификации и сужает область его применения.

Одним из перспективных способов интенсификации теплообмена в вертикальных аппаратах с кипением реальных (часто загрязненных) жидких сред внутри труб при малых и умеренных тепловых потоках следует признать подвод легкой фазы. Применение способа позволяет увеличить коэффициент теплоотдачи при определенных условиях в два и лишним раза. С целью расширения области применения данного способа интенсификации, особенно при многоступенчатой ректификации и выпаривании, предлагается в качестве легкой фазы использовать пары испаряемой жидкости вместо газа.

Отсутствие в научной литературе результатов исследований теплообмена при кипении в вертикальных каналах с подводом острого пара в жидкость, а, следовательно, и аппаратурно-технологических решений использования данного способа интенсификации на практике, послужило обоснованной необходимостью выполнения настоящей диссертационной работы.

Во второй главе представлены экспериментальные и аналитические исследования закономерностей теплообмена при кипении жидкостей в вертикальных каналах без подвода и с подводом острого пара.

Проведен анализ структурной модели испарительного контура с естественной циркуляцией. Отмечено наличие в кипяtilьной трубе экономайзерной зоны, отличающейся низкой интенсивностью теплообмена. Сделан вывод о возможности сокращения экономайзерной зоны теплообмена за счет подвода острого пара на начальном участке испарительного канала и, тем самым, увеличения зоны развитого пузырькового кипения с высокими значениями локальных коэффициентов теплоотдачи.

Для подтверждения данной модели был проведен цикл поисковых исследований на однетрубном вертикальном теплообменном аппарате типа «труба в трубе» с контуром естественной циркуляции. Результаты поисковых исследований экспериментально подтвердили возможность использования острого пара в качестве интенсифицирующего способа теплообмена при кипении в условиях низких температурных напоров между теплоносителями (достигнуто увеличение коэффициента теплопередачи до 50%), а также позволили установить основные факторы, влияющие на степень интенсификации. Согласно полученным данным, интенсивность теплообмена зависит не только от количества подводимого острого пара β , но и от плотности теплового потока q , высоты уровня светлой жидкости в кипяtilьной трубе h . Поскольку влияние некоторых из этих параметров оказалось неоднозначным, то установленный экспериментально факт их воздействия на степень интенсификации потребовал более точных исследований с целью получения локальных характеристик процесса теплообмена при кипении с подводом острого пара, а также получения расчетных зависимостей для определения коэффициентов теплоотдачи.

Дальнейшие экспериментальные исследования проводились на многофункциональной установке, схема которой представлена на рис. 1.

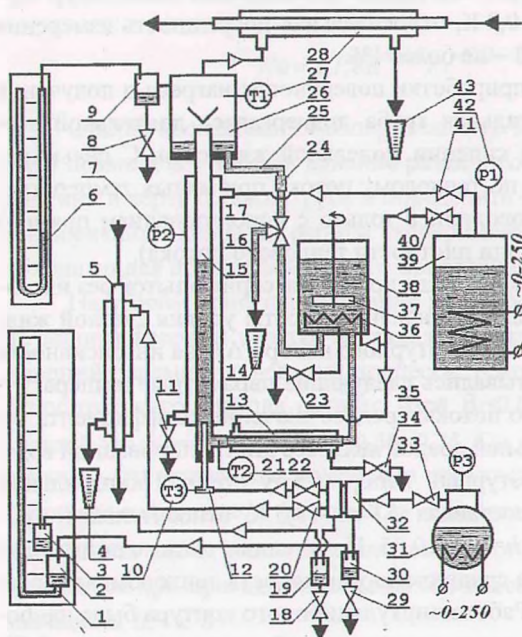


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1,6— дифференциальный манометр; 2,3,9,19,30— сборник конденсата; 4,14,43— мерный сосуд; 5,28— конденсатор; 7,35,42— манометр; 8,18,20,22,29— кран; 10,21,27— термопара; 11,23,33,34,40,41— вентиль; 12— узел ввода острого пара; 13— подогреватель; 15— испаритель; 16— отводящий трубопровод; 17— трехпозиционный кран; 24— смотровой фонарь; 25— циркуляционная труба; 26— сепаратор; 31— генератор острого пара; 32— диафрагма; 36— паровой змеевик; 37— мешалка; 38— термостат; 39— парогенератор.

Исследовательским объектом являлся вертикальный однотрубный испаритель 15 с контуром естественной циркуляции. Процесс кипения осуществлялся в медной трубе с внутренним диаметром 20 мм и толщиной стенки 4 мм. Высота обогреваемого участка составляла 1 м. В качестве греющего и острого паров применялся водяной насыщенный пар. Давление паров измерялось образцовыми манометрами 7 и 35. Регулирование уровня кипящей жидкости в испарителе осуществлялось за счет изменения положения подвижного термостата 38. Температуры модельной жидкости и острого пара, поступающих в испаритель, измерялись с помощью термопар 21 и 10. Наличие устойчивой циркуляции модельной жидкости визуально определялось через смотровой фонарь 24, установленный в верхней части циркуляционной трубы. Температура вторичного пара над кипящей жидкостью определялась с учетом избыточного давления в сепараторе, измеряемого дифференциальным жидкостным манометром 6. При проведении опытов с интенсификацией дополнительно использовалась линия острого пара, включающая в себя генератор острого пара 31, узел ввода острого пара 12 и расходомерное устройство. Минимизация тепловых потерь достигалась за счет паровых рубашек и наружной тепловой изоляции.

Для определения температуры стенки кипяtilьной трубы в нее через равные интервалы по высоте завальцованы 5 хромель-копелевых термопар в исполнении КТМС. ЭДС термопар измерялись потенциометром постоянного

тока Р 363 (класс точности 0,001). Погрешность измерения температур термомпарами составляла не более 0,2 К, относительная погрешность измерения расходов не более 5%, давлений – не более 1%.

Для устранения эффекта приработки поверхности нагрева и получения стабильных результатов кипяtilьная труба подвергалась длительной эксплуатации (десятки часов) при кипении модельной жидкости. С целью исключения влияния гистерезиса по тепловому потоку при малых температурных напорах серии опытов проводились только с использованием прямого хода (при постепенном увеличении плотности теплового потока).

На первом этапе исследований была проведена серия опытов без интенсификации теплообмена и определено влияние высоты уровня светлой жидкости в кипяtilьной трубе h и температурного напора ΔT на интенсивность теплообмена. При этом рассчитывались следующие параметры: температурный напор, плотность теплового потока, среднее значение коэффициента теплоотдачи при кипении. Модельной средой являлась дистиллированная вода.

Во время опытов температурный напор между стенкой кипяtilьной трубы и кипящей жидкостью составлял $\Delta T = 3 \pm 13,5$ К, относительный уровень светлой жидкости в трубе $h = 0,35 \pm 0,75$. Полученные данные подтвердили влияние уровня жидкости на среднюю интенсивность теплообмена в вертикальной кипяtilьной трубе. Работа циркуляционного контура была наиболее эффективной при относительном уровне светлой жидкости равном 0,50, для которого отчетливо наблюдалось наличие двух зон кипения – переходной ($\Delta T < 5$ К, $\alpha \sim q^{0,34}$) и развитой пузырьковой ($\alpha \sim q^{0,61}$). При повышении h средняя интенсивность теплообмена медленно снижалась, а работа испарительного контура при пониженных уровнях отличалась нестабильностью и значительным уменьшением коэффициентов теплоотдачи.

Сопоставление полученного экспериментального материала с данными по интенсивности теплообмена кипящей при атмосферном давлении воды, опубликованными в научной литературе, показало их хорошую сходимость (отклонение не более 15%). Это свидетельствует о корректности выбранной методики проведения исследований и достоверности их результатов.

Также было выявлено, что большинство результатов различных экспериментаторов, а также данные собственных исследований процесса кипения в области развитого пузырькового кипения, с наименьшей погрешностью обобщаются двумя критериальными системами, предложенными Н. Ю. Тобилевичем¹ и В. И. Толубинским². Соответствующее преобразование указанных зависимостей позволило получить расчетные уравнения, обобщающие результаты опытов без интенсификации, проведенных лично, с погрешностью не более 7%:

¹ Тобилевич Н. Ю., Сагань И. И., Гордиско А. П. Критериальное уравнение для определения коэффициента теплоотдачи кипящих жидкостей // Изв. вузов. Пищевая технология. – 1966, № 5. – С. 150–154.

² Толубинский В. И. Теплообмен при кипении. – Киев: Наукова думка, 1980. – С. 140–166.

$$Nu = 2,39 \cdot 10^{-4} Pe_u^{0,61} Ga^{0,05} K_p^{0,84}, \quad (1)$$

$$Nu = 67,8 K^{0,61} Pr^{-0,2}. \quad (2)$$

Стадия исследований испарительного контура с естественной циркуляцией позволила уточнить влияние различных параметров на теплообмен при кипении в вертикальной трубе и определить оптимальный с точки зрения интенсификации диапазон работы экспериментальной установки, что было необходимо для целенаправленного проведения последующего эксперимента.

На втором этапе исследований изучалось влияние подвода острого пара на экономайзерном участке вертикальной трубы в следующем диапазоне изменений параметров ведения процесса: температурного напора $\Delta T = 2 \div 11$ К; относительного расхода острого пара $\beta = 0,05 \div 0,50$; относительного уровня светлой жидкости в трубе $h = 0,50 \div 0,75$. По результатам эксперимента определялись относительные изменения плотности теплового потока Δq и коэффициента теплоотдачи $\Delta \alpha$, а также относительный расход острого пара β . β вычислялся как отношение расходов острого пара и вторичного пара, образующегося при проведении опытов без интенсификации, при одних и тех же значениях ΔT и h .

Результаты экспериментов частично представлены на рис. 2 в виде зависимостей $\alpha = f(\Delta T, \beta)$ при $h = 0,5$. Подвод острого пара в жидкость способствует повышению коэффициента теплоотдачи при кипении, причем с увеличением β степень интенсификации возрастает. Влияние плотности теплового потока на коэффициент теплоотдачи при этом неоднозначно. При достижении некоторой критической величины q , значение которой меньше плотности теплового потока, соответствующего переходу из свободно-конвективной зоны в зону пузырькового кипения, происходит резкое увеличение коэффициента теплоотдачи. Дальнейший рост q приводит к снижению интенсифицирующего эффекта, однако коэффициент теплоотдачи остается на 10÷15% выше, чем при кипении без подвода острого пара.

В ходе исследований также установлено, что положительное воздействие ввода острого пара возрастает при увеличении уровня светлой жидкости в кипяtilльной трубе. Однако этот рост незначителен при уровнях жидкости выше оптимального.

Коэффициент теплоотдачи при кипении воды и разбавленных водных растворов с вводом острого пара α_n предлагается определять по формуле

$$\alpha_n = B \alpha. \quad (3)$$

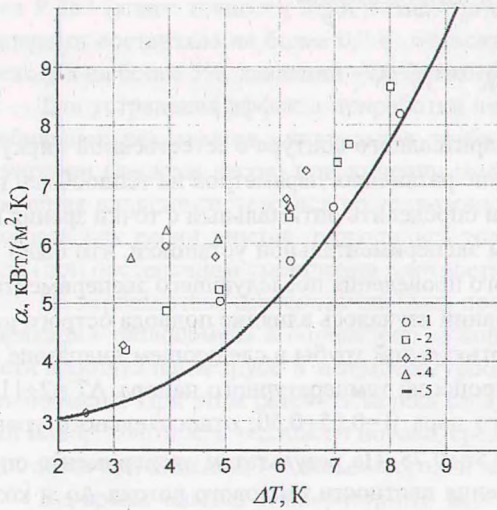


Рис. 2. Зависимость α от ΔT при $h = 0,5$ и различных значениях β : 1 – $\beta = 0,15$; 2 – $\beta = 0,25$; 3 – $\beta = 0,33$; 4 – $\beta = 0,50$; 5 – $\beta = 0$.

На рис. 3 представлены графические зависимости коэффициента B от температурного напора ΔT при различных значениях β и $h = 0,5$. Согласно им наиболее значительный рост интенсивности теплоотдачи при вводе острого пара в кипящую жидкость наблюдается при $\beta = 0,25 \div 0,33$. С повышением β от 0,33 до 0,5, а также при $\beta < 0,25$, относительное приращение коэффициента теплоотдачи менее значимо. Следовательно, высокоэффективная работа испарителя с подводом острого пара обеспечивается лишь при равномерном распределении легкой фазы по трубам аппарата в области оптимальных значений β .

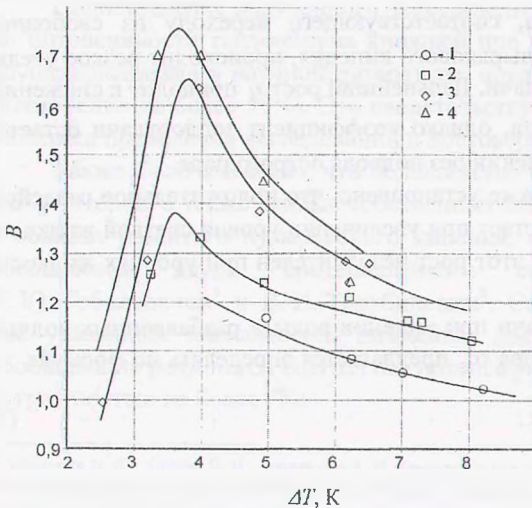


Рис. 3. Зависимость $B = \alpha_{\text{н}}/\alpha$ от ΔT при $h = 0,5$ и различных значениях β : обозначения точек 1–4 – см. рис. 2.

Обобщение результатов экспериментальных исследований интенсификации теплообмена при кипении жидкости в вертикальной трубе с вводом острого пара для оптимальных режимов ведения процесса осуществлено эмпирическим уравнением

$$B = 12,1 \cdot \beta^{0,152} q^{-0,196}. \quad (4)$$

Расчетная зависимость (3) с учетом (4), а также (1) и (2), соответственно, принимает вид следующих уравнений:

$$\alpha_{\text{и}} = B \frac{\lambda}{l_0} 2,39 \cdot 10^{-4} Pe_{\text{и}}^{0,61} Ga^{0,05} K_p^{0,84}; \quad (5)$$

$$\alpha_{\text{и}} = B \frac{\lambda}{l_0} 67,8 K^{0,61} Pr^{-0,2}. \quad (6)$$

При $\beta = 0,1 \div 0,5$, $q = 20 \div 80$ кВт/м² относительное отклонение экспериментальных значений $\alpha_{\text{и}}$, от рассчитанных по (5) и (6), не превышает 7% (см. корреляционный график, представленный на рис. 4).

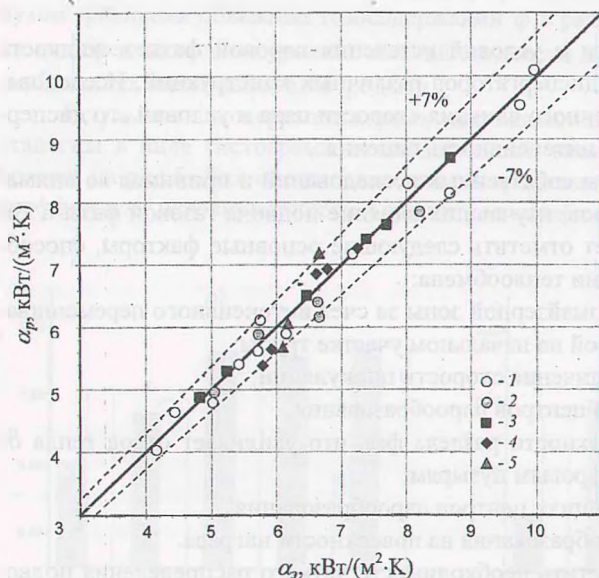


Рис. 4. Корреляция значений $\alpha_{\text{и}}$ уравнением (6): 1 – $\beta = 0$; 2 – $\beta = 0,15$; 3 – $\beta = 0,25$; 4 – $\beta = 0,33$; 5 – $\beta = 0,50$.

Влияние подвода острого пара на теплообмен было исследовано также на водном растворе сахарозы, существенно отличающемся от дистиллированной воды своей вязкостью. Концентрация сахарозы на входе в кипятиль-

ную трубу поддерживалась равной 0,40 кг/кг ($CB=40\%$) с точностью $\pm 3\%$ и контролировалась с помощью рефрактометра.

Качественная картина влияния ΔT и β на степень интенсификации для кипящего раствора сахарозы оказалась идентичной, как и для воды. Причем для раствора сахарозы максимально достижимый рост α составил 2,3 раза (для воды – 1,7 раза). Следовательно, с ростом вязкости жидкости интенсифицирующее воздействие острого пара возрастает. Дополнительно установлено, что при этом область максимальных значений коэффициентов теплоотдачи смещается в сторону больших температурных напоров.

Исследование работы циркуляционного контура без интенсификации теплообмена и с подводом острого пара сопровождалось определением расходных характеристик потоков на входе в кипятельную трубу – скорости циркуляции жидкой фазы, скорости и условий истечения паровой фазы.

Скорость циркуляции устанавливалась методом мгновенной отсечки потока жидкости, двигающейся по циркуляционному контуру. Согласно опытам подвод легкой фазы существенно повышает скорость циркуляции жидкости и, тем самым, способствует улучшению теплообмена на экономайзерном участке. Кроме того, обеспечивается устойчивая работа циркуляционного контура в широком диапазоне плотностей теплового потока и снижается вероятность образования зоны ухудшенного теплообмена в верхней части кипятельной трубы.

Изменение скорости и условий истечения паровой фазы в жидкость достигалось установкой диспергаторов различных конструкций. Исследования не выявили существенного влияния скорости пара и условий его диспергирования в жидкость на интенсивность кипения.

Обобщая результаты собственных исследований и принимая во внимание данные других авторов, изучавших влияние подвода газовой фазы в кипящую жидкость, следует отметить следующие основные факторы, способствующие интенсификации теплообмена:

- сокращение экономайзерной зоны за счет интенсивного перемешивания жидкости легкой фазой на начальном участке трубы;
- значительное увеличение скорости циркуляции;
- подвод «готовых» центров парообразования;
- увеличение поверхности раздела фаз, что усиливает отвод тепла от перегретой жидкости к паровым пузырям;
- активация «молчащих» центров парообразования;
- снижение накипеобразования на поверхности нагрева.

Особо следует отметить необходимость четкого распределения подводимой легкой фазы по трубам для обеспечения эффективной работы испарителя с интенсификацией теплообмена.

В третьей главе рассмотрены вопросы, связанные с исследованиями равномерного распределения легкой фазы по трубам вертикального много-трубного аппарата.

Анализ существующих конструкций распределителей вызвал необходимость разработки нового распределительного устройства, удовлетворяющего совокупности требований: обеспечение стабильного распределения в широком диапазоне изменений нагрузок по газу (пару) и жидкости; отсутствие калиброванных отверстий малого диаметра, склонных к быстрому забиванию; малая чувствительность к перекосам, допускаемым при монтаже; простота устройства и технологичность изготовления; возможность установки в стандартной теплообменной аппаратуре без значительных конструктивных изменений последней.

В связи с этим предложено и исследовано новое техническое решение, отличительной особенностью которого является наличие двух ступеней распределения. Экспериментальные исследования равномерности распределения фаз разработанной конструкции распределителя и базового варианта (дырчатого листа) проводились на модели трубчатки промышленного масштаба. В ней была установлена 61 трубка диаметром $18 \times 1,5$ мм. Испытываемые модели распределителей имели отверстия для прохода газа диаметром не менее 6 мм. Модельными средами служили вода и воздух. Расход газа G изменялся от 2 до $12 \text{ м}^3/\text{ч}$. Равномерность распределения газа определялась путем сравнения объемных газосодержаний φ в различных трубках. Величина φ определялась по уровню светлой жидкости в измерительных ячейках, снабженных линейными электродами.

Результаты экспериментальных исследований распределителей представлены в виде гистограмм газосодержаний, типичный вид которых изображен на рис.5. Для оценки качества распределения также использовались коэффициент неравномерности и амплитуда колебаний газосодержания.

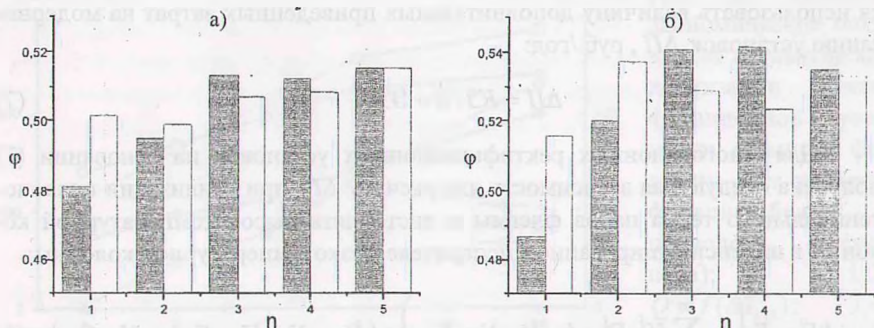


Рис. 5. Гистограммы газосодержаний для дырчатого листа (темный фон) и двухступенчатого распределителя (светлый фон) при: а) $G = 12 \text{ м}^3/\text{ч}$; б) $G = 4 \text{ м}^3/\text{ч}$. n – номер измерительной ячейки.

Сравнение качественных и количественных параметров работы испытанных образцов подтверждает более высокие эксплуатационные характеристики двухступенчатого распределителя. Значения амплитуды колебаний газосодержаний для предлагаемой конструкции оказались в среднем в 4 раза меньше, чем у дырчатого листа, и не превышали 10%.

На основе результатов экспериментальных исследований отработана оптимальная конструкция двухступенчатого распределителя, разработана методика его расчета.

Выводы:

- предложенная конструкция распределителя обеспечивает стабильное и равномерное распределение двухфазного потока по трубному пучку в широком диапазоне нагрузок по фазам;
- наличие патрубков большого диаметра на первой ступени распределителя значительно снижает свободную поверхность раздела фаз на ней, что препятствует образованию автоколебательных систем в аппарате;
- принятое техническое решение не требует дополнительных конструктивных изменений вертикальных многотрубных аппаратов;
- за счет образования на нижней ступени распределителя газовой подушки достаточной высоты снижаются требования к выверке устройства при его монтаже;
- большой диаметр отверстий для прохода газовой фазы обеспечивает невосприимчивость данной конструкции к ее забиванию.

В четвертой главе рассмотрены вопросы технико-экономической оценки целесообразности использования острого пара для интенсификации теплообмена в установках многоступенчатой ректификации и выпаривания, что особо актуально при утилизации низкопотенциального тепла.

Для оценки целесообразности применения интенсифицированных процессов теплообмена при утилизации низкопотенциального тепла предлагается использовать величину дополнительных приведенных затрат на модернизацию установок $\Delta\P$, руб./год:

$$\Delta\P = K_3 \cdot E + \Xi_3. \quad (7)$$

Для многоколонных ректификационных установок на основании (7) получена следующая зависимость для расчета $\Delta\P$ при утилизации низкопотенциального тепла паров флегмы и дистиллята высокотемпературной колонны в интенсифицированном испарителе низкотемпературной колонны:

$$\Delta\P = E_1 \left(k_T \sum_{i=1}^m \Pi_F^i F^i + k_H \Pi_N N + K_D \right) + (\Pi_{ЭЛ} N - \Pi_{ТЭ} G_{ТЭ} - \Pi_X G_X) \tau, \quad (8)$$

где E_1 – коэффициент, объединяющий в себя нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений E , долю годовых амортизационных отчислений и отчислений на ремонт и обслуживание вновь устанавливаемого оборудования, год⁻¹.

Независимыми переменными в этом уравнении являются требуемые поверхности вновь устанавливаемого теплообменного оборудования F и мощность, затрачиваемая на перемещение потоков через это оборудование N . Величины $C_F, k_T, C_N, k_H, G_{TЭ}, G_X$ – переменные, зависящие от F, N . При использовании уравнений теплообмена и гидравлики они выражаются как функции конструктивных, режимных и технологических параметров в принятых математических моделях соответствующих объектов модернизируемой установки.

Для определения оптимальных условий эксплуатации ректификационной установки с утилизацией тепла уравнение (8) записывается в развернутом виде и определяется минимум приведенных затрат. Модернизация экономически целесообразна, если величина $\Delta\Pi$ имеет отрицательное значение.

С использованием уравнения (8) выполнено компьютерное моделирование технологических параметров ведения процесса ректификации с утилизацией вторичного тепла при интенсификации теплообмена для установки разделения продуктов окисления циклогексана производства капролактама Гродненского ПО «Азот».

Основные технико-экономические показатели вариантов модернизации установки с интенсификацией и без интенсификации теплообмена представлены на рис. 6. Очевидно, что в области низких ΔT_{cp} подвод острого пара может существенно повысить технико-экономические показатели работы ректификационных установок при утилизации тепла.

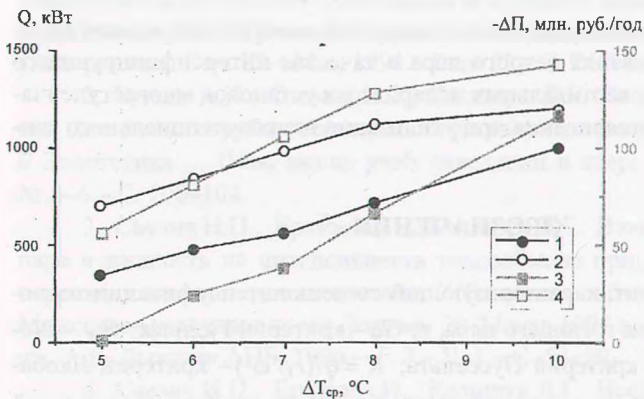


Рис. 6. Технико-экономические показатели вариантов модернизации ректификационной установки (темный фон точек – без интенсификации, белый – с подводом острого пара):
 $Q = f(\Delta T_{cp})$; 1,2 –
 $\Delta\Pi = f(\Delta T_{cp})$; 3,4 –

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Впервые получены сравнительные экспериментальные данные по интенсивности теплообмена при кипении в вертикальных трубах с подводом и без подвода острого пара в жидкость на их экономайзерном участке [1,3,6-8,11,12,14,16].

2. Экспериментально установлено, что в условиях теплообмена при малых температурных напорах:

- подвод острого пара в жидкость является эффективным способом интенсификации процесса;
- с ростом относительного расхода острого пара интенсифицирующее воздействие на теплообмен при кипении возрастает;
- процесс кипения в вертикальных трубах с подводом острого пара должен проводиться при относительных уровнях светлой жидкости, соответствующих оптимальным, общепринятым для вертикальных испарителей;
- для более вязких жидкостей интенсифицирующий эффект подвода острого пара усиливается;
- за счет ввода острого пара в жидкость можно добиться увеличения коэффициента теплоотдачи в 1,5÷2 раза.

3. Полученные расчетные критериальные зависимости позволяют определять значения коэффициентов теплоотдачи в вертикальных трубах с погрешностью $\pm 7\%$ и могут быть использованы в инженерных расчетах при проектировании испарителей с интенсификацией теплообмена за счет подвода острого пара [8,9,17-19].

4. Предложена и исследована конструкция двухступенчатого распределителя, устойчиво работающая в широком диапазоне нагрузок по фазам, не склонная к загрязнению, технологичная в изготовлении и простая в монтаже [2,4,13].

5. Разработан метод проведения технико-экономической оценки целесообразности использования острого пара в качестве интенсифицирующего фактора теплообмена в вертикальных испарителях установок многоступенчатой ректификации и выпаривания при утилизации низкопотенциального тепла [5,6,10].

ОБОЗНАЧЕНИЯ

$B = \alpha_{\text{и}}/\alpha$ – коэффициент, характеризующий степень интенсификации теплообмена; $G_{\text{ТЭ}}$ – экономия греющего пара, т; Ga – критерий Галилея; G_X – экономия воды, м³; Nu – критерий Нуссельта; $K = q/(rp''\omega)$ – критерий Якоба-Толубинского; $K_p = pl_0/\sigma$ – критерий давления; $Pe_u = ql_0/(rp''a)$ – критерий Пекле для кипения; Rg – критерий Прандтля; Q – количество утилизован-

ной тепловой энергии, Вт; h – относительный уровень светлой жидкости в кипяtilьной трубе; k_H – коэффициент, учитывающий затраты на транспортировку, фундамент и монтаж насоса; k_T – обобщающий коэффициент дополнительных затрат в теплообменное оборудование (транспортировка, изоляция, монтаж, обвязка, фундамент); m – количество вновь устанавливаемого теплообменного оборудования; q – плотность теплового потока, Вт/м²; ΔT – температурный напор в кипящей жидкости, К; ΔT_{cp} – средний температурный напор, К; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); β – относительный расход острого пара, кг/кг; ϕ – объемное газосодержание, м³/м³; τ – годовой ресурс работы установки, ч/год; K_D – капиталовложения в дополнительное оборудование, руб.; $KЗ$ – капитальные затраты на модернизацию установки, руб.; СВ – массовое содержание сухих веществ в растворе, %; ЭЗ – эксплуатационные затраты, руб./год; C_F – стоимость 1 м² поверхности теплопередачи, руб./м²; C_N – стоимость единицы установочной мощности нагнетателя и привода, руб./кВт; $C_{ЭД}$ – цена электроэнергии, руб./(кВт·ч); $C_{ТЭ}$ – стоимость тепловой энергии (греющего пара), руб./т; C_X – стоимость хладагента (воды), руб./м³; **Индексы:** и – интенсифицированный; р – расчетный; э – экспериментальный.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи:

1. Саевич Н.П., Ершов А.И., Калишук Д.Г. Аппаратурно-технологическое решение утилизации вторичного тепла при малых температурных напорах // Труды Белорусского государственного технологического университета. Сер. III. – Мн., 1994. – Вып. II. – С. 74–78.

2. Ершов А.И., Саевич Н.П., Калишук Д.Г. Исследование распределения газа в многотрубных аппаратах при взаимодействии двухфазных систем // Энергетика ... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объедин. СНГ). – 1995. – № 5–6. – С. 100–104.

3. Саевич Н.П., Ершов А.И., Калишук Д.Г. Влияние диспергирования пара в жидкость на интенсивность теплообмена при малых температурных перепадах между теплоносителями // Тепломассообмен ММФ-96: Труды III Минского международного форума, 20–24 мая 1996 г. – Минск: АНК «ИТМО им. А.В. Лыкова» АНБ, 1996. – Т. 7. – Ч. 1. – С. 54–59.

4. Саевич Н.П., Ершов А.И., Калишук Д.Г. Исследование распределения газа в многотрубных аппаратах при взаимодействии двухфазных систем // Труды Белорусского государственного технологического университета.

Сер. III. Химия и химическая технология.— Мн.: БГТУ, 1998.— Вып. VI.— С. 155–160.

5. Калишук Д.Г., Саевич Н.П., Коротков М.В. Техничко-экономическая оценка утилизации низкопотенциального тепла ректификационных установок // Энергоэффективность.— № 9.— 1999.— С. 21.

6. Калишук Д.Г., Саевич Н.П., Ершов А.И. Особенности теплообмена, рекуперации и утилизации тепла при малых температурных перепадах между теплоносителями // Теплообмен ММФ-2000: Труды IV Минского международного форума по тепло- и массообмену, 22-26 мая 2000 г. / Нац. акад. наук Беларуси. Академич. науч. комплекс «Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова».— Минск: АНК ИТМО НАНБ, 2000.— Т. 11.— С. 104–108.

7. Калишук Д.Г., Саевич Н.П. Исследование теплообмена при малых температурных перепадах между теплоносителями и аспекты его применения в энергосберегающих технологиях // Труды Белорусского государственного технологического университета. Сер. III. Химия и технология неорганических веществ.— Мн.: БГТУ, 2000.— Вып. VIII — С. 228–236.

8. Саевич Н.П., Калишук Д.Г., Ершов А.И., Чиркун Д.И. Исследования интенсификации кипения воды в вертикальной трубе // Труды Белорусского государственного технологического университета. Сер. III. Химия и технология неорган. в-в.— Мн., 2002. Вып. X.— С 210–217.

9. Саевич Н. П., Калишук Д. Г., Ершов А. И. Исследования интенсификации кипения воды в вертикальной трубе // ИФЖ.— 2004.— Т. 77, №1.— С. 191 — 196.

10. Саевич Н.П., Калишук Д.Г., Ершов А.И. Методика технико-экономической оценки модернизации многоколонных ректификационных установок с утилизацией низкопотенциального тепла и интенсификацией теплообмена // Труды Белорусского государственного технологического университета. Сер. химия и технологии неорган. в-в.— Минск: БГТУ, 2004.— Вып. XII.— С. .

Доклады на конференциях:

11. Калишук Д.Г., Саевич Н.П., Шнайдерман М.Ф. Исследование теплообмена в испарителях при малых температурных напорах // Материалы юбилейной научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ: Тез. докл. научно-техн. конф., Минск, 1990 г.— Мн.: БТИ, 1990.— С. 197.

12. Саевич Н.П., Калишук Д.Г. Исследование утилизации тепла паров при малых температурных напорах в испарителе // Химия, химическая технология, химическое машиностроение: Тезисы докладов, областной научно-технической конференции студентов и молодых ученых, Днепропетровск, 21–24 мая 1991 г.— Днепропетровск: ДХТИ, 1991.— С. 37.

13. Ершов А.И., Саевич Н.П., Калишук Д.Г. Исследование парораспределения в теплообменнике для утилизации низкопотенциального тепла // Ресурсосберегающие и экологически чистые технологии: Тез. докл. научно-техн. конф., Гродно, 28–30 июня 1994 г. – Гродно: РС АН РБ, 1994. – С. 179 – 180.

14. Саевич Н.П., Ершов А.И., Калишук Д.Г. Интенсификация утилизации вторичного тепла ректификационных установок // Ресурсо- и энергосберегающие технологии в химической и нефтехимической промышленности: Материалы конференции, Минск, 27-28 октября 1998 г. – Мн.: БГТУ, 1998. – С. 55–56.

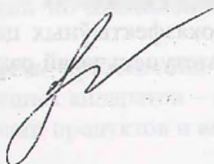
15. Исследование интенсификации кипения при малых температурных напорах / Труханович А.Ф., Сосинский А.В., Калишук Д.Г., Саевич Н.П. // V Республиканская научная конференция студентов, магистрантов и аспирантов Республики Беларусь (НИРС-2000): Материалы научной конференции, Гродно, 25-27 апреля 2000 г., Ч.5. – Гродно: ГрГУ, 2000. – С. 156–158.

16. Саевич Н.П., Калишук Д.Г., Кравчук А.П. Повышение энергоэффективности оборудования за счет интенсификации утилизации низкопотенциального тепла при кипении жидкости // Новые технологии рециклинга вторичных ресурсов: Материалы докладов Международной научно-технической конференции, Минск, 24-26 октября 2001 г. – Минск: БГТУ, 2001. – С. 182 – 184.

17. Саевич Н.П., Калишук Д.Г. Исследование интенсификации кипения в «мягких» условиях подвода тепла // Техника и технология пищевых производств: Материалы III международной научно-технической конференции, Могилев, 24-26 апреля 2002 г. – Могилев: МГТУ, 2002. – С. 33.

18. Саевич Н.П., Калишук Д.Г. Обобщение экспериментальных исследований теплообмена при кипении жидкости с вводом острого пара // Новые технологии в химической промышленности: Материалы докладов Международной научно-технической конференции, Минск, 20-22 ноября 2002 г. – Мн.: БГТУ, 2002. – Ч.1. – С. 219–221.

19. Исследования интенсификации теплообмена в вертикальном испарителе / Д.Г. Калишук, Н.П. Саевич, А.И. Ершов, А.В. Татульченков // Ресурсо- и энергосберегающие технологии промышленного производства: Материалы международной научно-технической конференции, Витебск, ноябрь 2003 г. «УО ВГТУ». – Витебск, 2003. – Ч.1. – С. 31–36.



РЭЗЮМЕ

Сасвіч Мікалай Пятровіч

Інтэнсіфікацыя цеплаабмену шляхам уводу вострай пары ў вадкасць на эканамайзерным участку вертыкальных трубчастых апаратаў

Ключавыя словы: цеплаабмен, інтэнсіфікацыя, вострая пара, кіпенне, размеркавальнік, газазмяшчэнне, тэхніка-эканамічная ацэнка.

Аб'ект і прадмет даследавання: цеплаабмен пры кіпенні вадкасці ў вертыкальных трубах з падводам вострай пары на іх эканамайзерных участках з мэтай інтэнсіфікацыі працэсу пры малых тэмпературных напорах.

Мэта работы: вызначэнне заканамернасцей цеплаабмену пры кіпенні вадкасцей у вертыкальных трубах з падводам вострай пары на іх эканамайзерных участках як актыўнага спосабу інтэнсіфікацыі ва ўмовах малых тэмпературных напораў і распрацоўка апаратурна-тэхналагічнага рашэння яго выкарыстання ў шматступеньчатых устаноўках для рэктыфікацыі, выпарвання і інш.

Метады даследавання. Эксперыменты выконваліся на шматфункцыянальнай устаноўцы, якая ўключае ў сябе змешчаныя доследныя вертыкальныя трубы з паравымі рубашкамі і тэрмапарамі, а таксама шматтрубны апарат з размеркавальнікам фаз і неабходнае стандартнае вымяральнае абсталяванне, якое дазволіла правесці даследаванні пры зададзеных тэмпературных рэжымах ва ўмовах мінімальнага страт цяпла. Цеплатэхнічныя эксперыменты выконваліся па агульнапрынятых метадыках.

Навуковая навізна. Упершыню атрыманы эксперыментальныя дадзеныя па інтэнсіўнасці цеплаабмену пры кіпенні вады і раствораў цукрозы ў вертыкальных трубах з падводам вострай пары на іх эканамайзерных участках ў дыяпазоне малых і ўмераных шчыльнасцей цеплавых патокаў пры атмасферным ціску; эксперыментальна вызначана залежнасць ступені інтэнсіфікацыі цеплаабмену ад колькасці вострай пары; прапанаваны крытэрыяльныя залежнасці для вызначэння каэфіцыентаў цеплааддачы пры кіпенні з інтэнсіфікацыяй цеплаабмену; распрацавана і даследавана канструкцыя двухступеньчатага размеркавальніка фаз для шматтрубчастых вертыкальных цеплаасабменных апаратаў.

Ступень выкарастання. Вынікі дысертацыі выкарастаны пры падрыхтоўцы тэхнічнага рашэння па мадэрнізацыі рэктыфікацыйнай устаноўкі раздзялення прадуктаў акіслення цыклагексану ў вытворчасці капралактам у Гродзенскага ВА «Азот» і ў вучэбным працэсе ў БДТУ пры чытанні курса лекцый па дысцыпліне «Працэсы і апараты хімічнай тэхналогіі».

Галіна выкарастання: распрацоўка высокаэфектыўных цеплаабменных апаратаў – выпарнікаў, у тым ліку для шматступеньчатой рэктыфікацыі прадуктаў і выпарвання раствораў.

РЕЗЮМЕ

Саевич Николай Петрович

Интенсификация теплообмена путем ввода острого пара в жидкость на экономайзерном участке вертикальных трубчатых аппаратов

Ключевые слова: теплообмен, интенсификация, острый пар, кипение, распределитель, газосодержание, технико-экономическая оценка.

Объект и предмет исследования: теплообмен при кипении жидкости в вертикальных трубах с подводом острого пара на их экономайзерных участках с целью интенсификации процесса при малых температурных напорах.

Цель работы: установление закономерностей теплообмена при кипении жидкостей в вертикальных трубах с подводом острого пара на их экономайзерных участках как активного способа интенсификации в условиях малых температурных напоров и разработка аппаратурно-технологического решения его применения в многоступенчатых установках ректификации, выпаривания и др.

Методы исследования. Эксперименты проводились на многофункциональной установке, включающей в себя сменные опытные вертикальные трубы с паровыми рубашками и термопарами, а также многотрубный аппарат с распределителем фаз и необходимое стандартное измерительное оборудование, позволившие провести исследования при заданных температурных режимах в условиях минимальных тепловых потерь. Теплотехнические эксперименты выполнялись по общепринятым методикам.

Научная новизна. Впервые получены экспериментальные данные по интенсивности теплообмена при кипении воды и растворов сахарозы в вертикальных трубах с подводом острого пара на их экономайзерных участках в диапазоне малых и умеренных плотностей тепловых потоков при атмосферном давлении; экспериментально установлена зависимость степени интенсификации теплообмена от количества острого пара; предложены критериальные зависимости для определения коэффициентов теплоотдачи при кипении с интенсификацией теплообмена; разработана и испытана конструкция двухступенчатого распределителя фаз для многотрубных вертикальных тепло-массообменных аппаратов.

Степень использования. Результаты диссертации использованы при подготовке технического решения по модернизации ректификационной установки разделения продуктов окисления циклогексана в производстве капролактама Гродненского ПО «Азот» и в учебном процессе в БГТУ при чтении курса лекций по дисциплине «Процессы и аппараты химической технологии».

Область применения результатов: разработка высокоэффективных теплообменных аппаратов – испарителей, в частности для многоступенчатой ректификации продуктов и выпаривания растворов.

RESUME

Saevich Nikolay Petrovich

Heat transfer intensification by direct vapour through economizing sites of vertical tube apparatuses

Key words: heat transfer, intensification, direct vapour, boiling, distributor, gas contents, evaluation of technical and economic effects.

Object and subject of research: heat transfer at the moment of liquid boiling in vertical tubes using direct vapour at economizing sites in order to intensify the process at an insignificant temperature pressure.

The goal of the work: to determine the laws of heat transfer at the moment of liquid boiling in vertical tubes using direct vapour through economizing sites as an active method of intensification in terms of insignificant temperature pressure and to work out technical solution of its applying in successive purifying installation, vapouration.

Methods of research. Experiments were carried out on the set-up, equipped with changeable vertical tubes, vapour coat, thermovapour, as well as with an apparatus containing many tubes and a phase distributor and all the necessary evaluation equipment that allowed to realize investigation under the preset temperature regimes in adiabatic conditions. Generally accepted methods were used for experiments.

The scientific novelty. For the first time experimental data were obtained for water and sugar solutions boiling in vertical tubes using direct vapour through the economizing sites in the wide range of heat flows and saturation pressures, the dependence of transfer intensivity on the direct vapour quantity was investigated. It was proposed criterial dependence for the determination of the transfer coefficients at the moment of boiling with the intensified heat transfer.

Degree of use. The results of thesis were used for elaboration of the technique of modernizing the rectification installation for cyclohexane oxides separating during caprolactum production at Grodno plant «Azot» and in conditions of teaching process of BSTU delivering lectures on the subject «Processes and chemical engineering apparatuses».

The field of application of the results: designing of evaporating heat exchange equipment for successive rectification of products and evaporating solutions.

Савич Николай Петрович

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА ПУТЕМ ВВОДА
ОСТРОГО ПАРА В ЖИДКОСТЬ НА ЭКОНОМАЙЗЕРНОМ
УЧАСТКЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ТРУБЧАТЫХ АППАРАТОВ**

Подписано в печать 28.09.2004. Формат 60×80^{1/4}/₄₆. Бумага офсетная.

Гарнитура Таймс. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,5. Уч.-изд. л. 1,3.

Тираж 80 экз. Заказ 559.

Учреждение образования

«Белорусский государственный технологический университет»

220050, Минск, Свердлова 13а. Лицензия ЛИ № 02330/0133255 от 30.04.2004.

Отпечатано в лаборатории полиграфии учреждения образования

«Белорусский государственный технологический университет».

220050, Минск, Свердлова, 13.