

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
Ордена Ленина институт общей и неорганической химии
им. Н. С. Курнакова

На правах рукописи

СИРЕНКО Виталий Иванович

*ГИДРОДИНАМИКА И МАССООБМЕН
ПРИ ДВУХФАЗНЫХ ПЛЕНОЧНО -
ДИСПЕРСНЫХ ПОТОКАХ
В ВЫСОКОСКОРОСТНОМ
ЦЕНТРОБЕЖНОМ
АППАРАТЕ*

05. 17. 08 - Процессы и аппараты химической технологии

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва, 1992

Работа выполнена в Украинском ордена Трудового Красного Знамени научно - исследовательском и конструкторском Институте химического машиностроения и в ордена Ленина Институте общей и неорганической химии им.Н.С.Курнакова АН СССР.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Н.Н.КУЛОВ.

Научный консультант: старший научный сотрудник, кандидат технических наук А.Б.ТЮТЮННИКОВ.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор В.М.ОЛЕВСКИЙ, доктор технических наук, профессор Л.А.СЕРАФИМОВ.

Ведущая организация: Харьковское научно - производственное объединение "Карбонат".

Защита диссертации состоится 23 января 1992 г. в 10 часов на заседании специализированного совета К 002.37.02 ордена Ленина Институте общей и неорганической химии им. Н.С.Курнакова АН СССР по адресу: И17907, Москва, Ленинский проспект, д.31.

С диссертацией можно ознакомиться у ученого секретаря специализированного совета.

Автореферат разослан 20 декабря 1991 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
кандидат химических наук

 Э.Г.ЖУКОВ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Тенденции к наращиванию мощностей химико - технологических агрегатов вызывает рост капитальных затрат в стоимости оборудования и, в частности, тепло- и массообменной аппаратуры. В этих условиях определяющее значение приобретает повышение интенсивности массообменных процессов и создание высокопроизводительных аппаратов, входящих в состав компактных малогабаритных установок и технологических линий. Разработка такого оборудования делает возможным значительное снижение как основных производственных затрат, так и затрат на его монтаж и транспортировку.

Проведение тепломассообменных процессов таких как абсорбция и ректификация в поле центробежных сил смещает точку захлебывания аппарата и позволяет осуществить процесс в режиме противотока при высоких относительных скоростях фаз. Увеличение турбулентности потоков, образование тонких слоев жидкости на вращающихся элементах конструкции, резкое увеличение поверхности контакта фаз и высокая скорость ее обновления вследствие многократных актов дробления жидкости на капли и последующая сепарация позволяет существенно уменьшить физический размер аппарата и сократить тем самым капитальные и эксплуатационные затраты.

Таким образом, создание надежных при промышленной эксплуатации высокоэффективных центробежных аппаратов, а также конструкций вращающихся контактных элементов, на которых происходит взаимодействие фаз, и методов их расчета является актуальной проблемой.

Работа выполнена в соответствии с Координационным планом важнейших научно - исследовательских работ по направлению "Теоретические основы химической технологии" АН СССР на 1986-1990 гг.

Цель работы: Экспериментальное изучение гидродинамики и кинетики массообмена в системе газ (пар) - жидкость в поле центробежных сил. Разработка эффективной конструкции высокоскоростного центробежного аппарата и методов его расчета.

Научная новизна. Установлены новые закономерности гидродинамики и массообмена в двухфазных системах при пленочно - дисперсном течении жидкости в условиях активного гидродинамического взаимодействия фаз в высокоскоростном центробежном аппарате с различными типами контактных элементов. Экспериментальное изучение потерь напора при различных нагрузках показало, что известные соотношения для расчета ΔP и скорости захлебывания в насадочных колоннах к высокоскоростным центробежным аппаратам неприменимы вследствие насосного эффекта и специфического влияния орошения. Проведена визуализация распределения жидкости по пластинчатому контактному элементу внутри вращающегося цилиндрического ротора, а также определены предельные нагрузки и области устойчивой работы аппарата. Экспериментально изучена кинетика массообмена в жидкой и газовой фазах в зависимости от расхода фаз, частоты вращения ротора для ряда конструкций контактных элементов. На основе обобщения результатов исследования получены расчетные соотношения для определения гидравлического сопротивления аппарата с различными контактными элементами и эффективности массоотдачи в жидкой и газовой фазах. Подтверждена возможность в отсутствие существенных влияний эффектов Марангони и тепловых эффектов использования принципа аддитивности фазовых сопротивлений при расчете бинарной ректификации по данным для абсорбции путем сравнения расчетных значений высоты единицы переноса с опытными данными, полученными при проведении ректификации системы этиловый спирт - вода.

Практическая значимость. Разработаны и изучены новые конструкции высокоэффективных и надежных контактных элементов для центробежного массообменного аппарата. Разработан алгоритм расчета на ЭВМ основных рабочих параметров: нагрузки по фазам, частоты вращения ротора, конструктивных особенностей контактных элементов, эффективности массообмена при абсорбции и ректификации бинарных систем.

На основе полученного экспериментального материала выполнены технические проекты и разработаны две новые конструкции центробежных тепломассообменных аппаратов с внутренними диаметрами роторов 400 и 800 мм. Результаты работы использованы в ХНПО "Карбонат" (Харьков) и ВНИПИГАЗПЕРЕРАБОТКА (Краснодар) при проектировании нового массообменного оборудования. На конструкции центробежного аппарата и контактных элементов поданы заявки на изобретения, имеющие положительные решения ВНИИГПЭ.

Апробация работы и публикации. Основные результаты работы доложены и обсуждены на 5 Всесоюзной конференции молодых специалистов по химической технологии (Северодонецк, 1985), на 3 Всесоюзном совещании по проблеме "Абсорбция газов" (Таллинн, 1987), на Всесоюзном совещании "Тепломассообменное оборудование - 88" (Москва, 1988), на 7 Республиканской конференции "Повышение эффективности, совершенствование процессов и аппаратов химических производств" (Львов, 1988), на Всесоюзном совещании "Повышение эффективности и надежности машин и аппаратов в основной химии" (Сумы, 1989), на Всесоюзном совещании по промышленной экологии (Каунас, 1989), на конференции - конкурсе молодых ученых ИОНХ АН СССР (Москва, 1989), на школах - семинарах "Современные проблемы тепло - массообмена в химической технологии" (Звенигород, 1988, 1990, 1991), на 5 Всесоюзной конференции по теории и практике ректификации (Северодонецк, 1991). По материалам диссертации

опубликовано 12 печатных трудов, получены 3 положительных решения Госпатента СССР по заявкам на изобретения.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка литературы и приложений. Работа изложена на I 4 2 страницах машинописного текста, иллюстрирована 42 рисунками и 2 таблицами, библиография включает 133 наименования публикаций отечественных и зарубежных авторов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, дана краткая характеристика состояния проблемы, изложены основные результаты, которые выносятся на защиту.

В первой главе проведен анализ различных конструкций роторных аппаратов и дана их классификация. Показано, что наиболее перспективными для интенсификации теплообмена и создания малогабаритного оборудования являются высокоскоростные центробежные аппараты, относящиеся к группе аппаратов с поверхностью контакта в виде скоростной постоянно обновляющейся пленки жидкости и развиваемой в свободном объеме поверхностью за счет интенсивного каплеобразования.

Рассмотрены работы, освещающие гидродинамику и кинетику массообмена в роторных аппаратах. Показано, что без тщательных экспериментальных исследований в настоящее время невозможно создание научно обоснованных методов интенсификации массообмена в поле центробежных сил и разработка надежной методики расчета нового массообменного оборудования.

На основании литературного обзора сформулированы задачи настоящей диссертационной работы.

Вторая глава посвящена описанию модельных систем, опытных установок и экспериментальных методик.

В результате анализа существующих методов определения эффективности массоотдачи в фазах в настоящей работе были выбраны следующие модельные системы: для процессов, контролируемых жидкой фазой – десорбция диоксида углерода из воды в поток воздуха; для процессов, контролируемых сопротивлением в газовой фазе – десорбция аммиака из воды в поток воздуха. Кроме того проводили испытания аппарата при ректификации смеси этанол – вода.

Изучение гидродинамики и массоотдачи в жидкой и газовой фазах проводили на установке, схема которой представлена на рис. I.

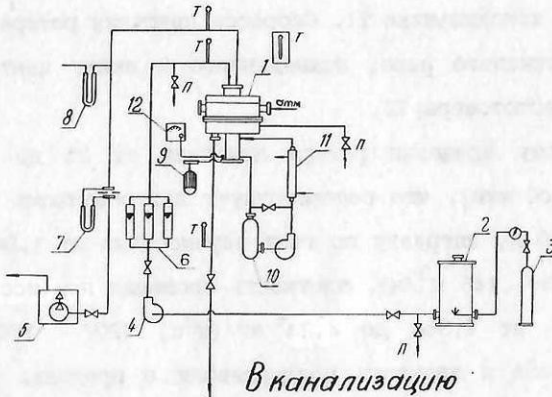


Рис. I. Схема экспериментальной установки для проведения десорбции: I- центробежный аппарат; 2- емкость для исходного раствора; 3- баллон с CO_2 ; 4- насос; 5- вакуум-насос; 6- ротаметры; 7, 8- манометры; 9- мотор; 10- масляная станция; 11- холодильник; 12- частотомер; буквой Т показаны места замера температуры.

Исходный раствор насосом 4 подавали в центробежный аппарат I, в центральную часть вращающегося контактного элемента, под действием центробежной силы перемещался к периферии корзины с насадкой и после взаимодействия с газом отводился из корпуса аппарата в канализацию. Расход исходного раствора измеряли

ротаметрами 6. Воздух, засасываемый через аппарат I вакуум - насосом 5, подавался в корпус аппарата тангенциально, проходил контактный элемент противотоком к жидкости и удалялся из верхней аппарата по осевой трубе. Расход подаваемого воздуха измеряли с помощью диафрагмы и U-образного водяного манометра 7. Пробы жидкости для анализа отбирались на входе и на выходе из аппарата (на схеме места отбора обозначены буквой П). Перепад давления в аппарате измеряли при помощи U-образного водяного манометра 8. Вращение ротора в аппарате осуществлялось с помощью клиноременной передачи от электродвигателя 9, а смазка подшипников обеспечивалась маслостанцией 10. Подаваемая смазка предварительно охлаждалась в холодильнике 11. Скорость вращения ротора измеряли с помощью магнитного реле, подведенного к шкиву центробежного аппарата, и частотомера 12.

Частоту вращения ротора изменяли от 25 до 83,3 с⁻¹ (1500 - 5000 об/мин), что соответствует центробежному ускорению от 155 до 1710 g, нагрузку по газу варьировали от 1,04 до 2,89 кг/(м²с) (58,6 - 145 м³/ч), плотность орошения

U_L - от 0,354 до 26,5 кг/(м²с) (20 - 1500 кг/ч). Температуру газа и жидкости поддерживали в пределах от 18 до 23°C. Аппарат, показанный на рис. I работал при атмосферном давлении.

Ректификацию системы этанол-вода проводили на установке, схема которой показана на рис.2. Установка работала в режиме бесконечной флегмы следующим образом. Водный раствор этилового спирта заливали в испаритель 2 примерно на 2/3 высоты его трубок. После этого на испарителе открывали линию греющего пара, а на дефлегматор 3 подавали охлаждающую воду. Затем включали циркуляционный насос 4. Раствор проходил через вращающийся

контактный элемент, где взаимодействовал с потоком пара, идущего из испарителя 2. Затем раствор этанола поступал в испаритель, откуда пар направляли тангенциально в корпус аппарата. Пар противотоком к жидкости проходил контактный элемент и поступал в дефлегматор 3, где конденсировался и сливался в емкость исходного раствора 5. Укрепленный раствор насосом 4 снова подавали в аппарат I. Расход флегмы измеряли с помощью ротаметров 7, а выход жидкости из аппарата фиксировали ротаметром II. После выхода установки на режим отбирали пробы жидкости на входе и выходе из аппарата (на схеме обозначены буквой П).

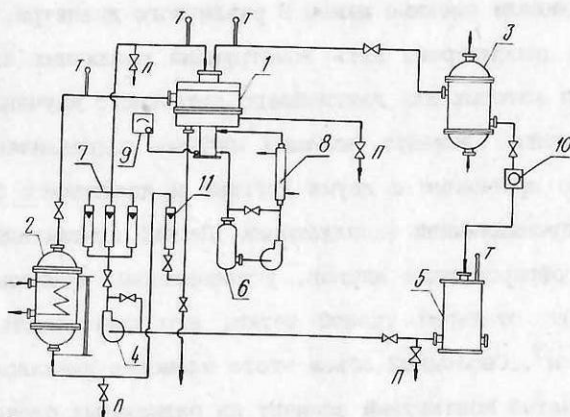


Рис.2. Схема ректификационной установки : I- центробежный аппарат; 2 - испаритель; 3- дефлегматор; 4- насос; 5- емкость исходного раствора; 6- масляная станция; 7 - ротаметр; 8 - холодильник; 9- частотомер; 10- смотровой фонарь; II- ротаметр.

Конструкция аппарата, использованного при проведении исследований, показана на рис. 3. Основным элементом аппарата является перфорированная корзина ротора 2 с внутренним диаметром 190 мм, установленная на вертикальном консольном валу 8, в которой расположен кольцевой контактный элемент (на рисунке не показан). Исходная жидкость поступает в аппарат через распределительное устройство 3, расположенное по оси аппарата. Через

штуцер 4 в корпус аппарата I тангенциально подается газ или пар, который взаимодействует с жидкостью в контактном элементе и затем отводится из аппарата через штуцер 6. Вращение ротора осуществлялось при помощи клиноременной передачи. За счет этого под воздействием центробежной силы жидкость, поступающая в контактный элемент, движется противотоком с газом (паром), идущим навстречу и выводится из аппарата через штуцер 5. Для предотвращения возможности обхода газом (паром) боковой поверхности ротора через осевую трубу или вал предусмотрены уплотнения 7. Для обеспечения различных скоростей вращения корзины ротора на валу устанавливали сменные шкивы 9 различного диаметра.

В работе рассмотрено пять конструкций различных контактных элементов, из которых для дальнейшего детального изучения выбраны три контактных элемента, имеющих меньшее гидравлическое сопротивление по сравнению с двумя другими и являющиеся более надежными при промышленной эксплуатации. Первый контактный элемент состоит из гофрированных дисков, установленных горизонтально и выполненных из стальной тканой сетки, его поверхность составляла $178,9 \text{ м}^2/\text{м}^3$. Свободный объем этого элемента равнялся 98 %. Другой - сетчатый контактный элемент из радиальных блоков - представляет собой собранные в кольцевой пакет радиальные пластины (ламели) с диагональными трапецевидными гофрами. Его поверхность была существенно больше и составляла $358 \text{ м}^2/\text{м}^3$, а свободный объем 95,5%, что несколько меньше, чем у горизонтального. Третий контактный элемент, выполненный из стального листа, состоит из двух дисков, соединенных перфорированными пластинами, установленными в виде многозаходной спирали Архимеда. В отличие от предыдущих такой элемент обладает сравнительно малой удельной поверхностью, $125 \text{ м}^2/\text{м}^3$, свободный объем его остается таким же как у радиаль-

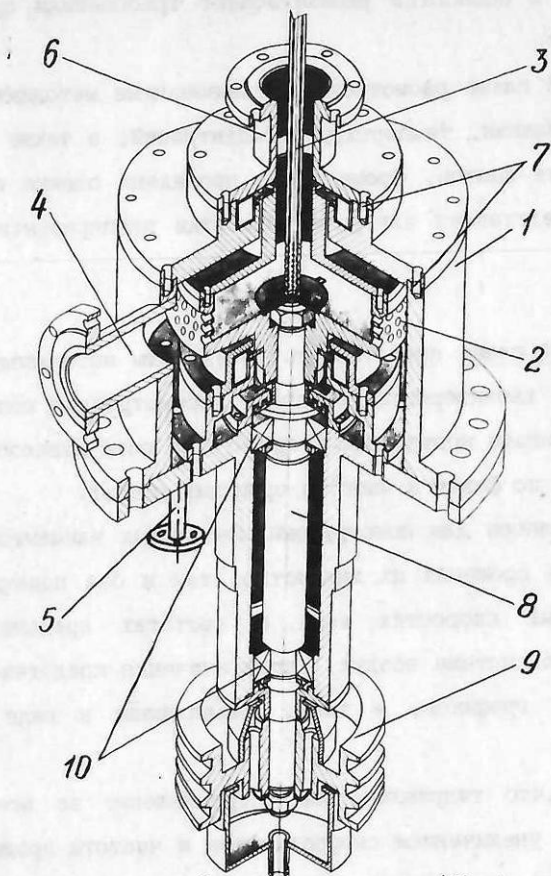


Рис.3. Конструкция высокоскоростного центробежного массообменного аппарата: 1- корпус; 2- перфорированная корзина ротора; 3- устройство подачи жидкости; 4- штуцер ввода газовой фазы; 5- сливной патрубкок; 6- осевая отводная труба (для выхода газа); 7- газонепроницаемые уплотнения импеллерного типа; 8- вал; 9- шкив клиноременной передачи; 10 - подшипниковые узлы.

ного элемента, но при переработке суспензий и жидкостей, склонных к образованию осадка пластинчатый элемент имеет значительное преимущество перед сетчатыми контактными устройствами.

Все представленные контактные элементы прочны, устойчивы при вращении, достаточно проницаемы, имеют развитую удельную

поверхность и полностью удовлетворяют требованиям промышленной эксплуатации.

В данной главе рассмотрены использованные методики измерений перепада давления, температур, концентраций, а также предложены схемы расчета опытов. Кроме этого проведена оценка погрешности опытов и представлен алгоритм обработки экспериментальных данных.

В третьей главе представлены результаты исследования гидродинамических характеристик аппарата рассмотренной конструкции с различными типами контактных устройств во всем диапазоне изменений нагрузок по фазам и частоты вращения ротора.

Потери напора для конструкций контактных элементов измеряли как в случае орошения их жидкостью, так и без подачи орошения при различных скоростях газа и частотах вращения ротора. Полученные на системе воздух - вода значения представлены в работе в виде графиков, а также суммированы в виде таблиц в приложении.

Отмечено, что гидравлическое сопротивление во всех случаях возрастает с увеличением скорости газа и частоты вращения ротора, причем при увеличении W_G в 2 раза ΔP_{GL} в среднем также увеличивается примерно вдвое, а при повышении частоты вращения с $33,3 \text{ с}^{-1}$ до $83,3 \text{ с}^{-1}$ - в 1,5 - 2 раза. На рис.4 показана зависимость потерь давления от скорости газа для контактного элемента из радиальных блоков при постоянной нагрузке по жидкости. Здесь пунктирной линией изображены зависимости ΔP_{GL} от W_G для неорошаемого контактного элемента ($U_L = 0$). Нетрудно убедиться, что полученные зависимости практически мало отличаются или несколько ниже данных при $\bar{U}_L = 7,37 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$. Этот факт может быть объяс-

нен тем, что пленка жидкости, движущаяся по контактному элементу с высокой скоростью, имеет очень малую толщину, поэтому существенного изменения сечения для прохождения газового потока, не происходит.

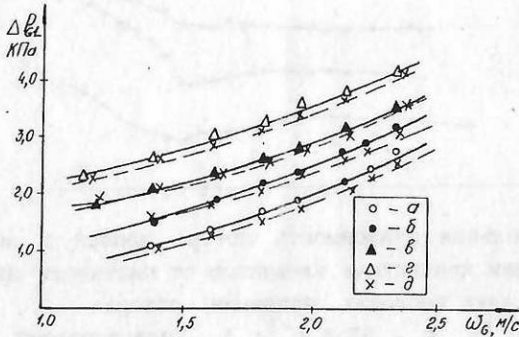


Рис 4 Зависимость потерь напора в аппарате с ламельным контактном элементом из радиальных блоков от скорости газа при $\dot{Q}_L = 7,37 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$ и различных частотах вращения ротора: а - $n = 33,3 \text{ с}^{-1}$; б - $50,0 \text{ с}^{-1}$; в - $66,6 \text{ с}^{-1}$; г - $n = 83,3 \text{ с}^{-1}$; д - $\dot{Q}_L = 0$ для всех режимов вращения.

На рис.5 для двух режимов вращения ротора сопоставлены данные по перепаду давления на трех изученных типах контактных элементов. Нетрудно убедиться, что гидравлическое сопротивление для всех контактных элементов монотонно увеличивается с ростом скорости вращения ротора.

Оказалось, что наименьшим гидравлическим сопротивлением обладает аппарат с ламельным радиальным контактном элементом В аппарате с контактном элементом из гофрированных дисков потери напора несколько больше. Аппарат с пластинчатым элементом имеет самое высокое гидравлическое сопротивление. Сравнение контактных элементов по гидравлическим сопротивлениям показало, что результаты исследования гидродинамики в поле центробежных сил резко

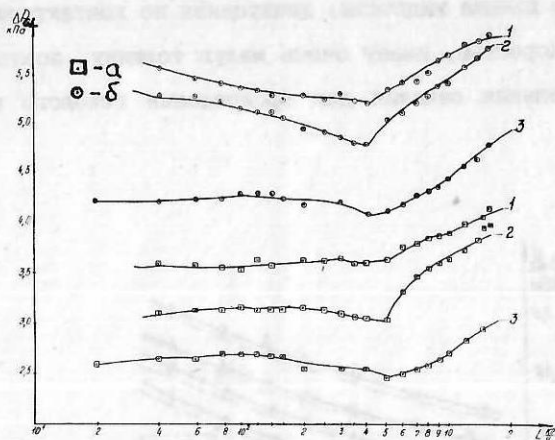


Рис.5. Сравнительная зависимость потерь напора в аппарате с различными типами контактных элементов от плотности орошения при $W_G = 2,24$ м/с и двух частотах вращения ротора: а - $n = 33,3$ с⁻¹; б - $83,3$ с⁻¹; 1 - пластинчатый контактный элемент; 2 - контактный элемент из горизонтальных дисков; 3 - из радиальных блоков.

отличается от гидродинамических зависимостей традиционных стационарных аппаратов. Так аппарат с контактным элементом, имеющим наивысшую удельную поверхность, обладает наименьшим гидравлическим сопротивлением и наоборот, контактный элемент с поверхностью существенно меньшей показал самые высокие значения перепада давления по сравнению с остальными.

Предельные нагрузки определяли для всех изученных в настоящей работе конструкций контактных элементов с целью выяснения диапазона стабильной работы аппарата. На рис. 6 схематично показана зависимость потерь давления в аппарате от нагрузки по жидкости для всех изученных конструкций контактных элементов. Как видно из графика, аппарат при различных плотностях орошения работает в различных гидродинамических режимах.

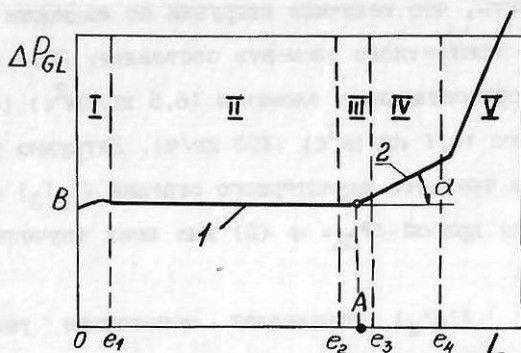


Рис.6. Общая зависимость гидравлических сопротивлений от плотности орошения для всех изученных W_G , n и конструкциях контактных элементов

Изученная область нагрузок по жидкости (ось абсцисс) условно разбита на рабочие зоны, границы которых для всех случаев удалось определить экспериментально. Первый участок ($0l_1$) определяет работу аппарата с момента подачи орошения на сухой контактный элемент до его полного смачивания. На этом отрезке отмечена некоторая неустойчивость зависимости ΔP_{GL} от нагрузки по жидкости, хотя все точки этой зависимости с небольшой погрешностью могут быть аппроксимированы прямой линией, параллельной оси абсцисс.

Начиная с точки l_1 , соответствующей для всех контактных элементов величине плотности орошения $\bar{U}_{L_1} = 0,78-1,47$ кг/(м²с) (20-40 кг/ч), зависимость гидравлического сопротивления от нагрузки по жидкости - стабилизируется. На графике этому соответствует второй отрезок (l_1l_2). На этом отрезке увеличение расхода жидкости практически не влияет на потери давления в аппарате. Отрезок (l_2l_3) соответствует началу влияния расхода жидкости на ΔP_{GL} . Точке А, названной нами пределом устойчивой работы аппарата, для рассмотренных конструкций контактных эле-

ментов соответствует различное значение нагрузки по жидкости. На рис.5 можно заметить, что величина нагрузки по жидкости в точке А для радиального контактного элемента составляет 28,4 кг/(м²с) (500 кг/ч), для горизонтального элемента 16,5 кг/(м²с) (450 кг/ч) и для пластинчатого 14,7 кг/(м²с) (400 кг/ч). Нетрудно убедиться, что в пределах третьего характерного отрезка ($l_2 l_3$) находятся точки излома на кривой $\Delta P_{GL} = \varphi(L)$ для всех изученных контактных элементов.

Участок ($l_3 l_4$) определяет монотонное увеличение гидравлического сопротивления с дальнейшим ростом плотности орошения. В этом режиме жидкая фаза уже влияет на потери напора, причем угол наклона α к оси абсцисс для разных элементов неодинаков. По всей видимости, должна существовать и точка l_4 , соответствующая захлебыванию аппарата, но в настоящей работе предел захлебывания определить не удалось.

При исследовании гидродинамики аппарата с пустым ротором без насадки были получены неожиданные на первый взгляд результаты. Оказалось, что гидравлическое сопротивление неорошаемого аппарата без контактного элемента от скорости газа при различных режимах вращения в 3-4 раза выше, чем с контактным элементом, при сохранении ранее отмеченного увеличения ΔP_G от скорости газа и частоты вращения. По-видимому, это объясняется тем, что контактный элемент в роторе организует газовый поток, делая его более упорядоченным, а при некоторых скоростях ламинарным из-за малой величины зазора. Благодаря этому, потери давления в аппарате с контактным элементом меньше, чем без него. Влияние подачи жидкости во вращающуюся корзину ротора без контактного элемента хорошо иллюстрирует зависимость, приведенная на рис.7. Хорошо видно, что с ростом нагрузки по жидкости гидравлическое

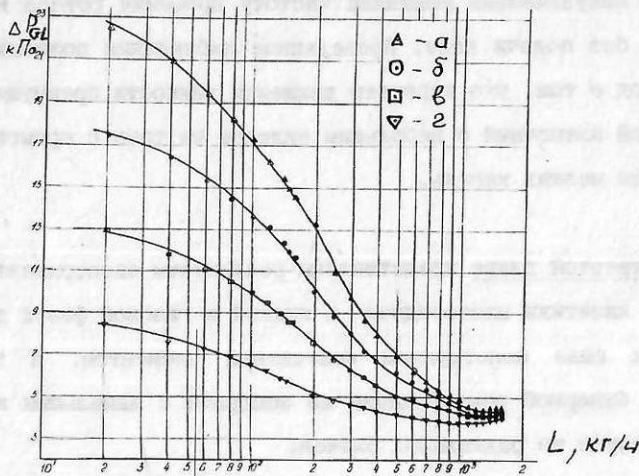


Рис.7 . Зависимость потерь напора в аппарате без контактного элемента от плотности орошения при $W_G = 2,24$ м/с и различных частотах вращения ротора: а - $n = 33,3$ с⁻¹; б - $50,0$ с⁻¹; в - $66,6$ с⁻¹; г - $n = 83,3$ с⁻¹

сопротивление при всех режимах вращения монотонно убывает во всем исследованном диапазоне, хотя относительная скорость движения фаз увеличивается. Этот факт можно объяснить тем, что пленка жидкости смачивает поверхность перфорированной корзины ротора, делая кромку отверстий неострой и, соответственно, уменьшает потери напора газа.

При проведении исследований была сделана попытка непосредственного наблюдения за внутренним объемом контактного элемента с целью изучения гидродинамических явлений и определения характера распределения потоков под действием центробежных сил. Для этого был изготовлен пластинчатый контактный элемент с вырезом в виде сегмента, открывающим лопасти, установленные по спирали Архимеда. Такой элемент устанавливали в корзину ротора со снятой крышкой. При помощи стробоскопического тахометра наблюдали

картину движения жидкости во вращающемся контактном элементе. В процессе визуализации изменяли частоту вращения ротора и расход жидкости без подачи газа. Проведенные наблюдения позволили сделать вывод о том, что характер движения жидкости преимущественно скоростной пленочный с небольшим вкладом на срыв с кромок лопастей в виде мелких капель.

В четвертой главе представлены результаты экспериментального изучения кинетики массоотдачи в жидкой и газовой фазах для всех описанных выше конструкций контактных элементов, а также в условиях бинарной ректификации на аппарате с ламельным контактным элементом из радиальных блоков.

Поскольку испытанная поверхность контакта фаз и ее зависимость от нагрузок по фазам и скорости вращения ротора оставались неизвестными, в качестве характеристики скорости массообмена использовали высоты единицы переноса в жидкой и газовой фазах.

Оказалось, что высота единицы переноса в жидкой фазе при десорбции диоксида углерода во всех случаях растет, а значит эффективность массоотдачи снижается с повышением нагрузки по газу. В то же время экспериментальные значения высоты единицы переноса в жидкой фазе уменьшаются при увеличении скорости вращения ротора. Так, при изменении частоты вращения ротора от $n=33,3 \text{ с}^{-1}$ до $83,3 \text{ с}^{-1}$, величина h_L уменьшалась в 2,5 - 3 раза для всех изученных типов контактных элементов. При этом отмечено, что плотность орошения практически не влияет на интенсивность массоотдачи в исследуемом диапазоне ее изменения. Проведено сопоставление интенсивности работы аппарата с тремя рассмотренными контактными устройствами. Установлено, что наименьшую высо-

ту единицы переноса имеет аппарат с ламельным контактным элементом из радиальных блоков. Более высокое значение h_L , по сравнению с предыдущим, имеет аппарат с контактным элементом из горизонтальных дисков и наибольшее значение - аппарат с пластинчатым контактным элементом.

Массообмен, контролируемый газовой фазой, в аппарате с тремя описанными конструкциями контактных элементов, изучали на примере десорбции аммиака из водного раствора в поток воздуха. Установлено, что высота единицы переноса в газовой фазе h_G растет при увеличении скорости газа. Было также отмечено, что для всех изученных конструкций контактных элементов высота единицы переноса снижается с ростом плотности орошения и с увеличением частоты вращения ротора, и достигает величины примерно 25 - 30 мм при частоте вращения ротора $n = 83,3 \text{ с}^{-1}$. Сопоставление результатов эксперимента показывает, что наибольшей эффективностью обладает контактный элемент из радиальных блоков, затем идет контактный элемент из горизонтальных гофрированных дисков, а наибольшую высоту единицы переноса в газовой фазе, а значит наименьшую эффективность массоотдачи показал аппарат с пластинчатым контактным элементом.

При исследовании ректификации в центробежном аппарате было отмечено существенное влияние на эффективность работы аппарата нагрузок по пару и исходной смеси, а также частоты вращения ротора. Оказалось, что интенсивность массопередачи медленно возрастает с увеличением плотности орошения, а общая высота единиц переноса, отнесенная к паровой фазе, уменьшается с увеличением частоты вращения ротора и достигает значения примерно 30 мм при $n = 83,3 \text{ с}^{-1}$. В этих опытах использовали ламельный контактный элемент из радиальных блоков, показавший при предыдущих испытаниях наименьшее гидравлическое сопротивление и наибольшую эффективность.

Пятая глава посвящена обобщению результатов исследования.

Экспериментально найденные значения ΔP_{GL} послужили основой для получения корреляционных зависимостей, позволяющих рассчитывать гидравлическое сопротивление аппарата с тремя изученными в работе типами контактных элементов.

Для диапазона нагрузок по жидкости от 0,735 до 14,7 кг/(м²с) для всех исследованных типов контактных устройств получено уравнение вида

$$\frac{\Delta P_{GL}}{\rho_G W_G^2} = Eu = A Re_G^{-0,72} Fr^{0,3}, \quad (1)$$

Для контактного элемента из радиальных блоков $A = 14,0$, для контактного элемента из гофрированных дисков $A = 18,8$ и для пластинчатого контактного элемента $A = 29,3$.

При нагрузках по жидкости, превышающих предел устойчивой работы аппарата ($14,7 < \bar{U}_L < 55,5$ кг/(м²с)), получены следующие уравнения:

контактный элемент из радиальных блоков

$$\frac{\Delta P_{GL}}{\rho_G W_G^2} = Eu = 3,1 Re_G^{-0,72} Re_L^{0,2} Fr^{0,3} \quad (2)$$

контактный элемент из гофрированных горизонтальных дисков

$$\frac{\Delta P_{GL}}{\rho_G W_G^2} = Eu = 1,88 Re_G^{-0,54} Re_L^{0,2} Fr^{0,3} \quad (3)$$

пластинчатый контактный элемент

$$\frac{\Delta P_{GL}}{\rho_G W_G^2} = Eu = 48,1 Re_G^{-0,85} Re_L^{0,2} Fr^{0,3} \quad (4)$$

Оказалось, что уравнения (1) - (4) описывают экспериментальные данные для всех изученных контактных устройств с погрешностью $\pm 10\%$.

В результате обработки экспериментальных данных получены корреляционные зависимости для определения эффективности массоотдачи в жидкой фазе отдельно для каждого из изученных контактных элементов. Во всем рассмотренном диапазоне нагрузок по фазам и скоростей вращения ротора

для контактного элемента из радиальных блоков

$$h_L/d_e = 0,18 \cdot 10^{-3} \text{Re}_G^{-0,59} \text{Fr}^{-0,42} \text{Sc}_L^{0,5}, \quad (5)$$

для контактного элемента из гофрированных горизонтальных дисков

$$h_L/d_e = 4,4 \cdot 10^{-3} \text{Re}_G^{-0,49} \text{Fr}^{-0,26} \text{Sc}_L^{0,5} \quad (6)$$

и для пластинчатого контактного элемента

$$h_L/d_e = 2,183 \cdot 10^{-3} \text{Re}_G^{-0,49} \text{Fr}^{-0,21} \text{Sc}_L^{0,5} \quad (7)$$

Полученные уравнения описывают экспериментальные данные с погрешностью $\pm 15\%$ для всех случаев.

Обработка данных по работе аппарата в условиях десорбции аммиака из водного раствора в поток воздуха позволила получить следующие корреляционные уравнения отдельно для каждого из рассмотренных типов контактных элементов для определения эффективности массоотдачи в газовой фазе:

контактный элемент из радиальных блоков

$$h_G/d_e = 1,52 \text{Re}_G^{0,39} \text{Re}_L^{-0,3} \text{Fr}^{-0,11} \text{Sc}_G^{0,66} \quad (8)$$

контактный элемент из гофрированных горизонтальных дисков

$$h_G/d_e = 1,15 \text{Re}_G^{0,31} \text{Re}_L^{-0,3} \text{Fr}^{-0,10} \text{Sc}_G^{0,66} \quad (9)$$

пластинчатый контактный элемент

$$h_G/d_e = 0,348 \text{Re}_G^{0,55} \text{Re}_L^{-0,3} \text{Fr}^{-0,23} \text{Sc}_G^{0,66} \quad (10)$$

Сопоставление опытных и расчетных значений безразмерного параметра (h_G/d_e) каждого из трех контактных элементов свидетельствует о том, что максимальное отклонение не превышает $\pm 10\%$

Поскольку физико-химические свойства системы этанол-вода, которую использовали при изучении ректификации, существенно зависят от концентраций и линия равновесия имеет значительную кривизну, очевидно, что уравнение аддитивности фазовых сопротивлений

$$h_{oG} = h_G + (mG/L) h_L \quad (11)$$

позволяет рассчитать лишь локальное значение общей высоты единицы переноса для ректификации $(h_{oG})_p$. Для определения средних значений, необходимых для сравнения с экспериментальными данными, в настоящей работе использовано уравнение $(L = G)$

$$(h_{oG})_{cp} = \frac{y_K \int_{y_H}^{y_K} \frac{h_{oG} dy}{(m_1 y - y)}}{y_K \int_{y_H}^{y_K} \frac{dy}{y^* - y}} \quad (12)$$

Использование этого осреднения позволило провести более надежное сравнение экспериментальных значений общей высоты единицы переноса с рассчитанными. На основании приведенного в данной главе алгоритма расчета кинетики бинарной ректификации в высокоскоростном центробежном аппарате с контактным элементом из радиальных блоков была разработана программа на ЭВМ, при помощи которой обработаны экспериментальные данные, полученные при ректификации смеси этанол - вода при различных нагрузках по фазам и частотах вращения ротора. В работе приведено сравнение экспериментальных значений общей высоты единицы переноса для

ректификации с рассчитанными по уравнениям для фазовых сопротивлений, найденных при изучении абсорбции в исследованном диапазоне изменения нагрузки по жидкости и скорости вращения ротора. Максимальная погрешность опытных данных и рассчитанных значений не превысила 25 %, что позволяет сделать вывод об удовлетворительном соответствии эксперимента и расчета.

Основные обозначения

$\Pi = \pi d_e$ - смоченный жидкостью периметр, м; a - удельная поверхность, $\text{м}^2/\text{м}^3$; $a_{\omega} = \omega^2 d_{av}/2$ - центробежное ускорение, $\text{м}/\text{с}^2$; b - высота контактного устройства, м; D_{AB} - коэффициент диффузии распределяемого вещества в фазе, $\text{м}^2/\text{с}$; d_o - внутренний диаметр контактного элемента, м; d - наружный диаметр контактного элемента, м; $d_e = 4\varepsilon/a$ - эквивалентный диаметр каналов в контактном элементе, м; $d_{av} = (d_o + d)/2$ - средний диаметр контактного элемента, м; g - ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$; h - фазовая высота единицы переноса, м; h_{oG} - общая высота единицы переноса по газовой фазе, м; L - массовый расход жидкости, $\text{кг}/\text{с}$; m - коэффициент распределения; n - частота вращения ротора, с^{-1} ; ΔP - гидравлическое сопротивление, Па; Q - объемный расход жидкости, $\text{м}^3/\text{с}$; $q = Q/\Pi$ - объемная плотность орошения, $\text{м}^3/(\text{м} \text{с})$; $U_L = L/(\pi d_o b)$ - массовая плотность орошения на входе в контактный элемент, $\text{кг}/(\text{м}^2 \text{с})$; $U_L = L/(\pi d_{av} b)$ - массовая плотность орошения на расстоянии от центра $d_{av}/2$, $\text{кг}/(\text{м}^2 \text{с})$; W - средняя скорость течения среды, $\text{м}/\text{с}$; x - концентрация распределяемого компонента в жидкой фазе, мол.доли; y - концентрация в газовой фазе, мол.доли; ν - кинематическая вязкость фазы, $\text{м}^2/\text{с}$; ρ - плотность фазы, $\text{кг}/\text{м}^3$; $\omega = 2\pi n$ - угловая скорость вращения, $\text{рад}/\text{с}$; ε - доля свободного объема; $Eu = \frac{\Delta P GL}{\rho_G W_G^2}$ - число Эйлера, безразмерный перепад давления в орошаемом элементе; $Fr = a_{\omega}/g$ - число Фруда; $Re_G = W_G d_e/\nu_G$ - число Рейнольдса для газа (пара);

*

на расстоянии $d_{av}/2$

$Re_L = 4q/\nu_L$ - число Рейнольдса для жидкости; $Sc = \nu/D_{AB}$ - число Шмидта.

Индексы: н - на входе в контактный элемент; к - на выходе из аппарата; av - среднее значение; l - локальное значение; G - газовая фаза; L - жидкая фаза; GL - при противотоке газа и жидкости;

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.

1. Показано, что применение ускорений порядка 1000g в роторных аппаратах центробежного типа позволяет разработать высокоэффективное компактное массообменное оборудование для проведения процессов абсорбции (десорбции) газов и ректификации.
2. Разработаны и изучены новые конструкции высокоэффективных и надежных контактных элементов для центробежного массообменного аппарата.
3. Изучено гидравлическое сопротивление контактных элементов в широком диапазоне нагрузок по фазам и скоростей вращения ротора. Проведена визуализация распределения жидкости по пластинчатому контактному элементу внутри вращающегося цилиндрического ротора, а также определены предельные нагрузки и области устойчивой работы аппарата.
4. Получены корреляционные зависимости, позволяющие рассчитать гидравлические сопротивления центробежного аппарата рассмотренной конструкции при различных рабочих параметрах для каждого из изученных контактных элементов.
5. Раскрыты основные закономерности переноса массы для газовой и для жидкой фазы в условиях десорбции хорошо и труднорастворимых газов из водного раствора в поток воздуха в центробежном аппарате с тремя типами контактных элементов. Установлена зависимость кинетики массообмена от основных рабочих параметров: нагрузки по

фазам, частоты вращения ротора и конструктивных особенностей контактных элементов.

6. Разработана методика гидравлического и кинетического расчета высокоскоростного центробежного массообменного аппарата с различными контактными элементами.

7. Показано, что данные по кинетике ректификации бинарной смеси этанол - вода с достаточной точностью могут быть предсказаны путем аддитивного сложения сопротивлений газовой и жидкой фаз, определенных в опытах по десорбции газов в центробежном аппарате с контактным элементом из радиальных блоков.

8. С учетом полученного экспериментального материала выполнены технические проекты и разработаны две новые конструкции центробежных тепломассообменных аппаратов с внутренними диаметрами роторов 400 и 800 мм. Аппараты входят в состав комплектных опытно-промышленных ректификационных установок.

9. Методика расчета кинетики массообмена в высокоскоростном центробежном аппарате и найденные в работе конструктивные решения его основных узлов и контактных элементов использовались при разработке малогабаритной высокоэффективной установки по переработке попутного нефтяного газа в составе блочной комплектной технологической линии (БКТЛ-2) в Западной Сибири, а также приняты проектной частью ХНПО "Карбонат" для создания установки десорбции диоксида углерода из фильтровой жидкости на Стерлитамакском ПО "Сода".

Основные результаты диссертации изложены в следующих работах:

1. Сиренко В.И., Кулов Н.Н., Тютюников А.Б. Гидродинамика и массообмен в роторном аппарате центробежного типа.- Теор.осн. хим технол., 1992, т.26, N 2, -с.163.

2. Сиренко В.И., Тютюников А.Б. Тепломассообменный аппарат с использованием искусственного гравитационного поля.- В кн.:Тезисы

докладов 5 Всесоюзной научно-технической конференции "Роль молодых конструкторов и исследователей химического машиностроения в реализации целевых комплексных программ". Северодонецк, 1986, -с.56

3. Тютюнников А.Б., Сиренко В.И., Тарынин Е.К., Кулов Н.Н. Гидродинамика и массообмен при двухфазных пленочно-дисперсных течениях в высокоскоростном центробежном аппарате.- В кн.:Тезисы докладов Всесоюзного совещания "Тепломассообменное оборудование - 88". Москва, 1988, -с.92.

4. Тютюнников А.Б., Сиренко В.И., Кулов Н.Н. Высокоскоростной центробежный аппарат для проведения процессов массообмена в системах газ(пар)-жидкость.- В кн.: Тезисы докладов 7 Республиканской конференции "Повышение эффективности, совершенствование процессов и аппаратов химических производств". Часть 2. Львов, 1988, -с.29.

5. Сиренко В.И.,Тютюнников А.Б., Васюк М.Ю. Исследование массообмена при взаимодействии высокотурбулизированных газожидкостных потоков.- В кн.: Тезисы докладов Всесоюзного совещания "Повышение эффективности и надежности машин и аппаратов в основной химии". Сумы, 1989, -с.27.

6. Тютюнников А.Б., Сиренко В.И., Тарынин Е.К., Кулов Н.Н. Разработка эффективных массообменных аппаратов с использованием си центробежного поля.- В кн.: Тезисы докладов 3 Всесоюзного совещания по проблеме "Абсорбция газов". Часть I. Таллинн, 1987, -с.72.

7. Тютюнников А.Б., Линтварев А.И, Тарынин Е.К., Сиренко В.И. Пути унификации и интенсификации колонной аппаратуры. - В кн.: Работы в области массообменных процессов за период 1986-1990гг. (абсорбция, ректификация, экстракция). Северодонецк,1989,-с.116.

8. Тютюнкников А.Б., Линтварев А.И., Тарынин Е.К., Слачинский Ю.А., Сиренко В.И. Проблемы тепломассообмена и промышленная экология. - В кн.: Тезисы докладов Всесоюзного совещания по промышленной экологии. Каунас, 1989, -с.27.

9. Сиренко В.И., Кулов Н.Н., Тютюнкников А.Б. Новый ректификационный аппарат центробежного типа. - В кн.: Тезисы докладов 5 Всесоюзной конференции по теории и практике ректификации. Северодонецк, 1991, -с.207.

10. Сиренко В.И., Тютюнкников А.Б., Погорельный Н.П., Васюк М.Ю. Контактное устройство центробежного тепломассообменного аппарата. - Заявка на изобретение N 4781028/26, положительное решение Госпатента СССР от 19.04.90 г.

11. Сиренко В.И., Тютюнкников А.Б., Погорельный Н.П. Высокоскоростной центробежный тепломассообменный аппарат. - Заявка на изобретение N 4740975/26, положительное решение Госпатента СССР от 23.10.91 г.

12. Сиренко В.И., Тютюнкников А.Б., Криворотченко Э.М., Погорельный Н.П., Кулов Н.Н. Контактное устройство центробежного тепломассообменного аппарата. - Заявка на изобретение N 4932748/26, положительное решение Госпатента СССР от 24.10.91 г.

СОИСКАТЕЛЬ:



В.И.СИРЕНКО

Заказ 5862

Тираж 100 экз.

Отдел оформления, УкрНИИхиммаш, ЗІОІ23, г. Харьков, ул. М. Конева, 21