

66  
к76

Белорусский технологический институт  
им. С.М.Кирова

На правах рукописи

Кошеленко Сергей Николаевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ И МАССОПЕРЕДАЧИ В ЭКСТРАКТОРАХ  
ПЛЕНОЧНОГО ТИПА

Специальность С5.17.08 - Процессы и аппараты химической  
технологии

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Минск - 1981

66  
K76

Белорусский технологический институт  
им. С.М.Кирова

На правах рукописи

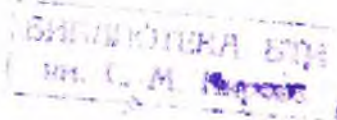
Кошеленко Сергей Николаевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ И МАССОПЕРЕДАЧИ В ЭКСТРАКТОРАХ  
ПЛЕНОЧНОГО ТИПА

Специальность 05.17.08 - Процессы и аппараты химической  
технологии

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Минск - 1981



Работа выполнена на кафедре процессов и аппаратов химической технологии Рубежанского филиала Воровшиноградского машиностроительного института

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент  
Носач В.А.

Научный консультант: доктор технических наук, профессор  
Возник В.Б.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Пеликваров Г.Г.,  
кандидат технических наук, доцент  
Кулов Н.Н.

Ведущее предприятие: Государственный институт по проектированию предприятий органических полупродуктов и красителей "ГИПРООРХИМ".

Защита состоится "11" сентября 1981 г. в 10 часов на заседании специализированного Совета К-056.01.03 по присуждению ученой степени кандидата наук в Белорусском технологическом институте им. С.М.Кирова по адресу:  
220630, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, БТИ им. С.М.Кирова.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан "9" сентября 1981 г.

Ученый секретарь специализированного  
Совета к.х.н., с.н.с.

Е.Д.Дзюба

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Решениями XXV съезда КПСС намечено дальнейшее развитие химической и нефтеперерабатывающей промышленности. Предусматривается "на основе проведения единой технической политики ... ускорить техническое перевооружение производства, широко внедрять прогрессивную технику и технологию".

Ускоренное развитие химической и нефтехимической промышленности требует постоянного совершенствования основных процессов химической технологии, в том числе такого важного, широко распространенного и энергетически выгодного технологического процесса как жидкостная экстракция. Специфические особенности процессов экстракции при осуществлении многочисленных производственных процессов, большое разнообразие свойств обрабатываемых систем требует разработки, исследования и внедрения новых аппаратов, обладающих высокой эффективностью в данных, конкретных условиях их применения.

Среди широкой номенклатуры известных и применяемых в промышленности массообменных аппаратов заслуженным вниманием пользуются аппараты пленочного типа, применение которых для процессов жидкостной экстракции позволяет успешно решать ряд сложных вопросов, возникающих на практике, в частности, при работе с загрязненными жидкостями, жидкостями, склонными к образованию устойчивых, трудно сепарируемых эмульсий, а также в тех случаях, когда требуется обеспечить максимально полное извлечение экстрагируемого компонента. В этой связи проведение работ по разработке и исследованию новых, более эффективных пленочных экстракторов применительно к конкретным производственным условиям является актуальной задачей.

Цель работы состоит в разработке новых, более эффективных конструкций вертикальных пленочных экстракторов и внедрении разработанных и исследованных конструкций в производство.

Научная новизна работы заключается в том, что в ходе работы были выполнены исследования гидродинамики и массопередачи в вертикальных пленочных экстракторах, установлены основные закономерности устойчивой и эффективной работы этих аппаратов, получены и проанализированы количественные зависимости, определяющие гидродинамические и массообменные характеристики разработанных и исследованных аппаратов; проведен теоретический анализ пленочного течения в системе "жидкость-жидкость" и получены аналитические решения, описывающие совместное движение тяжелой и легкой фаз.

Практическая ценность работы состоит в том, что применение разработанных и исследованных аппаратов позволяет успешно решать задачи аппаратурного оформления стадий экстракции в ряде конкретных производственных процессов, в результате чего при достижении высокого качества продукта более рационально используются технологическое оборудование, производственные площади, а также снижаются затраты труда, энергии и времени.

Реализация работ в промышленности. Разработанные и исследованные конструкции приняты к внедрению на Заволжском химическом заводе им. М.В.Фрунзе. Экономический эффект по одному цеху составит 35 тыс.руб. в год.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены: 1) на I Всесоюзной научной конференции "Современные машины и аппараты химических производств" (Чимкент, 1977 г.); 2) на I Всесоюзной научно-технической конференции "Молодые исследователи и конструкторы - химическому машиностроению" (Дзержинск, 1977 г.); 3) на заседании научно-технического Совета отраслевой научно-исследовательской лаборатории по расчету и моделированию аппаратов Днепрпетровского химико-технологического института им. Ф.Э.Дзержинского (февраль 1980 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 статей, получено 2 авторских свидетельства на изобретения.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из пяти разделов, общих выводов и приложения, изложена на 151 странице машинописного текста, содержит 35 рисунков, 13 таблиц, список использованной литературы из 171 наименования и приложение на 13 страницах.

#### СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработано множество конструкций экстракторов, которые отличаются принципом работы, характером сил, в поле которых происходит взаимодействие потоков жидкостей и т.д. Поэтому возникает необходимость их классификации. Известные классификации обладают рядом недостатков: недостаточной полнотой и дифференциацией, несколько формальным подведением под определяющий признак конструкций, обладающих принципиальными отличиями по другим характеристикам, не охватывают появившиеся в последние годы конструкции.

Разработана новая, более развернутая классификационная система, в которой рассмотрены экстракторы двух классов: гравитационные и центробежные экстракторы. Предложенная классификация является в достаточной степени исчерпывающей, охватывая все многообразие жидкостных экстракторов, и в то же время довольно детализированной.

Анализ работ, характеризующих современное состояние и перспективы развития аппаратурного оформления экстракционных процессов, с учетом общих тенденций развития химического аппаратостроения свидетельствует о следующем:

- процессы жидкостной экстракции достаточно широко распространены в химической технологии, их изучению, а также разработке и исследованию эффективного экстракционного оборудования уделяется большое и постоянно растущее внимание;
- широкое многообразие химико-технологических процессов и свойств обрабатываемых веществ обуславливает большое число типов и конструкций экстракционного оборудования;
- для целого ряда химико-технологических процессов, особенно в том случае, когда обработке подвергаются склонные к эмульгированию, трудно сепарирующиеся и загрязненные жидкости, а также в тех случаях, когда требуется максимально полное извлечение экстрагируемого компонента, значительный интерес представляют экстракторы пленочного типа;
- аппараты пленочного типа широко распространены в химической технологии, однако подавляющее большинство исследований относится к аппаратам, предназначенным для систем "газ-жидкость". Распространение полученных в ходе этих исследований результатов по гидродинамике и массообмену на аппараты, предназначенные для проведения процессов в системах "жидкость-жидкость", т.е. на пленочные жидкостные экстракторы, без проведения дополнительных исследований невозможно.

Учитывая вышеизложенное, автор ставит следующие основные задачи исследования:

1. Изучение некоторых закономерностей пленочного течения в системе "жидкость-жидкость" путем совместного решения уравнений движения тяжелой и легкой фаз.

2. Исследование гидродинамики вертикального трубчатого пленочного экстрактора с целью оценки интенсивности межфазного взаимодействия в реальных условиях, а также определения влияния

различных факторов (режимов противоточного движения легкой и тяжелой фаз и вязкости тяжелой фазы) на толщину пленки и удерживающую способность по тяжелой фазе.

3. Исследование влияния различных факторов на гидравлическое сопротивление вертикального пленочного экстрактора.

4. Разработка новой конструкции вертикального пленочного экстрактора, обеспечивающей более интенсивную радиальную турбулизацию жидкостной пленки и увеличение удельной межфазной поверхности.

5. Исследование гидродинамики разработанного вертикального пленочного экстрактора с определением предельно допустимых нагрузок, области устойчивой работы, удерживающей способности экстрактора по тяжелой фазе.

6. Исследование процесса массопередачи в вертикальных пленочных экстракторах.

7. Получение основных расчетных зависимостей по гидродинамике и массопередаче для вертикальных пленочных экстракторов, пригодных для проведения практических расчетов при проектировании.

8. Выполнение производственных испытаний и промышленное внедрение разработанных и исследованных аппаратов.

#### НЕКОТОРЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПЛЕНОЧНОГО ТЕЧЕНИЯ В СИСТЕМЕ "ЖИДКОСТЬ - ЖИДКОСТЬ"

Течение пленки жидкости в жидкой фазе характеризуется некоторыми отличительными особенностями по отношению к пленочному течению в газовой (паровой) фазе, которые заключаются в том, что на процесс движения оказывает влияние сила Архимеда, а межфазное взаимодействие проявляется в значительно большей степени.

Для случая вертикального плоскопараллельного течения по твердой стенке, если движение установившееся ламинарное безволновое, исходя из совместного решения уравнений движения пленки тяжелой фазы и потока легкой фазы получим выражение для определения толщины пленки тяжелой фазы:

$$\begin{aligned} & \delta^5 \rho g \left(1 - \frac{1}{\mu_n / \mu_t}\right) + \delta^4 \rho g \Delta \left(\frac{2}{\mu_n / \mu_t} - 1\right) + \delta^3 \rho g \frac{\Delta^2}{\mu_n / \mu_t} - \\ & - \delta^2 \mu_t \left(12 V_{16} + 9 V_{16} - \frac{3}{\mu_n / \mu_t} V_{16}\right) + \delta \mu_t \Delta V_{16} \left(2 - \frac{1}{\mu_n / \mu_t}\right) + \frac{3 \mu_t}{\mu_n / \mu_t} \Delta^2 V_{16} = 0 \end{aligned} \quad (I)$$



Здесь:  $\delta$  - толщина пленки тяжелой фазы;  $\Delta\rho = \rho_1 - \rho_2$  - разность плотностей тяжелой и легкой фаз;  $g$  - ускорение свободного падения;  $\mu_1, \mu_2$  - коэффициенты динамической вязкости тяжелой и легкой фаз;  $V_{1c}, V_{2c}$  - расходы тяжелой и легкой фаз, отнесенные к единице ширины канала;  $\Delta$  - зазор между ограничивающими канал стенками.

Если пленочное течение происходит в цилиндрическом канале по внутренней цилиндрической поверхности, толщина пленки тяжелой фазы определяется по выражению:

$$V_T = 2\pi \left\{ \frac{\Delta\rho g}{\mu_1} \left[ \frac{3}{16} (z_0 + \delta)^4 \frac{z_0^4}{16} + \frac{(z_0 + \delta)^2 z_0^2}{4} + \frac{(z_0 + \delta)^4}{4} \frac{z_0 + \delta}{z_0} \right] + \left[ \frac{(z_0 + \delta)^2 z_0^2}{4} - \frac{(z_0 + \delta)^2}{2} \frac{z_0 + \delta}{z_0} \right] \times \right. \\ \left. \frac{\Delta\rho g}{\mu_1} \frac{(z_0 + \delta)^2 z_0^2}{4} + \frac{\Delta\rho g}{\mu_1} \frac{(z_0 + \delta)^2}{2} \frac{z_0 + \delta}{z_0} - \frac{A}{B(z_0 + \delta)} \frac{V_A}{2\pi} \right\} \\ \times \frac{\frac{\mu_1}{\mu_2} \frac{z_0 + \delta}{4} + \frac{\mu_1}{\mu_2} \frac{z_0 + \delta}{R} + \frac{\mu_1}{\mu_2} \frac{A^2}{B(z_0 + \delta)^2}}$$

где:  $A = \frac{(z_0 + \delta)^3}{4} \frac{(z_0 + \delta) R^2}{4} + \frac{(z_0 + \delta)^3}{2} \frac{R}{z_0 + \delta}$ ;  $B = \frac{R^2 (z_0 + \delta)^2}{4} - \frac{3}{16} \frac{(z_0 + \delta)^4}{16} - \frac{(z_0 + \delta)^4}{4} \frac{R}{z_0 + \delta}$

$z_0, R$  - радиус поверхности внутреннего и наружного цилиндра;

$V_A$  - расход легкой фазы.

Справедливость формулы (1) подтверждают результаты экспериментов, проведенные, с целью устранения явления волнообразования, в наклонном плоскопараллельном канале, при этом вместо величины  $g$  в выражение (1) подставлялось произведение  $g \cdot \sin \alpha$ , где  $\alpha$  - угол наклона пленкообразующей поверхности к горизонту. Достоверность выражения (2) подтверждается тем, что при сходных характеристиках канала для движения фаз результаты вычислений по уравнениям (1) и (2) близки.

Аналогичные соотношения получены для случая свободного течения пленки тяжелой фазы, когда она омывается легкой фазой с обеих сторон, при плоскопараллельном и осесимметричном вариантах течения. При соответствующих условиях эти соотношения приводятся к уравнениям, характеризующим пленочное течение по твердой стенке.

Поскольку в реальных условиях режим течения пленки по вертикальной поверхности является волновым, полученные выражения могут служить в качестве первого приближения при определении характеристик такого течения и основой для более глубокого анализа движения и взаимодействия фаз.



## ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЭКСТРАКТОРОВ ПЛЕНОЧНОГО ТИПА

Исследование гидродинамики вертикальных пленочных экстракторов имеет своей целью определение области устойчивой их работы с точки зрения формирования жидкостной пленки и отсутствия существенного уноса, а также определение степени влияния различных факторов на толщину жидкостной пленки и, как следствие, — на удерживающую способность экстрактора и его динамические характеристики.

Гидродинамика вертикальных пленочных экстракторов исследовалась на экспериментальном стенде, схематично изображенном на рис. I.

В первой серии опытов исследовался вертикальный трубчатый пленочный экстрактор, состоящий из двух коаксиальных труб: наружной (стеклянной) с диаметром 80 мм и внутренней (сталь IX18H9T) с диаметром 51,2 мм. Рабочая высота экстрактора составляла 1500 мм.

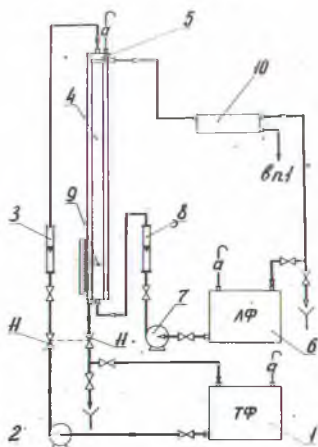


Рис. I.

Тяжелая фаза из емкости I подавалась центробежным насосом 2 через ротаметр 3 в вертикальный пленочный экстрактор 4, распределялась щелевым распределительным устройством 5 и стекала в виде пленки по наружной поверхности внутренней трубы экстрактора. Собирающаяся в нижней части экстрактора тяжелая фаза возвращалась в емкость I. Легкая фаза из емкости 6 центробежным насосом 7 подавалась через ротаметр 8 в нижнюю зону экстрактора через специальное распределительное устройство 9. Отработанная легкая фаза выводилась через дополнительный отстойник 10 и самотеком возвращалась в емкость 6. Для определения количества удерживаемой в экстракторе тяжелой фазы использовались устройства для отсечки II, снабженные синхронизатором. В качестве тяжелой фазы использовались вода, водно-глицериновые растворы и водные растворы поваренной соли и кальцинированной соды. В качестве легкой фазы использовался керосин.

Отработанная легкая фаза выводилась через дополнительный отстойник 10 и самотеком возвращалась в емкость 6. Для определения количества удерживаемой в экстракторе тяжелой фазы использовались устройства для отсечки II, снабженные синхронизатором. В качестве тяжелой фазы использовались вода, водно-глицериновые растворы и водные растворы поваренной соли и кальцинированной соды. В качестве легкой фазы использовался керосин.

В том случае, когда легкая фаза неподвижна или перемещается снизу вверх с малой скоростью, реальный профиль скоростей в пленке тяжелой фазы характеризуется наличием определенной, отличной от нуля скорости тяжелой фазы на границе раздела фаз.

Для скорости тяжелой фазы на границе раздела фаз, равной нулю, профиль скорости в пленке тяжелой фазы описывается уравнением:

$$W_T = \frac{\Delta \rho g}{4 \mu_T} \left[ \frac{(z_0 + \delta)^2 - z_0^2}{L_n} \frac{z}{z_0} - \frac{z^2 - z_0^2}{4} \right] \quad (3)$$

При отсутствии взаимодействия на межфазной поверхности:

$$W_T = \frac{\Delta \rho g}{2 \mu_T} \left[ (z_0 + \delta)^2 \frac{z}{z_0} - \frac{z^2 - z_0^2}{2} \right] \quad (4)$$

Для плоской стенки условие равенства нулю скорости тяжелой фазы на границе раздела фаз приводит к выражению:

$$\delta = \sqrt[3]{\frac{12 \mu_T \Gamma}{\Delta \rho \beta g}}, \quad (5)$$

а при отсутствии взаимодействия на межфазной поверхности:

$$\delta = \sqrt[3]{\frac{3 \mu_T \Gamma}{\Delta \rho \beta g}} \quad (6)$$

Здесь:  $\Gamma$  - массовая плотность орошения тяжелой фазы.

Сравнение экспериментальных значений усредненной толщины пленки со значениями, рассчитанными по соотношениям (3), (5) и (4), (6), свидетельствуют о том, что уже в области ламинарного режима течения пленки межфазное взаимодействие является существенным. В связи с этим в качестве критерия Рейнольдса для тяжелой фазы в дальнейшем использовалось выражение

$$Re_T = \frac{2\Gamma}{\mu_T}$$

Исследовалась удерживающая способность экстрактора. Обобщенная зависимость

$$\frac{\delta}{\delta_{прив}} = f(Re_T, Re_n, \frac{\mu_T}{\mu_6})$$

где  $\mu_6$  - вязкость воды при 20°C, имеет следующий вид:

$$\frac{\delta}{\delta_{прив}} = 13,4 + 7,2x_1 + 0,8x_2 - 4,1x_3 + 2,5x_4^2 + 0,6x_1x_2 - 1,7x_1x_3 \quad (7)$$

Здесь:

$$x_1 = \frac{Re_T - 800}{305}; \quad x_2 = \frac{Re_n - 420}{220}; \quad x_3 = \frac{\mu_T/\mu_6 - 2,95}{1,25}$$

Число Рейнольдса для легкой фазы находилось из выражения:

$$Re_L = \frac{2W_s(\Delta - \delta)\rho_L}{\mu_L}$$

где  $\Delta$  - зазор между внутренним диаметром наружной трубы и наружным диаметром внутренней трубы,  $\bar{W}_s$  - средняя скорость движения легкой фазы.

Выражение  $\delta_{\text{прив}} = \sqrt[3]{\frac{\mu_L^2}{4\rho_L \rho_T g}}$  отражает действие силы Архимеда.

Изучалось влияние различных факторов на величину гидравлического сопротивления экстрактора. В результате было установлено, что сопротивление столба жидкости в пределах изменения дозировки легкой фазы 23,5 - 130 л/час составляет от 60 до 97% от полного гидравлического сопротивления экстрактора, преобладающее влияние на гидравлическое сопротивление экстрактора оказывает сопротивление устройства ввода, между гидравлическим сопротивлением и усредненной толщиной пленки тяжелой фазы существует зависимость, близкая к линейной. Было получено следующее эмпирическое уравнение:

$$\Delta p = gH(\rho_L + 330\rho_T \delta) + 416 \cdot 10^6 \bar{W}_L^{1,75} \text{ н/м}^2, \quad (8)$$

где  $H$  - высота столба жидкости в экстракторе, м;

$\delta$  - усредненная толщина пленки тяжелой фазы, м;

$\rho_L$  и  $\rho_T$  - плотность легкой и тяжелой фаз, кг/м<sup>3</sup>.

Недостатком конструкций существующих пленочных экстракторов является последовательная обработка слоев пленки тяжелой фазы вследствие того, что межфазовый контакт происходит лишь с одной стороны пленки, вторая сторона ее контактирует с твердой поверхностью. С целью устранения указанного недостатка был разработан пленочный экстрактор с проницаемой поверхностью орошения. Для создания пленки тяжелой фазы применены натянутые металлические нити. Образующаяся пленка тяжелой фазы омывается легкой фазой с обеих сторон и характеризуется более высокой степенью радиальной турбулизации, благодаря чему достигается существенно большая полнота экстракции.

На рис. 2 приведено схематичное изображение лабораторной модели пленочного экстрактора с проницаемой поверхностью орошения, которая состоит из корпуса 1, по оси которого проходит вертикальная трубка 2, прикрепленная с помощью стопорных винтов 3 к нижнему стакану 4. Трубка имеет в своей верхней части отверстие 5 для выхода легкой фазы, которая вытекает по трубке 2 из аппарата. В



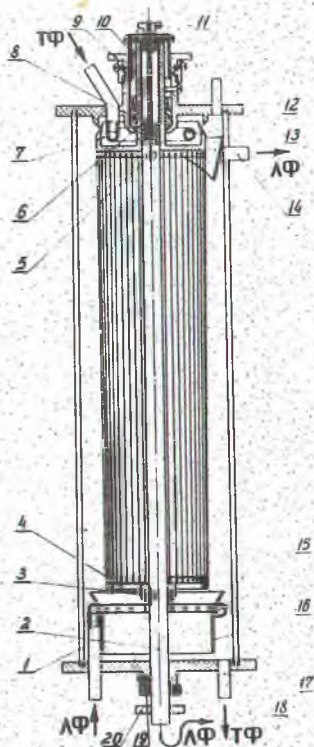


Рис. 2.

верхнюю часть трубки 2 вставлен шток 6, входящий в удлиненную втулку верхнего стакана 7, которая через сальниковое устройство проходит через крышку аппарата. Между нижним 4 и верхним 7 стаканами натянуты стальные нити из стали IX18H9T толщиной 0,55 мм. Верхняя часть удлиненной втулки стакана 7 соединяется с регулировочной шайбой 9 через резьбовую втулку 10. Регулировочный винт II служит для изменения натяжения нитей без изменения зазора между стаканом 7 и кольцевой кромкой 12, которой снабжена крышка экстрактора. Регулировка указанного зазора производится поворотом регулировочной гайки 9. Тяжелая фаза поступает через распределитель 13. Корпус аппарата снабжен штуцером 14 для вывода легкой фазы, расположенным на одном уровне с отверстием 5. Легкая фаза подается через распределитель 15. Тяжелая

фаза, пройдя успокоительный стакан 16, выводится через штуцер 17 в нижней крышке экстрактора. Нижняя крышка экстрактора снабжена сальниковым устройством 18, через которое проходит трубка 2. Экспериментальный образец аппарата позволял осуществлять также закручивание нитей на определенный угол. Для этого необходимо было отпустить стопорный винт 19 на корпусе сальника 18 и регулировочный винт II, с помощью закрепленной на трубе 2 шайбы 20 повернуть на определенный угол трубу 2 вместе с нижним стаканом 4, а после этого вновь закрепить стопорный винт 19 и регулировочный винт II.

Исследовалось влияние нагрузки по тяжелой и легкой фазам на величину уноса тяжелой фазы. Было найдено, что предельная нагрузка по легкой фазе ( $W_1$ ), при которой унос ( $u$ ) не превышает 0,1%, составляет около  $1,4 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{м}^2\text{с}$  для соотношения тяжелой и легкой фаз

0,45. С увеличением соотношения фаз предельная нагрузка падает.

В ходе экспериментов было установлено, что устойчивая пленка тяжелой фазы образуется при наличии вполне определенных условий.

На рис.3 приведены экспериментальные данные для системы "вода-керосин" при неподвижной легкой фазе, характеризующие влияние плотности орошения по тяжелой фазе ( $\Gamma$ ) при подаче тяжелой фазы на предварительно смоченную ее поверхность нитей и расстояния между отдельными нитями ( $l$ ) на устойчивость пленки тяжелой фазы.

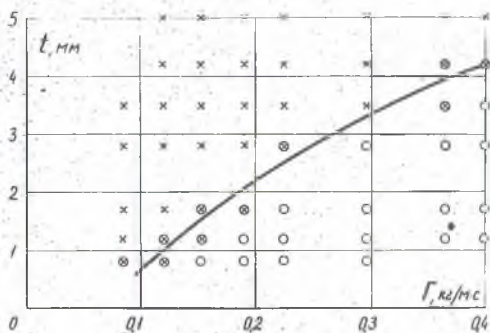


Рис.3.

Помимо указанных факторов, устойчивость жидкостной пленки, как показали опыты, в значительной степени зависит от вязкости тяжелой фазы, но практически не зависит от ее плотности и межфазного поверхностного натяжения.

Исследовалось влияние режима движения легкой фазы на область существования устойчивой пленки тяжелой фазы. Обобщением данных по зависимости предельно допустимого расстояния между отдельными нитями от плотности орошения по тяжелой фазе, режима движения легкой фазы, а также вязкости тяжелой фазы, было получено следующее соотношение:

$$l = 12\Gamma^{0,4} + (5\mu_T - 0,4)^{0,455} - 2,2 \cdot 10^{-7} Re_A^{2,57} - 5,1, \text{ мм} \quad (9)$$

Исследовалась удерживающая способность экстрактора. Для величины усредненной толщины пленки тяжелой фазы была получена следующая зависимость:

$$\delta = 1,21 + 0,28x_1 + 0,06x_2 - 0,05x_1^2 \quad (10)$$

где:

$$x_1 = \frac{\Gamma - 0,277}{0,087}; \quad x_2 = \frac{Re_A - 155}{40}$$

ИССЛЕДОВАНИЕ МАССОПЕРЕДАЧИ  
В ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПЛЕНОЧНЫХ ЭКСТРАКТОРАХ

Массопередача при экстракции в вертикальном трубчатом пленочном экстракторе исследовалась с использованием систем, физико-химические свойства которых приведены в таблице I.

Таблица I.

| № п/п | Экстракционная система   | Плотность легкой фазы, кг/м <sup>3</sup> | Вязкость легкой фазы, н·с/м <sup>2</sup> | Вязкость тяжелой фазы, н·с/м <sup>2</sup> | Коэффициент распределения |
|-------|--|--|--|---|---------------------------|
| 1.    | Керосин-бензойная кислота-вода (водно-глицериновый раствор)      | 790                                      | $1,2 \cdot 10^{-3}$                      | $1 \cdot 10^{-3} + 5 \cdot 10^{-3}$       | 3                         |
| 2.    | Изоамилацетат-уксусная кислота-вода (водно-глицериновый раствор) | 871                                      | $0,881 \cdot 10^{-3}$                    | $1 \cdot 10^{-3} + 5 \cdot 10^{-3}$       | 0,32                      |
| 3.    | Толуол-уксусная кислота-вода (водно-глицериновый раствор)        | 865                                      | $0,6 \cdot 10^{-3}$                      | $1 \cdot 10^{-3} + 5 \cdot 10^{-3}$       | 0,0433                    |

Во всех опытах экстракция осуществлялась из тяжелой фазы (вода и водно-глицериновые растворы) в легкую фазу (керосин, изоамилацетат и толуол). На экстракцию подавалась легкая фаза, не содержащая экстрагируемого компонента. Концентрация экстрагируемого компонента в легкой фазе после экстракции ( $y_k$ ) вычислялась по материальному балансу, а концентрация экстрагируемого компонента в тяжелой фазе (начальная  $-x_k$  и конечная  $-x_k'$ ) определялась титрованием. Концентрации экстрагируемого компонента выражались в массовых долях (кг кислоты/кг смеси), определялась средняя движущая сила процесса ( $\Delta x_{cp}$ ). При работе с вертикальным трубчатым экстрактором за величину поверхности контакта фаз принималась наружная поверхность внутренней трубы без учета толщины пленки тяжелой фазы.

В качестве определяющих критериев были взяты критерий Рейнольдса для легкой и тяжелой фаз и диффузионный критерий Прандтля для тяжелой фазы. Было принято предварительное допущение, что вли-



яние диффузионного критерия Прандтля для легкой фазы и критерия Вебера на процессе массопередачи будет менее существенным. Дальнейшие опыты подтвердили это допущение. В то же время была показана необходимость учета коэффициента распределения ( $\Gamma$ ).

С учетом рассмотренных выше экспериментальных данных по гидродинамике числа подобия формировались следующим образом:

$$Re_x = \frac{2\Gamma}{\mu_x}; \quad Re_y = \frac{4G_y}{\pi(D+d)\mu_y}; \quad P_{rgx} = \frac{\mu_x}{\beta_x D_x}$$

Здесь:  $D_x$  - коэффициент диффузии в тяжелой фазе,  $m^2/c$ ;  $\Gamma$  - плотность орошения по тяжелой фазе,  $кг/м \cdot c$ ;  $G_y$  - расход легкой фазы,  $кг/c$ ;  $\beta_x$  - плотность тяжелой фазы,  $кг/м^3$ ;  $\mu_x$  и  $\mu_y$  - коэффициент динамической вязкости тяжелой и легкой фаз,  $н \cdot c/м^2$ ;  $D$  и  $d$  - внутренний диаметр наружной трубы и наружный диаметр внутренней трубы без учета толщины пленки тяжелой фазы,  $м$ .

Коэффициент диффузии в тяжелой фазе определялся расчетом.

Ввиду невозможности активного варьирования коэффициента распределения ( $\Gamma$ ) в качестве функции отклика было использовано выражение

$$\tilde{y} = \frac{K_f \frac{\delta_{прив}}{\beta_x D_x}}{r^a}$$

где  $K_f$  - коэффициент массопередачи, отнесенный к единице поверхности контакта фаз,  $кг/м^2 \cdot c$ ;  $\delta_{прив}$  - приведенная толщина пленки с учетом силы Архимеда.

Величина показателя степени при коэффициенте распределения определилась путем постановки серии экспериментов с использованием указанных выше двухфазных систем при постоянных значениях критериев подобия:  $Re_x = 845$ ,  $P_{rgx} = 490$  и  $Re_y = 380$ .

Постоянство числа Рейнольдса для легкой фазы обеспечивалось соответствующим изменением дозировки.

Из экспериментальных данных было найдено, что  $a = 0,8$ .

При планировании эксперимента по массопередаче вместо диффузионного критерия Прандтля использовалась величина, обратная этому критерию

$$\frac{1}{P_{rgx}} = \frac{\beta_x D_x}{\mu_x}$$

Уравнение регрессии после выполнения дисперсионного анализа имеет следующий вид:

$$K_p = \frac{g_x D_x}{\delta_{проб}} \cdot r^{0,8} (0,4655 + 0,1642x_1 + 0,0526x_2 - 0,1303x_3 - 0,0431x_1^2 - 0,0277x_2^2 + 0,0866x_3^2) \quad (\text{II})$$

Здесь:  $x_1 = \frac{Re_x - 670}{380}$ ;  $x_2 = \frac{Re_y - 700}{360}$ ;  $x_3 = \frac{Re_{гх}^{-1} - 1,06 \cdot 10^{-3}}{5,8 \cdot 10^{-4}}$

Полученное уравнение было дополнительно проверено на лабораторных моделях вертикальных трубчатых пленочных экстракторов, основные размеры которых приведены в таблице 2.

Таблица 2.

| № п/п | Высота рабочей зоны, м | Внутренний диаметр наружной трубы, м | Наружный диаметр внутренней трубы, м | Среднее отклонение от расчетного уравнения, % |
|-------|------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---|
| 1.    | 1,4                    | 0,106                                | 0,070                                | 7,4   |
| 2.    | 1,4                    | 0,162                                | 0,102                                | 6,1   |
| 3.    | 2,2                    | 0,162                                | 0,102                                | 6,9   |

В этой же таблице приведены усредненные относительные отклонения экспериментальных значений коэффициента массопередачи (для системы "вода-бензойная кислота-керосин") от подсчитанных по соотношению (II).

Полученные данные подтверждают справедливость принятого ранее допущения о несущественном влиянии в данном случае на процесс массопередачи диффузионного критерия Прандтля для легкой фазы и критерия Вебера, что объясняется, очевидно, наличием фиксированной межфазной поверхности, а также тем, что влияние физических свойств легкой фазы в достаточной степени учитывается критерием Рейнольдса для легкой фазы.

Исследование процесса массопередачи в вертикальном пленочном экстракторе с проницаемой поверхностью орошения выполнялось по описанной выше методике и на тех же системах. Количество проэкспериментированного за единицу времени вещества относилось при определении коэффициента массопередачи к общей поверхности пленки тяжелой фазы, то есть к удвоенной поверхности конуса, образованного натянутыми нитями.

Экстрактор имел следующие размеры: внутренний диаметр обечайки  $D = 108$  мм; средний диаметр поверхности орошения  $d_{ср} = 83$  мм; высота поверхности орошения  $H = 550$  мм; диаметр внутренней трубы  $d = 25$  мм.

При вычислении числа Рейнольдса для легкой фазы эквивалент-

ный диаметр подсчитывался по формуле:

$$d_{\text{эк}} = \frac{D^2 - d^2}{D + 2d_{\text{ср}} + d}$$

При формировании числа Рейнольдса для тяжелой фазы в качестве смоченного периметра использовалось выражение

$$2\pi d_{\text{ср}} + n\pi d_n$$

где:  $d_{\text{ср}}$  - средний диаметр поверхности орошения, м;  $n$  - число нитей, шт.;  $d_n$  - диаметр нити, м.

Плотность орошения вычислялась путем отнесения массовой нагрузки к периметру поверхности орошения  $\pi d_{\text{ср}}$ . С учетом этого:

$$Re_x = \frac{4\Gamma d_{\text{ср}}}{(2d_{\text{ср}} + nd_n)\mu_x} \quad (12)$$

Обработкой полученных экспериментальных данных было получено следующее уравнение:

$$K_f = 0,48 \cdot 10^{-2} \cdot Re_x^{0,2} Re_y^{0,2} Re_z^{0,4} P_{gz}^{0,4} \frac{\rho_x D_x}{\delta_{\text{приб}}} \quad (13)$$

С целью проверки полученного уравнения были проведены эксперименты по той же методике с использованием вертикального пленочного экстрактора с проницаемой поверхностью орошения, имевшего следующие (увеличенные) размеры: внутренний диаметр обечайки  $D = 201$  мм; средний диаметр поверхности орошения  $d_{\text{ср}} = 152$  мм при высоте ее  $H = 1570$  мм; диаметр внутренней трубы  $d = 45$  мм.

Для уменьшения объема экспериментальных исследований при одновременном повышении аппроксимирующей способности получаемой расчетной зависимости использовался метод математического планирования эксперимента с применением в качестве варьируемых факторов критериев подобия. Функцией отклика служило выражение  $K_f \frac{\delta_{\text{приб}}}{\rho_x D_x} / r^{0,7}$  где  $r$  - коэффициент распределения. В окончательном виде уравнение регрессии имеет следующий вид:

$$K_f = \frac{\rho_x D_x}{\delta_{\text{приб}}} r^{0,7} (0,7097 + 0,1991x_1 + 0,1444x_2 - 0,1708x_3 - 0,0359x_2^2 + 0,0650x_3^2) \quad (14)$$

Здесь:

$$x_1 = \frac{Re_x - 345}{112}; \quad x_2 = \frac{Re_y - 235}{116}; \quad x_3 = \frac{P_{gz} - 1,06 \cdot 10^3}{5,8 \cdot 10^4}$$

На корреляционном графике (рис. 4) приведено сравнение экспериментальных данных по массопередаче с коэффициентами массопередачи, рассчитанными по уравнениям (13) и (14) для вертикального пленочного экстрактора с проницаемой поверхностью орошения.

Для вертикального пленочного экстрактора с проницаемой поверхностью орошения проведена оценка интенсивности массоотдачи в фазах "x" и "y" путем разложения общего коэффициента массопередачи

на частные коэффициенты массоотдачи в каждой фазе -  $\beta_x$  и  $\beta_y$ .  
Результирующие выражения имеют следующий вид:

$$\beta_x = 1,5 \cdot 10^{-4} Re_x^{1,1} Re_y^{0,4} Pr_{gx}^{-0,5} \quad (15)$$

$$\beta_y = 2,6 \cdot 10^{-3} Re_y^{0,4} \quad (16)$$

Отклонения значений коэффициента массопередачи, вычисленного через коэффициенты массоотдачи, от значений, рассчитанных по уравнению (13), в области средних значений критериев  $Re_x, Re_y$  в исследованном диапазоне их изменения и значении  $Pr_{gx} = 4,90$  составляют около 30%.

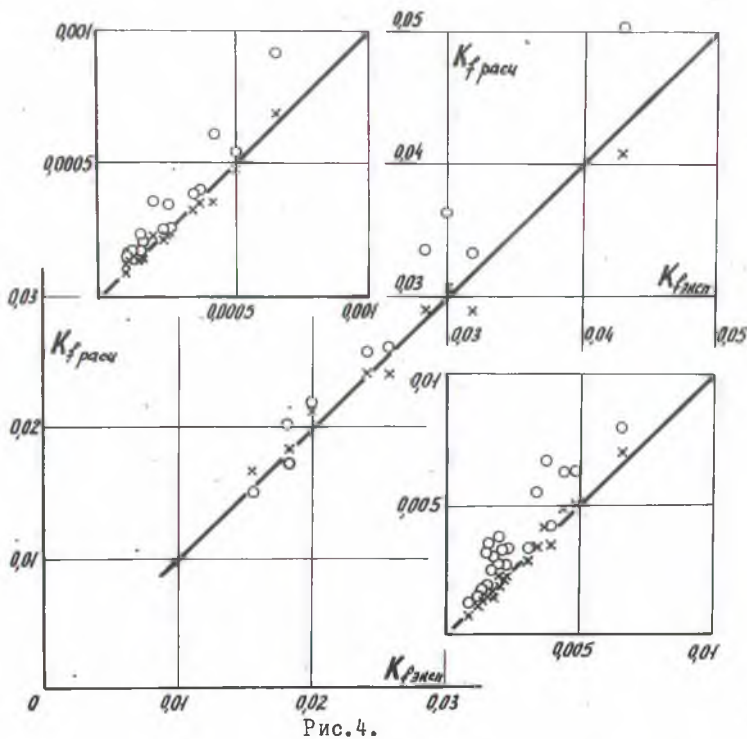


Рис. 4.

В таблице 3 приведены некоторые данные, характеризующие эффективность вертикального пленочного экстрактора с проницаемой поверхностью орошения при работе на системе "вода-бензойная кислота-керосин".



Таблица 3.

| № п/п | Наименование показателей  | Единица измерения                        | Показатель |
|-------|---|--|------------|
| 1.    | Максимальная производительность по тяжелой фазе, отнесенная к полной площади сечения аппарата | $10^{-3} \text{ м}^3/\text{м}^2\text{с}$ | 9,2        |
| 2.    | Максимальная производительность по легкой фазе, отнесенная к полной площади сечения аппарата  | $10^{-3} \text{ м}^3/\text{м}^2\text{с}$ | 11,1       |
| 3.    | Максимальная производительность по тяжелой фазе, отнесенная к полному объему аппарата         | $10^{-3} \text{ м}^3/\text{м}^3\text{с}$ | 9,4        |
| 4.    | Максимальная производительность по легкой фазе, отнесенная к полному объему аппарата          | $10^{-3} \text{ м}^3/\text{м}^3\text{с}$ | 12,2       |
| 5.    | Коэффициент массопередачи при максимальной производительности                                 | $\text{кг}/\text{м}^2\text{с}$           | 0,0433     |

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОМЫШЛЕННОГО ВНЕДРЕНИЯ

Результаты экспериментальных исследований и разработки новых, более эффективных жидкостных экстракторов нашли практическое применение.

На Заволжском химическом заводе им. М.В.Фрунзе было осуществлено коренное усовершенствование стадии экстракции  $\alpha$ -нафтиламина в производстве нафтионата натрия.

Была разработана, испытана в опытно-промышленных условиях и принята к внедрению в производство двухступенчатая непрерывная технологическая схема стадии экстракции  $\alpha$ -нафтиламина из раствора нафтионата натрия бензолом.

Процесс осуществляется следующим образом.

Исходный раствор нафтионата натрия после стадии первой фильтрации поступает в напорный бак, откуда самотеком через ротаметр

- в экстрактор первой ступени. Пройдя экстрактор первой ступени, раствор нафтионата натрия также самотеком поступает в экстрактор второй ступени, а затем стекает в приемник, откуда направляется на повторную фильтрацию. Бензол из напорного бака через ротаметр подается в нижнюю часть экстрактора второй ступени, пройдя который, самотеком поступает в нижнюю часть экстрактора первой ступени. Отработанный бензол из верхней части экстрактора первой ступени поступает в испаритель пленочного типа, обогреваемый глужим паром. Отогнанный бензол конденсируется в холодильнике и через сборник возвращается в напорный бак.  $\alpha$ -нафтиламин выводится из нижней части испарителя и направляется в специальный сборник. Процесс экстрагирования ведется при температуре около  $60^{\circ}\text{C}$ .

В качестве экстрактора первой ступени было принято решение использовать роторно-дисковый экстрактор. С целью интенсификации массообмена, учитывая реальные условия технологического процесса и физико-химические свойства легкой и тяжелой фаз, была разработана новая конструкция роторно-дискового экстрактора. От известной конструкции экстрактор отличается тем, что в диспергирующих дисках выполнены спиральные прорезы, а по периферии диспергирующих дисков шарнирно расположены крестообразные перемешивающие устройства в виде рамок с проволочной сеткой.

Промышленный образец роторно-дискового экстрактора новой конструкции имеет диаметр 219 мм, общую высоту 2450 мм (рабочая высота 1600 мм), число оборотов ротора  $200 \text{ мин}^{-1}$ , ширину статорных колец 25 мм, расстояние между кольцами 80 мм, диаметр дисков 130 мм, длину крестообразных перемешивающих устройств 30 мм при ширине и высоте рамок 30 мм.

Для окончательной очистки раствора нафтионата натрия от  $\alpha$ -нафтиламина был применен пленочный экстрактор с проницаемой поверхностью орошения, промышленный вариант которого представляет собой вертикальный цилиндрический корпус, снабженный рубашкой, внутри которого имеется центральная труба с закрепленными на ней верхним и нижним стаканами, между которыми натянуты металлические нити. Тяжелая фаза подается через распределитель, помещенный внутри верхнего стакана, и выводится через патрубок. Легкая фаза подается через распределитель снизу, выходит через отверстия в верхней части трубы и патрубки. Нижняя часть корпуса экстрактора выполнена стеклянной с целью обеспечения возможности визуального контроля равномерности орошения тяжелой фазой поверхности орошения



и границы раздела фаз. Формирование пленки тяжелой фазы производится путем перелива ее через верхнюю кромку верхнего стакана. При общей высоте колонны, равной 2270 мм, высота проницаемой поверхности орошения составляет 1570 мм, диаметр корпуса 215 мм, диаметр поверхности орошения 152 мм, диаметр внутренней трубы 45 мм, расстояние между нитями 1,6 мм, толщина нити 0,55 мм, материал нити - сталь IX18H9T. Основной конструкционный материал - углеродистая сталь.

В таблице 4 приведены некоторые экспериментальные данные, полученные в ходе опытно-промышленных испытаний. Концентрация  $\alpha$ -нафтиламина пересчитывалась на сухой нафтионат натрия.

Таблица 4.

| № п/п | Дата     | Сме на | Дозировка, л/час |         | Содержание $\alpha$ -нафтиламина в пересчете на сухой нафтионат натрия, % массовые |                            |                             |
|-------|----------|--------|------------------|---------|--|----------------------------|-----------------------------|
|       |          |        | Растворы         |         | В исходном раст-воре   | После I ступени экстракции | После II ступени экстракции |
|       |          |        | нафтионата       | бензола |  |                            |                             |
| 1     | 2        | 3      | 4                | 5       | 6  | 7                          | 8                           |
| 1.    | 29.03.77 | I      | 500              | 130     | 4,3  | 0,43                       | 0,08                        |
| 2.    | 29.03.77 | I      | 370              | 130     | 4,3  | 0,32                       | 0,06                        |
| 3.    | 30.03.77 | I      | 410              | 60      | 3,8  | 0,35                       | 0,14                        |
| 4.    | 30.03.77 | I      | 325              | 60      | 3,8  | 0,25                       | 0,08                        |
| 5.    | 30.03.77 | I      | 450              | 130     | 3,8  | 0,53                       | 0,09                        |
| 6.    | 30.03.77 | II     | 410              | 95      | 3,8  | 0,51                       | 0,11                        |
| 7.    | 30.03.77 | II     | 600              | 165     | 3,8  | 0,44                       | 0,09                        |
| 8.    | 30.03.77 | III    | 540              | 200     | 3,1  | 0,25                       | 0,05                        |
| 9.    | 30.03.77 | IV     | 600              | 200     | 3,1  | 0,44                       | 0,06                        |
| 10.   | 31.03.77 | II     | 540              | 130     | 3,7  | 0,35                       | 0,07                        |
| 11.   | 31.03.77 | II     | 600              | 130     | 3,7  | 0,37                       | 0,10                        |
| 12.   | 31.03.77 | III    | 540              | 95      | 4,1  | 0,33                       | 0,11                        |
| 13.   | 1.04.77  | I      | 450              | 60      | 5,2  | 0,34                       | 0,14                        |
| 14.   | 1.04.77  | I      | 540              | 130     | 5,2  | 0,42                       | 0,08                        |
| 15.   | 1.04.77  | II     | 500              | 165     | 5,2  | 0,31                       | 0,06                        |
| 16.   | 1.04.77  | II     | 410              | 165     | 5,2  | 0,53                       | 0,05                        |
| 17.   | 1.04.77  | II     | 410              | 130     | 5,2  | 0,52                       | 0,08                        |
| 18.   | 2.04.77  | I      | 325              | 130     | 3,9  | 0,41                       | 0,05                        |
| 19.   | 2.04.77  | I      | 370              | 95      | 3,9  | 0,37                       | 0,07                        |

Путем постановки эксперимента было определено значение коэффициента распределения  $\alpha$  -нафтиламина между раствором нафтионата натрия и бензолом, которое составило 6,3.

Зависимость между комплексом:  $R_{Ex}^{0,8} R_{Ey}^{0,4} P_{Ex}^{0,4}$  и коэффициентом массопередачи, значения которых были определены по данным таблицы 4, устанавливалась методом парной корреляции. В результате получено следующее уравнение:

$$K_f = 0,81 \cdot 10^{-4} \cdot 0,97 R_{Ex}^{0,8} R_{Ey}^{0,4} P_{Ex}^{0,4} \left( \frac{S_x D_x}{\delta_{прис}} \right) + 0,06 \quad (17)$$

Отличие полученного уравнения от уравнения (13), полученного при исследовании пленочного экстрактора на модельных смесях, объясняется большой сложностью реального производственного процесса.

По результатам, приведенным в таблице 4, по количеству перенесенной массы  $\alpha$  -нафтиламина определялась величина к.п.д. экстракции, которая оказалась равной 1,23 - 1,48. Число теоретических тарелок изменялось в пределах 1,7 - 3,1 при варьировании соотношения фаз от 0,4 до 0,13 л/л. ВЭТТ = 0,5 - 0,9 м. Общее число единиц переноса составляло 2,1 - 3,1. ВЕП = 0,5 - 0,8 м.

Непрерывная двухступенчатая технологическая схема экстракции  $\alpha$  -нафтиламина в производстве нафтионата натрия обеспечивает снижение содержания  $\alpha$  -нафтиламина и повышение качества готовой продукции, улучшение условий труда, уменьшение потерь экстрагента и целевого продукта, сокращение численности обслуживающего персонала. В настоящее время на основе опытно-промышленной схемы внедряется промышленная непрерывная двухступенчатая технологическая схема экстракции  $\alpha$  -нафтиламина.

Экономический эффект, ожидаемый в результате внедрения новой технологической схемы, составляет по одному цеху 35 тыс.руб. в год.

## ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

I. Рассмотрено современное состояние и перспективы развития аппаратурного оформления процессов жидкостной экстракции в химической и смежных отраслях промышленности; выполнена классификация экстракционного оборудования, учитывающая характер сил, в поле которых осуществляется экстрагирование, конструктивные и гидродинамические особенности аппаратов.

2. В результате выполнения аналитического обзора установлена перспективность применения для обработки трудно сепарируемых загрязненных систем, склонных к образованию стойких эмульсии, аппаратов пленочного типа и показана необходимость их дальнейшего конструктивного совершенствования применительно к конкретным технологическим процессам.

3. Получено совместное аналитическое решение уравнений движения тяжелой и легкой фаз при пленочном течении тяжелой фазы в более легкой жидкой фазе для случаев течения пленки по твердой стенке и свободно текущей пленки при ламинарном безволновом режиме течения. Рассмотрены два варианта движения - плоскопараллельное и осесимметричное. Справедливость теоретических выражений подтверждена экспериментально. Полученные соотношения могут служить основой для анализа более сложных режимов течения.

4. Разработан ряд новых конструкций жидкостных экстракторов, в т.ч. вертикальный пленочный аппарат с проницаемой поверхностью орошения, характеризующийся увеличенной межфазной поверхностью и интенсивной радиальной турбулизацией.

5. В результате исследований гидродинамики вертикального трубчатого пленочного экстрактора получена зависимость количества удерживаемой в аппарате тяжелой фазы от режимов течения и физических свойств фаз, а также зависимость, характеризующая влияние этих факторов на величину гидравлического сопротивления экстрактора.

6. Исследования гидродинамики вертикального пленочного экстрактора с проницаемой поверхностью орошения показали, что устойчивость пленки тяжелой фазы определяется геометрическими параметрами поверхности орошения, режимами движения фаз и их физическими свойствами. Получена зависимость, устанавливающая связь между этими характеристиками. Установлена также зависимость, определяющая удерживающую способность экстрактора.

7. Установлено, что область устойчивой работы вертикального пленочного экстрактора с проницаемой поверхностью орошения с обеспечением формирования стабильной пленки тяжелой фазы и отсутствия заметного уноса заключена в пределах изменения числа Рейнольдса тяжелой фазы от 160 до 880 при варьировании числа Рейнольдса легкой фазы от 0 до 430.

8. В результате исследования массопередачи в вертикальном трубчатом пленочном экстракторе и в вертикальном пленочном экстракторе с проницаемой поверхностью орошения получены уравнения,

описывающие процесс массопередачи. Для экстрактора с проницаемой поверхностью орошения выполнено разложение коэффициента массопередачи на коэффициенты массоотдачи в тяжелой и легкой фазах и получены уравнения, позволяющие произвести их оценку.

9. Разработана, испытана в опытно-промышленных условиях и принята к внедрению в производство непрерывная двухступенчатая технологическая схема экстракции  $\alpha$ -нафтиламина в производстве нафтионата натрия с использованием на первой ступени разработанного роторно-дискового экстрактора, обладающего повышенной удерживающей способностью по легкой фазе, а на второй ступени - разработанного вертикального пленочного экстрактора с проницаемой поверхностью орошения, обеспечивающего высокую степень очистки; определены основные технологические показатели оборудования; обеспечено снижение содержания  $\alpha$ -нафтиламина до 0,05% вместо 0,2% и повышение качества готовой продукции; выполнены с положительными результатами опытно-промышленные испытания разработанных экстракторов применительно к ряду других технологических процессов.

#### Основные материалы работы опубликованы:

1. Исследование гидродинамики вертикального пленочного экстрактора с проницаемой перегородкой / С.Н.Кошеленко, В.А.Носач, М.Я.Розкин, А.В.Рукин - В кн.: Современные машины и аппараты химических производств. Чимкент, 1977, т.2, с.51-56.

2. Исследование процесса массопередачи в вертикальном пленочном экстракторе с проницаемой перегородкой / С.Н.Кошеленко, В.А.Носач, А.В.Рукин, А.Н.Семикопный. - В кн.: Современные машины и аппараты химических производств. Чимкент, 1977, т.2, с.60-64.

3. К вопросу о характере распределения скоростей в пленке тяжелой фазы в пленочных экстракторах / С.Н.Кошеленко, М.Я.Розкин, В.А.Носач, А.В.Рукин, А.Н.Семикопный. - Тез. докл. I Всесоюз. науч.-техн. конф. "Молодые исследователи и конструкторы - химическому машиностроению". М., 1977, с.45.

4. К вопросу о влиянии перемешивания в ротационных экстракторах на эффективность массообмена / В.А.Носач, В.Я.Стороженко, А.В.Рукин, С.Н.Кошеленко, А.Н.Семикопный, А.А.Носач. - Тез. докл. I Всесоюз. науч.-техн. конф. "Молодые исследователи и конструкторы - химическому машиностроению". М., 1977, с.45-46.

5. Исследование удерживающей способности и гидравлического сопротивления вертикального трубчатого пленочного экстрактора / С.Н.Кошеленко, В.А.Носач, М.Я.Розкин, А.В.Рукин, А.Н.Семикопный. - Тез. докл. I Всесоюз. науч.-техн. конф. "Молодые исследователи и конструкторы - химическому машиностроению". М., 1977, с.46.

6. Исследование массопередачи в вертикальном трубчатом экстракторе / С.Н.Кошеленко, В.А.Носач, А.В.Рукин, А.Н.Семикопный. - Тез. докл. I Всесоюз. науч.-техн. конф. "Молодые исследователи и конструкторы - химическому машиностроению". М., 1977, с.75.

7. А.с. 561322 (СССР). Роторно-дисковый экстрактор / В.А.Носач, А.В.Рукин, М.Я.Розкин, С.Н.Кошеленко, А.Н.Семикопный, В.Н.Попов, В.М.Роговик, Ф.С.Грабовский. - Заявл. 20.05.75, №2135986/26; Опубл. в Б.И., 1979, №27; МКИ В 01 D 11/04, В 01 D 3/30.

8. А.с. 582799 (СССР). Вертикальный пленочный теплообменник аппарат / В.А.Носач, М.Я.Розкин, А.В.Рукин, Ю.Н.Штонда, Ю.Я.Ткачук, Е.А.Ржецкий, А.Н.Семикопный, Д.И.Белкин, Г.Ф.Слезко, С.Н.Кошеленко. - Заявл. 13.01.75, №2095070/23-26; Опубл. в Б.И., 1977, №45; МКИ В 01 D 3/28.

9. Кошеленко С.Н. Современное состояние аппаратного оформления экстракционных процессов. - Рубежное, 1978. - 18с. - Рукопись представлена Рубеж. фил. Ворошиловгр. машиностр. ин-та. Деп. в ВИНТИ 16 нояб. 1978, №2214/78 деп.

10. Кошеленко С.Н. Исследование гидродинамики пленочного течения в системе "жидкость-жидкость". - Рубежное, 1979. - 8с. - Рукопись представлена Рубеж. фил. Ворошиловгр. машиностр. ин-та. Деп. в ВИНТИ 23 янв. 1980, №118хп-Д80.

11. Кошеленко С.Н. К вопросу об осесимметричном пленочном течении жидкости в жидкой фазе. - Рубежное, 1979. - 5с. - Рукопись представлена Рубеж. фил. Ворошиловгр. машиностр. ин-та. Деп. в ВИНТИ 23 янв. 1980, №120хп-Д80.

Копеленко Сергей Николаевич

Исследование гидродинамики и массопередачи в экстракторах  
пленочного типа

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

---

Подписано к печати 26.12.80 г. Печать офсетная.  
Формат 60<sup>x</sup>84/16. Печ. л. I. Усл. печ. л. 0,98.  
Заказ № 453I. Тираж 100.

---

Отпечатано на ротапринтере Рубежанской городской типографии  
349870, г. Рубежное Ворошиловградской обл.,  
ул. Интернациональная, 15.