

66  
196  
Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 66.02.021

**Люtareвич Илья Анатольевич**

**СТРУКТУРА ПОТОКОВ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ  
И РАЗДЕЛЕНИЯ ФАЗ В ДИСПЕРСИОННО-ПЛЕНОЧНОМ  
АППАРАТЕ РОТОРНОГО ТИПА**

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.17.08 «Процессы и аппараты химических технологий»

Минск 2008

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный технологический университет» на кафедре «Процессы и аппараты химических производств».

Научный руководитель

**Марков Владимир Алексеевич**,  
доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедрой «Процессы и аппараты  
химических производств»,  
УО «Белорусский государственный  
технологический университет»

Официальные оппоненты:

**Плехов Иван Максимович**,  
доктор технических наук, профессор,  
УО «Белорусский государственный  
технологический университет», кафед-  
ра «Машины и аппараты химических и  
силикатных производств»;

**Перминов Евгений Викторович**,  
кандидат технических наук, доцент,  
УО «Белорусский государственный эконо-  
мический университет», кафедра «То-  
вароведения непродовольственных това-  
ров»

Опонирующая организация

ОАО «Гродненский научно-исследова-  
тельский и проектный институт азот-  
ной промышленности и продуктов ор-  
ганического синтеза»

Защита состоится 28 марта 2008 г. в 12.00 часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.08.02 при УО «Белорусский государственный технологический университет» (Беларусь, 220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а) в аудитории 240 корп. 4. Тел. 226-00-39; факс (017) 227-62-17, электронная почта: root@bstu/unibel.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке УО «Белорусский государственный технологический университет».

Автореферат разослан 22 февраля 2008 г.

Ученый секретарь  
совета по защите диссертаций  
доктор технических наук, доцент



Левданский А.А.

## ВВЕДЕНИЕ

Сравнительный анализ конструкций аппаратов для проведения процессов разделения гомогенных и гетерогенных сред (массообменных, очистки газов от твердых частиц и капель жидкости), а также тепловых процессов показывает, что более интенсивное взаимодействие и разделение фаз достигается при закрученном движении потоков. Использование закрученного движения приводит к увеличению поверхности контакта, повышению коэффициентов тепло- и массоотдачи, значительному снижению уноса, уменьшению размеров аппарата и тем самым сокращению затрат на проведение процесса.

Известны аппараты, взаимодействие фаз в которых осуществляется с использованием центробежных сил (циклонные распыливающие, центробежные, роторно-пленочные и др.). Контакт фаз в некоторых аппаратах такого типа, в основном, осуществляется либо в зоне диспергированной жидкости, либо в зоне пленочного течения. Кроме того, из-за сложного характера движения потоков гидродинамика и массообмен в роторных аппаратах изучены еще недостаточно. Поэтому создание новых конструкций роторных дисперсионно-пленочных аппаратов, позволяющих повысить эффективность взаимодействия фаз, исследование их гидродинамических и массообменных параметров, необходимых для разработки методики их расчета, является актуальной задачей.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

*Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами.* Исследования, выполненные по теме диссертации, проводились в рамках государственных тем: «Исследовать комбинированные способы интенсификации процессов тепломассообмена и разделения многофазных систем в полях массовых сил, разработать математические модели с алгоритмами по реализации их в инженерных расчетах» ГБ 21-044 (2003 г.), «Разработка высокоэффективных аппаратов и машин для проведения химико-технологических процессов в гетерогенных системах» ГБ 26-01 (2005 г.), «Разработка и исследование новых способов интенсификации тепломассообменных процессов и ресурсоэнергосберегающих технологий» ГБ 26-01 (2006 г.); гранта Министерства образования РБ «Гидродинамика и массообмен в роторном аппарате при дисперсионно-пленочном взаимодействии фаз» ГБ 27-010 (2007 г.).

*Цель и задачи исследования.* Цель диссертационной работы – теоретические и экспериментальные исследования в новом роторном дисперсионно-пленочном аппарате структуры и гидродинамики газожидкостных потоков, закономерностей процессов разделения смесей десорбционным методом, а также запыленных газов посредством мокрой очистки; энергозатрат на проведение процессов и получение расчетных зависимостей для определения основных рабочих характеристик.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. На основе обзора известных конструкций роторных аппаратов, анализа механизма взаимодействия фаз в них определен подход к созданию перспективной конструкции роторного дисперсионно-пленочного аппарата.

2. Разработана новая конструкция роторного дисперсионно-пленочного аппарата, позволяющего проводить как тепломассообменные процессы, так и процессы мокрой очистки газовых потоков от твердой фазы.

3. Проведен комплекс экспериментальных и теоретических исследований направленных на:

– изучение структуры и особенностей движения газовой и жидкой фаз в роторном аппарате;

– математическое описание движения жидкости и газа в аппарате и решение полученных уравнений;

– изучение рабочих характеристик аппарата (влияние расходных и геометрических параметров на эффективность процессов взаимодействия и сепарации газожидкостных систем, энергозатрат на проведение процесса), получение зависимостей для их расчета и определение оптимальных параметров.

4. Разработана методика инженерного расчета важнейших характеристик роторного дисперсионно-пленочного аппарата и проведены испытания конструкции в промышленных условиях.

Объект исследования – роторный дисперсионно-пленочный аппарат.

Предмет исследования – взаимодействие и сепарация фаз в полях массовых сил, структура газового потока, пленочное течение жидкости, диспергирование жидкости вращающимся ротором, энергозатраты на проведение процесса.

Выбор объекта и предмета исследования обоснован недостатками в конструктивном исполнении и изученности тех процессов, которые происходят в существующих роторных аппаратах, а также необходимостью совершенствования и создания новых конструкций.

*Положения, выносимые на защиту.*

1. Подходы к проектированию и разработке конструкции роторного дисперсионно-пленочного аппарата.

2. Установленные закономерности распределения скоростей газа в различных сечениях контактной ступени роторного дисперсионно-пленочного аппарата.

3. Теоретическое описание движения пленки жидкости по внутренней поверхности вращающегося конуса с расширяющимся сечением по высоте, а также результаты экспериментальных исследований диспергирования им жидкости.

4. Математическое описание движения капель жидкости в закрученном газовом потоке.

5. Результаты экспериментальных исследований пленочного течения жидкости по стенке цилиндрического корпуса под воздействием закрученного газового потока.

6. Результаты исследования рабочих характеристик роторного дисперсионно-пленочного аппарата и полученные зависимости для расчета диспергирующих устройств, критической скорости газового потока, относительного уноса жидкости, объемного коэффициента массоотдачи, эффективности массообмена, гидравлического сопротивления и потребляемой мощности.

**Личный вклад соискателя.** Автор принимал участие в постановке задач исследования, разработке методик и проведении теоретических и экспериментальных исследований. Соискателем спроектирован и изготовлен лабораторный роторный дисперсионно-пленочный аппарат, на котором проведены экспериментальные исследования. Автором выполнена обработка и анализ полученных данных. Все результаты работы получены соискателем самостоятельно.

**Апробация результатов диссертации.** Результаты исследований докладывались на следующих конференциях:

54-я студенческая научно-техническая конференция. – Минск: УО «БГТУ», 2003; IX Республиканская научная конференция студентов и аспирантов РБ «НИРС-2004». – Гродно: ГрГУ, 2004; 55-я студенческая научно-техническая конференция. – Минск: УО «БГТУ», 2004; 56-я студенческая научно-техническая конференция. – Минск: УО «БГТУ», 2005; V Международная научно-техническая конференция «Техника и технология пищевых производств». – Могилев: УО «МГУП», 2005; X Республиканская научная конференция студентов и аспирантов высших учебных заведений РБ «НИРС-2005». – Минск: БГТУ, 2005; V Международная научная конференция студентов и аспирантов «Техника и технология пищевых производств». – Могилев: УО «МГУП», 2006; 59-я научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов – Ярославль: ЯГТУ, 2006; Международная научно-техническая конференция «Техника и технология защиты окружающей среды». – Минск: УО «БГТУ», 2006; VI Международная научно-техническая конференция «Техника и технология пищевых производств». – Могилев: УО «МГУП», 2007; 7-я Международная научно-техническая конференция «Энерго- и материалосберегающие экологически чистые технологии». – Гродно: ГрГУ, 2007.

**Опубликованность результатов диссертации.** Основные результаты диссертационной работы изложены в 9 научных статьях, 2 материалах конференции, 10 тезисах докладов на республиканских и зарубежных конференциях и 4 отчетах по НИР. Получено положительное решение по заявке на патент РБ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения и приложений, содержит 61 иллюстрацию и 2 таблицы. Список использованных источников включает 115 наименований. Полный объем диссертации – 153 страницы.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**В первой главе** сделан анализ работы и конструкций существующих роторных аппаратов для проведения процессов локальной очистки газовых потоков от компонентов  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}_2$  и др. методом абсорбции, а также процессов ректификации и предложена их классификация. Среди них выделены роторные дисперсионно-пленочные аппараты, отличающиеся повышенной эффективностью массообмена, не очень высоким гидравлическим сопротивлением при сравнительно большей пропускной способности по газовой фазе. Кроме того, они при определенных условиях могут быть использованы для мокрой очистки газов.

Сформулированы основные подходы к разработке новых роторных дисперсионно-пленочных аппаратов для проведения массообменных процессов, а также процессов разделения гетерогенных систем:

- необходимо использовать закрученный газовый поток для сепарации и турбулизации контактирующих фаз с целью интенсификации проводимых процессов;

- конструкция ротора (диспергирующего устройства) должна быть такой, чтобы обеспечивалось равномерное распределение жидкости по его высоте, стабильность в работе, простота в изготовлении;

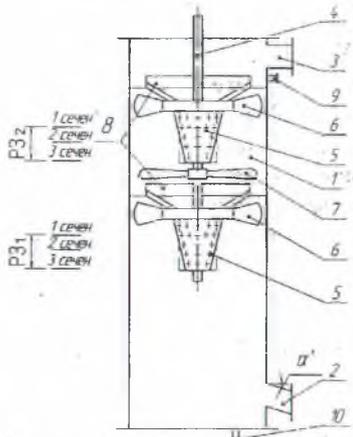
- распыл жидкости осуществлять вращающимся ротором, что позволит увеличить долю свободного сечения аппарата, а следовательно, и пропускную способность по газовой фазе;

- использовать ротор для эффективной сепарации контактирующих фаз, особенно при мокрой очистке газов от взвешенной твердой фазы;

- для локальной очистки газов диаметр аппарата должен быть в пределах 0.1–0.5 м.

**Вторая глава** посвящена разработке и экспериментальному исследованию новой конструкции роторного дисперсионно-пленочного аппарата.

С учетом сформулированных выше подходов к разработке аппаратов такого типа создана конструкция двухступенчатого роторного дисперсионно-пленочного аппарата, схематично представленная на рисунке 1.



1 – корпус; 2, 3 – тангенциальные входной и выходной патрубки соответственно; 4 – вал; 5 – диспергирующие устройства; 6 – лопастные отбойники; 7 – крыльчатка; 8 – переливные устройства; 9, 10 – штуцера для подвода и отвода жидкости

**Рисунок 1** – Конструкция роторного дисперсионно-пленочного аппарата

Аппарат работает следующим образом: газовый поток, подвергаемый очистке, подается в аппарат снизу (первая ступень контакта) и, пройдя через тангенциально установленный к корпусу 1 входной патрубок 2, закручивается. Затем он следует на вторую ступень контакта, где крутка газового потока поддерживается крыльчаткой 7. При этом крыльчатка способствует закрутке и транспортировке газового потока, который удаляется из аппарата через тангенциальный патрубок 3. Жидкость поступает через штуцер 9 по переливному устройству 8 во вращающееся диспергирующее устройство 5 (диспергатор) верхней (второй) ступени контакта, диспергируется на капли и в дальнейшем стекает в виде пленки по стенке аппарата на следующую ступень контакта. Далее процесс диспергирования и взаимодействия фаз повторяется и жидкость через штуцер 10 отводится из аппарата. Таким образом, взаимодействие газа с жидкостью осуществляется как в

дисперсном, так и в пленочном режимах. Для предотвращения уноса жидкой фазы закрученным газовым потоком на ступени контакта, а также из аппарата на диспергирующих устройствах устанавливаются лопастные отбойники б с наклонными лопастями.

В задачу экспериментальных и аналитических исследований новой конструкции роторного дисперсионно-пленочного аппарата входило изучение:

- **гидродинамических характеристик диспергирующего устройства:** скоростей движения пленки жидкости внутри диспергатора; толщины пленки жидкости; равномерности распыла жидкости по высоте диспергирующего устройства; коэффициента расхода;

- **структуры и особенностей движения газожидкостного потока в рабочей зоне контактной ступени:** профилей скоростей закрученного газового потока; движения частиц жидкости в закрученном газовом потоке; влияния жидкой фазы на структуру газового потока;

- **режимов течения пленки жидкости по корпусу аппарата:** углы закрутки пленки жидкости; критические скорости газового потока;

- **основных рабочих характеристик:** относительного уноса жидкости  $e$ ; объемного коэффициента массоотдачи  $\beta_{Vx}$  и эффективности массообмена  $E_x$ ; гидравлического сопротивления контактной ступени  $\Delta P_{к.с.}$ ; затрат мощности на привод ротора  $N$ .

При проектировании роторных аппаратов, в которых распыл жидкости происходит в результате ее истечения из отверстий диспергирующего устройства под действием массовых сил, необходимо обеспечить их стабильную работу. При этом очень важно достижение равномерного истечения жидкости из всех отверстий по высоте диспергирующего устройства с избеганием перелива через отбортовку.

Для теоретических и экспериментальных исследований в качестве диспергирующего устройства был апробирован усеченный перфорированный конус с большим верхним основанием, поскольку конусность способствует движению пленки жидкости вверх по стенке и повышению центробежных сил, что тем самым увеличивает скорости движения жидкости через отверстия. Для стационарного осесимметричного ламинарного движения пленки вязкой жидкости по внутренней стенке вертикального конуса, вращающегося с постоянной угловой скоростью, рассмотрено уравнение Навье–Стокса и получены выражения для расчета касательной и продольной составляющих скорости

$$\mu \cdot \frac{\partial}{\partial r} \cdot \left( \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \cdot (r \cdot U_{\varphi}) \right) = 0, \quad (1)$$

$$\mu \cdot \left( \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \cdot \left( r \cdot \frac{\partial U_l}{\partial r} \right) \right) - \rho \cdot (a_l - g_l) = 0, \quad (2)$$

где  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости жидкости, Па·с;  $r$  – текущий радиус пленки жидкости, м;  $U_{\varphi}$ ,  $U_l$  – касательная и продольная (вдоль образующей конуса) составляющие скорости пленки жидкости, м/с;  $a_l$ ,  $g_l$  – проекции цен-

тробежного ускорения и ускорения свободного падения на образующую конуса,  $\text{м/с}^2$ .

В результате решения уравнений и использования разложения зависимостей в ряд по степеням  $\bar{\delta}$  получены выражения для определения:

– средних скоростей пленки жидкости

$$\bar{U}_\varphi = \frac{\omega \cdot R}{1 + (1 - \bar{\delta})^2} \cdot \frac{1}{\bar{\delta}} \cdot \left( \frac{1 - (1 - \bar{\delta})^2}{2} + (1 - \bar{\delta})^2 \cdot \ln(1 - \bar{\delta}) \right), \quad (3)$$

$$\bar{U}_l = \frac{(a_l - g_l) \cdot R^2}{4 \cdot \nu} \cdot \frac{1}{\bar{\delta}} \cdot \left( \frac{1 - (1 - \bar{\delta})^3}{3} - \bar{\delta} + 2 \cdot (1 - \bar{\delta})^2 \cdot \ln(1 - \bar{\delta}) + 2 \cdot \bar{\delta} \cdot (1 - \bar{\delta})^2 \right), \quad (4)$$

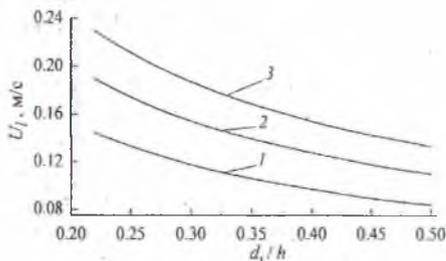
где  $\omega$  – угловая скорость вращения конуса,  $\text{с}^{-1}$ ;  $R$  – текущий радиус конуса,  $\text{м}$ ;  $\bar{\delta} = \delta / R$ ;  $\delta$  – толщина пленки жидкости,  $\text{м}$ ;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости жидкости,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

– величины толщины пленки жидкости

$$\delta = \sqrt[3]{6 \cdot q \cdot \nu / (\omega^2 \cdot R \cdot \sin \beta - g \cdot \cos \beta)}, \quad (5)$$

где  $\beta$  – угол наклона образующей конуса с вертикалью, град;  $q$  – удельный расход жидкости (плотность орошения) на единицу периметра конуса,  $\text{м}^3/(\text{м} \cdot \text{с})$ .

Полученные данные позволяют оценить гидродинамические характеристики пленочного течения в зависимости от исходных данных и определить режимы пленочного течения.



$1 - q = 0.2 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с}); 2 - 0.3; 3 - 0.4;$   
 $n = 750 \text{ мин}^{-1}$

**Рисунок 2 – Продольная составляющая скорости пленки жидкости при угле образующей конуса  $7^\circ$**

Из рисунка 2 видно, что осевая скорость с увеличением высоты снижается, в то же время тангенциальная за счет увеличения радиуса возрастает и, следовательно, толщина пленки уменьшается. Поскольку в диспергирующем устройстве предусмотрены отверстия для жидкости, то распределение каплей и их скорость движения будут различными.

Полученная математическая модель позволяет рассчитать гидродинамические характеристики пленочного движения в зависимости от геометрических параметров конуса, его частоты вращения и нагрузок по жидкости. Однако анализ показывает, что для конических диспергирующих устройств, как и для цилиндрических, следует предусматривать отбортовку в верхней части.

Для перфорированного диспергатора конической формы с отбортовкой в верхней части проведены экспериментальные исследования по изучению

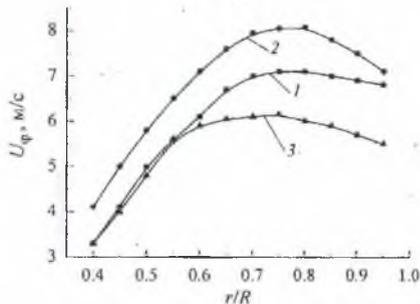
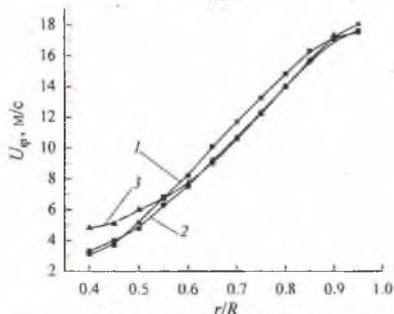
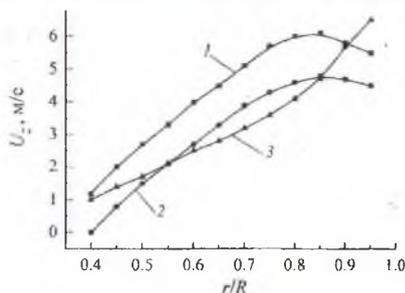
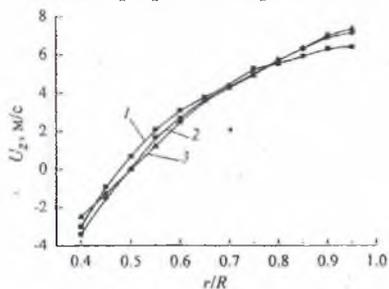
влияния частоты вращения ротора и угла образующей конуса на равномерность распределения жидкости по его высоте.

После определения условий равномерного распределения жидкости по высоте диспергирующего устройства дальнейшие исследования были направлены на изучение движения частиц жидкости (капель) в зоне между диспергатором и стенкой аппарата, для чего необходимо было знать структуру газового потока (распределение в зоне осевых и тангенциальных скоростей).

Профили тангенциальных и осевых скоростей в роторном дисперсионно-пленочном аппарате исследовались при разных средних скоростях газового потока. При этом диаметр аппарата составлял 0.195 м (рисунок 1), диспергирующих устройств – 0.054 м, угол  $\alpha$  входного патрубка к горизонтали –  $30^\circ$ . Диспергирующие устройства были выполнены высотой 0.13 м с отбортовкой, чтобы избежать перелива жидкости.

Замеры локальных скоростей в аппарате проводились с помощью зонда в трех сечениях рабочих зон аппарата (на рисунке 1 зоны  $P_{31}$  и  $P_{32}$ ) при различных режимах его работы (при переменных средних скоростях газа на сечение  $w_{cp} = 1.6-4.2$  м/с и частоте вращения ротора  $n = 600-1400$  мин<sup>-1</sup>).

Результаты исследований на участке  $P_{31}$  (рисунок 3) указывают на то, что изменение профилей скоростей незначительно отличается по высоте аппарата.



1 –  $n = 600$  мин<sup>-1</sup>; 2 – 1000; 3 – 1400

Рисунок 3 – Профили осевой и тангенциальной скоростей во втором сечении  $P_{31}$  аппарата при различных оборотах ротора и  $w_{cp} = 3$  м/с

1 – 1-ое сечение; 2 – 2-ое; 3 – 3-е

Рисунок 4 – Профили осевой и тангенциальной скоростей по сечению аппарата в зоне  $P_{32}$  при  $w_{cp} = 3$  м/с и  $n = 1000$  мин<sup>-1</sup>

По высоте второй ступени контакта (рабочая зона P<sub>32</sub>) распределение скоростей газа отличается от первой, особенно тангенциальных скоростей (рисунок 4). Это объясняется тем, что структура газового потока на первой ступени контакта сформирована тангенциальным вводом газа, а на второй ступени — и за счет влияния крыльчатки, установленной на валу.

Поскольку профили локальных скоростей газового потока в разработанной конструкции аппарата различны, то представляло интерес дальнейшее их изменение по высоте, если аппарат будет многоступенчатым. С этой целью конструкция, представленная на рисунке 1, была дооборудована третьей ступенью контакта (аналогично второй) и проведены замеры скоростей газа. Исследования показали, что профили локальных скоростей незначительно отличаются от тех, которые были получены для второй ступени контакта.

Наличие жидкой фазы в закрученном газовом потоке незначительно повлияло на изменение профилей скоростей, что также подтверждено экспериментально.

После изучения характера изменения локальных скоростей газового потока в рабочих зонах роторного дисперсионно-пленочного аппарата были проведены расчеты траекторий движения частиц диспергируемой жидкости, что позволяет определить время контакта фаз в дисперсионном режиме и, следовательно, оценить влияние режимных параметров работы аппарата на эффективность проводимых в нем процессов.

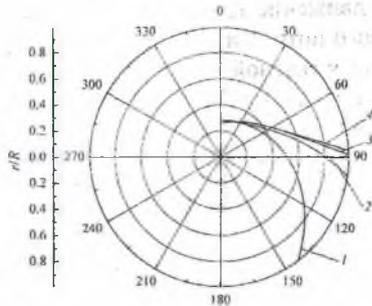
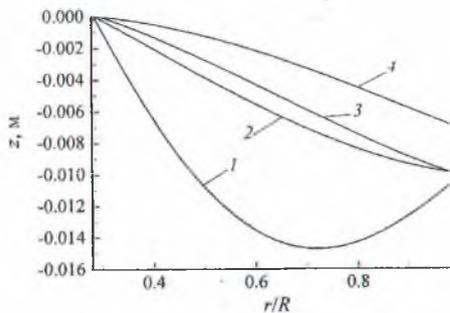
При расчетах траекторий движения капель жидкости в закрученном потоке сделаны следующие допущения: на частицу жидкости действуют основные обобщенные силы — сила гидродинамического воздействия со стороны газового потока и сила тяжести; капля имеет шарообразную форму и взаимное влияние частиц жидкости при их движении отсутствует.

На основании уравнения Лагранжа II рода с учетом принятых допущений получена система дифференциальных уравнений, описывающая движение капель жидкости в закрученном потоке:

$$\begin{cases} dv_r/d\tau - v_\varphi^2/r = k \cdot \psi \cdot v_r \cdot |\vec{v}_{от}|, \\ dv_\varphi/d\tau + v_\varphi \cdot v_r/r = k \cdot \psi \cdot (U_\varphi - v_\varphi) \cdot |\vec{v}_{от}|, \\ dv_z/d\tau = k \cdot \psi \cdot (U_z - v_z) \cdot |\vec{v}_{от}| - g, \end{cases} \quad (6)$$

где  $v_r, v_\varphi, v_z$  — соответственно радиальная, тангенциальная и осевая скорости капли, м/с;  $r$  — текущий радиус, м;  $k = 3 \cdot \rho_r / (4 \cdot \rho_q \cdot d_q)$ . Здесь  $\rho_r, \rho_q$  — плотность газа и частицы жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $d_q$  — диаметр частицы жидкости, м;  $\psi$  — коэффициент сопротивления среды;  $|\vec{v}_{от}|$  — модуль полной относительной скорости капли, м/с;  $U_\varphi, U_z$  — радиальная и тангенциальная составляющие скорости газа, м/с;  $g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Для решения системы (6) был применен численный метод Рунге-Кутты-Фельберга. С помощью ЭВМ произведен расчет движения капель жидкости различного размера и получены траектории их движения (рисунок 5).



1 -  $d_q = 0.1$  мм, 2 - 0.5; 3 - 1; 4 - 1.2

**Рисунок 5 – Движение частиц жидкости в вертикальной и горизонтальной плоскостях при  $w_{cp} = 3$  м/с и  $n = 1000$  мин<sup>-1</sup>**

Анализ представленных зависимостей показывает, что мелкие частицы (кривая 1) сразу увлекаются газовым потоком и практически соответствуют его траектории. Более крупные частицы в силу своей инерционности движутся вниз под действием массовых сил и газовый поток не оказывает существенного влияния на их движение. Исходя из этого, можно отметить, что процесс массообмена, мокрой очистки газа от твердых взвешенных частиц желательнее проводить при более мелком диспергировании жидкости, поскольку увеличивается не только поверхность межфазного контакта, но и время пребывания частиц в аппарате.

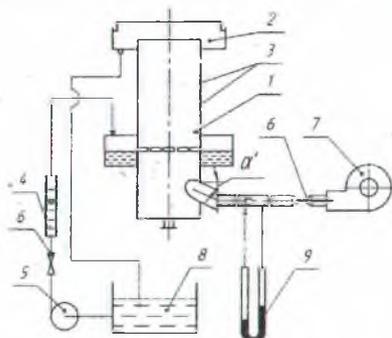
Частота вращения ротора на движение частиц (в вертикальной плоскости) как малого, так и большого диаметров не оказывала существенного воздействия. При движении частиц в горизонтальной плоскости увеличение частоты вращения ротора уменьшает влияние газового потока на движение более крупных частиц, так как увеличивается центробежная сила. Для мелких частиц воздействие центробежной силы уменьшается и на их движение частота вращения ротора оказывает меньшее воздействие по сравнению с влиянием газового потока.

Полученные теоретические траектории движения капель жидкости сравнивались с экспериментальными исследованиями, в которых изучались траектории движения твердых частиц в закрученном потоке. Получена удовлетворительная сходимость сравниваемых результатов. Среднее относительное отклонение расчетных и экспериментальных величин составило около 9%. Поэтому для инженерных расчетов движения капель диспергируемой жидкости можно использовать уравнения (6).

Результаты анализа движения капель жидкости показывают, что с уменьшением диаметра капель жидкости возможен их унос из зоны контакта при увеличении диаметра аппарата. Поэтому аппарат целесообразно изготавливать диаметром не более 0.5–1 м, что соответствует рекомендациям других авторов для такого типа аппаратов.

В разработанном дисперсионно-пленочном аппарате взаимодействие фаз осуществляется как в объеме распыленной жидкости – дисперсионном режиме,

так и в зоне ее пленочного закрученного течения по корпусу аппарата. При этом движение пленки жидкости будет изменяться в зависимости от скорости газового потока и может перейти от противоточного к прямоточному (по отношению к газовой фазе), что нежелательно для разработанной конструкции аппарата. Поэтому были проведены исследования с целью определения критической скорости газового потока  $w_{кр}$ , при которой противоточное движение закрученных газа и пленки жидкости переходит в прямоточное.



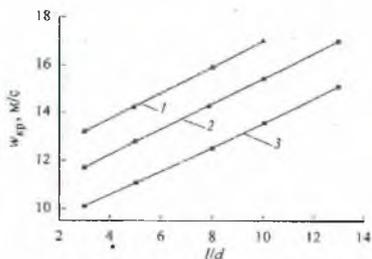
1 – цилиндрический корпус; 2 – отбойник; 3 – отверстия для ввода красителя; 4 – ротаметр; 5 – насос; 6 – вентили; 7 – вентилятор; 8 – емкость для жидкости; 9 – дифманометр

**Рисунок 6 – Схема экспериментальной установки для исследования пленочного течения жидкости**

Опыты проводились на системе вода–воздух с изменением параметров в пределах: нагрузок по жидкости  $q' = 0.15–0.85 \text{ м}^3/(\text{м}\cdot\text{ч})$ , угла входного патрубка к цилиндрическому корпусу  $\alpha' = 30–60^\circ$ .

Критическая скорость определялась постепенным снижением заранее принятой скорости газового потока, при которой наблюдалось прямоточное движение фаз, до критической скорости.

При плотности орошения  $q' = 0.46 \text{ м}^3/(\text{м}\cdot\text{ч})$  на рисунке 7 представлена зависимость  $w_{кр}$  от высоты цилиндрического корпуса. Углы наклона входного патрубка  $30^\circ$  соответствуют наименьшие критические скорости газа, величина которых возрастает с увеличением длины канала, что обусловлено ростом касательных напряжений на границе раздела фаз.



1 –  $\alpha' = 60^\circ$ ; 2 –  $45^\circ$ ; 3 –  $30^\circ$

**Рисунок 7 – Влияние относительной высоты цилиндрического корпуса на критическую скорость газового потока**

Исследования закрученного газожидкостного потока проводились на экспериментальной установке (рисунок 6). В нижнюю часть цилиндрического корпуса через тангенциальный патрубок подавался газ, который закручивал пленку жидкости. При проведении опытов определялись углы закручивания в зависимости от средней скорости газового потока в корпусе и плотности орошения на разных высотах корпуса.

Опыты проводились на системе вода–воздух с изменением параметров в пределах: нагрузок по жидкости  $q' = 0.15–0.85 \text{ м}^3/(\text{м}\cdot\text{ч})$ , угла входного патрубка к цилиндрическому корпусу  $\alpha' = 30–60^\circ$ .

Критическая скорость определялась постепенным снижением заранее принятой скорости газового потока, при которой наблюдалось прямоточное движение фаз, до критической скорости.

В результате обработки опытных данных для исследуемого диапазона получено выражение для расчета  $w_{кр}$

$$w_{кр} = 9.641 \cdot \alpha'^{0.344} \cdot (l/d)^{0.257} \cdot q'^{0.052}, \quad (7)$$

где  $\alpha'$  – угол входного патрубка к цилиндрическому корпусу, рад.

Максимальное отклонение опыт-

ных и расчетных значений  $pc$   $w_{кр}$  не превышает 4.1%.

На данном этапе изучения гидродинамики роторного дисперсионно-пленочного аппарата получены результаты, позволяющие установить его верхний предел работы по газовой фазе, при котором пленка жидкости еще будет стекать по стенке корпуса аппарата.

Поскольку унос жидкости газовым потоком из контактной зоны на расположенную выше ступень приводит к выравниванию концентраций и снижению движущей силы по аппарату, ухудшает массообмен и ограничивает допустимые газовые нагрузки, одним из этапов дальнейших исследований было изучение влияния режимных параметров на унос жидкости.

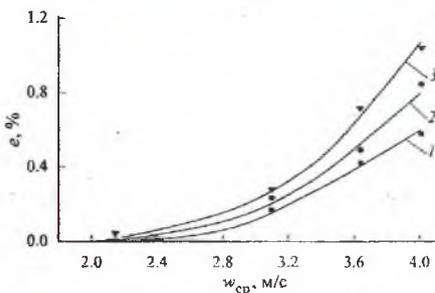
Изучалось влияние на унос основных рабочих параметров в пределах их изменения: плотности орошения —  $q = 3-8 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ; средней скорости газа на полное сечение аппарата —  $w_{ср} = 2-4 \text{ м/с}$ ; числа оборотов ротора —  $n = 600-1400 \text{ мин}^{-1}$ . В качестве жидкой фазы использовалась вода, газовой — воздух. Величина относительного уноса жидкости определялась по формуле

$$e = (L_{ун} / L_{под}) \cdot 100 \%, \quad (8)$$

где  $L_{ун}$  — количество уносимой жидкости,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $L_{под}$  — количество подаваемой жидкости в аппарат,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Как следует из рисунка 8, величина относительного уноса жидкости в роторном дисперсионно-пленочном аппарате возрастает с повышением средней скорости газа и числа оборотов ротора, что объясняется увеличением силы гидродинамического воздействия на капли со стороны газового потока и уменьшением размеров капель при диспергировании жидкости.

С повышением плотности орошения величина относительного уноса жидкости снижается. Полученные данные свидетельствуют о том, что общий унос жидкости в аппарате определяется, в основном, явлением вторичного уноса. С повышением плотности орошения увеличивается толщина жидкостной пленки на стенке корпуса аппарата, а это приводит к снижению количества брызг, образующихся здесь при ударе летящих с большой скоростью капель.



$1 - n = 600 \text{ мин}^{-1}$ ;  $2 - 1000$ ;  $3 - 1400$

Рисунок 8 — Зависимость величины относительного уноса жидкости от средней скорости газа при  $q = 6.4 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$

В результате обработки опытных данных получена эмпирическая зависимость для расчета величины относительного брызгоуноса

$$e = 1.254 \cdot w_{ср}^{2.54} \cdot q^{-0.52} \cdot n^{0.87} \quad (9)$$

Среднее относительное отклонение расчетных и опытных значений не превышает 6%.

**Третья глава** посвящена исследованию процессов массообмена и мокрой очистки газа в роторном дисперсионно-пленочном аппарате.

При исследовании массообменных характеристик разработанной конструкции аппарата использовалась методика, основанная на десорбции диоксида углерода из воды в воздушный поток. Содержание  $\text{CO}_2$  в воде определялось по кислотности раствора, которая замерялась рН-метром. По экспериментальным данным рассчитывались объемный коэффициент массоотдачи  $\beta_{Vx}$  и эффективность массообмена  $E_x$  в жидкой фазе по известным формулам

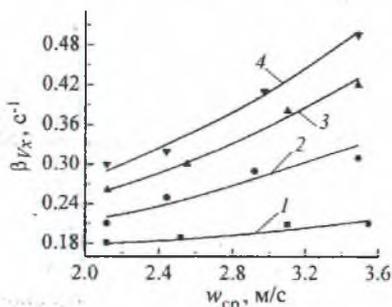
$$\beta_{Vx} = \frac{L}{V} \cdot \ln \frac{C_n}{C_k}, \quad (10)$$

$$E_x = 1 - \frac{1}{\exp\left(\frac{\beta_{Vx} \cdot V}{L}\right)}, \quad (11)$$

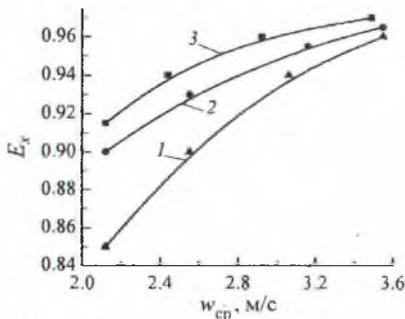
где  $L$  – расход жидкой фазы,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $V$  – рабочий объем аппарата,  $\text{м}^3$ ;  $C_n, C_k$  – начальная и конечная концентрации раствора, %.

Установлено, что объемный коэффициент массоотдачи (контактной ступени) возрастает с повышением скорости газа, плотности орошения (рисунк 9), а также числа оборотов ротора вследствие турбулизации потоков, образования большего количества капель (в том числе меньшего размера), что приводит к увеличению поверхности контакта фаз.

Эффективность массообмена контактной ступени также возрастает с увеличением скорости газа, числа оборотов ротора и достигает 97% (рисунк 10).



$1 - q = 3.3 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}); 2 - 5; 3 - 6.4; 4 - 8$   
**Рисунок 9** – Зависимость объемного коэффициента массоотдачи от средней скорости газа при  $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$



$1 - n = 600 \text{ мин}^{-1}; 2 - 1000; 3 - 1400$   
**Рисунок 10** – Зависимость эффективности массообмена от средней скорости газа при  $q = 5 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$

По результатам исследований получены эмпирические уравнения для расчета объемного коэффициента массоотдачи и эффективности массообмена контактной ступени. Разница между рассчитанными и экспериментальными значениями не превышает 7.5%.

Проведенный сравнительный анализ эффективности массообмена разработанной конструкции дисперсионно-пленочного аппарата с эффективностью

ситчатых тарелок и прямоточных контактных устройств центробежного типа показал более высокую его эффективность.

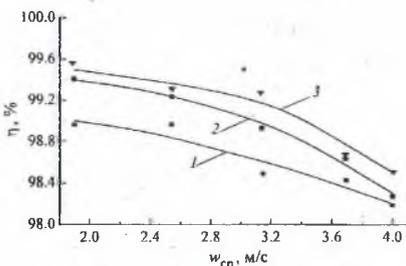
Исследования процесса мокрой очистки газовых потоков от твердых частиц для разработанного роторного дисперсионно-пленочного аппарата проводились в производственных условиях в цехе предварительной подготовки газовых баллонов к освидетельствованию на ОАО «Крион». При полупромышленных испытаниях режимные параметры работы аппарата были такими, как и при экспериментальных исследованиях. Средний диаметр твердых частиц в запыленном газовом потоке составлял 26 мкм. Эффективность очистки определялась по формуле

$$\eta = (1 - m_{\text{вых}} / m_{\text{вх}}) \cdot 100, \% \quad (12)$$

где  $m_{\text{вых}}$ ,  $m_{\text{вх}}$  – масса пыли на выходе из аппарата и входе в него (с учетом уноса капель жидкости), кг.

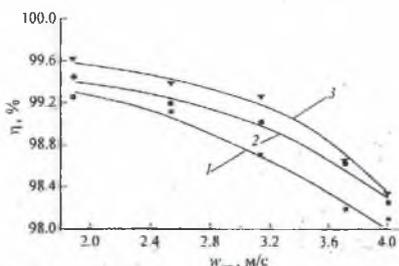
Степень очистки незначительно уменьшается с ростом  $w_{\text{ср}}$  (рисунок 11). Это связано с тем, что большие локальные скорости газового потока способствуют уносу частиц пыли аналогично капельному брызгоуносу.

С возрастанием  $n$  (рисунок 11) увеличиваются скорости капель жидкости, которые в момент полета увлекают твердые частицы из газового потока к стенке аппарата и, следовательно, количество уносимой из аппарата пыли уменьшается.



$$n = 1000 \text{ мин}^{-1}$$

$$1 - q = 3.3 \text{ м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{ч}); 2 - 6.4; 3 - 8$$



$$q = 6.4 \text{ м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{ч})$$

$$1 - n = 600 \text{ мин}^{-1}; 2 - 1000; 3 - 1400$$

Рисунок 11 – Зависимость эффективности очистки для частиц  $d_{\text{ср}} = 26 \text{ мкм}$  от  $w_{\text{ср}}$

Проведенные полупромышленные испытания роторного дисперсионно-пленочного аппарата показали его высокую эффективность в процессе мокрой очистки газа от твердых взвешенных частиц и перспективность дальнейшего использования в процессах локальной газоочистки.

В четвертой главе рассмотрены факторы, влияющие на энергозатраты при осуществлении процессов. Важными из них являются гидравлическое сопротивление контактной ступени  $\Delta P_{\text{к.с}}$  и потребляемая ротором мощность  $N$ . В результате проведенных исследований было установлено, что плотность орошения и частота вращения ротора существенного влияния на гидравлическое сопротивление не оказывали. Максимальное относительное отклонение между значениями  $\Delta P_{\text{к.с}}$  в указанном диапазоне изменения нагрузок по жидкости и

числа оборотов ротора не превышало 3%. Для расчета гидравлического сопротивления получена зависимость

$$\Delta P_{\text{к.с.}} = 36.581 \cdot w_{\text{ср}}^{1.74} \quad (13)$$

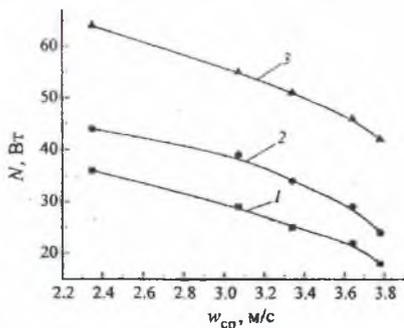
Разница рассчитанных по уравнению (13) и определенных экспериментально значений не превышает 1.5 %.

Потребляемая ротором мощность определялась по разности мощностей  $N$ , потребляемых приводным электродвигателем и двигателем, на котором установлен ротор. Уменьшение потребляемой мощности с возрастанием  $w_{\text{ср}}$  (рисунок 12) объясняется тем, что газовый поток воздействует на крыльчатку, установленную на валу, и таким образом способствует вращению ротора.

Зависимость потребляемой ротором мощности от числа его оборотов и величины средней скорости газового потока в аппарате была аппроксимирована следующим выражением:

$$N = 13.37 + 24.32 \cdot w_{\text{ср}} - 0.0164 \cdot n - 0.00358 \cdot w_{\text{ср}} \cdot n - 5.599 \cdot w_{\text{ср}}^2 + 3 \cdot 10^{-5} \cdot n^2 \quad (14)$$

Разница между рассчитанной по (14) и экспериментальной потребляемой мощностью не превышает 5.6%.



1 -  $n = 600$  мин<sup>-1</sup>; 2 - 1000; 3 - 1400

Рисунок 12 – Зависимость величины потребляемой ротором мощности от средней скорости газового потока

При сопоставлении и обобщении экспериментальных данных из условия обеспечения устойчивой работы роторного дисперсионно-пленочного аппарата при достижении наибольшей эффективности массообмена и степени очистки установлены диапазоны варьирования газовых нагрузок и плотности орошения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Рассмотрены основные конструкции роторных аппаратов [1], выполнен анализ их работы и установлено, что для проведения процессов локальной очистки газа от вредных газообразных веществ абсорбционным методом или от взвешенных твердых частиц – мокрой очисткой наиболее перспективными яв-

ляются роторные дисперсионно-пленочные аппараты. Сформулированы основные подходы к конструированию таких аппаратов.

2. Разработана новая конструкция роторного дисперсионно-пленочного аппарата для очистки газа [22], по которой получено положительное решение на изобретение.

3. В неорошаемом роторном дисперсионно-пленочном аппарате выполнено исследование распределения локальных скоростей (тангенциальной и осевой) закрученного газового потока. Установлено влияние режимных параметров на деформацию профилей скоростей газового потока [3–5, 17].

При диспергировании жидкости профили локальных скоростей газового потока изменяются незначительно, что подтверждается экспериментальными исследованиями.

4. Теоретически описано движение пленки жидкости по внутренней поверхности вращающегося конуса с расширяющимся сечением по высоте [2]. На основании проведения экспериментальных исследований диспергирования жидкости вращающимся конусом установлен диапазон вращения ротора, при котором происходит равномерный распыл жидкости по высоте диспергирующего устройства [15, 16, 18].

В качестве диспергирующего устройства, обеспечивающего более равномерное диспергирование жидкости по его высоте, может использоваться полый отбортованный цилиндр, вращающийся с большей скоростью.

5. С помощью метода Лагранжа составлены и решены дифференциальные уравнения, описывающие траектории движения капель жидкости в закрученном газовом потоке роторного дисперсионно-пленочного аппарата [10].

В основу решения дифференциальных уравнений положены результаты экспериментальных исследований и зависимости, описывающие изменение профилей тангенциальной и осевой составляющих полной скорости газового потока [7, 19, 20].

6. Экспериментальные исследования движения пленки жидкости в цилиндрической трубе (корпусе аппарата) под воздействием закрученного газового потока позволили определить углы закрутки пленки жидкости (при различных углах ввода газа) и критические скорости газового потока, при которых противоточное движение фаз переходит в прямоточное [12–14].

7. Изучен относительный унос жидкости и установлено, что на ступени контакта он не превышает 1.2%, что свидетельствует о повышенной пропускной способности нового аппарата по сравнению с роторными аппаратами подобного типа.

8. Изучены массообменные характеристики роторного дисперсионно-пленочного аппарата. Установлено, что эффективность контактной ступени разработанной конструкции выше, чем у ситчатой тарелки [6, 8, 11] и точно центробежных контактных устройств.

9. Проведенные исследования позволили установить параметры, влияющие на гидравлическое сопротивление контактной ступени аппарата и потребляемую ротором мощность [9, 21].

## Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Получены зависимости для расчета:

- расхода жидкости через отверстия диспергирующего устройства при заданном их количестве, диаметре и числе оборотов ротора и наоборот, при известном расходе, диаметре отверстий и числе оборотов – количества отверстий;
- критической скорости газового потока;
- относительного уноса жидкости;
- объемного коэффициента массоотдачи;
- эффективности массообмена;
- гидравлического сопротивления контактной ступени;
- затрат мощности на привод ротора.

2. Выявлены достоинства разработанного аппарата: компактность; высокая эффективность очистки потоков десорбционным методом, а также методом мокрой очистки; отсутствие дополнительных статических завихрителей потока по высоте; возможность использования ротора для сепарации контактирующих фаз, поддержания крутки газового потока на второй ступени контакта и на последующих при изготовлении аппарата с большим числом ступеней.

3. Возможность эффективного использования разработанного роторного дисперсионно-пленочного аппарата для процессов газоочистки подтверждается следующими рекомендациями: ООО «АНХ-инжиниринг» г. Москва, НПРДУП «Промышленные экологические системы» г. Минск.

Разработанный роторный дисперсионно-пленочный аппарат использован для локальной очистки газового потока от твердых взвешенных частиц на ОАО «Крион», где показал высокую эффективность улавливания (акт полупромышленных испытаний).

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Статьи*

1. Лютаревич, И.А. Роторные теплообменные аппараты (краткий обзор) / И.А. Лютаревич, В.А. Марков // Труды Белорус. гос. технол. ун-та. Сер. III, Химия и технол. неорган. в-в. – 2005. – Вып. XIII. – С. 146–150.

2. Волк, А.М. Пленочное движение вязкой жидкости по внутренней поверхности вращающегося конуса / А.М. Волк, В.А. Марков, И.А. Лютаревич // Труды Белорус. гос. технол. ун-та. Сер. VI, Физ.-мат. науки и информ-ка – 2005. – Вып. XIII. – С. 30–32.

3. Лютаревич, И.А. Исследование гидродинамики в неорошаемом роторном массообменном аппарате / И.А. Лютаревич, В.А. Марков, А.И. Вилькоцкий // Труды Белорус. гос. технол. ун-та. Сер. III, Химия и технол. неорган. в-в. – 2006. – Вып. XIV. – С. 103–105.

4. Лютаревич, И.А. Изучение распределения локальных скоростей газа в роторном массообменном аппарате / И.А. Лютаревич, В.А. Марков, А.И. Вилькоцкий // Хим. пром. – 2006. – Т. 83. – № 8. – С. 375–379.

5. Лютаревич, И.А. Исследование гидродинамики роторного дисперсионно-пленочного аппарата / И.А. Лютаревич, В.А. Марков, А.И. Вилькоцкий // Хим. технол.-ия. – 2007. – Т. 8. – № 1. – С. 37–41.

6. Лютаревич, И.А. Исследование массообмена в роторном дисперсионно-пленочном аппарате / И.А. Лютаревич // Инж.-физ. журн. – 2007. – Т. 80. – № 2. – С. 144–148.

7. Лютаревич, И.А. Влияние закрученного газового потока на движение дисперсной фазы в роторном массообменном аппарате / И.А. Лютаревич, В.А. Марков // Хим. и нефтегаз. маш.-ие. – 2007. – № 3. – С. 9–10.

8. Лютаревич, И.А. Гидродинамика и массообмен в роторном аппарате / И.А. Лютаревич, В.А. Марков // Журнал прикладной химии. – 2007. – Т. 80. – № 8. – С. 1330–1333.

9. Лютаревич, И.А. Исследование гидродинамики и массообмена в роторном аппарате / И.А. Лютаревич, В.А. Марков // Труды Белорус. гос. технол. ун-та. Сер. III, Химия и технол. неорган. в-в. – 2007. – Вып. XV. – С. 127–129.

### *Материалы конференций*

10. Лютаревич, И.А. Теоретические исследования гидродинамики роторного массообменного аппарата / И.А. Лютаревич, В.А. Марков, А.И. Вилькоцкий // Техника и технология защиты окружающей среды: Материалы докладов Междунар. науч.-техн. конф. – Мн.: БГТУ, 2006. – С. 174–176.

11. Лютаревич, И.А. Изучение процесса массообмена в роторном аппарате / И.А. Лютаревич, В.А. Марков, А.И. Вилькоцкий // Техника и технология защиты окружающей среды: Материалы докладов Междунар. науч.-техн. конф. – Мн.: БГТУ, 2006. – С. 171–174.

### *Тезисы докладов*

12. Лютаревич, И.А. Исследование кольцевого режима движения жидкости в вертикальном канале / И.А. Лютаревич, А.В. Капора, В.А. Марков // Тезисы докл. 54-й студ. науч.-техн. конф.: в 2 ч. – Мн.: БГТУ, 2003. – Ч. 2. – С. 171.

13. Лютаревич, И.А. Изучение режимов движения пленки жидкости / И.А. Лютаревич, В.А. Марков // Тезисы докл. 55-й студ. науч.-техн. конф.: в 3 ч. – Мн.: БГТУ, 2004. – Ч. 2. – С. 221.

14. Лютаревич, И.А. Особенности движения пленки жидкости под воздействием закрученного газового потока / И.А. Лютаревич, В.А. Марков // НИРС-2004: Тезисы докладов IX Республ. науч. конф. студентов и аспирантов Республики Беларусь: в 8 ч. – Гродно: ГрГУ, 2004. – Ч. 2. – С. 96–98.

15. Мацкевич, Д.П. Исследование гидродинамики в роторном массообменном аппарате / Д.П. Мацкевич, Д.В. Юхневич, И.А. Лютаревич // Тезисы докл. 56-й студ. науч.-техн. конф.: в 2 ч. – Мн.: БГТУ, 2005. – Ч. 2. – С. 223.

16. Лютаревич, И.А. Исследование гидродинамических характеристик диспергирования жидкости в роторном дисперсионно-пленочном аппарате /

И.А. Люতারевич, В.А. Марков // Техника и технология пищевых производств: Тезисы докл. V Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: УО «МГУП», 2005. – С. 202.

17. Люতারевич, И.А. Исследование гидродинамики однофазного газового потока в роторном массообменном аппарате / И.А. Люতারевич, В.А. Марков, А.И. Вилькоцкий // Техника и технология пищевых производств: Тезисы докл. V Междунар. науч. конф. студентов и аспирантов – Могилев: УО «МГУП», 2006. – С. 239.

18. Люতারевич, И.А. Исследование диспергирования жидкости в роторном массообменном аппарате / И.А. Люতারевич, В.А. Марков // НИРС-2005: Тезисы докладов X Республ. науч. конф. студентов и аспирантов высших учебных заведений Республики Беларусь: в 3 ч. – Мн.: БГТУ, 2006. – Ч.2. – С. 335.

19. Люতারевич, И.А. Исследование гидродинамики в роторном массообменном аппарате / И.А. Люতারевич // Тезисы докл. 59-й науч.-техн. конф. студентов, магистрантов и аспирантов – Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2006. – С. 263.

20. Люতারевич, И.А. Исследование движения капель жидкости в роторном массообменном аппарате / И.А. Люতারевич, В.А. Марков, А.И. Вилькоцкий // Техника и технология пищевых производств: Тезисы докл. VI Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: УО «МГУП», 2007. – С. 230–231.

21. Люতারевич, И.А. Исследование гидравлического сопротивления роторного массообменного аппарата и потребляемой ротором мощности / И.А. Люতারевич, В.А. Марков // Энерго- и материалосберегающие экологически чистые технологии: Тезисы докл. VII Междунар. науч.-техн. конф. – Гродно: ГрГУ, 2007. – С. 175–176.

### *Патент на изобретение*

22. Аппарат для очистки газа / И.А. Люতারевич, В.А. Марков; заявитель Белорус. гос. технол. ун-т – заявка на изобретение № а20030475, МПК В 01 D 45/00; заявл. 08.09.05 // Афіцыйны бюл. Джарж. Пат. Ведамства РБ. – 2007. – № 2. – С. 19.



Лютарэвіч Ілья Анатольевіч

**Структура пльняў і эфектыўнасць узаемадзеяння і раздзялення фаз у дысперсійна-плёначным апарате ротарнага тыпу**

Гідрадынаміка, профілі хуткасцей, гідраўлічнае супраціўленне, масаабмен, сепарацыя, эфектыўнасць, траекторыя руху, магутнасць, энергазатраты.

Аб'ектам даследавання з'яўляюся ротарны дысперсійна-плёначны апарат, прадметам даследавання – узаемадзеянне і сепарацыя фаз у палях масавых сіл, структура газавай пльні, плёначнае цячэнне вадкасці, дыспергаванне вадкасці ротарам, які верціцца, энергазатраты на правядзенне працэсаў.

Мэтай дадзенай работы з'яўляюцца тэарэтычныя і эксперыментальныя даследаванні ў распрацаваным ротарным дысперсійна-плёначным апарате структуры і гідрадынамікі газавадкасных пльняў, працэсаў раздзялення сумесяў дэсарбцыйным метадам, а таксама запыленых газаў метадам мокрай ачысткі; энергазатрат на правядзенне працэсаў.

У выніку створана новая канструкцыя дысперсійна-плёначнага апарата. Для гэтага выкананы тэарэтычныя і эксперыментальныя даследаванні, якія ўключаюць: цячэнне вадкасці праз адтуліны дыспергуючага ўстройства; размеркаванне хуткасцей газавай пльні ў розных сячэннях кантактных ступеняў; плёначнае цячэнне вадкасці ў канічным дыспергатары і па корпусе апарата; рух кропель дыспергуючай вадкасці. Атрыманы аналітычныя залежнасці для разліку адноснага вынасу вадкасці, аб'ёмнага каэфіцыента масааддачы, эфектыўнасці масаабмену, гідраўлічнага супраціўлення і спажыванай магутнасці ў залежнасці ад рэжымных параметраў.

Распрацаваная канструкцыя паказала высокую эфектыўнасць улоўлівання пылавых часцінак метадам мокрай ачысткі на ААТ «Крыён». Перспектыўнасць гэтых апаратаў вызначаецца магчымасцю перапрацоўваць пльні газу пры перменных (у тым ліку вельмі малых) шчыльнасцях арашэння.

## РЕЗЮМЕ

Лютаревич Илья Анатольевич

### **Структура потоков и эффективность взаимодействия и разделения фаз в дисперсионно-пленочном аппарате роторного типа**

Гидродинамика, профили скоростей, гидравлическое сопротивление, массообмен, сепарация, эффективность, траектория движения, мощность, энергозатраты.

Объектом исследования является роторный дисперсионно-пленочный аппарат, а предметом исследования – взаимодействие и сепарация фаз в полях массовых сил, структура газового потока, пленочное течение жидкости, диспергирование жидкости вращающимся ротором, энергозатраты на проведение процессов.

Целью настоящей работы являются теоретические и экспериментальные исследования в разработанном роторном дисперсионно-пленочном аппарате структуры и гидродинамики газожидкостных потоков, процессов разделения смесей десорбционным методом, а также запыленных газов методом мокрой очистки; энергозатрат на проведение процессов.

В результате создана новая конструкция роторного дисперсионно-пленочного аппарата. Для этого осуществлены теоретические и экспериментальные исследования, включающие: истечение жидкости из отверстий диспергирующего устройства; распределение скоростей газового потока в различных сечениях контактных ступеней; пленочное течение жидкости в коническом диспергаторе и по корпусу аппарата; движение капель диспергируемой жидкости. Получены аналитические зависимости для расчета относительного уноса жидкости, объемного коэффициента массоотдачи, эффективности массообмена, гидравлического сопротивления и потребляемой мощности в зависимости от режимных параметров.

Разработанная конструкция показала высокую эффективность улавливания пылевых частиц методом мокрой очистки на ОАО «Крион». Перспективность этих аппаратов определяется возможностью перерабатывать потоки газов при переменных (в том числе очень малых) плотностях орошения.

## SUMMARY

**Lytarevich Ilya Anatolievich**

### **The structure of streams and the efficiency of interaction and separation of phases in a dispersion-film rotor-type apparatus**

Fluid dynamics, velocity profiles, hydraulic resistance, mass transfer, separation, efficiency, trajectory of motion, power, power inputs.

The subject of research was the rotor dispersion-film apparatus, and the object of research - interaction and separation of phases in the fields of mass forces, the structure of a gas stream, film flow of a liquid, power inputs on carrying out the process.

The purpose of the present work is the development of the rotor dispersion-film apparatus for clearing gas streams by the absorptive method, and also a method of wet clearing having rather a low water resistance, high efficiency; determination of the regularity of motion and interacting of phases and the methods of calculation of basic characteristics.

As a result of the work conducted, a new design of the rotor dispersion-film apparatus is created. For this purpose, theoretical and experimental researches were carried out, including: the expiration of a liquid from the apertures of dispergate devices, the velocity distribution of a gas stream in various cross-sections of contact steps; film flow of a liquid in a tapered dispergate device and through the body of the apparatus; motion of drops of a dispergated liquid. Analytical dependences for calculation of the relative entrainment of a liquid, volumetric factor of mass transfer and efficiency of mass transfer, hydraulic resistance and power consumption are obtained depending on regime parameters.

The design developed has shown high performance in trapping suspended solids by the method of wet purification at «Krión». The prospect of using these apparatuses is determined by the possibility of processing large streams of gases at variables (including very small) water concentrations.

1063 ар.



Научное издание

**Лютаревич Илья Анатольевич**

**СТРУКТУРА ПОТОКОВ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ  
И РАЗДЕЛЕНИЯ ФАЗ В ДИСПЕРСИОННО-ПЛЕНОЧНОМ  
АППАРАТЕ РОТОРНОГО ТИПА**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

по специальности 05.17.08 «Процессы и аппараты химических технологий»

Подписано в печать 14.02.2008. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага офсетная. Гарнитура Гаймс. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,3. Уч.-изд. л. 1,3.

Тираж 60 экз. Заказ 55.

Учреждение образования

«Белорусский государственный технологический университет».

220006, Минск, Свердлова, 13а.

ЛИ № 02330/0133255 от 30.04.2004.

Отпечатано в лаборатории полиграфии учреждения образования  
«Белорусский государственный технологический университет».

220006, Минск, Свердлова, 13.

ЛП № 02330/0056739 от 22.01.2004.