

66
B67

БЕЛОРУССКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМЕНИ С.М.КИРОВА

На правах рукописи

ВОЛК Анатолий Матвеевич

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ СУСПЕНЗИЙ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЗАКРУЧЕННОГО ГАЗОВОГО ПОТОКА

05.17.08 - Процессы и аппараты химической
технологии

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Минск 1990

Работа выполнена в Белорусском ордена Трудового Красного Знамени технологическом институте им.С.М.Кирова.

Научный руководитель доктор технических наук,
профессор ПЛЕХОВ И.М.

Научный консультант кандидат технических наук,
доцент ЛЕВДАНСКИЙ Э.И.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор ЖУКОВ В.Г.,
кандидат технических наук,
доцент ХОТИН Л.М.

Ведущая организация Гродненское ПО "Химволокно".

Защита диссертации состоится "18" декабря 1990 г.
в 14 час. на заседании специализированного совета
К 056.01.03 по присуждению ученой степени кандидата наук в
Белорусском ордена Трудового Красного Знамени технологическом институте им.С.М.Кирова (220630, г.Минск, ул.Свердлова, 13а).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского технологического института им.С.М.Кирова.

Автореферат разослан "16" ноября 1990 г.

Ученый секретарь
специализированного совета,
кандидат химических наук

Е.Д. Дзюба

ДЗЮБА Е.Д.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В планах развития народного хозяйства значительная роль отводится химизации основных отраслей, что обеспечит существенную экономию энергетических, материальных, трудовых и финансовых ресурсов, значительно повысит эффективность общественного производства. Решение поставленных задач требует внедрения прогрессивных технологий. При этом важную роль приобретают физико-химические процессы, которые применяются в различных отраслях. Такой особенностью обладает процесс разделения многофазных систем.

Для разделения суспензий перспективным является разработанный в БТИ им.С.М.Кирова способ проточно-пленочного фильтрования в пористом элементе с использованием закрученного газового потока. При этом осадок твердой фазы находится в постоянном движении, что предотвращает его отложение на фильтровальной поверхности. Задачи конструирования и внедрения в производство данных устройств требуют моделирования происходящих процессов и разработки инженерной методики расчета.

Актуальность работы подтверждается планами разработки и внедрения высокоэффективных и высокопроизводительных аппаратов для разделения гетерогенных систем в химической промышленности.

Планы научных исследований и внедрения газоцентрибейных фильтров выполнялись по следующей хозяйственной и госбюджетной тематике.

1. Разработка, исследование и внедрение аппаратов для разделения суспензий сульфата аммония. Номер Государственной регистрации отчета НИР 018250012050.

2. Разработка, исследование и внедрение аппаратов по очистке газов в производстве фосфорных удобрений. Номер Государственной регистрации отчета НИР 01825002279.

3. Разработка, исследование и внедрение газоцентрибейных разделителей суспензий полимерных материалов. Номер Государственной регистрации отчета НИР 01860008693.

4. Некоторые вопросы теории управления и оптимизации динамических систем. Номер Государственной регистрации отчета НИР 01860022573.

Цели работы. Рассмотрены новые конструкции для газоцентрибейного разделения суспензий, очистки воздуха от частиц

БИБЛИОТЕКА БТИ
им. С. М. Кирова

пыли и классификации материалов. Выполнено математическое моделирование происходящих процессов. В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований найдены оптимальные конструктивные параметры аппаратов и режимы их работы.

Научная новизна работы заключается в теоретическом моделировании процессов разделения гетерогенных систем с использованием в качестве движущей силы процесса энергии закрученного газового потока, а также в аппаратно-технологическом оформлении процессов глубокого обезвоживания крупнодисперсных суспензий.

Исследуемый способ газодисперсного разделения является новым перспективным научным направлением в области процессов и аппаратов химической технологии и позволяет решать крупную научно-техническую проблему, имеющую важное народнохозяйственное значение.

Практическая ценность и реализация работы. Исследуемый способ разделения суспензий и конструкции для его осуществления, а также методика расчета новых газодисперсных разделителей крупнодисперсных суспензий используются в народном хозяйстве. Аппараты защищены 3 авторскими свидетельствами СССР на изобретения и 2 патентами.

Проведенные промышленные испытания, результаты внедрения и экономические расчеты показывают перспективность исследуемого способа разделения крупнодисперсных суспензий. При одинаковой производительности металлоемкость новых аппаратов в 10-20, а стоимость в 30-50 раз ниже стоимости центрифуг, применяемых для аналогичных целей. Расход электроэнергии снижается не менее чем в 2 раза. При этом влажность твердой фазы на выходе меньше, чем у центрифуг. Отсутствие вращающихся узлов и деталей обеспечивает высокую надежность газодисперсных разделителей при эксплуатации.

Экономический эффект от внедрения 4-х газодисперсных разделителей суспензии вместо центрифуг на Новополоцком ПО "Полимир" составил 321 тыс. руб.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях Белорусского технологического института им.С.М.Кирова в 1983-1990 гг.; на III Всесоюзной научно-технической конференции "Современные машины и аппараты химических производств" (Навои, 1983 г.); на

Республиканском научно-техническом совещании "Применение математических методов и вычислительной техники при решении народнохозяйственных задач" (Гомель, 1986 г.); на отраслевой научно-технической конференции "Совершенствование технологии и оборудования для обогащения калийных руд" (Пермь, 1989 г.).

Автор защищает:

новые способы и реализующие их конструкции для разделения гетерогенных систем за счет проточного фильтрования с использованием в качестве движущей силы процесса энергии закрученного газового потока;

математическое описание движения закрученного газового потока, течения закрученной пленки жидкости, движения частиц твердой фазы в закрученном потоке, обезвоживания гранул в потоке газа;

методику инженерного расчета газодисперсных разделителей крупнодисперсных суспензий, программы расчета на ЭВМ; результаты внедрения, экспериментальных и промышленных испытаний газодисперсных разделителей суспензий.

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 16 работах, в том числе 2-х патентах и 4-х авторских свидетельствах СССР на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемой литературы (155 наименований), приложения. Работа изложена на 145 стр. машинописного текста, содержит 29 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

I. МНОГОФАЗНЫЕ СИСТЕМЫ И ПУТИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА ИХ РАЗДЕЛЕНИЯ

Первый раздел посвящен многокомпонентным системам, их свойствам и способам разделения фаз. Гравитационное осаждение используется для разделения фаз различной плотности малоконцентрированных суспензий. Основными силами данного процесса являются силы Архимеда и гидродинамического воздействия. Применяемые при осаждении резервуары, лотки, стстойники отличаются простотой, но занимают большие площади и выгрузка осадка в них представляет довольно сложную и трудоемкую задачу.

При увеличении концентрации суспензии увеличивается ее вязкость, которую можно определить по формуле Хаппеля

$$\frac{\mu}{\mu_0} = 1 + 5,5x \frac{10 - (84/11) \cdot x^{2/3} + 4x^{7/3}}{10 - 25x + 25x^{7/3} - 10x^{10/3}} \quad (I)$$

Более интенсивно процесс разделения фаз происходит в поле центробежных сил. Данный способ осаждения из основного потока более тяжелых частиц реализуется в циклонах, которые характеризуются высокой производительностью, простотой и легкостью обслуживания, относительно небольшими затратами на изготовление и эксплуатацию, отсутствием движущих частей. Но циклоны имеют большое гидравлическое сопротивление, недостаточную степень разделения, высокую влажность продукта на выходе и применяются в основном для предварительного сгущения суспензий и их классификации.

Высокую степень разделения фаз позволяют получить центрифуги, но они сложны в устройстве и требуют высоких энергетических затрат.

Широкое применение в промышленности имеет способ разделения суспензий с помощью фильтровальных проницаемых перегородок, которые являются важной частью фильтра любой конструкции: барабанного, ленточного, патронного и др. Повышение давления с целью интенсификации процесса фильтрования возможно лишь при достаточной механической прочности перегородки. Образование осадка и закупоривание ведет к повышению сопротивления, требует удаления осадка и регенерации проницаемой поверхности. Применяемые фильтры громоздки по размерам, сложны в эксплуатации и требуют больших затрат энергии.

Определенный интерес представляют конструкции фильтров, реализующие гидродинамический смыв осадка с неподвижных фильтровальных элементов. Перспективность способа проточного фильтрования отмечалась на международной конференции в Лондоне, но в то же время указывалось, что данный процесс изучен недостаточно. Использовать положительные эффекты проточного фильтрования и избавиться от отмеченных ранее недостатков применяемого оборудования позволяет разработанный в Белорусском технологическом институте им.С.М.Кирова способ разделения двухфазных систем в фильтрах за счет использования энергии закрученного газового потока. Основной частью созданных конструкций является фильтровальный элемент, вовнутрь которого подается закрученный газовый поток (рис. I). Возникающие при этом центробежные силы способствуют процессу разде-

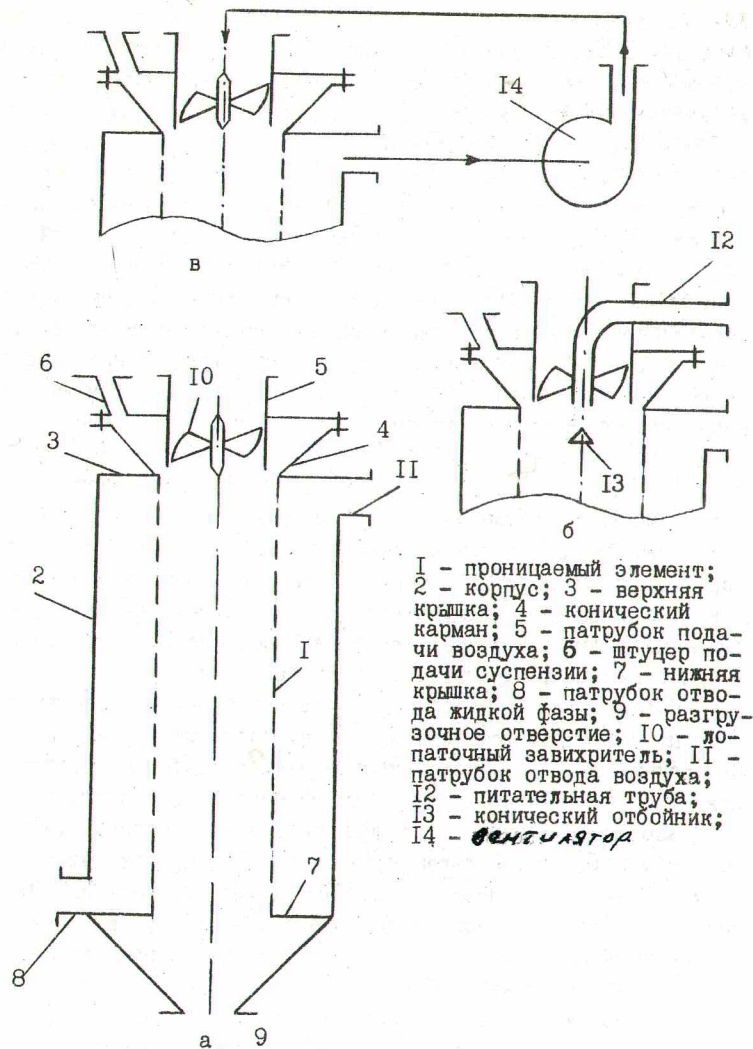


Рис. I. Конструкции газочентробежных разделителей суспензий

ления, фильтровальная перегородка задерживает твердые частицы, пропуская жидкость и газ. Особенностью процесса является то, что твердые частицы находятся в непрерывном движении относительно фильтровального элемента, что препятствует или полностью предотвращает отложение осадка. При этом имеется возможность изменять режим работы устройств с целью выбора оптимальных технологических параметров процесса разделения фаз. Конструкция аппарата позволяет достигать равномерного распределения суспензии по фильтровальной поверхности, изменяя способ ввода в зависимости от размера частиц твердой фазы. Мелкодисперсная суспензия через кольцевой зазор между карманом и газоподводящим патрубком подается равномерно распределенной пленкой на цилиндрический проницаемый элемент, конструкция "а". При наличии крупных частиц суспензия подается через питательную трубу в область за завихрителем на конический отбойник, конструкция "б". В этом случае жидкая фаза под воздействием центробежных сил равномерно сепарировается на фильтровальную поверхность, где формируется вращательно-поступательное пленочное течение и происходит фильтрование жидкости. При отделении кристаллов солей в насыщенных растворах в конструкции "в" предусмотрена организация замкнутого цикла по воздуху. В результате циркуляции газ становится насыщенным и тем самым предотвращается перенасыщение раствора и кристаллизация фильтровальной поверхности.

Рассмотренный способ позволяет производить разделение твердых частиц по фракциям и очистку газов от частиц пыли. Для данных целей на уровне изобретений разработаны соответствующие конструкции. Разработанный способ разделения фаз с использованием энергии закрученного газового потока отличается простотой осуществления, но сложен по происходящим при этом явлениям и не имеет инженерной методики расчета. Для внедрения разработанного способа в производство, выявления оптимальных и режимных параметров были исследованы следующие взаимосвязанные между собой процессы: движение закрученного газового потока; течение пленки суспензии в цилиндре под воздействием газа; фильтрование жидкости через проницаемую поверхность; движение частиц в закрученном потоке газа и жидкости; удаление влаги с поверхности твердых частиц при их взаимодействии с газовым потоком. Предварительно были рассмотрены изложенные в научной литературе результаты по отмеченным выше проблемам.

2. АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ ДВУХФАЗНЫХ СИСТЕМ

Показано, что модели, полученные для однофазных потоков, удовлетворительно описывают движение систем газ-жидкость, газ-твердые, жидкость-твердые. Потери энергии, которые имеют место при концентрациях более 2 % учитываются изменением вязкости. Применяя формулу Хаппеля (I) при концентрациях до 50 %, суспензию можно рассматривать как ньютоновскую жидкость. Для исследования движения частиц в установившихся потоках, при разделении фаз, выделяют доминирующие силы: тяжести, Архимеда, гидродинамического воздействия, центробежную. Вблизи ограничивающих поверхностей потоки характеризуются большим градиентом скорости и здесь необходимо учитывать поперечную силу Жуковского, а при вращении частицы, кроме того, силу Магнуса. При обезвоживании суспензий дополнительно возникает задача удаления поверхностной влаги с твердых частиц в потоке газа. Эффективность центробежного разделения зависит от профилей скорости потока, угла его закрутки. Угол закрутки связывает составляющие тензора касательных напряжений соотношением $\tau_{r\varphi} / \tau_{rz} = tg \alpha$. Касательные напряжения на стенках трубы определяются гидродинамическим напором.

$$\tau = \frac{\lambda_0}{4} \frac{\rho_0 \bar{w}_z^2}{2} \quad (2)$$

При наличии пленочного течения для коэффициента трения Уоллисом получено соотношение $\lambda = \lambda_0 (1 + 300 \delta / D)$. Для закрученных потоков Шукин, введя параметр $\alpha = d / 15$, получил

$$\lambda_0 = \frac{0,3164}{Re^{0,25-0,02\alpha}} (1 - 0,13\alpha^{0,65}) \quad (3)$$

Скорость оттока на проницаемых поверхностях может быть определена на основании закона Бернулли

$$u_0 = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_0(1-\xi-\xi^2)}} = \gamma \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_0}} \quad (4)$$

Для коэффициента расхода получены экспериментальные зависимости: Идельчиком при отсутствии продольной скорости потока

$$\gamma_0^{-2} = (0,707\sqrt{1-\xi} + 1 + \xi)^2 / \xi^2 \quad (5)$$

Рекиным для наличия движения вдоль проницаемой поверхности

$$\frac{\gamma}{\gamma_0} = 1 + \exp\left(-\sqrt{2\Delta P / \frac{\rho_0 u_0^2}{2}}\right) \quad (6)$$

3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГАЗОПЛЕНОЧНОГО РАЗДЕЛЕНИЯ ДВУХФАЗНЫХ СИСТЕМ

Математическое описание процессов разделения позволяет выполнить расчет основных характеристик, исследовать влияние на процесс различных факторов и выделить доминирующие, определить оптимальные конструктивные и технологические параметры.

Рассмотрено установившееся, осесимметричное, автоматическое движение закрученного газового потока в пронизаемом цилиндре. Считая скорость оттока w_0 известной, а градиент давления в осевом направлении пропорциональным перепаду давления, получены уравнения Навье-Стокса в цилиндрической системе координат z, φ, x

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \rho_0 \left(\frac{w_\varphi^2}{z} + \frac{w_0^2 R^2}{z^3} \right) \quad (7)$$

$$\frac{d^2 w_\varphi}{dz^2} - \frac{1}{z} \left(\frac{w_0 R}{\nu_0} - 1 \right) \frac{dw_\varphi}{dz} - \frac{1}{z^2} \left(\frac{w_0 R}{\nu_0} + 1 \right) w_\varphi = 0 \quad (8)$$

$$\frac{d^2 w_x}{dz^2} - \frac{1}{z} \left(\frac{w_0 R}{\nu_0} - 1 \right) \frac{dw_x}{dz} = - \frac{1}{\mu_0} \frac{p_1 - p_2}{L} \quad (9)$$

и найдены их решения

$$w_x = \bar{w}_x (1 - \bar{z}^l) + \frac{(p_1 - p_2) R}{4L w_0 \rho_0} (1 - 2\bar{z}^2 - \bar{z}^l) \quad (10)$$

$$w_\varphi = \frac{\bar{w}_\varphi}{2} \frac{w_0 R + 2\nu_0}{w_0 R + 3\nu_0} \left(\frac{1}{\bar{z}} - \bar{z}^k \right) \approx \frac{\bar{w}_\varphi}{2} \left(\frac{1}{\bar{z}} - \bar{z}^k \right) \quad (11)$$

где $\bar{z} = z/R$; $l = w_0 R/\nu_0$; $k = w_0 R/\nu_0 + 1$; $\bar{w}_\varphi = \bar{w}_x / \epsilon g d$. Давление потока получим интегрированием уравнения (7) в области с избыточным статическим давлением

$$p_r = \frac{\rho_0}{2} \left(\frac{\bar{w}_\varphi^2}{4} + w_0^2 \right) \left(\frac{1}{\bar{z}^2} - 1 \right) \quad (12)$$

Определена толщина пограничного слоя

$$\bar{h} = \frac{\nu_0}{w_0 R} \ln \left(\frac{100 w_0 R}{\nu_0} \right) \quad (13)$$

Рассмотрено установившееся осесимметричное движение пленки жидкости по внутренней поверхности пронизаемого цилиндра. Считая скорость оттока u_0 постоянной, в системе координат

$x = z\varphi$; $y = -z$; $z = z$, связанной с пронизаемой поверхностью, получены уравнения движения

$$\frac{d^2 u_x}{dy^2} - \frac{u_0}{\nu_0} \frac{du_x}{dy} = - \frac{g}{\nu_0} \quad (14)$$

$$\frac{d^2 u_\varphi}{dz^2} - \frac{1}{z} \left(\frac{u_0 R}{\nu_0} - 1 \right) \frac{du_\varphi}{dz} - \frac{1}{z^2} \left(\frac{u_0 R}{\nu_0} + 1 \right) u_\varphi = 0 \quad (15)$$

Приняв выполненным условие прилипания и заданными касательные напряжения на границе раздела фаз, получены решения

$$u_x = \left(\frac{\bar{z}^l}{\mu_0} + \frac{g}{u_0} \right) \frac{\nu_0}{u_0} (1 - e^{-\frac{u_0}{\nu_0} y}) e^{-\frac{u_0}{\nu_0} z} - \frac{g}{u_0} y, \quad u_0 > 0 \quad (16)$$

$$u_\varphi = A \left(\frac{1}{\bar{z}} - \bar{z}^{n+1} \right), \quad A = \frac{k \bar{z}^l}{2 \mu_0 + \rho_0 u_0 R e^{-\left(\frac{u_0 R}{\nu_0} + \frac{g}{u_0} \right)}}, \quad n = \frac{u_0 R}{\nu_0} \quad (17)$$

Интегрируя (16) находим удельный объемный расход жидкости

$$\bar{Q} = \left(\frac{\bar{z}^l}{\mu_0} + \frac{g}{u_0} \right) \left(\frac{\nu_0}{u_0} \right)^2 \left[e^{-\frac{u_0}{\nu_0} z} \left(\frac{u_0 R}{\nu_0} - 1 \right) + 1 \right] - \frac{g z^2}{2 u_0} \quad (18)$$

Используя (17) находим давление пленки на стенку

$$p_{nn} = \rho_0 \left\{ \frac{A^2 + u_0^2}{2} \frac{1}{(1 - \bar{z})^2} - 1 + \frac{2A^2(1 - e^{-2\bar{z}})}{n} + \frac{A^2[1 - e^{-(2n+2)\bar{z}}]}{2n+1} \right\} \quad (19)$$

Суммарный перепад давления на пронизаемой поверхности будет $\Delta p = p_r + p_{nn}$. Уравнение (18) позволяет найти толщину пленки. Практический расчет производится пошаговым методом, пере считывая на элементарной цилиндрической поверхности все характеристики. Изменение удельного объемного расхода описывается уравнением $d\bar{Q}/d\bar{z} = -u_0$, а концентрации суспензии уравнением $d\bar{x}/d\bar{z} = -x u_0 / \bar{Q}$.

После удаления жидкой фазы твердые частицы движутся под воздействием закрученного газового потока. Напишем в цилиндрической системе координат уравнения их движения.

$$\begin{cases} m_a \left(\frac{dv_z}{dt} - \frac{v_z^2}{z} \right) = F_z - F_n \\ m_a \left(\frac{dv_\varphi}{dt} - \frac{v_\varphi v_z}{z} \right) = F_\varphi + F_{TP} \\ m_a \frac{dv_x}{dt} = m_a g + F_x + F_{TP} - F_n \\ \bar{I}_a \frac{d\omega_\varphi}{dt} = M_{TP}^\varphi + M_z^\varphi \\ \bar{I}_a \frac{d\omega_x}{dt} = M_{TP}^x + M_z^x \end{cases} \quad (20)$$

Схема действующих сил представлена на рис.2.

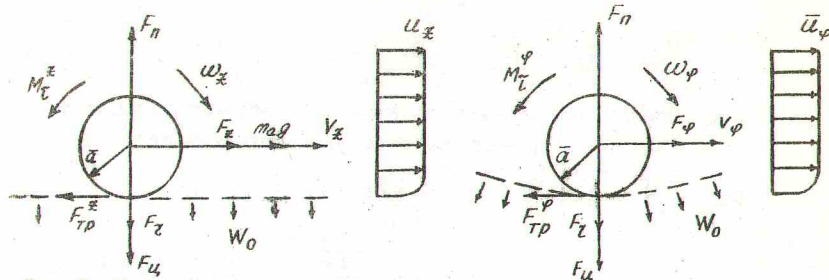


Рис.2. Схема составляющих скорости частицы, действующих сил и моментов при контакте с проницаемой стенкой

Входящие в систему силы тяжести, Архимеда, составляющие F_{φ} , F_T , F_x силы гидродинамического воздействия находятся по имеющимся в литературе зависимостям. Подъемная сила получена для частицы произвольной формы, направлена по нормали к поверхности, включает в себя силы Жуковского и Магнуса

$$F_n = \rho_0 v_a \left[\left(\frac{\partial u_{\varphi}}{\partial z} - 2\omega_{\varphi} \right) (u_x - v_x) + \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} - 2\omega_x \right) (u_{\varphi} - v_{\varphi}) \right] \quad (21)$$

Результирующий вращающий момент, возникающий при вращении потока и частицы будет $\bar{M}_z = 3\pi v_a (\cot \bar{\alpha} - 2\bar{c})$. Сила трения учитывает направление скорости в точке касания $\bar{F}_{TP} = -k_{TP} \bar{F}_T / \sin \alpha (v_a + \omega \alpha)$. Вращающий момент силы трения будет $\bar{M}_{TP} = \bar{F}_{TP} \times \bar{\alpha}$. Нормальная составляющая учитывает все силы, действующие по нормали $\bar{F}_N = -(\bar{F}_g^N + \bar{F}_z + \bar{F}_u + \bar{F}_n)$. Центробежная сила будет $F_u = \rho a v_a v_{\varphi}^2 / z$. Для численного интегрирования системы (20) разработана программа на ЭВМ.

4. РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИИ, РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПРОМЫШЛЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ

Для дополнения и проверки созданных моделей были выполнены экспериментальные исследования в аппарате (рис.1): с гранулами полистирола сферической формы размером 2-4 мм, плотностью 1000-1050 кг/м³; полиэтилена цилиндрической формы размером 1,5-3 мм, плотностью 930-970 кг/м³; фракцией песка размером 2-3 мм, плотностью 1500 кг/м³; раствором сульфата аммония с кристаллами размером 0,5-5 мм, плотностью 1789 кг/м³. На экспериментальной установке исследовались различные проницаемые элементы диаметром 0,15 м, при изменении параметров входных потоков. В исследуемом процессе могут быть выделены два основных этапа: 1) пленочное течение суспензии и ее фильтрование через проницаемую перегородку; 2) удаление влаги с

поверхности частицы после отвода основной массы жидкости. Выполненные расчеты и экспериментальные исследования показали, что отвод жидкой фазы в диапазоне нагрузок до 3000 кг/ч происходит на участке длиной порядка в один диаметр. Минимальная влажность наблюдалась, если отток газа составлял 15-25%. Требуемым условиям удовлетворяет фильтровальная сетка проницаемостью 16%. Исследования, выполненные с целью минимизации влажности продукта при устойчивом протекании процесса разделения и достаточно высокой производительности, показали, что оптимальными являются угол закрутки газового потока в 35°-40°, среднерасходная скорость газа 18-20 м/с, длина проницаемого элемента в пределах $L/D = 6-7$. Способ подачи суспензии в аппарат (рис.1) не оказывает существенного влияния на конечную влажность. Обработкой экспериментальных данных получены адекватные зависимости для давления внутри проницаемого элемента, которые учитывают потери энергии на взаимодействие фаз:

а) для подачи суспензии пленкой

$$P = 100 \exp(-0,5 \cdot 10^3 \bar{\alpha} - 5,23 \sin \alpha - 0,125 L/D) \rho_0 \bar{W}_x^2 / 2 \quad (22)$$

б) для подачи суспензии в газовый поток за завихрителем

$$P = 115 \exp(-0,93 \cdot 10^3 \bar{\alpha} - 5,14 \sin \alpha - 0,147 L/D) \rho_0 \bar{W}_x^2 / 2 \quad (23)$$

Расчет производился на ЭВМ по разработанным программам пошаговым методом. На каждом шаге толщина пленки рассчитывалась по уравнению (18). При этом касательные напряжения на границе раздела фаз определялись зависимостями (2), (3), давление на проницаемой стенке по формулам (22), (23), а скорость оттока жидкой фазы из формул (4)-(6). При известной толщине пленки ее средняя скорость будет $u = \bar{\alpha} / \delta$. На каждом шаге учитывалось изменение удельного объемного расхода суспензии и пересчитывались реологические характеристики. Выполненные расчеты (рис.3) показывают, что существенное изменение концентрации суспензии происходит на конечном участке небольшой длины. На основном участке не происходит резкого изменения толщины пленки и ее средней скорости. Число Рейнольдса, скорость оттока жидкой фазы, закрутка пленки изменяются по законам близким к линейным. Допустимая расчетная нагрузка суспензии концентрацией 5% составила 3000 кг/ч. Распределение скорости по толщине пленки (16), (17) характеризуется достаточно большим, но конечным градиентом у стенки, и близким к

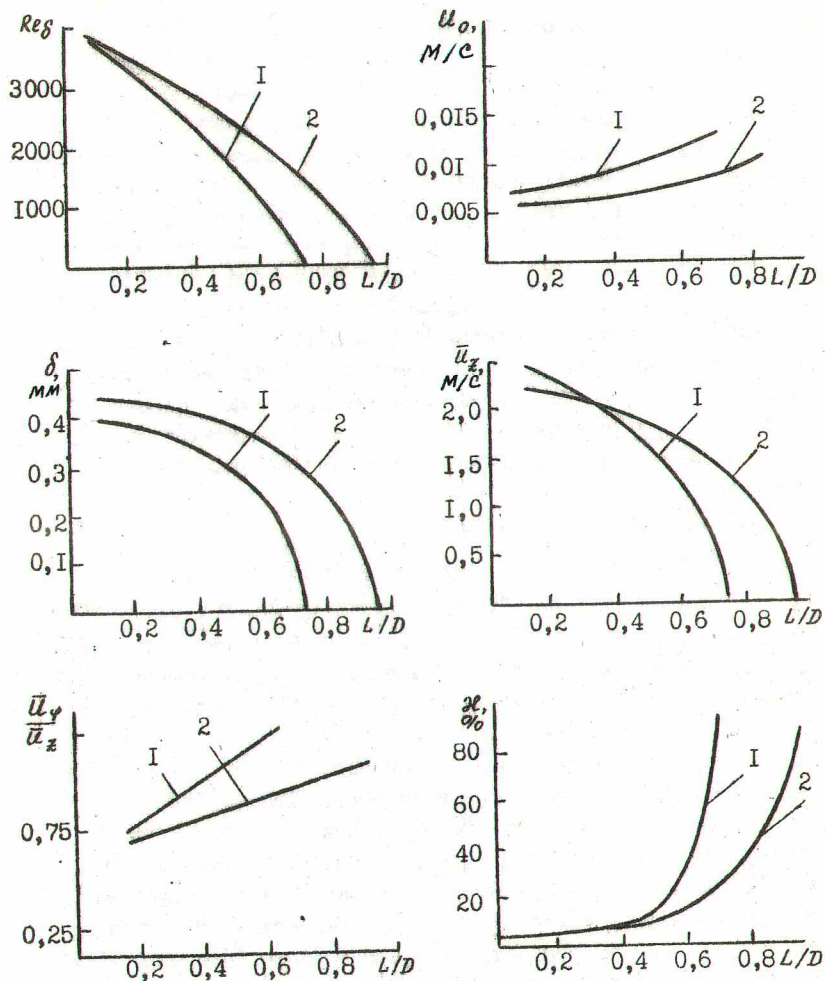


Рис.3. Изменение гидродинамических и реологических характеристик течения пленки, по длине пронцаемого элемента.
 $G = 2000 \text{ кг/ч}$; $\bar{W}_x^0 = 20 \text{ м/с}$; $\alpha = 35^\circ$; $D = 0,15 \text{ м}$; $\bar{f} = 0,16$.
 Способ ввода суспензии: I - пленкой; 2 - в центр.

нулю его значением у границы взаимодействия с газовым потоком. Частицы твердой фазы размером меньше толщины пленки, при их торможении у стенки, испытывают значительное воздействие подъемной силы (21), что препятствует их осаждению у стенки и гидродинамическому смыву осадка. После удаления жидкой фазы твердые частицы движутся под воздействием газового потока. Оценка толщины пограничного слоя в газовом потоке по зависимости (13) дает значение 0,1-0,2 мм. Осевая составляющая скорости газового потока описывается полученной зависимостью (10). Касательная составляющая более точно по сравнению с (II) аппроксимирована линейной зависимостью и найдено давление газового потока на пронцаемую поверхность

$$W_\varphi = \frac{3}{2} \frac{\bar{W}_x}{\epsilon g \alpha} \frac{z}{R}; \quad \rho = \frac{g}{8} \rho_0 \frac{\bar{W}_x^2}{\epsilon g^2 \alpha} \quad (24)$$

Скорость оттока газа через пронцаемую поверхность определяется зависимостями (4)-(6), а изменение осевой составляющей средней скорости описано уравнением

Результаты расчета скорости частицы приведены на рис.4.

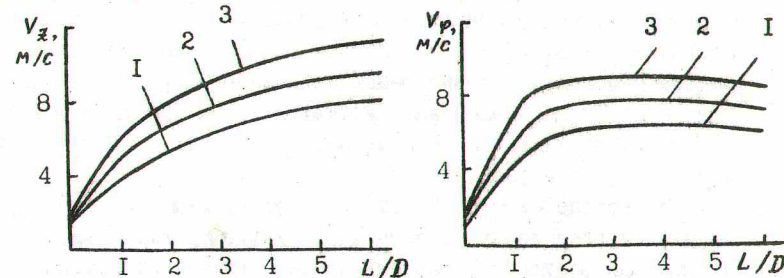


Рис.4. Изменение скорости частицы по длине элемента.
 $\bar{W}_x^0 = 20 \text{ м/с}$; $\rho_a = 950 \text{ кг/м}^3$; $\alpha = 35^\circ$; $\bar{f} = 0,16$.
 I - $\alpha = 1 \text{ мм}$; 2 - $\alpha = 2 \text{ мм}$; 3 - $\alpha = 4 \text{ мм}$

Если рассматривать частицы равномерно распределенные по фильтровальной поверхности на расстоянии двух диаметров (при этом затухают возмущения потока вызванные частицей), то может быть найдена удельная производительность по твердой фазе

$$\bar{q}_T = \frac{V_x}{2\alpha} \frac{1}{2\alpha} \frac{F\alpha^3}{6} \rho_a = \rho_a \frac{F\alpha V_x}{24} \quad (25)$$

Сравнение рассчитанной угловой скорости частицы с величиной $\omega = V/\alpha$ показывает, что отклонение составляет не более 5%. Вращение частицы является одной из причин их эффектив-

Химия и химическая техника. - Мн.: Высшая школа, 1984. - № 19. - С. 100-101.

3. Левданский Э.И., Волк А.М., Плехов И.М. О законе распределения частиц при дроблении // ТОХТ. - 1986. - № 5. - С. 672-677.

4. А.с. 1232302 СССР. МКИ В 07 В 7/086, В 04 С 3/00. Центробежный классификатор / Э.И.Левданский, П.Е.Вайтехнович, А.М.Волк и др. - Б.И., 1986. - № 19.

5. А.с. 1263315 СССР. МКИ В 01 46/02, 45/12. Пылеуловитель / Н.П.Кохно, И.М.Плехов, Э.И.Левданский, А.Н.Ковалев и А.М.Волк. - Б.И., 1986. - № 38.

6. Экспериментальное исследование течения жидкостной пленки в центробежных элементах с перфорированными стенками / Э.И.Левданский, М.В.Самойлов, А.М.Волк и В.И.Лобачевский // ЦИНТИхимнефтемаш, деп. - № 1583. - 1986. - 20 с.

7. Горбатович Ж.Н., Волк А.М. Моделирование двух процессов взаимодействия со средой // Применение математических методов и вычислительной техники при решении народнохозяйственных задач. - Гомель, 1986. - С. 120-121. - (Тез.докл.).

8. Левданский Э.И., Плехов И.М., Волк А.М. Исследование разделения газожидкостных потоков в центробежных аппаратах // ТОХТ. - 1987. - № 2. - С. 273-277.

9. Левданский Э.И., Волк А.М. Студение крупнодисперсных суспензий газовым потоком в перфорированном канале // М.: ЦИНТИхимнефтемаш, деп. - № 1702. - 1987. - 15 с.

10. Патент ГДР DD 259355 A1. Способ и устройства для разделения суспензии на жидкость и твердые частицы / Левданский Э.И., Кретов Н.И., ..., Волк А.М. и др. - 1988.

11. Патент ФРГ DE 3642276 C2. Способ для разделения суспензий на жидкость и твердые частицы, а также устройство для этого способа / Э.И.Левданский, А.Н.Карпович, ..., А.М.Волк и др. - 1989.

12. А.с. 1493290. МКИ В 01 35/22. Самоочищающийся фильтр / В.А.Бобрович, А.М.Волк, Н.П.Кохно и др. - Б.И., 1989. - № 26.

13. Волк А.М., Ковалев А.Н., Бобрович В.А. Исследование закономерностей разделения грубодисперсных суспензий в вихревой камере с проницаемой стенкой // Совершенствование технологии и оборудования для обращения калийных руд. - Пермь. - 1989. - С. 85-86. - (Тез.докл.).

14. Волк А.М., Кулешова И.Ф., Монастырский П.И. Численное решение задачи по движению жидкости между двумя цилиндрами с проницаемыми стенками бесконечной длины // М.: ВИНТИ, деп. - № 3790. - 1989. - 15 с.

15. Исследование поведения частиц при проточном фильтровании суспензий / Э.И.Левданский, А.М.Волк, В.Б.Труханович, А.Э.Левданский // М.: ЦИНТИхимнефтемаш, деп. - № 2008-ХН. - 1989. - 15 с.

16. Расчет оптимальных гидродинамических параметров вихревого разделителя суспензий / А.М.Волк, А.Н.Ковалев, Н.П.Кохно, Э.И.Левданский, Ю.М.Костюнин // Химическая промышленность. - 1990. - № 2. - С. 48-50.

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

α - диаметр частицы, м; D - диаметр цилиндра, м; \bar{F} - сила, Н; \bar{I} - относительная площадь отверстий проницаемой поверхности; g - ускорение свободного падения, м/с²; δ - толщина пограничного слоя, м; \bar{I} - момент инерции, кг/м²; l - длина, м; m - масса, кг; p - давление, Па; Q - объемный расход, м³/с; \bar{Q} - удельный объемный расход, м²/с; R - радиус, м; t - время, с; u - скорость жидкости, м/с; u_0 - скорость оттока жидкой фазы, м/с; V - скорость частицы, м/с; V_a - объем частицы, м³; w - скорость газа, м/с; w_0 - скорость оттока газа, м/с; x, y, z - прямоугольная система координат; α - угол, рад.; γ - коэффициент расхода; δ - толщина пленки, м; Δp - перепад давления, Па; ξ - коэффициент гидравлического сопротивления; χ - объемная доля взвешенных твердых частиц; λ - коэффициент трения; μ, μ_0 - коэффициент динамической вязкости суспензии и несущей среды, (Н·с)/м²; ρ - плотность, кг/м³; τ - касательные напряжения, Н/м²; $\varphi, \varphi, \varphi$ - цилиндрическая система координат; ω - угловая скорость, рад/с; ζ - коэффициент поверхностного натяжения, Н/м; ψ - влажность, %; Re - число Рейнольдса.

Знаки над символами: $\bar{}$ - среднее значение, приведенный параметр, вектор; \sim - относительная величина.

Индексы: А - Архимеда; Г - газа; Т - твердый; ТР - трения; ц - центробежная; а - частица; max - максимальный; N - нормальный; r - радиальный; z - осевой; d - пленка; p - касательный; o - начальное значение.

