

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

На правах рукописи

БОБРОВИЧ Владимир Аркадьевич

66.064.3

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОПЛЕНОЧНЫХ
ФИЛЬТРОВ-СУСТИТЕЛЕЙ

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 1993

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

доктор технических наук,
профессор ЛЕВДАНСКИЙ Э. И.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
профессор ГРИЧЕНКО А. А.

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
СУСЛОВ С. Л.

Ведущая организация

Гродненское ПО "Азот"

Защита диссертации состоится " 30 " июня 1993 г.
в 14 часов на заседании специализированного совета
К 056.01.03 по присуждению ученой степени кандидата наук
в Белорусском ордена Трудового Красного Знамени техно-
логическом институте им. С. М. Кирова (220630, г. Минск, ул.
Свердлова, 13а).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Бело-
русского технологического института им. С. М. Кирова.

Автореферат разослан " ____ " мая 1993 г.

Ученый секретарь
специализированного совета,
кандидат технических наук

 ПЕРМИНОВ Е. В.

С Белорус. ордена Трудового
Красного Знамени технол.
ин-т им. С. М. Кирова, 1993

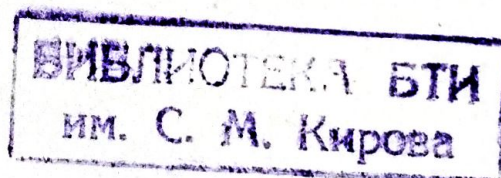
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В химической технологии широкое распространение имеют процессы разделения жидких неоднородных систем. Современная техника для разделения суспензий характеризуется большим многообразием конструкций и форм исполнения оборудования, которое в первую очередь определяется широким спектром условий его использования, связанных с физико-химическими свойствами твердой или жидкой фаз, концентрацией твердой фазы, формой и размерами ее частиц, а также различием в требованиях к эффективности разделения. Широкое распространение в технике разделения суспензий нашли аппараты, в которых разделение осуществляется методом фильтрации. Анализ современного состояния разделения суспензий фильтрацией показывает, что несмотря на определенные успехи, достигнутые в решении ряда теоретических вопросов, нельзя однозначно утверждать, что на основании имеющихся теоретических разработок можно решать подавляющее большинство задач в области промышленного фильтрации. Практические результаты отличаются от закономерностей, выражаемых известными уравнениями, поэтому необходимо дальнейшее изучение этого процесса и разработка высокоэффективных фильтров.

Промышленные фильтры работают с образованием осадка на фильтрующей поверхности, что вынуждает в ряде случаев проводить фильтрацию периодически, затрачивая значительное время на разгрузку осадка и подготовку фильтра для повторных циклов. Даже в непрерывно работающих аппаратах фильтрующая перегородка функционирует периодически. Поэтому достаточно эффективными представляются разработанные способы и аппараты для разделения суспензий, отличающиеся использованием энергии разделяемой суспензии и энергии однонаправленного с суспензией газового потока для проведения процессов сгущения-фильтрации с одновременной регенерацией фильтрующей перегородки. Задачи конструирования и внедрения в производство предложенных способов и устройств потребовали моделирования происходящих процессов и разработки инженерной методики расчета.

Вышеизложенное определяет актуальность тематики диссертационной работы, которая выполнялась на основе координационного плана Госкомитета по науке и технике СССР (задание N 1703), а также планов НИР Белорусского технологического института 1985-1992г.г. (N гос. регистрации 01840013903, 01850012050, 01860077896).

Цель работы. Разработка высокопроизводительных и эффективных



газопленочных фильтров-сгустителей, расходующих минимум энергии на регенерацию, совмещающих ее с процессом фильтрования, математическое моделирование происходящих процессов, проведение теоретических и экспериментальных исследований разработанных конструкций и их промышленное внедрение.

Научная новизна. Разработаны на уровне изобретений новые способы и аппараты для непрерывного разделения тонкодисперсных суспензий.

Разработана математическая модель процесса газопленочного фильтрования тонкодисперсных суспензий, как без образования осадка, так и с его накоплением.

Определены возможность и условия, необходимые для обеспечения саморегенерации фильтрующей поверхности разработанных конструкций фильтров.

Экспериментально исследовано влияние режимно-технологических и конструктивных параметров на показатели работы газопленочных фильтров-сгустителей.

Практическая ценность и реализация работы. Разработанный по результатам проведенных исследований способ газопленочного разделения суспензий реализован в промышленности в производстве гидроксиламина сульфата при отделении готового продукта от катализатора на Гродненском ПО "Азот", а также прошел промышленные испытания при очистке сточных вод цеха фтористого алюминия и криолита Гомельского химзавода.

Проведенные промышленные испытания, результаты внедрения и экономические расчеты показывают перспективность разработанного способа и конструкций для его осуществления при разделении тонкодисперсных суспензий. Скорость фильтрования в 5-10 раз выше, чем в центробежном фильтре-сгустителе или дисковом вакуум-filtре. Разработанные конструкции обладают низкой металлоемкостью на единицу фильтровальной поверхности, отличаются простотой конструкции, легкостью автоматизации и обслуживания. Отсутствие вращающихся углов и деталей обеспечивает высокую надежность газопленочных фильтров-сгустителей.

Экономический эффект от внедрения составил 130 тыс. руб. в год в ценах 1990 года.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на Всесоюзной научно-технической конференции "Повышение эффективности, совершенствование процессов и

аппаратов химических производств" (г. Харьков, 1985), 1X Всесоюзной научной конференции по химическим реакторам (г. Гродно, 1986), Всесоюзной научно-технической конференции "Процессы и аппараты полимерных материалов, методы и оборудование для переработки их в изделия" (г. Москва, 1986г.), Всесоюзной научно-технической конференции "Современные машины и аппараты химических производств" (г. Чикмент, 1988), отраслевой научно-технической конференции "Совершенствование технологии и оборудования для обогащения калийных руд" (г. Пермь, 1989), научно-технической конференции "Очистка воздуха и обезвреживание отходящих газов" (г. Пенза, 1991), научно-технических конференциях БТИ им. С. М. Кирова в 1985-1993г. г.

Автор защищает:

- новые способы и реализующие их конструкции для разделения тонкодисперсных суспензий путем организации прямоочного нисходящего движения пленки суспензии и газового потока вдоль фильтрующего элемента;
- результаты экспериментальных исследований эффективности разделения суспензий в зависимости от различных параметров;
- математическую модель процесса газопленочного фильтрования суспензий как без образования осадка, так и с его накоплением, программы расчета на ЭВМ;
- результаты промышленных испытаний и внедрения газопленочного способа фильтрования.

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 26 работах, в том числе 13 авторских свидетельствах СССР на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемой литературы (181 наименование), приложения. Работа изложена на 179 стр. машинописного текста, содержит 71 рисунок, 4 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

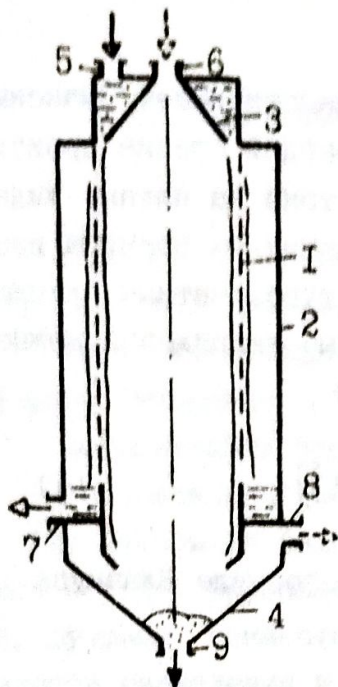
1. ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ СПОСОБОВ И УСТРОЙСТВ ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ ЖИДКИХ НЕОДНОРОДНЫХ СИСТЕМ

Процессы разделения жидких неоднородных систем в большинстве случаев осуществляются методами, основанными либо на использовании

равности плотностей фаз - осаждение, либо на задержании твердой фазы пористой перегородкой, пропускающей лишь жидкую фазу - фильтрование. Осаждение применяется в основном для предварительного сгущения суспензий и их классификации. Оборудование занимает значительные производственные площади и обладает низкой производительностью (резервуары, отстойники), или является сложнейшими технологическими установками (центрифуги непрерывного действия). Разделение суспензий фильтрованием осуществляется в различных конструкциях фильтров и фильтрующих центрифугах. Наиболее распространенный способ фильтрования - процесс с образованием осадка. Однако образование осадка на фильтрующей перегородке требует непрерывной или периодической ее регенерации, что значительно усложняет как технологическую схему, так и конструкцию фильтра. Поэтому определенный интерес представляют фильтры с разрушением структуры осадка, в которых в процессе фильтрования частицы твердой фазы находятся во взвешенном состоянии, в непрерывном движении и осадка, как такового в классическом понимании, при этом практически не образуется. Такие фильтры называют безосадочными, самоочищающимися, проточными, центробежными, динамическими, акустическими, вибрационными и т. п. Наиболее перспективным представляется способ проточного фильтрования, реализующий гидродинамический смыв осадка с неподвижных фильтровальных элементов самим потоком суспензии. Недостаточно детальное изучение механизма способа, использование повышенного давления и сложность регулирования процессом сдерживают его реализацию в промышленности. Использовать положительные эффекты проточного фильтрования и избавиться от отмеченных недостатков позволяет разработанный на уровне изобретения способ разделения суспензий, отличающийся использованием энергии разделяемой суспензии и энергии однонаправленного с суспензией газового потока для проведения процессов сгущения-фильтрования с одновременной регенерацией фильтрующей перегородки. В разработанном способе пленочное движение суспензии происходит по внутренней стенке цилиндрического фильтровального элемента в проточном режиме под воздействием силы тяжести и касательных напряжений сил трения, возникающих на границе газ-суспензия. В результате создаются условия, препятствующие отложению осадка на проницаемой поверхности.

Способ реализуется в устройстве, изображенном на рис. 1, следующим образом.

Исходная суспензия по штуцеру 5 поступает в камеру 3 и посред-



1-фильтрующий элемент;
2-корпус; 3-камера;
4-сборник; 5,6,7,8,9-штуцера.

Рис. 1. Фильтр-сгуститель.

элемента 1, отводится через штуцер 7. Применяя фильтрующие элементы конической формы, сужающиеся по ходу движения суспензии, либо устанавливая в выходном патрубке фильтрующего элемента сужение, например, диафрагму, конус или на патрубке выхода отработанного газового потока запорно-регулирующей арматуры, можно устанавливать и регулировать в широком диапазоне давление процесса фильтрации.

Дальнейшее использование вышеописанного способа требует более детального изучения механизма процесса и на его базе разработки новых высокоэффективных конструкций аппаратов для разделения суспензий.

2. АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ МНОГОФАЗНЫХ СИСТЕМ.

Изучение движения пленок жидкости по внутренней поверхности цилиндра показывает, что модели, полученные для однофазных потоков, удовлетворительно описывают движение систем газ-жидкость, жидкость-твердые. При установившемся течении и отсутствии градиента

ством кольцевого зазора формируется в пленку и поступает на внутреннюю поверхность фильтрующего элемента 1. Сверху через центральный штуцер 6 в фильтрующий элемент 1 вводится газовый поток. Поскольку скорость газового потока значительно выше скорости движения пленки, то за счет касательных напряжений поток воздействует на пленку, увеличивая скорость ее движения, и исключает формирование неподвижного осадка из твердых частиц на фильтрующей поверхности. В элементе 1 при движении газа создается избыточное давление, которое будет воздействовать на пленку стекающей суспензии и способствовать увеличению скорости фильтрации жидкости через фильтрующий элемент. На выходе из элемента 1 газ попадает в сборник 4 и отводится через штуцер 8, а концентрат через штуцер 9.

Фильтрат, стекая по наружной поверхности

давления вдоль потока локальная скорость жидкости имеет максимальное значение на свободной поверхности. На твердой стенке происходит прилипание жидкости. Воздействие газового потока на пленку жидкости передается посредством сил трения, возникающих на границе взаимодействия фаз. Для газожидкостного потока с турбулентным движением газа и ламинарным течением пленки касательные напряжения можно определить из соотношения полученного Уоллисом

$$\tau = \frac{\lambda}{8} \frac{\rho W^2}{\varphi_r} [1 + 75(1 - \varphi_r)] \quad (1)$$

Коэффициент трения λ определяется по формуле Блазиуса

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} \quad (2)$$

Касательные напряжения на стенках трубы определяются гидродинамическим напором

$$\tau = \frac{\lambda}{4} \frac{\rho W^2}{2} \quad (3)$$

Полагая одномерность потока скорость оттока на проницаемых поверхностях может быть определена на основании закона Бернулли

$$v_\infty = \varphi \sqrt{2\Delta P/\rho} \quad (4)$$

Рекин установил, что параметром, характеризующим значение коэффициента истечения является отношение $\Delta P/q_c$, причем при $\Delta P/q_c = 0 \rightarrow \varphi = 0$, а при $\Delta P/q_c \gg 1$ коэффициент истечения асимптотически приближается к предельному значению φ_∞ .

$$\varphi = \varphi_\infty [1 - \exp(-\sqrt{\frac{2\Delta P}{q_c}})] \quad (5)$$

Движение потока суспензии в перфорированном канале может быть описано с помощью уравнений Навье-Стокса при соответствующих граничных условиях. Для учета вязкого взаимодействия между элементарными фильтрационными потоками вводится понятие эффективной вязкости. Работы, исследующие данную задачу, носят разнообразный и противоречивый характер. Однако сравнение теоретических данных с экспериментальными исследованиями показало, что выражение Халпеля для определения эффективной вязкости можно использовать для суспензий с объемной концентрацией до 50%. Это позволяет применить к суспензиям законы, полученные для ньютоновской жидкости.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ГАЗОПЛЕНОЧНОГО ФИЛЬТРОВАНИЯ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ СУСПЕНЗИЙ

В ходе исследований выявлено влияние следующих характеристик на процесс фильтрования тонкодисперсных суспензий:

- типа материала фильтрующего элемента и размера частиц твердой фазы суспензии;
- концентрации суспензии и ее физико-химических свойств;
- гидродинамических и конструктивных факторов.

Тип материала фильтрующего элемента (размер пор, свойства волокон и т. д.) оказывает существенное влияние на процесс фильтрования. Лучшими показателями по совокупности двух факторов - эффективности разделения и сопротивления фильтрованию характеризуется сукно и нетканый иглопробивной материал. Определяющее влияние на эффективность процесса фильтрования и достижение режима саморегенерации оказывает размер частиц твердой фазы суспензии. Исследования проводились на суспензиях с фракционированными частицами криолита. Установлено, что основное влияние на динамику засорения фильтрующей поверхности оказывают мелкие фракции твердых частиц до 20 мкм. С возрастанием размера фракции повышается эффективность разделения и для частиц размером более 25-27 мкм она достигает почти 100% значения. А начиная с размера частиц 30-35 мкм происходит практически полная саморегенерация фильтрующей поверхности элемента, выполненного из иглопробивной ткани секстра. Режим полной саморегенерации характеризуется постоянством гидравлического сопротивления, скорости фильтрования и эффективности разделения.

Установлено, что с увеличением начальной концентрации твердой фазы в суспензии снижается скорость фильтрования. Исследования показали, что динамика забивки фильтрующей перегородки для различных видов суспензий неодинакова, что объясняется отличием их физико-химических свойств. Изменение концентрации суспензии не влияет на эффективность разделения.

При постоянстве прочих факторов увеличение перепада давления до определенных величин приводит к повышению скорости фильтрования. По результатам исследований можно сделать вывод, что проточное фильтрование следует осуществлять при перепаде давления не выше 20 кПа. Дальнейшее повышение перепада давления приводит к образованию слоя осадка и его пропорциональному увеличению. Исследованием влияния удельного расхода суспензии на скорость фильтрования

установлено, что процесс необходимо вести при удельном расходе суспензии от $0,4 \cdot 10^{-3}$ до 10^{-3} м³/м²·с. Дальнейшее увеличение расхода ведет к снижению скорости фильтрования. Повышение скорости газового потока с одной стороны стабилизирует процесс проточного фильтрования, т.к. увеличивая скорость движения пленки суспензии вдоль фильтрующей поверхности, предотвращает отложение на ней твердых частиц. С другой стороны увеличение скорости газового потока ведет к снижению скорости фильтрования не только за счет чрезмерного увеличения скорости пленки суспензии, но и за счет срыва с поверхности волнистой пленки значительной части суспензии. Поэтому скорость газового потока не должна превышать 10 м/с. Исследованиями установлено, что для организации равномерной плотности орошения по всей фильтрующей поверхности проводить процесс газопленочного фильтрования желательно на фильтрующих элементах с диаметром входа до 100-150 мм, обеспечивая необходимую поверхность фильтрования увеличением количества элементов. Исследование влияния диаметра выходного отверстия фильтрующего элемента на скорость фильтрования показало, что диаметр необходимо выполнять возможно меньших размеров, используя коническую форму элементов либо запорно-регулирующие устройства.

Анализ исследований процесса разделения тонкодисперсных суспензий газопленочным способом показывает, что достаточно достоверные результаты достигаются при сочетании экспериментальных и теоретических методов. При математическом моделировании пленочного течения, с введением эффективной вязкости, как отмечалось выше, суспензия может рассматриваться как ньютоновская жидкость в пределах изменения концентрации до 50%.

Установившееся осесимметричное течение вязкой несжимаемой жидкости по внутренней стенке пронизываемого цилиндра под воздействием газового потока (рис. 2) описано в цилиндрической системе координат уравнениями Навье-Стокса для осевой составляющей скорости и неразрывности

$$\rho \left(v \frac{\partial u}{\partial r} + u \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho g - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (6)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v) + \frac{\partial u}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

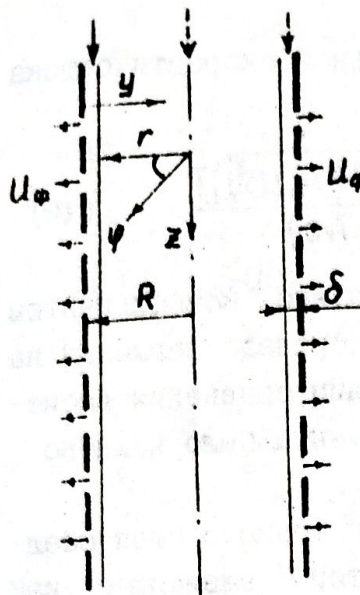


Рис. 2. Схема газопленочного фильтрования

Считая скорость оттока, а, следовательно, и радиальный расход жидкой фазы на некотором элементарном цилиндре длиной Δz постоянными, нашли радиальную скорость в пленке жидкости: $v = u_\phi R/r$. Тогда из уравнения неразрывности (7) получили $\partial u / \partial z = 0$ и $u = u(r)$. Пренебрегая капиллярными силами поверхностного натяжения пленки, полагали $\partial R / \partial z = 0$, и, учитывая, что в цилиндре большого диаметра радиус по толщине пленки изменяется незначительно, можно $1/r$ заменить на $1/R$. Перенеся начало координат на внутреннюю стенку цилиндра, выполнив замену $r = R - y$, получили уравнение для осевой скорости в пленке суспензии

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \left(\frac{u_\phi}{\nu} - \frac{1}{R} \right) \frac{du}{dy} = - \frac{g}{\nu} \quad (8)$$

Обозначили $\lambda = u_\phi / \nu - 1/R$ и нашли общее решение уравнения (8)

$$u = B_1 \exp(-\lambda y) + B_2 - \frac{g}{\lambda \nu} y \quad (9)$$

Приняв выполненным условие прилипания и равенство касательных напряжений на границе раздела фаз, получено решение

$$u = \left(\frac{\sigma}{\mu} + \frac{g}{\lambda \nu} \right) \frac{1}{\lambda} \exp(\lambda \delta) [1 - \exp(-\lambda y)] - \frac{g}{\lambda \nu} y \quad (10)$$

Интегрированием осевой составляющей скорости (10) по толщине пленки найден объемный расход на единицу периметра

$$Q = \int_0^\delta u dy = \left(\frac{\sigma}{\mu} + \frac{g}{\lambda \nu} \right) \frac{1}{\lambda^2} [(\lambda \delta - 1) \exp(\lambda \delta) + 1] - \frac{g \delta^2}{2 \lambda \nu} \quad (11)$$

Изменение удельного объемного расхода описывается уравнением $dQ/dz = u_\phi (u_\phi > 0)$, а концентрации суспензии уравнением $dc/dz = c u_\phi / Q$. Воздействие газового потока передается через силы поверхностного трения. При условии непрерывности тензоры касательных напряжений на границе раздела фаз с учетом нерегулярной шероховатости стенок канала при пленочном течении

$$\sigma = \frac{0.3164}{Re_r^{0.25}} \frac{\rho W}{8} \left(1 + 150 \frac{\delta}{R} \right) \quad (12)$$

Обобщением экспериментальных исследований и выполненных расчетов по полученной математической модели на основании закона Дарси

была найдена зависимость для определения локальной скорости оттока жидкой фазы

$$u_{\phi} = \left(\frac{\Delta P}{\mu(R_{\phi,л.} + R_{ос})} = \frac{\Delta P [1 - \exp(-m \sqrt{\Delta P / (\rho \langle u_{\phi}^2 \rangle)})]}{\mu(R_{\phi,л.} + A c)} \right) \quad (13)$$

Влияние на процесс гидродинамики течения учтено коэффициентом фильтрации γ , который зависит от отношения перепада давления на стенке к скоростному напору пленки. На основании сравнения расчетов по зависимостям (6,11-13) и данных эксперимента было найдено $m = 0,2$.

Сопротивление фильтровальной перегородки и тонкого слоя осадка, образующегося при заполнении всех неровностей, зависящее как от структуры проницаемой поверхности, так и от физико-химических свойств твердой фазы суспензии, получено экспериментально для исследованных материалов. При фильтровании суспензии графит-вода с размером частиц твердой фазы до 90 мкм получено значение коэффициента $A = 4,3 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-1}$. Фильтрование проводилось при среднерасходной скорости газа 7 м/с и избыточном давлении 7,5 кПа. Длина проницаемого элемента составляла 2 м. Исходный объемный расход суспензии выбирался таким образом, чтобы концентрация изменялась от $C_0 = 0,05$ на входе до 0,5 на выходе. При этом не наблюдалось накопления осадка. Расчет проводился пошаговым методом. Шаг изменения длины выбирался таким, чтобы при его уменьшении в два раза и повторном пересчете изменяющиеся величины совпадали с наперед заданной точностью. Результаты выполненных расчетов по формулам (6,11-13) приведены на рис. 3. Концентрация суспензии и ее реологические свойства существенно изменяются лишь на конном участке фильтра. Профиль осевой составляющей скорости (10) характерен большим градиентом на проницаемой поверхности (рис. 4). Осевая составляющая скорости (10) на расстоянии 2 мкм от поверхности более чем на порядок выше радиальной, что обеспечивает гидродинамический смыв частиц достаточно малого размера. Исследование под микроскопом образцов работающих фильтров показывает, что происходит лишь заполнение шероховатостей поверхности осадком фильтрующей суспензии.

Выполненные исследования показали устойчивую работу фильтра в пределах объемного расхода суспензии до $Re_{\phi} = 1600$. Отток жидкой фазы уменьшает степень турбулентности, стабилизирует пленочное течение. Средняя скорость оттока на фильтровальной поверхности $V_{\phi} = 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}$, что в 5-10 раз выше, чем в центробежном фильтре-сгустителе или

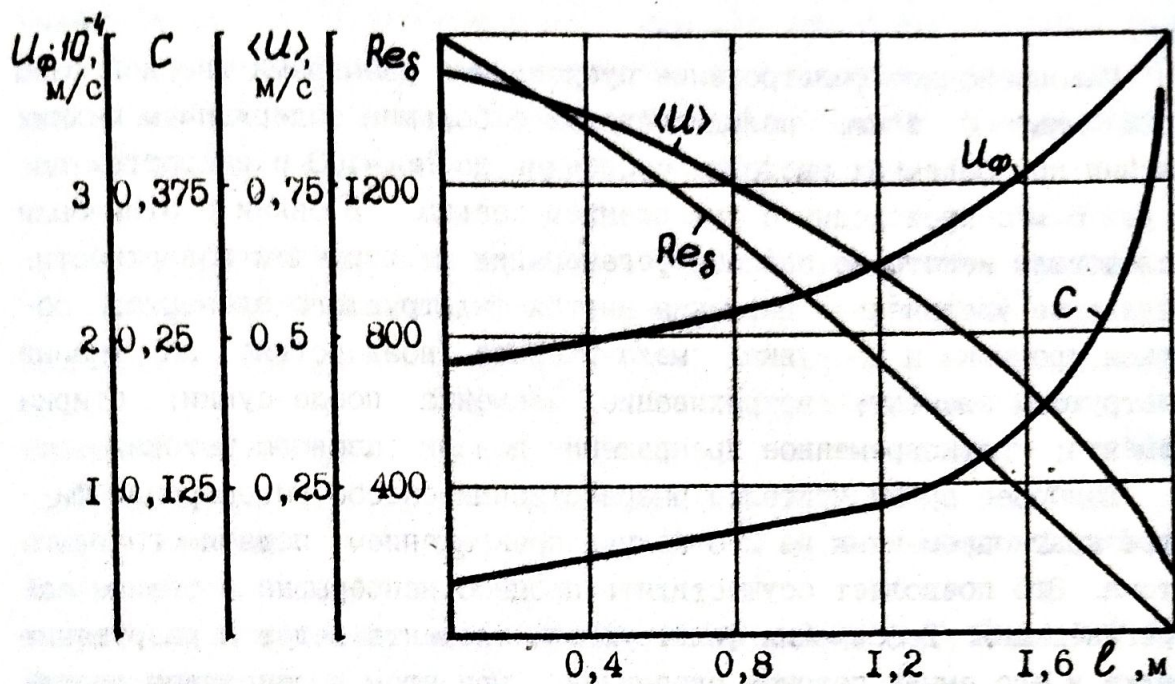


Рис.3. Изменение характеристик пленочного течения суспензии по длине фильтра

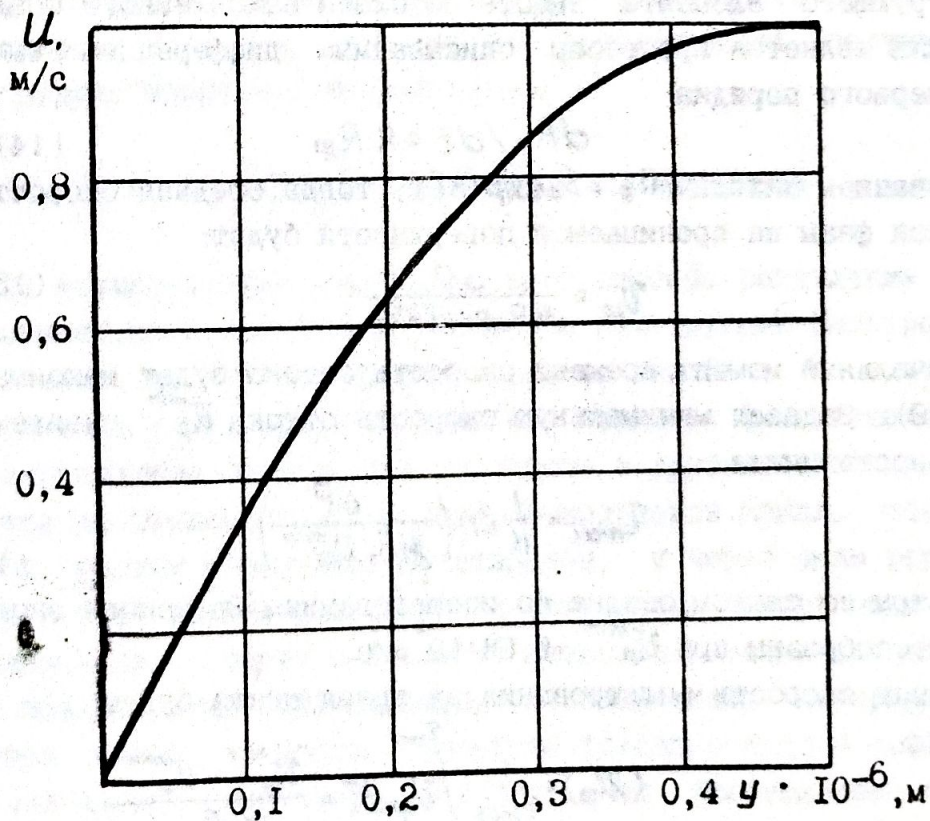


Рис.4. Изменение осевой составляющей скорости в пленке суспензии

дисковом вакуум-филт্রে. Кроме того, чистота фильтрата на порядок выше.

Газопленочное фильтрование суспензий с размерами твердой фазы до 25 мкм, а также полидисперсных с большим содержанием мелких фракций при объемных расходах суспензии до $Re_\delta = 400$ и скоростях газа до 5 м/с происходит с накоплением осадка. В связи с этим были исследованы некоторые способы регенерации фильтрующей поверхности: импульсное увеличение давления внутри фильтрующего элемента; обратная промывка и продувка; механическое воздействие на тканый фильтрующий элемент; встряхивание элемента после сушки; стирка элемента; кратковременное прекращение подачи газового потока.

Наиболее предпочтителен разработанный способ регенерации фильтра кратковременным на 2-6 секунд прекращением подачи газового потока. Это позволяет осуществлять процесс непрерывно в режиме саморегенерации. Деформация фильтрующего элемента ведет к разрушению осадка и его смыву потоком суспензии. При этом достигается достаточно высокая степень регенерации, которая практически сохраняется на одном уровне от цикла к циклу.

Экспериментальные исследования показали, что изменение сопротивления фильтрующего элемента вместе со слоем накопленного осадка во время цикла является процессом описываемым дифференциальным уравнением первого порядка

$$dR_\phi / d\tau = K R_\phi \quad (14)$$

Интегрированием находим: $R_\phi = R_0 \exp(K\tau)$, тогда средняя скорость оттока жидкой фазы на проницаемой поверхности будет:

$$v_\phi = \frac{\Delta P}{\mu R_0 \exp(K\tau)} \quad (15)$$

В начальный момент времени скорость оттока будет максимальной $v_\phi^{max} = v_\phi(0)$. Задавая минимальную скорость оттока v_ϕ^{min} , найдем продолжительность цикла

$$\tau_{max} = \frac{1}{K} \ln \left(\frac{\Delta P}{\mu R_0 v_\phi^{min}} \right) \quad (16)$$

Фильтры со смывом осадка по исследованиям Вронского экономически целесообразны при $v_\phi^{min} = 5,56 \cdot 10^{-5}$ м/с.

Средняя скорость фильтрования за время цикла будет

$$\langle v_\phi \rangle = \frac{1}{\tau_{max}} \int_0^{\tau_{max}} v_\phi d\tau = \frac{v_\phi^{max} - v_\phi^{min}}{K \cdot \tau_{max}} \quad (17)$$

В таблице 1 приведены рассчитанные характеристики газоплено-

ного фильтрования через трикотажную ткань суспензии графит-вода с размером частиц твердой фазы 2-25 мкм для некоторых способов регенерации. Сопротивление фильтровальной поверхности после регенерации и порядок K процесса изменения сопротивления находились из экспериментальных данных на основании зависимости (15).

Таблица 1.

Характеристика процесса фильтрования с накоплением осадка при $U_{\phi}^{min} = 5,56 \cdot 10^{-5}$ м/с; $\Delta P = 3$ кПа; $W = 1,5$ м/с; $C_0 = 0,05$; $l = 2$ м.

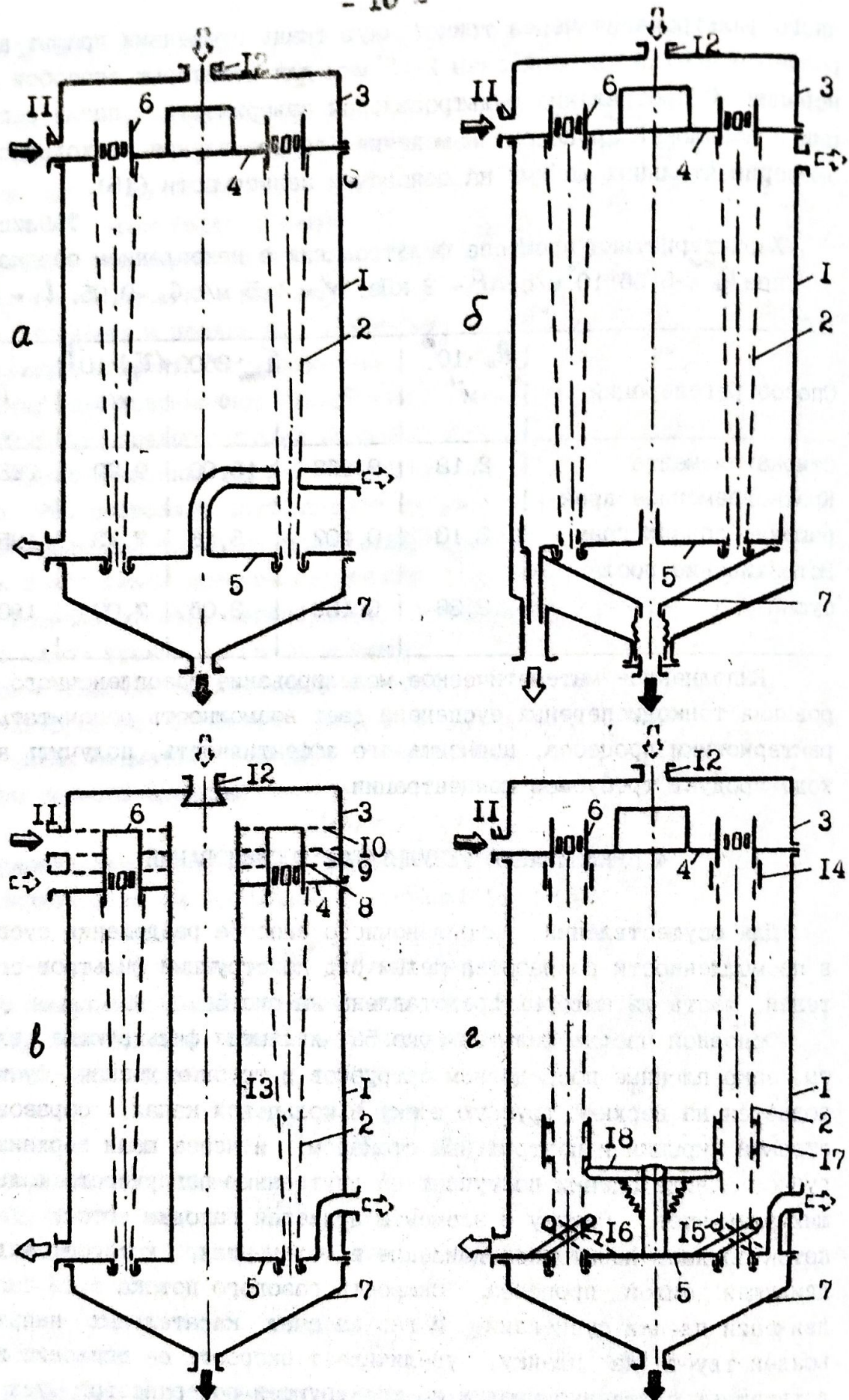
Способ регенерации	$R_0 \cdot 10^6$ м ⁻¹	K	$(\zeta_{min} \cdot 3600 \cdot K U_{\phi}) \cdot 10^5$ с	м/с	Re_{δ}
Стирка элемента	2,13	0,062	15,00	9,20	285-110
Кратковременное прекращение подачи газа	3,10	0,107	5,16	7,42	195-110
Встряхивание после сушки	3,39	0,152	3,06	7,07	180-110

Выполненное математическое моделирование газопленочного фильтрования тонкодисперсных суспензий дает возможность рассчитать характеристики процесса, повысить его эффективность, получить на выходе продукт требуемой концентрации.

4. РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для осуществления газопленочного способа разделения суспензий в промышленности разработан целый ряд конструкций фильтров-сгустителей, часть из которых представлена на рис. 5.

Основной частью фильтра (рис. 5а) являются фильтрующие элементы, закрепленные посредством патрубков в трубных досках. Суспензия подается на верхнюю трубную доску в кольцевой канал, образованный стенкой крышки и центральным стаканом, и через щели верхних патрубков в виде пленки поступает на внутреннюю поверхность фильтрующих элементов. Сверху в элементы подается газовый поток. Газовый поток создает избыточное давление в элементах, которое является движущей силой процесса. Скорость газового потока выше скорости движения пленки суспензии, и газ за счет касательных напряжений воздействует на пленку, увеличивает скорость ее движения и предотвращает отложение осадка на фильтрующей поверхности. Суспензия,



1 - корпус; 2 - фильтрующие элементы; 3 - крышка; 4, 5 - трубные доски; 6 - патрубки; 7 - сборник; 8, 9, 10 - распределительные тарелки; 11, 12 - штуцера; 13, 17 - обечайки; 14 - компенсаторы; 15 - шарики; 16 - желоба; 18 - заделки.

Рис. 5. Конструкции газопленочных фильтров-сгустителей

стекая вниз, разделяется на фильтрат, который отводится с нижней трубной доски, и концентрат, который, попадая в сборник концентрата, выводится из аппарата. В сборнике концентрата предусмотрен штуцер для отвода отработанного газового потока.

Для снижения трудоемкости монтажа и замены фильтрующих элементов, а также обеспечения возможности использования тканевых фильтрующих элементов подверженных вытягиванию в процессе работы, разработана конструкция фильтра, изображенная на рис. 5б. Отличительной особенностью конструкции является выполнение нижней трубной доски свободно висящей на фильтрующих элементах. Такая конструкция обеспечивает достаточное натяжение элементов, благодаря чему даже при растяжении они сохраняют вертикальную форму с кольцевым поперечным сечением, что обуславливает устойчивый гидродинамический режим ведения процесса. Появилась возможность монтажа и замены фильтрующих элементов вне аппарата, причем можно иметь несколько собранных комплектов.

Для разделения углеграфитосодержащих суспензий разработана конструкция фильтра, представленная на рис. 5в. Отличительной особенностью конструкции является наличие перфорированных распределительных тарелок 8,9,10 над верхней трубной доской, причем степень перфорации тарелок увеличивается от нижней к верхней. Под нижней распределительной тарелкой 8 установлен штуцер ввода дополнительного потока газа, а под верхней тарелкой - штуцер ввода суспензии 11, кроме того, в центре фильтра, между верхней тарелкой 10 и нижней трубной доской 5 установлена обечайка 13, а верхние патрубки 6, на которых крепятся фильтрующие элементы 2, заглушены сверху. Фильтр работает следующим образом. Исходная суспензия через штуцер 11 поступает на тарелку 9, затем на тарелку 8 и через патрубки 6 вместе с частью газового потока подается внутрь элементов 2. Остальная часть газа проходит через распределительные решетки 8,9,10, дробится на мелкие пузырьки, которые, проходя сквозь слой суспензии, захватывают твердые частички и выносят их в верхнюю часть фильтра, тем самым осветляя (уменьшая концентрацию) суспензии перед поступлением в фильтрующие элементы. В верхней части фильтра над тарелкой 10 образуется пена, которая поступает в центральную обечайку 13 и с помощью газового потока, вводимого посредством штуцера 12, транспортируется непосредственно в сборник 7, увеличивая концентрацию сгущенного продукта.

Фильтрация суспензий с накоплением осадка газопленочным способом, с обеспечением непрерывности процесса, может осуществ-

вляться в разработанной конструкции фильтра, представленной на рис. 5г. Рукавные фильтрующие элементы 2 верхней частью присоединены к патрубкам 6 посредством эластичных компенсаторов 14. В нижней части элементов 2 на наружной поверхности диаметрально противоположно закреплены шарики 15, которые установлены с возможностью перемещения в желобах 16, имеющих винтовую форму и жестко смонтированных на нижней трубной доске 5. Над шариками на элементах 2 закреплены цилиндрические обечайки 17, опирающиеся нижней кромкой на подпружиненные защелки 18, установленные на нижней трубной доске. При работе фильтра, при накоплении определенного слоя осадка вес фильтрующих рукавов начинает превышать усилие пружины защелки 18, рукава, посредством обечаек 17, отодвигают защелки и опускаются, растягивая компенсаторы 14, и одновременно поворачиваются, благодаря наличию шариков 15, перемещающимся по винтовым желобам 16. Отложившийся осадок разрушается и смывается в сборник концентрата, а рукава с помощью компенсаторов возвращаются в начальное положение.

Рассмотренный в данной работе способ газопленочного разделения суспензий был внедрен на Гродненском ПО "Азот". Согласно проекта фирмы BASF отделение катализатора "платина на графите" от водного раствора гидроксиламинсульфата производилось на патронных фильтрах периодического действия. Отделенный катализатор в количестве 800 кг (1 единица) в течение короткого времени серной кислотой смывался в первый по ходу реактор синтеза. Следствием этого являлось резкое повышение концентрации катализатора в первом по ходу кислоты реакторе и снижение концентрации катализатора в последующих реакторах в течение одного цикла процесса фильтрования. Механическое повреждение фильтрующих патронов, "выдавливание" прокладки на фильтре из-за повышения давления, обусловленного забивкой фильтрующих элементов, часто приводило к полной остановке каскадов синтеза, увеличению потерь водорода, окиси азота, снижению выработки. Кроме того, наличие 276 патронов в импортном фильтре предопределяет сложность обнаружения и замены неисправных элементов.

Внедренный фильтр, работающий по способу газопленочного фильтрования, имеет восемь фильтровальных элементов с общей поверхностью фильтрования $13,2 \text{ м}^2$. Суспензия с концентрацией 50 г/л в количестве $13,7 \text{ м}^3/\text{ч}$ непрерывно подавалась на фильтр. Производительность по фильтрату составила $0,886 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ при перепаде давления в фильтрующих элементах $0,2 \text{ кг/см}^2$, причем концентрация ката-

лизатора в готовом продукте находилась в начальный период в пределах 0,001-0,004 г/л и в дальнейшем снижалась, в то время как существующая ПДК допускает 0,01 г/л. Стоимость фильтра составила 5,6 тыс. руб., а стоимость применяемого импортного фильтра в десятки раз выше. Кроме того внедрение способа позволило непрерывно, с заданной скоростью возвращать катализатор в каскад и тем самым поддерживать постоянную концентрацию катализатора в реакторах. За счет этого поддерживается оптимальная скорость образования гидроксиламинсульфата, удалось снизить удельные нормы расхода аммиака, кислорода, азотно-водородной смеси, повысить стабильность процесса.

Способ газопленочного фильтрования прошел также промышленные испытания на Гомельском химзаводе для очистки сточных вод от взвешенных частиц цеха фтористого алюминия и криолита. Разработана конструкция фильтра для реализации способа.

Рассмотренный способ разделения суспензий экономичнее, более прост в реализации и требует гораздо меньших затрат на ремонт и эксплуатацию оборудования.

ВЫВОДЫ

1. На основании проведенного критического анализа существующих способов и устройств для разделения жидких неоднородных систем разработаны новые высокоэффективные способы непрерывного разделения тонкодисперсных суспензий, заключающиеся в организации прямо-точного нисходящего движения пленки суспензии и газового потока вдоль фильтрующего элемента с обеспечением возможности регулирования скорости процесса разделения. Для процесса фильтрования суспензий с размерами твердой фазы до 25 мкм, происходящего с накоплением осадка, разработан новый эффективный способ регенерации тканевых фильтрующих элементов.

2. Разработанные конструкции фильтров-сгустителей, для реализации способа газопленочного фильтрования высокоэффективны, обладают низкой металлоемкостью на единицу фильтровальной поверхности, отличаются простотой конструкций, надежностью в работе, возможностью автоматизации и легкостью обслуживания.

3. На основании уравнений Навье-Стокса и закона Дарси получена математическая модель процесса газопленочного фильтрования тонкодисперсных суспензий как без образования осадка, так и с его на-

коплением на фильтрующей поверхности. С учетом экспериментальных исследований и на основании полученной математической модели разработана методика инженерного расчета разделения фаз суспензий и даны рекомендации по проектированию промышленного варианта фильтра-сгустителя.

4. Способ газопленочного разделения суспензий реализован в промышленности в производстве гидроксиламинсульфата при отделении готового продукта от катализатора на Гродненском ПО "Азот", а также прошел промышленные испытания при очистке сточных вод цеха фтористого алюминия и криолита Гомельского химзавода. Экономический эффект от внедрения составил 130 тыс. рублей в ценах 1990 года.

Материалы диссертации опубликованы в следующих работах.

1. Бобрович В. А., Левданский Э. И., Плехов И. М. Исследование и внедрение самоочищающихся фильтров-сгустителей // Повышение эффективности, совершенствование процессов и аппаратов химических производств. - Харьков. - 1985. - Ч. 1. - С. 55. - (Тез. докл.).

2. А. с. 1153954 СССР. Способ сгущения суспензий / И. М. Плехов, Э. И. Левданский, В. А. Бобрович и др. - Б. И., 1985. - N 17.

3. А. с. 1155284 СССР. Рукавный фильтр / Э. И. Левданский, И. М. Плехов, Н. П. Кохно, В. А. Бобрович. - Б. И., 1985. - N 18.

4. Левданский Э. И., Бобрович В. А., Плехов И. М. Фильтрование без образования осадка из пленочного потока суспензии // Химическая промышленность. - 1986. - N 9. - С. 48-49.

5. А. с. 1255170 СССР. Способ сгущения суспензий / И. М. Плехов, Э. И. Левданский, В. А. Бобрович и др. - Б. И., 1986. - N 33.

6. Бобрович В. А., Левданский Э. И., Плехов И. М. Непрерывный способ удаления катализатора из реакционной среды // Материалы IX Всес. НТК по химическим реакторам "Химреактор-9". - Гродно. - 1986. - Ч. 3. - С. 289-294. - (Тез. докл.).

7. Бобрович В. А., Левданский Э. И. Повышение эффективности процессов разделения полимерных материалов // Процессы и аппараты производства полимерных материалов, методы и оборудование для переработки их в изделия. - Москва. - 1986. - Т. 2. - С. 89. - (Тез. докл.).

8. А. с. 1282876 СССР. Самоочищающийся фильтр / И. М. Плехов, Э. И. Левданский, В. А. Бобрович, Н. П. Кохно. - Б. И., 1987. - N 2.

9. А. с. 1344991 СССР. Способ сгущения суспензий / В. А. Бобрович, Э. И. Левданский, В. И. Лобачевский, Н. П. Кохно. - Б. И., 1987. - N 38.

10. А. с. 1360781 СССР. Самоочищающийся фильтр / В. А. Бобрович,

Э. И. Левданский, Н. П. Кохно, М. В. Самойлов. - Б. И., 1987. - N 47.

11. Бобрович В. А., Левданский Э. И., Плехов И. М., Кохно Н. П. Разработка и исследование газопленочного саморегенерирующегося фильтра-сгустителя биологических суспензий // Сборник. Расчет и конструирование биотехнической аппаратуры, М., МИХМ - 1988. - С. 53-57.

12. Бобрович В. А., Левданский Э. И., Плехов И. М., Кохно Н. П. Исследование процесса разделения суспензий в самоочищающемся газопленочном фильтре-сгустителе // Современные машины и аппараты химических производств. - Чимкент. - 1988. - Ч. 1. - С. 190-191. - (Тез. докл.).

13. А. с. 1428431 СССР. Рукавный фильтр / Н. П. Кохно, Э. И. Левданский, В. А. Бобрович, М. В. Самойлов. - Б. И., 1988. - N 37.

14. Левданский Э. И., Плехов И. М., Кохно Н. П., Бобрович В. А. Определение условий саморегенерации проточного рукавного фильтра // Пластические массы. - 1988. - N 5. - С. 38-39.

15. Кохно Н. П., Плехов И. М., Бобрович В. А., Самойлов М. В. Разработка и исследование динамических рукавных фильтров с саморегенерацией фильтрующей перегородки // Современные машины и аппараты химических производств. - Чимкент. - 1988. - Ч. 1. - С. 60-61. - (Тез. докл.).

16. А. с. 1489806 СССР. Самоочищающийся фильтр / В. А. Бобрович, Н. П. Кохно, Э. И. Левданский, М. В. Самойлов. - Б. И., 1989. - N 24.

17. 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 обогащения калийных руд. - Пермь. - 1989. - С. 85-86. - (Тез. докл.).

18. А. с. 1493990 СССР. Самоочищающийся фильтр / В. А. Бобрович, А. М. Волк, Н. П. Кохно и др. - Б. И., 1989. - N 26.

19. Волк А. М., Ковалев А. Н., Плехов И. М., Бобрович В. А. Исследование закрученного газового потока в вихревой камере с проницаемыми стенками // Межвед. сборник. Реология, процессы и аппараты химической технологии. - Волгоград. - 1989. - С. 64-67.

20. А. с. 1590109 СССР. Рукавный фильтр / Н. П. Кохно, В. А. Бобрович. - Б. И., 1990. - N 33.

21. А. с. 1600847 СССР. Фильтр-сгуститель / В. А. Бобрович, Н. П. Кохно, А. Н. Ковалев, А. Э. Левданский. - Б. И., 1990. - N 39.

22. Бобрович В. А., Волк А. М., Плехов И. М., Кохно Н. П. Запат.

мерности газопленочного способа сгущения тонкодисперсных суспензий // Материалы юбилейной НТК по итогам НИР БТИ им. С. М. Кирова-60. - Минск. - 1990. - С. 204.

23. А. с. 1607893 СССР. Самоочищающийся фильтр / В. А. Бобрович, Н. П. Кохно, А. Н. Ковалев, М. В. Самойлов. - Б. И., 1990. - N 43.

24. Волк А. М., Кохно Н. П., Бобрович В. А. Очистка газа рукавным фильтром в режиме саморегенерации // Очистка воздуха и обезвреживание отходящих газов. - Пенза. - 1991. - С. 32-33.

25. А. с. 1678419 СССР. Фильтр-сгуститель / И. М. Плехов, В. А. Бобрович, А. М. Волк, В. Н. Гуляев. - Б. И., 1991. - N 35.

26. Волк А. М., Бобрович В. А., Плехов И. М. Газопленочное фильтрование мелкодисперсных суспензий // Инженерно-физический журнал. - 1992. - Т. 63. - С. 702-707.

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

A - коэффициент сопротивления осадка, м; C_0, C - начальная и текущая объемная концентрация, %; B_1, B_2 - произвольные константы; g - ускорение свободного падения, м/с²; K - коэффициент, выражающий порядок изменения сопротивления фильтра; l, R - длина и радиус цилиндрического фильтровального элемента, м; m - коэффициент; P - давление, Па; Q - объемный расход суспензии на единицу периметра, м³/мс; r, φ, z - цилиндрические координаты; R_0, R_ϕ - сопротивление фильтровального элемента вместе со слоем осадка в начале цикла и в процессе фильтрования, м²; U, V - осевая и радиальная составляющие скорости в пленке жидкости, м/с; U_ϕ, V_ϕ - локальная и средняя скорости оттока жидкой фазы на фильтровальной поверхности, м/с; $U_\phi^{max}, U_\phi^{min}, \langle U_\phi \rangle$ - максимальная, минимальная и средняя скорости фильтрования в период цикла, м/с; W - среднерасходная скорость газа, м/с; y - расстояние от фильтровальной поверхности, м; γ - коэффициент фильтрования, учитывающий гидродинамику потока; Δ - приращение; δ - толщина пленки, м; λ - коэффициент; μ_r, μ_0, μ - коэффициент динамической вязкости газа, жидкой фазы и суспензии соответственно, (Н·с)/м²; ν - коэффициент кинематической вязкости суспензии, м²/с; ρ - плотность, кг/м³; τ - время, с; τ_{max} - время цикла, с; σ - касательные напряжения на границе раздела потоков газ-суспензия, Н/м; $Re_r = \rho_r W 2R / \mu_r$ - число Рейнольдса для газа; $Re_\delta = 4Q / \nu$ - число Рейнольдса для пленки суспензии; q_c - скоростной напор потока, кг/(мс²); φ_r - газосодержание.

Индексы: c - суспензии; g - газа; $\phi, п$ - фильтровальной перегородки; $ос$ - осадка; δ - пленки.

В. А. Бобрович

Бобрович Владимир Аркадьевич
РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОПЛЕНОЧНЫХ
ФИЛЬТРОВ-СГУСТИТЕЛЕЙ

Подписано в печать 20.05.93. Формат 60x84 1/16.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,5. Усл. кр. - отт. 1,5. Уч. - изд. л. 1,3.

Тираж 100 экз. Заказ 252. Бесплатно.

Белорусский ордена Трудового Красного Знамени технологический институт им. С. М. Кирова. 220630, Минск, Свердлова, 13а.

Отпечатано на роталпринте Белорусского ордена Трудового Красного Знамени технологического института им. С. М. Кирова.
220630, Минск, Свердлова, 13.