

66  
К75

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

На правах рукописи

КОЧЕМАСОВ Сергей Георгиевич

УДК 532.546:532.135:66.067.1

ГИДРОДИНАМИКА РАДИАЛЬНЫХ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПОТОКОВ  
В АППАРАТАХ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

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-1986

Работа выполнена в Волгоградском ордена Трудового Красного Знамени политехническом институте

Научный руководитель: доктор технических наук,  
профессор ТЯБИН Н.В.

Научный консультант: кандидат технических наук,  
доцент БАЛАШОВ В.А.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
профессор ГРИЧЕНКО А.А.

кандидат технических наук,  
доцент ЛЕЗДАНСКИЙ Э.И.

Ведущая организация: Всесоюзный научно-иссле-  
довательский и проектно-техноло-  
гический институт химического  
и нефтяного машиностроения,  
г.Москва

Защита состоится "11" ноября 1986 г. в 14.00 часов  
на заседании специализированного совета К 056.01.03 по при-  
суждению ученой степени кандидата наук в Белорусском ордена  
Трудового Красного Знамени технологическом институте им.  
С.М.Кирова. Адрес: 220630, г.Минск, ул.Свердлова, 13а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорус-  
ского ордена Трудового Красного Знамени технологического  
института им. С.М.Кирова.

Автореферат разослан "10" октября 1986 г.

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

ДЭУБА Е.Д.

Актуальность проблемы. Течение жидкостей и газов в пористых материалах, или так называемые фильтрационные течения, являются составной частью многих технологических процессов в химической промышленности и родственных ей производствах.

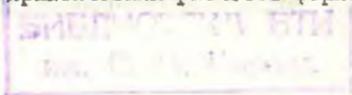
В настоящее время в оборудовании химической технологии широкое распространение получили машины, аппараты и устройства, работающие с использованием радиальных фильтрационных потоков. Такие потоки, например, реализуются в патронных и динамических (проточных) фильтрах, фильтрах-сгустителях, трубчатых теплообменниках с проницаемыми стенками, коллекторных системах, радиальных контактных аппаратах, каталитических реакторах и целом ряде других устройств.

Анализ современного состояния методов расчета аппаратов и устройств, работающих с использованием фильтрационных течений, показал, что достаточно глубоких и систематических исследований гидродинамики радиальных фильтрационных потоков в настоящее время нет, отсутствуют и рекомендации по оценке эффективности работы элементов технологического оборудования, действие которых основано на применении таких потоков. Крайне недостаточно изучено влияние реологических свойств перерабатываемых продуктов на характер гидродинамических зависимостей для радиальных фильтрационных течений. Углубленное изучение этих вопросов позволит разработать надежные методы инженерного расчета технологического оборудования, создавать его эффективные конструкции, обоснованно осуществлять выбор оборудования и наиболее рациональных режимов его эксплуатации.

Работа выполнялась согласно комплексной программе Минвуза РСФСР на 1981-1985 г.г. "Человек и окружающая среда", подпрограмма "Охрана и рациональное использование водных ресурсов суши" (приказ Минвуза РСФСР № 599 от 15.10.81г.).

Цель работы. Исследование гидродинамики радиальных фильтрационных потоков вязких и неньютоновских жидкостей и разработка методов инженерного расчета таких потоков в элементах машин и аппаратах химической промышленности.

Научная новизна. Получено уравнение переноса импульса для континуального описания фильтрационных течений, учитывающее в явном виде молекулярный и турбулентный перенос импульса в фильтрационном потоке и на межфазной поверхности, на основании которого записаны в удобной для практических расчетов форме дифференциаль-



2607 ар

ные уравнения для описания фильтрационных течений вязких и неньютоновских жидкостей.

Выполнен гидродинамический анализ поведения фильтрационного потока вязкой жидкости в области границ течения.

Предложены базовые модели для описания радиальных фильтрационных течений и установлены критерии, позволяющие определить области их применения.

Выполнены расчеты и проведен анализ гидродинамических характеристик модельных течений.

Исследовано влияние реологических свойств неньютоновских жидкостей на гидродинамические характеристики радиальных фильтрационных потоков.

Практическая ценность. Разработаны рекомендации для выполнения гидродинамических расчетов и оптимизации конструкции машин, аппаратов и устройств, работающих с использованием радиальных фильтрационных течений.

Разработаны на уровне изобретения новая конструкция высокоэффективного фильтра (маслоотделителя) с цилиндрическим фильтровальным элементом для разделения аэрозолей и технологическая схема ионообменной очистки жидкостей, в которой используется метод динамического фильтрования в проточных каналах с проницаемыми стенками. Оба технических решения основаны на применении радиальных фильтрационных потоков.

Результаты исследования могут быть использованы при создании "банков данных" для систем автоматизированного проектирования химических производств.

Экономический эффект от внедрения результатов диссертационной работы составил 60 тыс.руб.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на III Всесоюзной научной конференции "Современные машины и аппараты химических производств: Химтехника-83", г.Навои, октябрь 1983 г.; II Всесоюзной научно-технической конференции по гидродинамическим процессам разделения неоднородных смесей, г.Курган, ноябрь 1983 г.; VIII Всесоюзном симпозиуме по реологии, г.Волгоград, июнь 1984 г.; II Всесоюзной научно-технической конференции "Повышение эффективности теплообменных и гидродинамических процессов в текстильной промышленности и производстве химических волокон", г.Москва, январь 1985 г.; III Всесоюзном симпозиуме "Теория механической переработки полимерных материа-

лов", г. Пермь, июнь 1985 г.; Всесоюзной научной конференции "Повышение эффективности, совершенствование процессов и аппаратов химических производств", г. Харьков, июнь 1985 г.; научно-технических конференциях Волгоградского политехнического института, секция "Процессы и аппараты химической технологии", г. Волгоград, январь 1984, 1985, 1986 г.г..

Публикации. Материалы диссертации, обобщающие результаты исследований отражены в 12 опубликованных работах. Получено одно авторское свидетельство СССР и одно положительное решение по заявке на изобретение. (Список прилагается).

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 160 страницах машинописного текста, содержит 40 рисунков и 16 таблиц. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка литературы, включающего 170 наименований работ отечественных и зарубежных авторов.

#### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приводится анализ современного состояния теоретических и экспериментальных исследований в области фильтрации и существующих методов расчета радиальных фильтрационных течений в технических приложениях. Показано, что применяющиеся в настоящее время способы описания фильтрационных течений не позволяют в полной мере отразить физическую картину движения жидкости в пористых материалах, при этом анализ фильтрационных потоков в элементах машин и аппаратах химической технологии, как правило, ограничивается только одномерными течениями и строится на гидравлических представлениях. Отсутствует методика расчета радиальных фильтрационных потоков, отражающая особенности конструкции отдельных технических устройств.

Сформулированы основные задачи исследования:

- используя современные представления теории переноса импульса в сплошных средах, получить общий вид уравнений для описания фильтрационных течений и, на их основании, записать дифференциальные уравнения для фильтрации вязких и неньютоновских жидкостей в форме, удобной для выполнения практических расчетов;
- проанализировать типовые случаи радиальных фильтрационных течений, установить для них расчетные зависимости и выявить гидродинамические особенности этих течений, обусловленные влиянием раз-

личных граничных условий;

- экспериментально проверить полученные зависимости для расчета параметров радиальных фильтрационных потоков и исследовать особенности межфазного переноса импульса при фильтрации неньютоновских жидкостей в разнообразных пористых средах;
- разработать инженерную методику расчета радиальных фильтрационных потоков в элементах машин и аппаратах химических производств.

Вторая глава посвящена математическому моделированию фильтрационных течений.

В основе моделирования лежат общие представления теории переноса импульса в сплошных средах, разработанные применительно к процессам химической технологии в работе /1/.

Рассматривается перенос импульса при фильтрации жидкости в произвольной недеформируемой пористой среде, свойства которой могут быть описаны некоторой функцией распределения доли пустот  $g^*(\bar{x})$ .

Для вывода уравнения переноса импульса, описывающего фильтрационные течения, впервые используется основное уравнение переноса векторной субстанции, которое для локальных параметров фильтрующегося потока жидкости имеет вид

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \text{div } j_{ij} = 0. \quad (1)$$

Используя предложенный в /1/ принцип иерархии потоков субстанции, согласно которому плотность потока импульса может быть представлена как аддитивная сумма плотностей конвективного, турбулентного и молекулярного потоков импульса, выполнив две последовательные процедуры усреднения параметров потока по времени и по статистически представительному объему  $V$ , получено общее уравнение переноса импульса для континуального описания фильтрационных течений

$$\rho \frac{d\langle \bar{u} \rangle}{dt} + \rho \langle \bar{u} \rangle \nabla \langle \bar{u} \rangle - g \text{grad} \langle p \rangle + \text{div} \langle \tau_{ijM} \rangle + \text{div} \langle \zeta_{ijT6} \rangle + \frac{1}{V} \int_{S_{T6}} j_{ijM} \cdot \bar{n} dS + \frac{1}{V} \int_{S_{T6}} j_{ijT6} \cdot \bar{n} dS = 0, \quad (2)$$

где: первое слагаемое учитывает нестационарность процесса фильт-

рации; второе - конвективное движение фильтрационного потока, как континуума; третье слагаемое - представляет собой градиент осредненного давления в потоке жидкости; четвертое - характеризует молекулярный перенос импульса между элементарными фильтрационными потоками "соседними ячейками"; пятое слагаемое - характеризует турбулентный перенос импульса между элементарными фильтрационными потоками; шестое - определяет молекулярный, а седьмое - турбулентный перенос импульса на межфазной поверхности "жидкость - твердое тело".

Показано, что тензор плотности турбулентного потока импульса  $j_{ij}^{TB}$  является результатом совокупности пульсационных движений, связанных как с наличием неоднородностей пористой структуры, так и с потерей гидродинамической устойчивости в потоках фильтрующейся жидкости. Это приводит к характерному для фильтрационных течений более раннему проявлению нелинейных эффектов при возрастании скорости движения жидкости в пористых средах, в сравнении с течением в пряхолинейных каналах постоянного живого сечения.

Таким образом, в уравнении (2) для континуального описания фильтрационных течений, в отличие от известных уравнений, в явном виде учитывается молекулярный и турбулентный перенос импульса в фильтрационном потоке и на межфазной поверхности.

Уравнение (2) описывает фильтрационные течения несжимаемой жидкости независимо от ее реологических свойств.

Межфазный перенос импульса в полученном уравнении характеризуется двумя слагаемыми, одно из которых представляет силу вязкостного сопротивления при движении жидкости в пористой среде, а другое - инерционную силу сопротивления. Это соответствует выводам, следующим из принципов неравновесной термодинамики [2], а также совпадает с эмпирическим уравнением Дюпюи-Форхгеймера.

Анализ межфазного переноса импульса, выполненный с использованием положений работы [1], позволил получить выражение для сил сопротивления фильтрующемуся потоку жидкости.

Для процесса молекулярного межфазного переноса импульса сила сопротивления представлена в виде

$$\bar{f}_M = \frac{1}{V} \int_{S_{TB}} j_{ij} \cdot \bar{n} \, ds = G \langle \delta_{ij} \rangle \langle \bar{u} \rangle, \quad (3)$$

где:  $G = S_{TB}/V$  - удельная поверхность пористой среды;  $\langle \delta_{ij} \rangle$  - коэффициент обмена импульсом на межфазной поверхности, который связан с коэффициентом проницаемости, в случае фильтрации вязкой

жидкости, следующим соотношением

$$\langle \delta_{ij} \rangle = \frac{\mu}{G K_{ij}} \quad (4)$$

Получены выражения для величины средних напряжений сдвига на межфазной поверхности при фильтрации жидкости в изотропной пористой среде

$$\tau_{\varepsilon} = f_{\mu} \cdot \sqrt{\frac{\mathcal{P}'_0 K}{K \cdot \varepsilon}} \quad (5)$$

и осредненного градиента скорости сдвига

$$\dot{\gamma}_{\varphi} = \langle u \rangle \cdot \sqrt{\frac{\mathcal{P}'_0}{K \cdot \varepsilon}} \quad (6)$$

где  $\mathcal{P}'_0$  - число отдачи импульса, характеризующее подобие фильтрационных течений и отражающее особенности формирования напряженно-деформированного состояния в жидкости в результате ее взаимодействия со "скелетом" пористой структуры. Соотношения (5) и (6) позволяют осуществить моделирование фильтрационного течения более простыми видами течений, например, движением жидкости в капилляре, что удобно использовать при моделировании фильтрации не-ньютоновских жидкостей.

Для процесса турбулентного межфазного переноса импульса показано, что выражение для силы сопротивления может быть приведено к виду квадратичного члена в уравнении Дюпюи-Форхгеймера

$$\bar{f}_{\tau\beta} = \frac{1}{V} \int_{S_{\tau\beta}} j_{ij\tau\beta} \cdot \bar{n} ds = \rho \beta_{\varphi} |\langle \bar{u} \rangle| \langle \bar{u} \rangle \quad (7)$$

Учитывая выражения для молекулярного (3), (4) и турбулентного (7) переноса импульса на межфазной поверхности, на основании уравнения (2) получено дифференциальное уравнение для описания фильтрационных течений вязких жидкостей

$$\rho \frac{\partial \langle \bar{u} \rangle}{\partial t} + \rho \langle \bar{u} \rangle \nabla \langle \bar{u} \rangle + g z \alpha d \rho - \mu_{\varphi ij}^m \nabla^2 \langle \bar{u} \rangle + \text{div}(\mu_{\varphi ij}^{\tau\beta} \cdot \langle \dot{\varepsilon}_{ij} \rangle) + \frac{\mu}{K_{ij}} \langle \bar{u} \rangle + \rho \beta_{\varphi i} |\langle \bar{u} \rangle| \langle \bar{u} \rangle = 0, \quad (8)$$

где  $\mu_{\varphi ij}^m$  и  $\mu_{\varphi ij}^{\tau\beta}$  - фильтрационная эффективная вязкость потока, характеризующая соответственно молекулярный и турбулентный обмен импульсом между элементарными фильтрационными потоками.

Уравнение (8) совместно с уравнением неразрывности потока, записанные в цилиндрической системе координат, с конкретными граничными и начальными условиями представляет математическую модель радиального фильтрационного течения вязких жидкостей.

Перерабатываемые в химической технологии аномально-вязкие жидкости отличаются, как правило, относительно высокой эффективной вязкостью, поэтому наибольший интерес представляют ламинарные фильтрационные течения таких жидкостей. В качестве реологического уравнения для описания поведения неньютоновских жидкостей была принята трехконстантная модель нелинейновязкопластичной жидкости Балкли-Гершеля. На основании уравнения (2), используя выражения (5) и (6), дифференциальное уравнение ламинарного движения нелинейновязкопластичной жидкости в пористой среде можно записать в виде

$$\rho \frac{d\langle \bar{u} \rangle}{dt} + \rho g \alpha d p + (h_0 + \frac{A^*}{K} |\langle \bar{u} \rangle|^n) \frac{\langle \bar{u} \rangle}{|\langle \bar{u} \rangle|} = 0, \quad (9)$$

$$\text{где } h_0 = \tau_0 \sqrt{\frac{\epsilon}{\pi_0' k}}; \quad A^* = A \left( \frac{\pi_0'}{k \epsilon} \right)^{\frac{n-1}{2}};$$

$\tau_0$ ;  $A$ ;  $n$  - реологические константы осредненной кривой течения нелинейновязкопластичной жидкости, полученной на капиллярном вискозиметре. Уравнение (9) в совокупности с уравнением неразрывности, записанные в цилиндрической системе координат, с конкретными граничными и начальными условиями представляют математическую модель радиального фильтрационного течения нелинейновязкопластичной жидкости.

Выполнен анализ влияния граничных условий на характер ламинарного фильтрационного потока при движении жидкости в однородной изотропной пористой среде: вдоль непроницаемой границы, вдоль поверхности раздела двух пористых сред с различной проницаемостью и вдоль границы со свободным спутным потоком жидкости.

Получен закон распределения поля скорости для фильтрационного пограничного слоя. Установлено, что толщина фильтрационного пограничного слоя может быть всецело определена величиной параметра

$$\chi = \sqrt{\mu / (\mu_\phi \cdot k)}. \quad (10)$$

Показано, что скорость потока в пограничной фильтрационной области, изменяясь по экспоненциальному закону при удалении от

границы, довольно быстро приближается к величине скорости в ядре потока, поэтому толщина фильтрационного пограничного слоя, как правило, невелика. Однако, при фильтрации в тонкослойных пористых материалах, толщина которых может быть соизмерима с размерами фильтрационного пограничного слоя, наличие пограничного слоя должно быть учтено в расчетах.

В третьей главе проводится теоретическое исследование радиальных фильтрационных потоков в элементах технологического оборудования.

Функциональные элементы машин, аппаратов и устройств, принцип работы которых основан на использовании радиальных фильтрационных течений, конструктивно выполняются в виде цилиндрического пористого слоя с центральным отверстием (рис. I). Торцевые поверхности цилиндрического пористого слоя, как правило, ограничиваются непроницаемыми стенками.

Анализ гидродинамических особенностей, которыми могут сопровождаться радиальные фильтрационные течения в конкретных практических случаях, учитывая геометрические размеры пористых элементов и граничные условия на торцевых поверхностях, позволил выделить следующие физические модели радиальной фильтрации:

- 1) Радиальное фильтрационное течение в цилиндрическом пористом слое (рис. Ia), которое характеризуется постоянным давлением вдоль его внешней и внутренней цилиндрических поверхностей, при этом считается, что поле скоростей фильтрации не изменяется вдоль пористого элемента вплоть до торцевых поверхностей.
- 2) Радиальное фильтрационное течение в пористом диске (рис. Ib), характеризуется постоянным давлением вдоль его внешней и внутренней цилиндрических поверхностей, при этом скорость фильтрации у торцевых поверхностей может изменяться (рис. Ib) от нуля (условие "прилипания") до некоторой  $v_{cp}$  (определяемой, например, спутным потоком жидкости у границы), а величина фильтрационного пограничного слоя может существенно влиять на расход фильтрующейся жидкости.
- 3) Радиальное фильтрационное течение в цилиндрическом канале с проницаемыми стенками (рис. I, г, д, е), характеризуется постоянным внешним давлением, а давление вдоль центрального канала может существенно изменяться, вследствие чего возникает значительная неравномерность распределения радиальной скорости фильтрации по

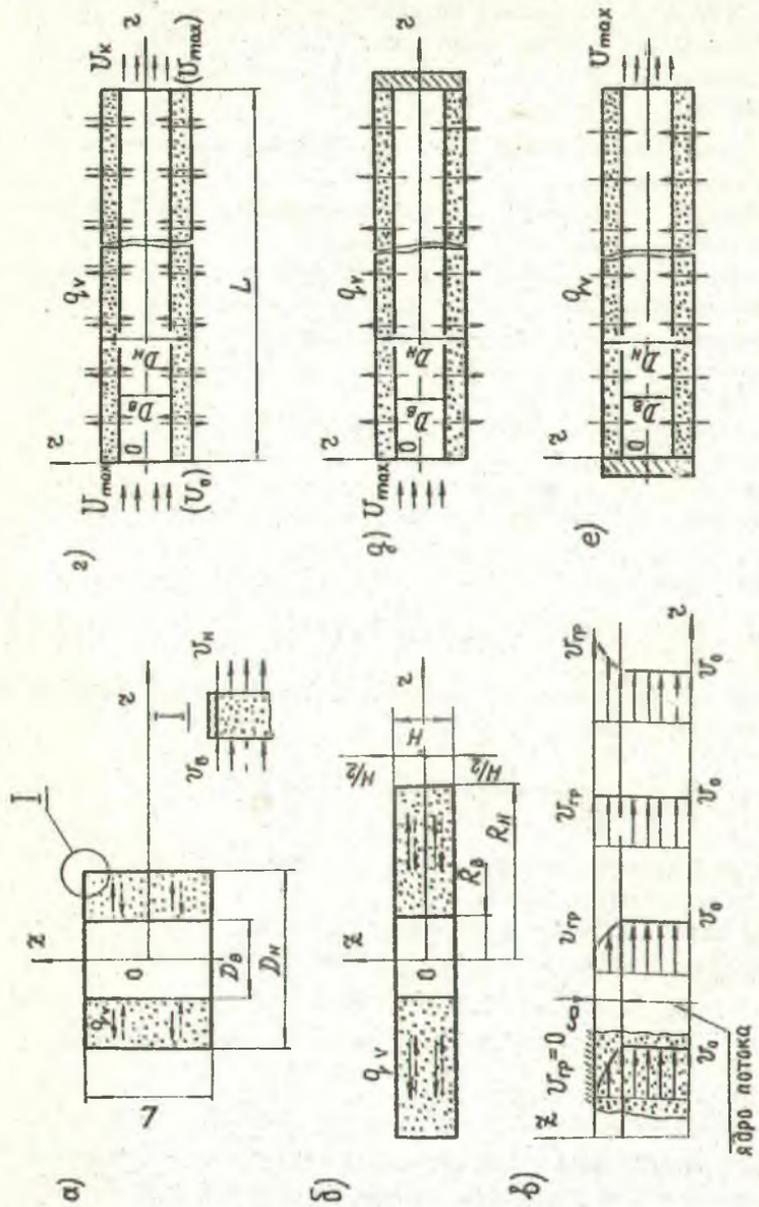


Рис. 1 Базовые физические модели радиальных фильтрационных потоков.

длине такого элемента.

Для указанных физических моделей были выделены задачи радиальной фильтрации, которые имеют наибольшее практическое применение в химической технологии или представляют значительный научный интерес.

- а) Фильтрация вязкой жидкости в цилиндрическом пористом слое (рис. I, а).

Полагаем, что скорость фильтрации изменяется только по радиусу  $U = U(r)$ , а течение в пористом слое является установившимся и осуществляется в широком диапазоне скоростей фильтрации. На основании (8) записаны уравнения движения, решая которые совместно с уравнением неразрывности и граничными условиями

$$\rho(R_0) = \rho_1 = \text{const}; \quad \rho(R_n) = \rho_2 = \text{const} \quad (11)$$

получен закон изменения давления по радиусу в пористом слое.

Анализ решения показал, что для большинства практических задач радиальной фильтрации влиянием изменения кинетической энергии на величину гидравлического сопротивления пористого слоя можно пренебречь, поэтому гидравлическое сопротивление определяется следующим выражением

$$\Delta p = \frac{\mu}{K} U_0 R_0 \ln \Gamma_1 + \beta_F \rho U_0^2 R_0 \left(1 - \frac{1}{\Gamma_1}\right). \quad (12)$$

Получено критериальное уравнение для фильтрации в цилиндрическом пористом слое

$$\bar{\Delta p} = \frac{\ln \Gamma_1}{Re_B^* \cdot \Gamma_2 \left(1 - \frac{1}{\Gamma_1}\right)} + 1, \quad (13)$$

которое удобно использовать для оценки режимов течения, реализуемых в пористом материале.

Для заданного перепада давления расход жидкости через цилиндрический пористый слой можно определить, как

$$Q_{V_0} = 2\pi R_0 L U_0 = 2\pi L W_0. \quad (14)$$

где  $W_0 = z \cdot U = R_0 U_0 = \text{const}$  - характеристика фильтрационного потока.

- б) Фильтрация вязкой жидкости в пористом диске (рис. I, б).

Рассматривая ламинарное установившееся течение в пористом диске полагаем, что скорость фильтрации является функцией двух

координат  $v = v(z, z)$  (рис. 1, в). Записав на основании (8) уравнения движения и решая их совместно с уравнением неразрывности и граничными условиями

$$p(R_B) = p_1; \quad p(R_H) = p_2; \quad v(z, \pm \frac{H}{2}) = v_{rp} \geq 0 \quad (15)$$

определено поле радиальных скоростей фильтрации

$$v = v(z, \xi) = \frac{W_0}{z} \left[ 1 + m \frac{ch(\alpha \xi)}{ch \alpha} \right], \quad (16)$$

где:  $\xi = 2z/H$  - безразмерная координата;  $\alpha = \frac{H}{2} \sqrt{\mu(\mu_0 \cdot K)}$  - безразмерный параметр фильтрационного потока в диске;  $m = \frac{v_{rp}}{v_0} - 1$  - параметр, характеризующий граничные условия на торцевых поверхностях.

Получено выражение для расхода жидкости в пористом диске

$$q_v = 2\pi H W_0 \left( 1 + \frac{m}{\alpha} th \alpha \right). \quad (17)$$

Влияние фильтрационного пограничного слоя на расход жидкости можно оценить из соотношения

$$\Delta = \frac{q_v}{q_{v_0}} - 1 = \frac{m}{\alpha} th \alpha \quad (18)$$

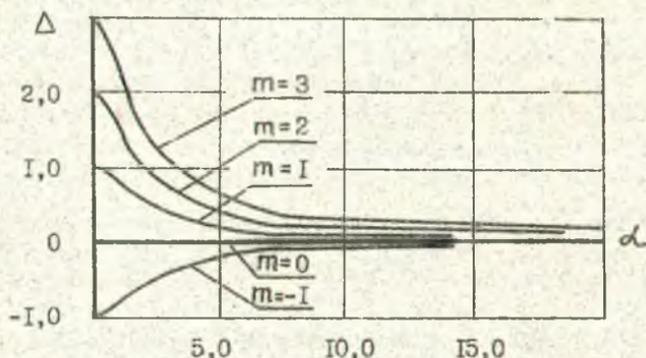


Рис. 2. Оценка влияния фильтрационного пограничного слоя на величину расхода жидкости в пористом диске

Из графиков, приведенных на рис. 2 видно, что при изменении величины  $m$  от  $-1$  до  $+3$  область фильтрационных течений, требующих поправки на граничный эффект, определяется величиной  $\alpha < (10 \div 15)$

в) Фильтрация вязкой жидкости в цилиндрическом канале с проницаемыми стенками (рис. I, г, д, е).

Возможны два случая радиальной фильтрации в таких каналах:

1) течение с отбором жидкости из канала через его проницаемые стенки и 2) течение со вдувом жидкости в канал. На практике могут быть реализованы две гидродинамические схемы работы каналов с проницаемыми стенками - это проточный вариант, когда имеется транзитный поток жидкости в канале и только часть жидкости отбирается из канала или подается в него (рис. I, г), и вариант канала с заглушенным одним торцом, когда вся поступающая в него жидкость фильтруется через стенки (рис. I, д, е).

Для описания течения внутри канала используется уравнение движения потока переменной массы в квазиодномерном приближении [3], которое принимается в качестве граничного условия для фильтрационного течения на внутренней поверхности канала.

Рассматривая ламинарное установившееся фильтрационное течение, полагаем, что скорость фильтрации является функцией двух координат  $v = v(z, x)$ . Граничными эффектами на торцевых поверхностях пористого канала - пренебрегаем. На основании (8) записаны уравнения движения фильтрационного потока, которые решаются совместно с уравнением неразрывности, граничными условиями

$$\left( \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} + (2 - c^*) v \frac{dv}{dz} + \lambda_0 \frac{v^2}{2D_B} + m^* \frac{|v|v}{2D_B} \right) \Big|_{z=R_B} = 0, \quad (19)$$

$$\rho(R_H) = \rho_c = \text{const}$$

и общим уравнением баланса потока

$$v_B = - \frac{D_B}{4} \frac{dv}{dx}. \quad (20)$$

Получено уравнение, описывающее закономерности изменения средней скорости потока в канале, которое в безразмерном виде записывается, как

$$\bar{v}'' - \alpha \bar{v} \bar{v}' - \beta \bar{v}^2 = 0, \quad (21)$$

где

$$\alpha = \frac{v_{max} D_B \rho}{\mu} \left( \frac{L}{D_B} \right) \frac{K}{D_B^2} \cdot \frac{S}{2n\Gamma}, \quad (22)$$

$$\delta = \frac{v_{max} D_0 \rho}{\mu} \cdot 4\lambda_0 \left(\frac{L}{D_0}\right)^2 \frac{K}{D_0^2} \cdot \frac{1}{\epsilon n \Gamma} \quad (23)$$

Коэффициенты  $\alpha$  и  $\delta$  - комплексно учитывают фильтрационные свойства пористого материала стенки, геометрические параметры канала, характер течения жидкости внутри него, а также особенности поведения потока у проницаемой поверхности.

Граничные условия для решения уравнения (21) имеют вид:

$$\text{для отбора жидкости из канала } \bar{U}(0) = 1; \quad \bar{U}(1) = \bar{U}_K \in [0, 1]; \quad (24)$$

$$\text{для вдува жидкости в канал } \bar{U}(0) = \bar{U}_0 \in [0, 1]; \quad \bar{U}(1) = 1. \quad (25)$$

Получено аналитическое решение уравнения (21) с граничными условиями (24) и (25), для случая  $\delta \rightarrow 0$ , соответствующего интенсивному отбору жидкости из канала и вдуву, а также найдено приближенное аналитическое решение - когда величиной коэффициента  $\delta$  в уравнении (21) пренебречь нельзя.

Определена гидравлическая неравномерность работы канала с проницаемыми стенками, представляющая собой распределение безразмерной радиальной скорости фильтрации вдоль канала

$$\bar{U} = \frac{v_B}{v_{cp}} = - \frac{1}{1-\psi} \cdot \bar{U}' \quad (26)$$

где  $\psi = \frac{U_{K,0}}{U_{max}}$  - степень проточности канала.

На рис. За, б представлены результаты расчета гидравлической неравномерности  $\bar{U}$ , для случая интенсивного отбора жидкости ( $\delta \rightarrow 0$ ) при переменных значениях параметров  $\alpha$  и  $\psi$ . Из приведенных графиков видно, что гидравлическая неравномерность возрастает с увеличением коэффициента  $\alpha$  и с повышением степени проточности  $\psi$ . На рис. 4 показано влияние коэффициента  $\delta$  на гидравлическую неравномерность. Сплошной линией показаны графики, построенные на основании приближенного решения уравнения (21), символами (0) - показаны соответствующие результаты на основе численного решения методом "стрельбы". Установлено, что приближенное решение можно использовать когда параметр  $\delta$  (23) по абсолютной величине не превышает значения параметра  $\alpha$  (22).

Распределение давления вдоль внутренней поверхности канала может быть найдено из выражения

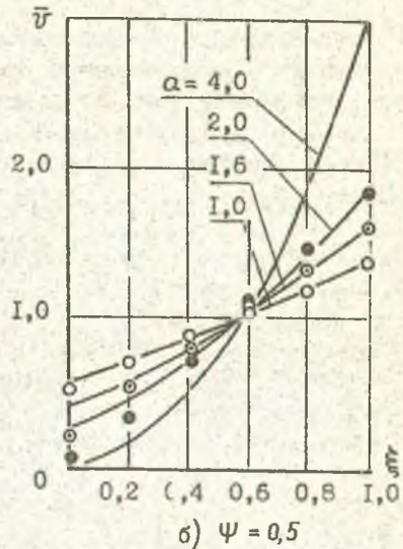
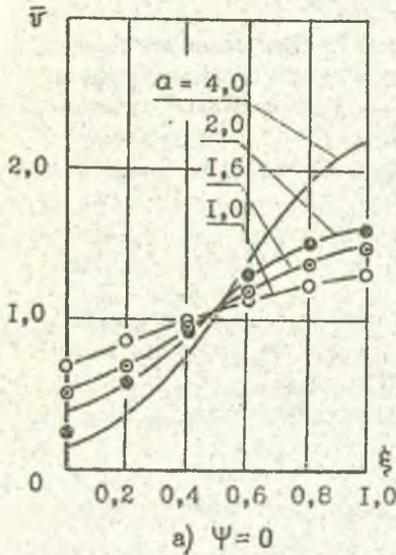


Рис.3 Зависимость гидравлической неравномерности  $\bar{u}$  от величины параметра  $\alpha$  и степени проточности  $\Psi$  (расчетные данные - сплошная линия)

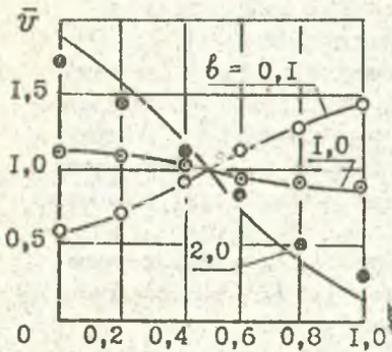


Рис.4 Влияние параметра  $\beta$  на величину гидравлической неравномерности  $\bar{u}$

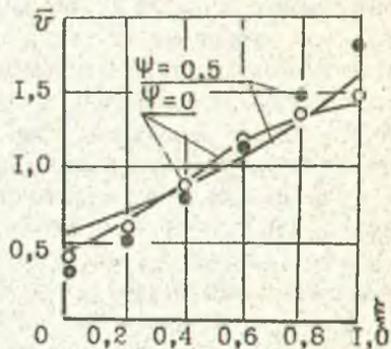


Рис.5 Влияние неньютоновского поведения жидкости на величину  $\bar{u}$  ( $n = 0,6$ )

$$P = P_c - \frac{\mu}{2K} R_B^2 \ln \Gamma_1 \cdot \frac{V_{max}}{L} \cdot \bar{U}' \quad (27)$$

г) Ламинарная фильтрация неньютоновских жидкостей в цилиндрическом пористом слое (рис. 1, а).

Записав на основании (9) уравнения движения ламинарного установившегося фильтрационного потока нелинейновязкопластичной жидкости, задача решена в постановке, аналогичной случаю фильтрации вязкой жидкости в цилиндрическом пористом слое.

Найден закон изменения давления по радиусу  $r$  пористом слое.

Получено выражение для определения гидравлического сопротивления цилиндрического пористого слоя

$$\Delta P = h_0 R_B (\Gamma_1 - 1) + \frac{A^* v_0^n R_B}{K(1-n)} (\Gamma_1 - 1)^{1-n} \quad (28)$$

д) Фильтрация неньютоновских жидкостей в цилиндрическом канале с проницаемыми стенками (рис. 1, г, д, е).

Записав на основании (9) уравнения движения ламинарного установившегося фильтрационного потока нелинейновязкопластичной жидкости, задача решена в постановке, аналогичной случаю фильтрации вязкой жидкости в цилиндрическом канале с проницаемыми стенками.

Получено уравнение, описывающее закономерности изменения средней скорости потока в канале, которое в безразмерной форме имеет вид

$$\bar{U}'' |\bar{U}'|^{n-1} - \alpha^* \bar{U} \bar{U}' = \beta^* \bar{U}^2 = 0, \quad (29)$$

где

$$\alpha^* = \frac{\bar{U}_{max}^{2-n} D_B \rho}{A^*} \cdot \frac{2^{2n-2} (1-n)}{n} \left( \frac{L}{D_B} \right)^n \frac{K}{D_B^2} \cdot \frac{S}{(\Gamma_1 - 1)^{1-n}}, \quad (30)$$

$$\beta^* = \frac{\bar{U}_{max}^{2-n} D_B \rho}{A^*} \cdot \frac{2^{2n} (1-n)}{n} \lambda_0 \left( \frac{L}{D_B} \right)^{n+1} \frac{K}{D_B^2} \cdot \frac{1}{(\Gamma_1 - 1)^{1-n}}. \quad (31)$$

Коэффициенты  $\alpha^*$  и  $\beta^*$  комплексно учитывают фильтрационные свойства пористого материала стенки, геометрические параметры канала,

характер течения жидкости внутри него, закономерности формирования потока у проницаемой поверхности, а также особенности, связанные с неньютоновским поведением жидкости при течении в пористой среде и в канале.

Найдено аналитическое решение в виде степенных рядов уравнения (29) с граничными условиями (24) и (25), для случая  $\beta^* \rightarrow 0$ , соответствующего интенсивному отбору жидкости из канала и вдуву.

Гидравлическая неравномерность определяется соотношением (26).

На рис.5 представлены результаты расчета гидравлической неравномерности  $\bar{U}$  для случая интенсивного отбора жидкости из канала ( $\beta^* \rightarrow 0$ ), при  $Q^* = 2$  для проточного канала  $\Psi = 0,5$  и канала с заглушенным торцом  $\Psi = 0$ , когда неньютоновское поведение жидкости характеризуется  $n = 0,6$ . Символами на графиках показаны результаты расчета гидравлической неравномерности при течении вязкой жидкости ( $n = 1$ ). Из приведенных графиков видно, что для течения в канале с заглушенным торцом влияние неньютоновского поведения на гидравлическую неравномерность - незначительное. Однако, с увеличением степени проточности  $\Psi$  это влияние становится существенным. В целом нелинейное поведение жидкости при фильтрации приводит к смягчению гидравлической неравномерности.

Распределение давления вдоль внутренней поверхности канала может быть найдено из выражения

$$P = P_c + h_0 \frac{D_0}{2} (\Gamma_1 - 1) + \frac{2A^*}{K(1-n)} (\Gamma_1 - 1)^{1-n} \left(\frac{D_0}{4}\right)^{n+1} \left(\frac{U_{max}}{L}\right)^n |\bar{U}|^n. \quad (32)$$

В четвертой главе приводится описание экспериментальных исследований закономерностей межфазного переноса импульса при фильтрации неньютоновских жидкостей и радиального фильтрационного потока в цилиндрическом канале с проницаемыми стенками.

Исследование ламинарной фильтрации неньютоновских жидкостей проводилось на экспериментальной установке, позволяющей реализовать одномерное стационарное фильтрационное течение в разнообразных пористых средах.

В качестве жидкостей, моделирующих различные типы неньютоновского поведения, использовались: 1) водный раствор карбоксиметилцеллюлозы КМЦ - жидкость с псевдопластичным поведением;

2) минеральное масло АМГ, загущенное жировой смазкой - вязкоплас-

тичное поведение; 3) водный раствор каолиновой глины - вязко-пластичное поведение; 4) водный раствор каолиновой глины с добавлением КМЦ - нелинейновязкопластичное поведение.

Пористыми средами служили пакеты металлических сеток различной просветности и зернистые слои сферических частиц материала: сталь, свинец.

Основные измеряемые параметры: перепад давл. ния на пористом материале и скорость фильтрации.

На рис.6 приведены результаты экспериментальных исследований, представленные на основании соотношений (5) и (6) в виде зависимостей  $\tau_{\Sigma} = f(\delta_{\Phi})$ . На этих же графиках для каждого опыта по фильтрации символами (+) нанесены данные капиллярной вискозиметрии, представленные в терминах осредненной кривой течения  $\tau_w = f(\dot{\gamma}_{cp})$ . Установлено, что фильтрационная зависимость  $\tau_{\Sigma} = f(\delta_{\Phi})$  и осредненная кривая течения достаточно хорошо совпадают, когда  $F_0 \approx 2$ .

Таким образом, полученные результаты подтвердили возможность моделирования межфазного переноса импульса для ламинарных фильтрационных потоков неньютоновских жидкостей методом идентификации течения в пористой среде и модельном потоке по осредненному напряженно-деформированному состоянию жидкости. Это позволяет получить в дифференциальной форме уравнения движения для описания фильтрационных течений, например, в виде уравнения (9).

Исследования радиального фильтрационного потока в цилиндрическом канале с проницаемыми стенками проводились на экспериментальной установке, реализующей течение с отбором жидкости из канала. С целью расширения возможностей экспериментального оборудования в качестве рабочей среды использовался воздух, сжимаемость которого в условиях проводимых исследований можно было пренебречь.

Канал I (рис.7) был изготовлен из шести металлокерамических элементов (ОСТ 26-2088-81) и имел внутренний диаметр  $D_в = 0,034$  м, наружный диаметр  $D_н = 0,040$  м, проницаемость пористого материала стенки  $K = 1,007 \cdot 10^{-10}$  м<sup>2</sup>. При помощи зонда 2 измерялось распределение давления вдоль канала, на основании чего определялась величина гидравлической неравномерности  $\bar{U}$  (26). Задний фланец 3 был выполнен с отводом 4, что позволило изменять степень проточности  $\Psi$  в интервале 0 - 0,75. Величина параметра  $\alpha$  в экспериментальных исследованиях варьировалась в пределах от 0,6 до 2,0, при этом максимальное значение расхода воздуха в канале со-

ответственно  $Re_{kmax} = 16500$ .

Было установлено, что для используемого пористого металло-керамического материала в условиях проводимого эксперимента, параметр  $S = 0,13$ .

На рис.3а,б приведены экспериментальные данные гидравлической неравномерности  $\bar{U}$  для течения в канале с заглушенным торцом и в проточном канале при  $\Psi = 0,5$ . Из графиков видно, что экспериментально полученные результаты (показаны символами) достаточно хорошо совпадают с расчетными.

В пятой главе приведено описание некоторых конструкций аппаратов и технологических схем, работающих с использованием радиальных фильтрационных течений и дана инженерная методика их расчета.

На рис.8 изображена конструкция фильтра (маслоотделителя) для отделения аэрозоля от газового потока. Фильтр представляет собой корпус I, в котором коаксиально устанавливается цилиндрический фильтровальный элемент 2. Эффективность отделения аэрозоля масла от газового потока обеспечивается реализацией широкого диапазона скоростей фильтрации при движении потока в радиальном направлении через пористый элемент. Для улучшения отвода отделенной жидкости фильтровальный элемент реакционирован на диски и изготавливается из высокопористой волокнистой металлокерамики или ячеистого пенометалла.

Анализ существующих способов ионнообменной очистки жидкостей (технологической воды) показал, что эффективность процесса может быть существенно повышена при реализации очистки в потоках смеси с жидкостью и ионитов, циркулирующей в замкнутом контуре I по схеме, изображенной на рис.9. Отбор очищенной жидкости осуществляется с помощью динамического (проточного) фильтра 2. Основным условием эффективного осуществления процесса очистки жидкости является обеспечение гидротранспорта частиц - ионитов в контуре очистки, что в полной мере определяется особенностями гидродинамики проточных каналов с проницаемыми стенками.

Для рационального выбора фильтровальных элементов и определения гидродинамических режимов их работы при проектировании рассмотренных выше и аналогичных аппаратов и устройств, разработана методика инженерного расчета радиальных фильтрационных потоков.

Конкретный радиальный фильтрационный поток определяется: геометрическими параметрами; характеристиками пористого материала, определяющими его фильтрационные свойства; величиной расхода

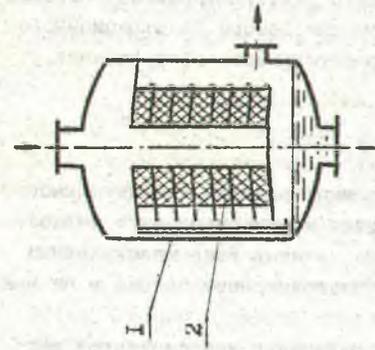


Рис.8

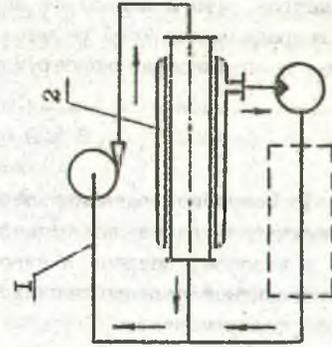


Рис.9

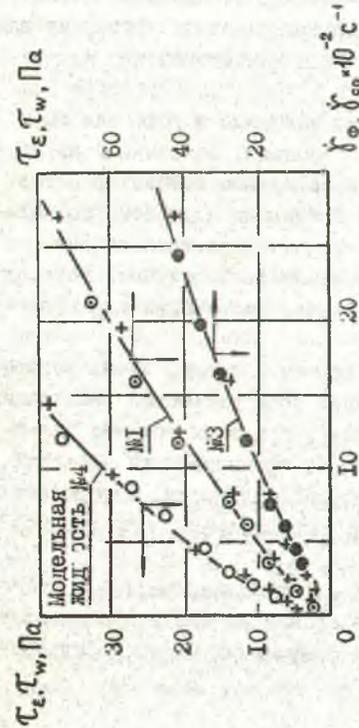


Рис. 6 Экспериментальные данные по фильтрации ньютоновских жидкостей через пакеты сеток (+ результаты вискозиметрии)

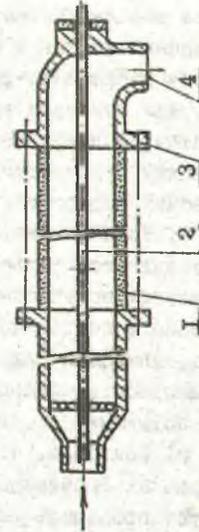


Рис.7

фильтрующейся жидкости, а в случае неполной фильтрации - еще и значением степени проточности; реологическими свойствами жидкости. Этих данных достаточно, чтобы рассчитать значения комплексных параметров  $\alpha$ ,  $\alpha^*$ ,  $\beta$ ,  $\beta^*$ . Исходя из требуемой точности выполнения расчетов, устанавливают предельные значения указанных параметров, что и позволяет определить базовую физическую модель для гидродинамического расчета рассматриваемого фильтрационного потока и оптимизации конструкций проектируемого оборудования.

## ВЫВОДЫ

1. Получено уравнение переноса импульса для континуального описания фильтрационных течений вязких и неньютоновских жидкостей, в котором, впервые в явном виде, учитываются молекулярный и турбулентный перенос импульса в фильтрационном потоке и на межфазной поверхности.

2. Предложены выражения для определения коэффициентов межфазного переноса импульса через наблюдаемые осредненные параметры процесса фильтрации и записаны дифференциальные уравнения для описания фильтрационных течений вязких и неньютоновских жидкостей.

3. Предложен метод моделирования межфазного переноса импульса для ламинарных фильтрационных течений, основанный на идентификации течения в пористой среде и модельном потоке по осредненному напряженно-деформированному состоянию жидкости, позволяющий, как показали результаты экспериментальных исследований, с достаточной для инженерных расчетов точностью, получить корреляцию между градиентом давления и скоростью фильтрации для неньютоновских жидкостей.

4. Установлено, что у границы пористой среды, вдоль которой осуществляется фильтрационное течение, поле скоростей фильтрации изменяется по экспоненциальному закону, при этом толщина фильтрационного пограничного слоя зависит от проницаемости пористой среды, вязкости жидкости и фильтрационной вязкости, определяющей интенсивность обмена импульсом между элементарными фильтрационными потоками.

5. Показано, что анализ работы и гидродинамический расчет радиальных фильтрационных течений в элементах машин и аппаратах следует проводить на основе базовых физических моделей фильтра-

ции, в качестве которых предложено использовать: радиальную фильтрацию в цилиндрическом пористом слое; радиальную фильтрацию в пористом диске и радиальную фильтрацию в цилиндрическом канале с проницаемыми стенками.

6. Проведено исследование гидродинамики фильтрационных потоков для базовых физических моделей и получены зависимости, позволяющие определить для этих потоков поля скоростей и давлений.

7. Установлены критерии, позволяющие на основании численных оценок выбирать для расчета конкретных фильтрационных потоков адекватную базовую физическую модель.

8. Исследовано влияние реологических свойств неньютоновских жидкостей на гидродинамические характеристики радиальных фильтрационных течений.

9. Результаты экспериментальных исследований радиальных фильтрационных течений показали правомерность использования предложенных базовых физических моделей радиальной фильтрации, а также возможность практического применения полученных на их основе методик расчета гидродинамических параметров таких течений.

10. Разработаны на уровне изобретений конструкция фильтра для разделения аэрозолей и способ очистки жидкостей, технические решения которых основаны на применении радиальных фильтрационных потоков.

11. Разработана методика инженерного расчета радиальных фильтрационных потоков в элементах машин и аппаратах химической промышленности.

12. Результаты выполненных исследований и полученные методики расчета радиальных фильтрационных потоков могут быть использованы при создании "банков данных" для систем автоматизированного проектирования химико-технологических процессов и производств.

#### УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$\bar{c}$  - концентрация импульса;  $D$  - диаметр;  $e_{ij}$  - девиатор тензора скоростей деформаций;  $H$  - высота пористого диска;  $\rho_{ij}$  - плотность потока импульса;  $K$  - коэффициент проницаемости изотропной пористой среды;  $K_{ij}$  - тензор проницаемости;  $L$  - осевой размер цилиндрического пористого элемента;  $\bar{n}$  - единичный вектор-нормаль к межфазной поверхности;  $P$  - давление;  $R$  - радиус;  $S$  - поверхность;  $s$  - эмпирический коэффициент в (22) и

(30);  $t$  - время;  $\bar{U}$  - вектор локальной скорости фильтрации;  $U$  - радиальная компонента скорости фильтрации в цилиндрической системе координат;  $U$  - средняя скорость потока жидкости в канале с проницаемыми стенками;  $\beta_\phi$  - инерционный коэффициент сопротивления при фильтрации;  $\varepsilon$  - объемная пористость;  $\zeta_{ij}$  - девиатор тензора обобщенного градиента концентрации импульса;  $\lambda_0$  - коэффициент сопротивления трения в канале;  $\mu$  - коэффициент динамической вязкости жидкости;  $\tau_{ij}$  - девиатор тензора плотности потока импульса;  $\bar{U} = \bar{U}/U_{max}$  и  $\xi = x/L$  - безразмерные средняя скорость потока в канале и координата;  $Re_\phi$  и  $Re_\kappa$  - число Рейнольдса для фильтрации и для потока в канале;  $\Gamma_1 = D_H/D_B$  и  $\Gamma_2 = \sqrt{K} \cdot \beta_\phi$  - геометрические симплексы.

Индексы: в - на внутренней поверхности цилиндрического пористого элемента; гр - на границе пористой среды; м - молекулярный перенос импульса; н - на наружной поверхности цилиндрического пористого элемента; ср - средний; тб - турбулентный перенос импульса; тв - твердая фаза; ф - фильтрационный.

Символ  $\langle \rangle$  означает процедуру осреднения.

#### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. Балашов В.А., Кочемасов С.Г. Определение гидродинамического сопротивления зернистого слоя для фильтрации растворов полимеров // Реология, процессы и аппараты химической технологии: Сб. научн. трудов / Волгоградский политехнический институт, 1983.- С.16-20.

2. Балашов В.А., Кочемасов С.Г. Расчет гидравлического сопротивления пористых материалов для фильтрации неньютоновских жидкостей // Тезисы докл. III Всес. научной конф. "Современные машины и аппараты химических производств: Химтехника-83", г.Навои, окт. 1983 г.- Ташкент, 1983.- Т.4.- С.189-190.

3. Балашов В.А., Кочемасов С.Г. Закономерности фильтрования с образованием слоя осадка для суспензий с вязкопластичной дисперсионной средой // Тезисы докл. II Всес. научно-техн. конф. по гидромеханическим процессам разделения неоднородных смесей, г.Курган, нояб. 1983 г.- М.: 1983.- С.19-20.

4. Балашов В.А., Кочемасов С.Г. Ламинарная фильтрация вязкопластичной жидкости // Реология, процессы и аппараты химической технологии: Сб. научн. трудов / Волгоградский политехнический ин-т, 1984.- С.16-19.

5. Балашов В.А., Кочемасов С.Г. Теоретические основы радиальной фильтрации аномально-вязких жидкостей // Тезисы докл. XIII Всес. симпозиума по реологии, г.Волгоград, июнь 1984 г.- Волгоград, 1984.- С.6.

6. Кочемасов С.Г., Балашов В.А. Расчет процесса фильтрации аномально-вязких жидкостей на основе консистентных кривых течения // Тезисы докл. XIII Всес. симпозиума по реологии, г.Волгоград, июнь 1984 г.- Волгоград, 1984.- С.36-37.

7. Тябин Н.В., Каныгин В.А., Балашов В.А., Кочемасов С.Г. Применение теории переноса для расчета течения вязкопластичных жидкостей в каналах и пористых средах // Гидродинамика и явления переноса в двухфазных дисперсных системах: Сб. научн. трудов / Иркутский политехнический институт, 1984.- С.28-32.

8. Кочемасов С.Г., Балашов В.А. Исследование процесса осветления технологических жидкостей в проточных каналах с проницаемыми стенками // Тезисы докл. II Всес. научно-техн. конф. "Повышение эффективности тепломассообменных и гидродинамических процессов в текстильной промышленности и производстве химических волокон", г.Москва, январь 1985.- М., 1985.- С.116.

9. Кочемасов С.Г., Балашов В.А. Исследование гидродинамики патронного фильтра // Тезисы докл. Всес. научной конф. "Повышение эффективности, совершенствование процессов и аппаратов химических производств", г.Харьков, июнь 1985 г.- Харьков, 1985.- Т.4.- С.65-66.

10. Кочемасов С.Г., Балашов В.А. Уравнение движения для фильтрационных течений при переработке не Ньютоновских полимерных материалов // Тезисы докл. III Всес. симпозиума "Теория механической переработки полимерных материалов", г.Пермь, июнь 1985 г.- Пермь, 1985.- С.103.

11. Балашов В.А., Кочемасов С.Г., Тябин Н.В. Радиальная фильтрация вязкой жидкости в пористом диске / Волгоградский политехнический ин-т.- Волгоград, 1985.- 17 с. Деп. в ВИНИТИ 6.08.85. № 5852-85.

12. Исследование гидродинамики потока в канале с пористыми стенками / В.А.Балашов, С.Г.Кочемасов, В.Г.Шебаршин, Н.В.Тябин; Волгоградский политехнический ин-т.- Волгоград, 1985.- 15 с. Деп. в ВИНИТИ 26.11.85. № 8153-85.

13. А.с. И139941 СССР, М. кл. F25B43/02 Маслоотделитель / В.А.Балашов, Е.П.Букацевич, С.Н.Анисимов, С.Г.Кочемасов, Н.В.Тябин, М.П.Якимив СССР.- № 3536221; заявлено 10.01.83; опубли.

15.02.85. Бюл. № 6.

14. Способ ионообменной очистки жидкости / Кочемасов С.Г., Сафронов А.К., Балашов В.А., Тябин Н.В. - заявка на изобретение № 3841920/23-26, приоритет 14.01.85.- положительное решение 16.01.86.

Список цитируемой литературы

1. Тябин Н.В. Теория равновесия и переноса в химико-технологических процессах. - Волгоград: Изд. Волгоградского политех. ин-та, 1983. - 122 с.

2. Николаевский В.Н. Механика пористых и трещиноватых сред. - М.: Недра, 1984. - 232 с.

3. Петров Г.А. Гидравлика переменной массы. - Барков: издат. УГУ, 1964. - 223 с.

Соискатель



Кочемасов С.Г.

КОЧЕМАСОВ Сергей Георгиевич

ГИДРОДИНАМИКА РАДИАЛЬНЫХ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПОТОКОВ  
В АППАРАТАХ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать 4.10.86 г. НМ № 00429. Формат 60x84 1/16.  
Усл.-печ.л.1,25. Уч.-изд.л.1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 850.

Межвузовский ротационный участок Волгоградского ордена  
Трудового Красного Знамени политехнического института.  
Волгоград-66, ул. Советская, 35.