

УДК 532.546; 532.5.013.4
PACS 47.56.+r, 47.55.pd

Нелинейные сорбционные эффекты при прокачке наножидкости через пористую среду

В. А. Демин^{1,2}, Б. С. Марышев^{1,3}, А. И. Меньшиков¹

¹ Пермский государственный национальный исследовательский университет
614990, Пермь, ул. Букирева, 15
email: demin@psu.ru

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет
614990, Пермский край, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29

³ Институт механики сплошных сред УрО РАН
614013, Пермь, ул. Академика Королева, 1
email: bmaryshev@mail.ru

На основе результатов численного моделирования проведен анализ процесса фильтрации наножидкости с размерами частиц менее 100 нм через пористую среду. Теоретическое описание фильтрационного процесса основано на МММ модели и законе Дарси, которые были модифицированы с учетом обратной нелинейной связи между сорбционными свойствами материала и поровой скоростью. Обсуждается новый параметр, характеризующий данную нелинейность, который фактически представляет собой критическую скорость отрыва частиц от стенок пор. По мере пропитки материала наночастицами происходит изменение проницаемости и пористости среды, которые связаны друг с другом формулой Козени – Кармана. Дополнительная нелинейность в уравнениях позволяет феноменологически учесть эффект, согласно которому закупорка в еще большей степени приводит к уменьшению скорости фильтрации, что вызывает усиление адсорбции примеси. Показано, что варьирование критической скорости отрыва значительно влияет на динамику распределения мобильной и иммобильной примеси в пористом материале.

Ключевые слова: пористая среда; прокачка наножидкости; процессы адсорбции и десорбции; критическая скорость отрыва

Поступила в редакцию 27.07.2020; принята к опубликованию 04.09.2020

Nonlinear sorptive effects during the pumping of a nanofluid through porous medium

V. A. Demin^{1,2}, B. S. Maryshev^{1,3}, A. I. Menshikov¹

¹ Perm State University, Bukireva St. 15, 614990, Perm
e-mail: demin@psu.ru

² Perm State National Research Polytechnic University, Komsomolskii pr., 29, 614990, Perm

³ Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Korolev Str. 1, 614013, Perm
e-mail: bmaryshev@mail.ru

Filtration process of a nanofluid with particles size less than 100 nm through a porous medium is analyzed theoretically on the base of direct numerical simulation. Mathematical description of this process is fulfilled using the MIM model and Darcy's law, which are modified to take into account the nonlinear reverse reaction of sorption properties of the material on the intensity of pore velocity. A new parameter, which characterizes this nonlinearity, is introduced into the model. In fact, it represents the value of critical velocity for particle separation from the pore walls by the flow. The values of permeability and porosity decrease in dependence on time during the saturation of porous

medium with nanoparticles. These parameters are related with each other by the Kozeny–Carman equation. The results of calculations show that the variation of the critical velocity for particle separation significantly affects on the dynamics of redistribution of the mobile and immobile impurity in porous material.

Keywords: porous medium; pumping of nanofluid; adsorption and desorption; critical velocity of separation

Received 27.07.2020; accepted 04.09.2020

doi: 10.17072/1994-3598-2020-4-09-16

1. Введение

В настоящее время создание и производство новых материалов с заданными физико-химическими свойствами является актуальной задачей для всех отраслей промышленности. Как правило, на микроуровне эти материалы представляют собой сложную комбинацию более простых исходных субстратов несмотря на то, что с макроскопической точки зрения они кажутся вполне однородными. Чтобы добиться требуемых свойств на выходе, процесс создания таких материалов включает в себя множество промежуточных стадий, при прохождении которых их результирующее строение становится невероятно сложным. В широком смысле такие материалы называют композитными, и они весьма востребованы на практике, так как способны выдерживать различные экстремальные нагрузки, что недоступно при использовании традиционных химически и физически однородных сред.

Одним из способов получения композитного материала является пропитка при высокой температуре исходной пористой матрицы жидкостью, которая при охлаждении застывает (стеклется или кристаллизуется), в результате чего образуется сложная комбинированная среда с некоторой промежуточной плотностью и принципиально новыми характеристиками. Причиной возникновения новых механических и физических свойств является прохождение в ходе пропитки химических реакций при высоких температурах, включая выгорание отдельных элементов. В этой связи, с развитием нанотехнологий, которые позволяют на сегодняшний день получать порошкообразные среды с размерами частиц порядка нескольких десятков нанометров, появилась возможность в качестве пропитывающей жидкости использовать суспензии, изготавливаемые на основе этих порошков. Взвешенные в жидкости частицы увлекаются фильтрационным потоком и с легкостью проникают в пористый материал, если размер частиц значительно меньше поперечных размеров пор. Дальнейшее поведение частиц зависит от характера их взаимодействия со стенками пористого скелета. Если имеет место существенная дисперсия у частиц по размерам или большой разброс в сечении пор, то среди частиц всегда найдутся до-

статочно крупные, чтобы приводить к механической закупорке каналов. Теоретическое описание таких процессов основывается на вероятностных законах и дает неплохое согласие с экспериментом [1]. Правда, следует учитывать, что, если диаметр частиц сопоставим с размерами каналов в поперечном сечении, глубокая пропитка такого материала, очевидно, невозможна.

Когда диаметр частиц много меньше поперечных размеров пор, постепенное закупоривание каналов тоже наблюдается, однако этот процесс определяется совсем другими физическими причинами. В этом случае в роли механизма закупорки выступает ван-дер-ваальсово взаимодействие частиц со стенками каналов на фоне продолжающегося фильтрационного течения [2,3]. Оценки показывают, что во многих ситуациях сила притяжения частиц к твердым стенкам каналов вполне достаточна, чтобы порождать сильные адсорбционные процессы в пористой среде, пренебрегать которыми на больших временах уже не представляется возможным [4].

Большим плюсом при создании композитных материалов, получающихся путем пропитки, является возможность не только управлять составом суспензии, но и использовать при этом искусственно произведенные пористые матрицы с заданными свойствами. В результате того, что динамика наносуспензий в пористых средах колоссально разнообразна, технологически открывается множество возможностей по созданию новых уникальных материалов, производство которых сопровождается открытием весьма нетривиальных физических эффектов и явлений. Описание одного из таких неожиданных эффектов было проведено в работе [5], в которой была численно изучена динамика оседания примеси на стенках пор, а также продемонстрированы образование и движение специфического концентрационного фронта у этого распределения. Помимо разработки математической модели, подробного анализа самого процесса фильтрации в этой работе методом прямого численного моделирования были исследованы поведение малых возмущений в потоке и проведены оценки, ограничивающие рамки применимости применяемого подхода. Ввиду ограничений на объем представляемых результатов в обсуждаемой работе не проведено подробное многопараметрическое исследование различных

режимов пропитки при изменении критериев подобия задачи. Следующий анализ показал, что нелинейный отклик системы на прокачку наносuspензии приводит к неожиданному поведению системы в отношении скорости продвижения концентрационного фронта примеси, постепенно заполняющей пористую среду.

Таким образом, в данной работе изучается динамика заполнения пор наночастицами suspension в зависимости от параметра, представляющего собой критическое значение поровой скорости, при которой десорбция полностью прекращается. Иными словами, анализируется эффект, согласно которому уменьшение скорости фильтрации до некоторого критического значения максимально усиливает адсорбцию примеси, так как при достижении этой скорости вероятность отрыва частиц и возвращения их обратно в поток становится равной нулю.

2. Постановка задачи и система базовых уравнений

Рассмотрим слой однородной пористой среды толщиной L и высотой H (рис. 1). Для определенности он представляет собой пластину, для которой выполняется условие $H > L$. За счет постоянной разницы давлений $\Delta p = p_2 - p_1$ на широких гранях образца осуществляется прокачивание наносuspензии в поперечном направлении. Слой находится в поле тяжести, что подразумевает учет в модели концентрационно-конвективного механизма переноса примеси на фоне просачивания жидкости через поровое пространство.

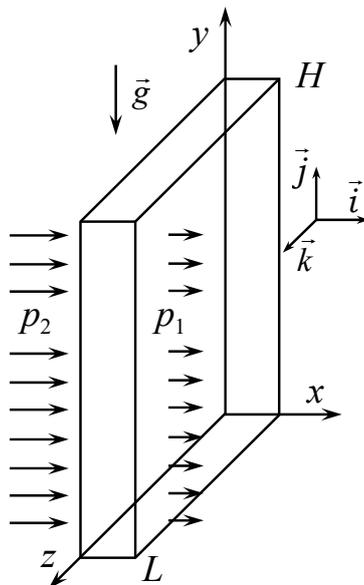


Рис. 1. Конфигурация задачи и система координат

Моделируемый процесс соответствует частицам, которые характеризуются определенной дис-

персией, но их размеры не превышают 100 нм. По составу они отличны от материала пористой матрицы. Пропитываемые образцы композитного материала до закупорки имеют поры размером порядка 10 мкм, т.е. их величина много больше диаметра частиц.

Для описания процесса фильтрации за основу возьмем модифицированную ММ модель, в которой учитывается нелинейный сорбционный отклик системы на величину поровой скорости жидкости [5,6]. При этом закрытие пор происходит по механизму Козени – Кармана [7,8], а динамика процесса фильтрации описывается уравнениями в приближении Дарси – Буссинеска [9]. В этом случае уравнения для концентраций в мобильной и иммобильной фазах имеют вид:

$$\frac{\partial}{\partial t} [\phi(c_m + c_i)] = -\bar{v}\nabla c_m + D\Delta(\phi c_m), \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} c_i = \mathfrak{R}(c_m, c_i), \quad (2)$$

где c_m, c_i – объемные концентрации тяжелой примеси в мобильном и иммобильном состояниях соответственно, \bar{v} – скорость фильтрации; ϕ – поле пористости среды, D – коэффициент диффузии в отсутствие твердого скелета. Так называемая кинетическая функция $\mathfrak{R}(c_m, c_i)$ описывает переход примеси из мобильного состояния в иммобильное и обратно.

Конкретизируем вид кинетической функции, а также перепишем систему уравнений (1), (2) в терминах поровой скорости с учетом несжимаемости жидкости и закона Дарси:

$$\partial_t(c_m + c_i) = -(\bar{u}\nabla)c_m + D\Delta c_m, \quad (3)$$

$$\frac{\eta\phi_0}{\kappa(\phi)}\bar{u} + g c_m \beta \bar{j} = -\nabla P, \quad \text{div}\bar{u} = 0, \quad (4)$$

$$\partial_t c_i = \alpha(c_m(q_0 - c_i) - \gamma(u_x - u_c)c_i), \quad (5)$$

$$\kappa(\phi) = \kappa_0 \phi^3 / (1 - \phi)^2, \quad \phi = \phi_0 - c_i. \quad (6)$$

Здесь κ – проницаемость среды, \bar{u} – поровая скорость жидкости, P – поправка к гидростатическому давлению. Индекс t означает дифференцирование по времени. В уравнениях присутствуют дополнительные параметры: η – динамическая вязкость, β – коэффициент концентрационного увеличения плотности, α – параметр межфазного обмена, ρ – плотность жидкости-носителя, κ_0 – константа Козени – Кармана, γ – с точностью до множителя представляет собой коэффициент распределения примеси, g – ускорение силы тяжести. Помимо этого имеем ϕ_0 – пористость незагрязненной среды, q_0 – концентрация насыщения пористой среды, \bar{j} – единичный вектор, ориентированный вертикально вверх.

В рамках классической ММ-модели [8] предполагается, что примесь разделена на две фазы –

это мобильный и иммобильный компоненты. Первая фаза представляет собой дрейфующие в фильтрационном потоке частицы, вторая – частицы, которые уже осели на твердый скелет пористой среды. Простейшая линейная модель подходит для описания процессов фильтрации, для которых характерны малые скорости фильтрации. Однако при рассмотрении различных технологических процессов возможны большие значения приложенного градиента давления, что приводит к увеличению скорости прокачки. В результате, чтобы расширить границы описания на случай больших изменений скорости фильтрации, в используемой модели кинетическая функция в правой части (2) имеет более сложную структуру и представляется уравнением (5). А именно, помимо нелинейного слагаемого, отвечающего за эффект насыщения среды, появляется еще одна нелинейность $\sim u_x c_i$. В указанном уравнении (5) для концентрации иммобильного компонента u_x – поперечная составляющая поровой скорости, а u_c – материальная константа, которая имеет смысл некоего ее критического значения. Предполагается, что при выполнении условия $u_x > u_c$, чем больше поровая скорость, тем интенсивнее происходит десорбция. Константа u_c является феноменологической характеристикой среды, которая показывает, что при уменьшении поровой скорости u_x до этого значения десорбция полностью прекращается. Он определяет интенсивность взаимодействия частицы со стенкой поры на микроскопическом уровне. Фактически; u_c – это скорость потока, при которой десорбция прекращается: сдвиговых напряжений не хватает, чтобы оторвать частицу потоком от твердого скелета. Дополнительный коэффициент γ в этом слагаемом описывает общее обратное влияние потока на адсорбционные процессы. Увеличивающаяся с течением времени закупорка в еще большей степени влияет на поровую скорость и тем самым за счет обратной связи усиливает адсорбционные процессы. Когда x компонента скорости падает до критического значения, адсорбционный процесс максимально усиливается. Последнее слагаемое в уравнении (5) учитывается в каждом узле сетки только при условии $u_x > u_c$. Очевидно, что десорбционное слагаемое может приводить только к уменьшению концентрации иммобильного компонента.

Обезразмерим систему уравнений (3)–(6), используя следующие единицы:

$$\begin{aligned} [\Delta x, \Delta y] &= L, [t] = L^2/D, [\vec{u}] = D/L, \\ [P] &= P_2 - P_1, [c] = C_0, [q_0] = C_0, \end{aligned} \quad (7)$$

где Δx и Δy – это пространственные интервалы вдоль горизонтальной и вертикальной координат соответственно, C_0 – начальное значение концентрации частиц в жидкости на левой границе. Давления на входе и выходе равны соответственно P_2

и P_1 . После обезразмеривания система уравнений приобретает вид:

$$\partial_t (c_m + c_i) = -(\vec{u}\nabla)c_m + D\Delta c_m, \quad (8)$$

$$\frac{\vec{u}}{\kappa(\phi)} + \text{Rd} \cdot c_m \vec{j} = -\text{Pe}\nabla P, \quad \text{div}\vec{u} = 0, \quad (9)$$

$$\partial_t c_i = a c_m (q_0 - c_i) - b(u_x - u_c) c_i, \quad (10)$$

$$\kappa(\phi) = \phi^3 / (1 - \phi)^2, \quad \phi = \phi_0 - C_0 c_i. \quad (11)$$

Данные уравнения в частных производных дополняются граничными условиями:

$$u_x|_{x=0} = -\text{Pe} k(\phi) \partial_x P|_{x=0}, \quad u_y|_{y=0,h} = 0, \quad (12)$$

$$c_m|_{x=0} = C_0, \quad \partial_x c_m|_{x=1} = 0, \quad \partial_y c_m|_{y=0,h} = 0, \quad (13)$$

$$P|_{x=0} = 1, \quad P|_{x=1} = 0, \quad (14)$$

$$\partial_y P|_{y=0,h} = -\frac{\text{Rd}}{\text{Pe}} c_m|_{y=0,h}. \quad (15)$$

В систему уравнений (8) – (11) и граничные условия (12) – (15) входят следующие безразмерные параметры: число Пекле Pe , характеризующее интенсивность прокачки, число Рэлея – Дарси Rd , отвечающее за гравитационное влияние на элементы жидкости с разной плотностью, а также параметры адсорбции a и десорбции b :

$$a = \alpha \frac{C_0 L^2}{D}, \quad b = \alpha \frac{\gamma L^2}{D}, \quad (16)$$

$$\text{Pe} = \frac{(P_2 - P_1) \kappa_0}{D \eta \phi_0}, \quad \text{Rd} = \frac{g \rho \kappa_0 \beta L C_0}{D \eta \phi_0}. \quad (17)$$

Краевые условия, первое в (12) и (15), являются следствиями уравнения Дарси – Буссинеска и представляют собой динамические граничные условия. Иными словами, скорость, давление, проницаемость и концентрация мобильного компонента на границах расчетной области слева и справа зависят от координат и времени. Второе уравнение в (13) на концентрацию мобильной примеси тоже требует особого обсуждения и означает, что вся примесь, доходящая до правой границы, выносится без задержки вместе с потоком.

3. Оценка параметров и методика решения

Система дифференциальных уравнений в частных производных (8) – (11) совместно с краевыми условиями (12) – (15) решалась численно методом конечных разностей при помощи явной схемы первого порядка точности по времени и второго порядка по пространству [10]. Временной шаг выбирался из соображений устойчивости численной процедуры (критерий Куранта–Фридрихса–Леви). Авторский компьютерный код был реализован на языке программирования FORTRAN-90.

В качестве начального состояния системы выбирались невозмущенные поля давления ($P = 0$) и компонент поровой скорости ($u_x = 0, u_y = 0$). Задача решалась в двумерной постановке с учетом однородности системы по координате z . Начальное значение пористости принималось равным $\phi_0 = 0.5$. Как видно из формулы Козени–Кармана (11), при этом значении проницаемость равна пористости. Поры образца изначально предполагаются пустыми, что математически означает равенство нулю значений концентрации мобильной и иммобильной фаз $C_m = C_i = 0$. В расчетах использовалась численная сетка с числом узлов по осям 35×155 . Соотношение толщины слоя L к высоте H составляло 1:5. Все расчеты проводились для следующих значений безразмерных параметров: $a = 600, b = 20, Rd = 30, Re = 800, q_0 = 0.45$. Числа Пекле и Рэлея–Дарси отвечают параметрам водно-спиртовых растворов, для которых $\nu = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}, \rho = 10^3 \text{ кг/м}^3$. Так как частицы предполагаются достаточно тяжелыми, примем $\beta \sim 3$. Их концентрация не является малой и составляет 0.2 массовой доли суспензии. В дополнение воспользуемся оценкой $\kappa_0 = 10^{-14} \text{ м}^2, D = 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$ [5].

Таким образом, для $L = 10^{-2} \text{ м}$ число Рэлея–Дарси равно $Rd \sim 30$. При разности давлений $2 \cdot 10^3 \text{ Па}$ число Пекле $Re \sim 1000$. Безразмерные параметры адсорбции и десорбции для частиц размером менее 100 нм характеризуются широким разбросом, поэтому в ходе численного моделирования они были подобраны так, чтобы обеспечить согласие результатов расчета и данных некоторого технологического процесса [5]. Значение критической скорости в приведенных там результатах расчетов принималось равным $u_c = 350$. При переходе к размерным величинам для указанного выше коэффициента диффузии и толщины слоя это дает весьма малое значение порядка $5 \cdot 10^{-3} \text{ мм/с}$. Это значение неплохо согласуется с исходными предположениями о механизме отрыва, который происходит при превышении силы вязких напряжений, действующих на частицу со стороны потока, над силами ван-дер-ваальсового взаимодействия со стенкой. Величина критических напряжений была оценена в работе [4]. Критические напряжения для различных сочетаний материалов частицы и стенки имеют порядок 10^{-2} Па , что для поры размером $\sim 10^{-5} \text{ м}$ соответствует диапазону скоростей $10^{-2} \div 10^{-3} \text{ мм/с}$.

4. Обсуждение результатов

Как уже было отмечено выше, численное моделирование процесса фильтрации в рамках предложенной модели при некотором фиксированном наборе управляющих параметров было проведено в [5]. Данное исследование позволило понять основные черты продвижения концентрационного фронта иммобильной примеси вглубь образца. В

том числе были представлены поля скорости, концентрации частиц в разных фазах, пористости и проницаемости, проведено качественное сравнение с экспериментом. Однако в этой работе не было выполнено варьирование критической скорости u_c , которая является пороговой для включения/выключения десорбционного механизма. Удивительно, но расчеты показывают, что перебор этого параметра обнаруживает парадоксальный отклик пористой среды на его изменение.

Далее представим результаты численного моделирования для следующих значений критической скорости: $u_c = 210, 300, 350$ и 500 . Этот выбор определяется числом Пекле, которое зависит от приложенного градиента давления и дает начальную скорость течения $u_x \sim Re / 2 = 400$. Данное значение вытекает из уравнения (9) для поровой скорости. Величина поровой скорости должна превосходить u_c , если мы хотим, чтобы десорбционное слагаемое в уравнении (10) работало. Таким образом, первые три значения u_c выбраны так, чтобы при прокачке, по крайней мере, на начальном ее этапе десорбция бы присутствовала. Значение $u_c = 500$ выбрано заведомо так, чтобы изучить поведение системы в отсутствие десорбции с самого начала фильтрации.

С физической точки зрения очевидно, что чем меньше критическая скорость u_c , тем дольше работают десорбционные процессы в массиве. Но, по идее, чем сильнее десорбция, тем медленнее частицы осаждаются на стенках пор и тем дольше должна продолжаться их закупорка.

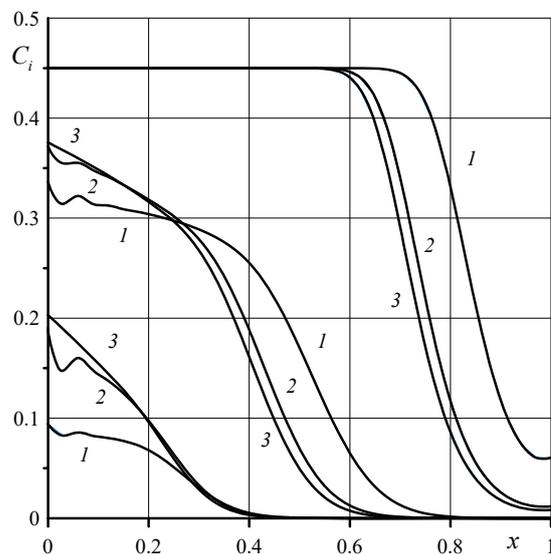


Рис. 2. Эволюция фронта иммобильной фазы в моменты времени $t = 0.001, 0.003, 0.1$. Номера кривых отвечают следующим значениям u_c : 1 – 210, 2 – 300, 3 – 500

Отсюда вроде бы следует, что если процесс заполнения пор идет дольше, то концентрационный фронт иммобильной примеси должен двигаться тоже медленнее. Однако, как показывает числен-

ное моделирование, в действительности все оказывается наоборот. Из рис. 2 видно, что концентрационный фронт для меньшего значения u_c в конечном счете движется быстрее нежели при больших значениях этого параметра. В семействе линий справа, отвечающем времени $t = 0.1$, кривая 1 показывает, что на больших временах заполнение пор идет значительно быстрее именно при меньших значениях критической скорости.

Действительно, чем меньше u_c , тем дольше продолжаются десорбционные процессы в системе. Это приводит к тому, что концентрация мобильного компонента в массиве во всех точках поперек слоя оказывается больше во все моменты времени (рис. 3, фрагменты *a* и *b*). Как на малых, так и больших временах кривые 1, 2 и 3 располагаются одна за другой так, что меньшее значение u_c соответствует большему значению концентрации мобильного компонента. Однако концентрация иммобильного компонента ведет себя кардинально по-другому. Она не следует синхронно за концентрацией мобильного компонента, так как в дополнение зависит от поровой скорости, как это вытекает из уравнения (10). Расчеты показывают (рис. 4), что поровая скорость очень быстро монотонно убывает с течением времени. При закупорке первой четверти слоя на одну-три десятых от начальной концентрации скорость во временном интервале от 0.001 до 0.003 падает практически на два порядка, а дальше на больших временах выходит на некоторое асимптотическое значение.

На этом этапе приращение концентрации иммобильного компонента δc_i не опосредованно, а напрямую определяется конкуренцией двух разных механизмов: адсорбционного и конвективного.

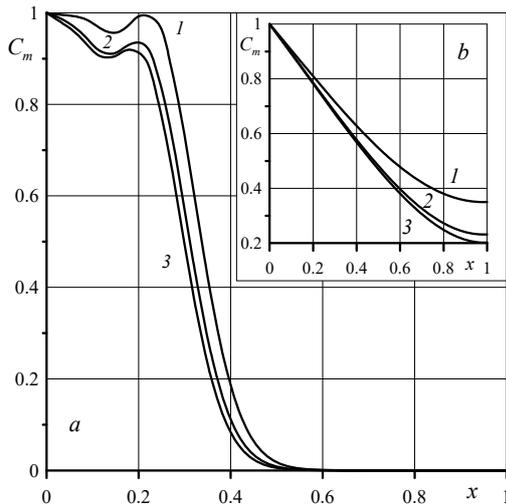


Рис. 3. Эволюция фронта мобильной фазы в моменты времени: *a* – $t = 0.001$; *b* – $t = 0.3$; номера кривых отвечают: 1 – $u_c = 210$; 2 – $u_c = 300$; 3 – $u_c = 500$

Для того чтобы понять, что происходит на этом этапе, проанализируем более подробно результаты, представленные на рис. 2. Действительно, на малых временах видим, чем меньше критическая скорость u_c , тем дольше присутствуют десорбционные процессы, но дольше по времени сохраняется скорость потока. При $t = 0.001$ (левое семейство кривых на рис. 1) кривая 1, соответствующая наименьшему значению u_c , лежит ниже всех. Выше всех лежит кривая 3, отвечающая наибольшему u_c . Однако у процесса адсорбции есть еще одна сторона. Пока работает десорбция, существенное количество примеси возвращается обратно в фильтрационный поток и уносится им вглубь образца. Семейство кривых при $t = 0.003$ демонстрирует отклик системы на десорбцию и конвективный перенос. Именно при меньших u_c большее количество примеси проникает вглубь образца. На входе в образец концентрация иммобильного компонента меньше для $u_c = 210$, однако примесь гораздо интенсивнее заходит внутрь массива, и там концентрация иммобильного компонента при этом значении u_c имеет большее значение. Вследствие десорбции на входе и конвективного переноса происходит увеличение концентрации мобильного компонента в глубине образца и соответственно рост концентрации иммобильного компонента, так как $\delta c_i \sim c_m$. Иными словами, согласно уравнению (10) приращение концентрации иммобильного компонента в некоторой точке пропорционально концентрации мобильного компонента в ней.

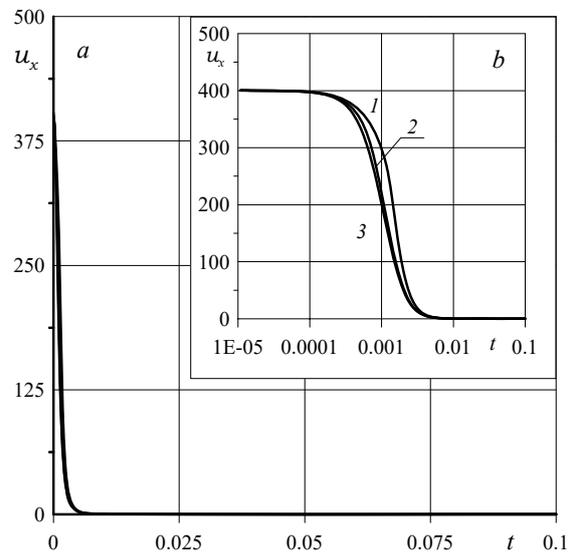


Рис. 4. Временная зависимость x -компоненты поровой скорости: *a* – в точке с координатами $x = 0.5$, $y = 2.5$ (середина образца); *b* – фрагмент временной зависимости x -компоненты скорости в этой же точке на начальном этапе по времени; 1 – $u_c = 210$; 2 – $u_c = 300$; 3 – $u_c = 500$

В итоге концентрационный фронт иммобильного компонента при малых значениях u_c начинает обгонять таковой для больших значений этого параметра.

На следующей стадии, когда скорость падает до минимального значения, очень быстро происходит насыщение образца на входе, но в случае с меньшим u_c примесь уже успела проникнуть глубже в образец и, таким образом, при $t = 0.1$ концентрационный фронт для $u_c = 210$ оказывается справа, т.е. он движется быстрее всех.

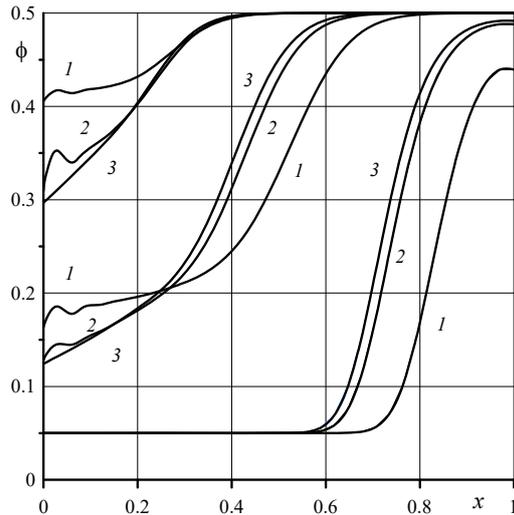


Рис. 5. Эволюция пористости в поперечном сечении для моментов времени: $t = 0.001, 0.003, 0.1$. Номера кривых соответствуют: 1 – $u_c = 210$, 2 – $u_c = 300$, 3 – $u_c = 500$

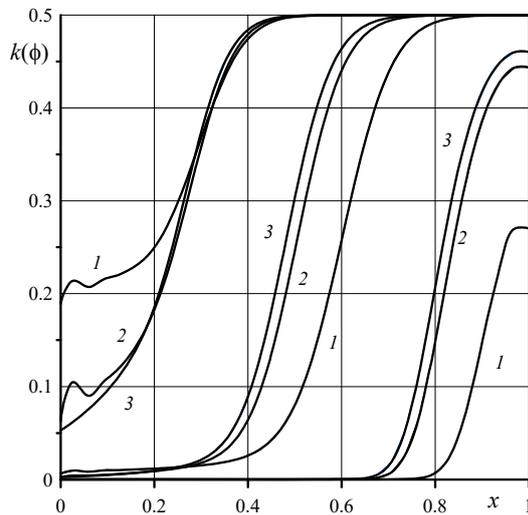


Рис. 6. Эволюция проницаемости в поперечном сечении для моментов времени: $t = 0.001, 0.003, 0.1$. Номера кривых 1 – 3 соответствуют $u_c = 210, 300, 500$

Следует также отметить, что на графиках не отображены результаты для $u_c = 350$, так как они практически совпадают с результатами для случая $u_c = 500$, который можно назвать предельным, в том смысле, что это значение превосходит началь-

ную поровую скорость $u_c = 400$, которая имеет место в численном эксперименте при числе Пекле $Pe = 800$. Как уже отмечалось выше, при данном значении критической скорости десорбция отсутствует во все моменты времени. Это подразумевает, что последнее слагаемое в уравнении (10) отключается во всех узлах расчетной сетки.

Не менее важными и интересными характеристиками являются поля пористости и проницаемости среды, которые, очевидно, зависят от степени насыщенности материала осевшими частицами. Распределения пористости и проницаемости вполне закономерно синхронно следуют за полем концентрации иммобильной примеси (рис. 5 и 6) и отражают сложную конкуренцию адсорбции и конвективного переноса. Кривые 1 и 3 меняются местами с течением времени по причине того, что при меньших значениях u_c на начальном этапе фильтрации примесь успевает глубже проникнуть в массив и зацепиться за твердые стенки скелета. А дальше десорбция прекращается во всех трех случаях и концентрационные фронты движутся практически с одной скоростью, как это демонстрируют кривые 1–3 на рис. 2.

5. Заключение

Проанализировано действие важного для пропитки пористого материала параметра, который определяет отрывные свойства потока в ходе фильтрации наносuspension через пористый материал. Показано, что данный параметр отвечает за обратное влияние фильтрационного течения на сорбционный отклик твердого скелета среды. Этот параметр показывает, насколько должна уменьшиться скорость, чтобы процесс десорбции прекратился. Результаты расчета для образцов достаточной толщины показывают, что при уменьшении этого параметра концентрационный фронт из иммобильной примеси продвигается быстрее, что свидетельствует о меньшем времени пропитки образца.

Работа выполнена при финансовой поддержке правительства Пермского края (Программа поддержки Научных школ Пермского края, соглашение № С-26/788).

Список литературы

1. *Valdes J. R., Santamarina J. C.* Particle clogging in radial flow: microscale mechanisms // SPE Journal. 2006. V. 11 (2). P. 193–198.
2. *Devereux O.F., de Bruyn P.L.* Interaction of plane-parallel double layers, Cambridge, MA: MIT Press, 1963, 361 p.
3. *Elimelech M., Gregory J., Jia X., Williams R.A.* Particle deposition and aggregation. Measurement, modelling and simulation. Woburn: Butterworth-Heinemann, 1995. P. 43–46.

4. Klimenko L. S., Maryshev B. S. Numerical simulation of microchannel blockage by the random walk method // *Chemical Engineering Journal*. V. 381, 2020, 122644. DOI: 10.1016/j.cej.2019.122644.
5. Демин В. А., Марышев Б. С., Меньшиков А. И. Движение концентрационного фронта и адсорбция примеси при прокачке наножидкости через пористую среду // *Вычислительная механика сплошных сред*. 2020. Т. 13. № 1. С. 83–97. DOI: 10.7242/1999-6691/2020.13.1.7
6. Gruesbeck C., Collins R. E. Entrainment and deposition of fine particles in porous media // *SPE Journal*. 1982. V. 22 (6). P. 847–856.
7. Deans H.A. A mathematical model for dispersion in the direction of flow in porous media // *SPE Journal*. 1963. V. 3, pp. 49–52.
8. Марышев Б. С. О горизонтальной напорной фильтрации смеси через пористую среду с учетом закупорки // *Вестник Пермского университета. Физика*. 2016. Вып. 3 (34). С. 12–21. DOI: 10.17072/1994-3598-2016-3-12-21.
9. Nield D. A., Bejan A. *Convection in porous media*. New York: Springer. 2006, 654 p.
10. Ferziger J. H., Peric M. *Computational methods for fluid dynamics*. New York: Springer, 2002, 423 p.
3. Elimelech M., Gregory J., Jia X., Williams R. A. *Particle deposition and aggregation. Measurement, modelling and simulation*. Woburn: Butterworth-Heinemann, 1995, pp. 43-46.
4. Klimenko L. S., Maryshev B. S. Numerical simulation of microchannel blockage by the random walk method. *Chemical Engineering Journal*, 2020, vol. 381, 122644. DOI: 10.1016/j.cej.2019.122644.
5. Demin V. A., Maryshev B. S., Menshikov A. I. The motion of the concentration front and adsorption of impurity during pumping of a nanofluid through a porous medium. *Computational mechanics of continuous media*, 2020, vol. 13, no. 1, pp. 83–97. DOI: 10.7242/1999-6691/2020.13.1.7
6. Gruesbeck C., Collins R. E. Entrainment and deposition of fine particles in porous media. *SPE Journal*, 1982, vol. 22 (6), pp. 847–856.
7. Deans H. A. A mathematical model for dispersion in the direction of flow in porous media. *SPE Journal*, 1963, vol. 3, pp. 49–52.
8. Maryshev B. S. On the horizontal pressure filtration of the mixture through a porous medium with clogging. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2016, no. 3 (34), pp. 12–21. DOI: 10.17072/1994-3598-2016-3-12-21.
9. Nield D. A., Bejan A. *Convection in porous media*. New York: Springer. 2006, 654 p.
10. Ferziger J. H., Peric M. *Computational methods for fluid dynamics*. New York: Springer, 2002, 423 p.

References

1. Valdes J. R., Santamarina J. C. Particle clogging in radial flow: microscale mechanisms, *SPE Journal*, 2006, vol. 11 (2), pp. 193–198.
2. Devereux O. F., de Bruyn P. L. *Interaction of plane-parallel double layers*, Cambridge, MA: MIT Press, 1963, 361 p.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Демин В. А., Марышев Б. С., Меньшиков А. И. Нелинейные сорбционные эффекты при прокачке наножидкости через пористую среду // *Вестник Пермского университета. Физика*. 2020. № 4. С. 09–16. doi: 10.17072/1994-3598-2020-4-09-16

Please cite this article in English as:

Demin V. A., Maryshev B. S., Menshikov A. I. Nonlinear sorptive effects during the pumping of nanofluid through porous medium. *Bulletin of Perm University. Physics*. 2020, No. 4, pp. 09–16. doi: 10.17072/1994-3598-2020-4-09-16