

УДК 519.6

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФИЛЬТРОВАНИЯ МАЛОКОНЦЕНТРИРОВАННЫХ РАСТВОРОВ ЧЕРЕЗ ПОРИСТУЮ СРЕДУ

Туракулов Ж.

jahondasturchi@gmail.com

Наманганский инженерно-строительный институт,
160115, Узбекистан, Наманган, ул. Касансай, 7.

Проводилось численное исследование нестационарного технологического процесса фильтрации малоконцентрированных растворов через пористую среду, протекающего в соответствии с законом Дарси с учетом явлений коагуляции и суффозии. Для определения основных параметров технологического процесса и определения их диапазонов изменения на основе разработанного численного алгоритма проведены вычислительные эксперименты, результаты которых позволили определить степень влияния засоренности раствора, технико-экономических характеристик агрегата и режимов его работы. Проведенными численными расчетами установлено, что когда время фильтрации суспензии превышает 450-500 часов, наблюдается резкий рост гидравлического давления в слоях колонки агрегата, происходит максимальное накопление частиц на поверхности перегородки фильтра и уменьшение его порового пространства и, следовательно, уменьшается скорость прохода жидкости через фильтровальную перегородку агрегата. Далее начинается процесс отрыва частиц, осевших в поровом пространстве фильтровальной перегородки. Анализ численных расчетов показал, что в подборе режимов работы фильтра существенную роль играет технология фильтрации суспензии и первоначальной концентрации жидкости, подаваемой к колонке агрегата.

Ключевые слова: математическая модель, численный алгоритм, вычислительный эксперимент, фильтрация, концентрация растворов, пористая среда.

Цитирование: Туракулов Ж. Численное исследование процесса фильтрации малоконцентрированных растворов через пористую среду // Проблемы вычислительной и прикладной математики. – 2024. – № 5(61). – С. 18-30.

1 Введение

В настоящее время особое внимание уделяется изучению процессов фильтрации и очистки растворов, электролитов и жидких смесей, которые широко применяются на производственных предприятиях химической и пищевой промышленности, а также в смежных отраслях. Научно-технический прогресс в области фильтрации жидкостей от ионов, нежелательных частиц, технологических отходов и тяжелых металлов является одним из основных этапов производства нефтяной, фармацевтической, машиностроительной, пищевой и других видов продукции. Качественное управление этим процессом позволяет существенно снизить затраты и повысить качество выпускаемой продукции.

В научных исследованиях, проводимых по всему миру, ведется систематическая работа над различными математическими моделями, алгоритмами расчета и программным обеспечением для анализа и прогнозирования процесса фильтрации жидкостей или ионных растворов с учетом различных параметров.

Следует отметить, что проблемы прогнозирования и управления в рассматриваемой научной работе не всегда могут быть успешно решены экспериментальными методами. Поэтому наиболее перспективным способом исследования проблем прогнозирования и управления при фильтрации жидких и ионных растворов является использование возможностей и инструментов математического моделирования и вычислительных экспериментов.

В работах Ю.М. Шехтмана, Ф. Б. Абуталиева, М. Рахимова, Н. Равшанова, И.М. Федоткина, С.И. Крыля, Н.У. Ризаева и их учеников на основе предложенных математических инструментов подробно проводились исследования, связанные с технологией сепарирования и фильтрации суспензии и ионных растворов от примесей и ионных соединений, с процессом фильтрации различных жидкостей в неоднородной среде [1–9].

В частности, в работах [10, 12] рассматриваются основные характеристики фильтрующих агрегатов, физико-механические и химические свойства фильтруемых материалов, а также режимы работы фильтров, применяемых для отделения частиц твердой фазы от жидкости, нежелательных ионов и других элементов.

В [13] изучается поток осадка и микрочастиц в зависимости от ионной силы в насыщенной пористой среде и были проведены контрольные эксперименты по осаждению частиц микронного размера с учетом коэффициента прилипания и отрыва частиц на стенках канала пористой среды при выводе математической модели процесса фильтрации суспензии.

В статье [14] при разделении твердой и жидкой фаз многофазной среды частицы, что давление твердого тела на поверхности кейка не равно нулю, а в работе [15] используются микроскопические уравнения баланса массы и импульса для фаз и границ раздела, чтобы лучше понять капиллярное давление на микромасштабе.

В работе [16] была разработана феноменологическая модель инфильтрации воды и разработанная математическая модель объединена с дисперсионным уравнением качества и нелинейным уравнением рассматриваемой кинетики технологического процесса. Математическая модель решалась численно с использованием конечно-разностной схемы высокого порядка точности. Полученные результаты сравнивались с полевыми экспериментами, проведенными на объектах ЕРА производства израильской компании Mekorot.

Авторы статьи [17] рассмотрели задачу фильтрации двухфазной суспензии через пористую среду. Предложена модель, основанная на законах сохранения массы, количестве движения и импульса энергии, а в работе [18] проанализированы уравнения, описывающие течение сжимаемой жидкости низкого давления в слабodeформируемом пористом среде с нелинейным законом фильтрации, а так же с предельным (начальным) градиентом давления и показан ряд решений, выраженных через элементарные функции.

В работе [19] предложена математически аппарат для процесса проникновения в почву растворов солей тяжелых металлов, где исследуется механизм очистки почвы от тяжелых металлов с использованием биосурфактанта и анализируется эффективность данного метода. На основании экспериментальных данных определены параметры математической модели объекта исследования: пористость почвы, коэффициент сопротивления в случаях фильтрации растворов солей тяжелых металлов (молибдена и никеля) и сопоставлены экспериментальные данные с результатами, полученными с помощью теоретической модели объекта исследования и сделан вы-

вод об эффективности использования биосурфактанта в технологиях очистки почвы, загрязненной тяжелыми металлами.

В работе [20] решается задача численного моделирования процесса фильтрации многокомпонентных жидкостей при бурении скважин в нефтяном коллекторе. Процесс инъекции бурового раствора на глинистой основе в пласт, насыщенный нефтью и пластовой водой, математически формализуется системой уравнений многофазной фильтрации с капиллярной моделью насыщенности Брукса-Кори. Для численного интегрирования поставленной задачи авторами работ используют консервативную схему предложенной Галеркиным. Приводятся результаты численных экспериментов и их сравнительный анализ с опубликованными в литературе данными.

В статье [21] рассмотрено решение актуальной задачи, связанной с процессом фильтрации и обезвоживания жидких и ионных растворов от гелевых частиц и тяжелых ионных соединений. Для анализа, исследования, определения основных параметров технологического процесса и режимов работы фильтровальных установок и поддержки принятия управленческих решений разработана математическая модель, эффективный численный алгоритм высокого порядка точности и программно-инструментальный комплекс для проведения вычислительного эксперимента на вычислительном кластере.

Разработана математическая модель для проведения комплексного исследования многократной фильтрации суспензий многослойным фильтром, вычислительный алгоритм решения задачи, а также программное обеспечение для проведения вычислительных экспериментов посвящено работа [22], где предложенный математический инструмент позволяет проводить многостороннее исследование и прогнозировать технологический процесс фильтрации с целью принятия соответствующих управленческих решений.

В работе [23] для проведения комплексного исследования технологического процесса фильтрования жидких и ионизированных растворов разработаны его математическая модель и эффективный численный алгоритм решения задачи с учетом: переменности скорости фильтрования, изменения концентрации суспензии в колонке агрегата и на выходе, образования слоя осадка на поверхности фильтровальной перегородки, скорости осаждения гель-частиц в порах фильтра, роста давления в колонке агрегата и других физико-механических свойств фильтруемой жидкости.

В этой статье [24] Ж. Туракулов численно решил изменение физических свойств жидкости при ее течении через однослойную среду, рассчитав процессы коагуляции и суффозирования. Анализ литературных источников показали, что процесс фильтрования как многокомпонентных так и малоконцентрированных растворов одновременно с учетом процесса коагуляции и суффозии, режимов работы фильтра, изменения скорости фильтрования жидкости и многослойности фильтровальной колонки (рис. 1) подробно не изученно.

В связи с этим разработана математических моделей, численных алгоритмов и программного обеспечения для решения выше указанной задачи с целью анализа, прогнозирования и поддержки принятия решений является актуальной.

2 Постановка задачи

В работе предлагаемая математическая модель разрабатывается с учетом выше указанных основных факторов и внешних возмущений действующий на технологический процесс в целом. При этом используем исходные значения давления, скорости потока раствора, концентрации растворов, поступающих в фильтр, и коэффициент

проницаемости пористой среды, через которую проходят жидкость, а также определяя давление и скорость потока по Закон Дарси, где изменение пористости среды, концентрация выходного раствора можно вычислить при процессе коагуляции и суффозии.

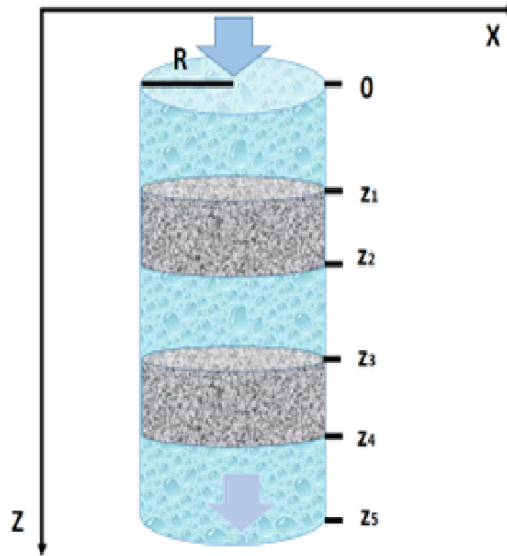


Рис. 1 Схематический вид фильтра

Учитывая вышеизложенное, предложена следующая математическая модель процесса фильтрования малокоцентрированного раствора через пористую среду:

Для первой слоя скорость фильтрования жидкости, роста гидравлического давления в колонке агрегата и изменение концентрация раствора вычисляются с помощью соотношение:

$$\left. \begin{aligned} P_1(z, r, t) &= P_{kirish}(z, r, t) - \rho g z; \\ W_1(z, r, t) &= \frac{Q}{\pi R^2}; \\ \frac{\partial \theta_1(z, r, t)}{\partial t} + W_1(z, r, t) \frac{\partial \theta_1(z, r, t)}{\partial z} &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r D_1 \frac{\partial \theta_1(z, r, t)}{\partial r} \right). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Начальные и граничные условия для первых уравнений среды:

$$\left. \begin{aligned} P(z_0, r, t_0) &= P_{kirish}; \\ \theta(z_0, r, t_0) &= \theta_0; \\ W(z_0, r, t_0) &= W_0; \end{aligned} \right\} z_0 = 0, \quad t_0 = 0;$$

$$\left. \begin{aligned} P(z, r, t)|_{r=R} &= P(z, r, t); \\ P(z, r, t)|_{z=z_1} &= P_1(z, r, t); \\ -D_1 \frac{\partial \theta(z, r, t)}{\partial r} \Big|_{r=R} &= 0 \\ -W(z, r, t) \frac{\partial \theta(z, r, t)}{\partial z} \Big|_{z=z_1} &= \\ &= h(\theta_a(z_1, r, t) - \theta(z_1, r, t)); \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Для второго слоя скорость фильтрования жидкости через колонки фильтра, с учетом процесса коагуляции и суффозии, роста гидравлического давления в колонке фильтра и изменение концентрация раствора внутри фильтра вычисляются с помощью соотношения:

$$\left. \begin{aligned} P_2(z, r, t) &= P_1(z, r, t) - \int_{z_1}^{z_2} \frac{\mu W_2(z, r, t)}{k \varepsilon_2(z, r, t)} dz; \\ W_2(z, r, t) &= \frac{Q}{\pi R^2 \varepsilon_2(z, r, t)}; \\ \frac{\partial \varepsilon_2(z, r, t)}{\partial t} &= -\alpha \theta_2(z, r, t) + \beta \theta_2(z, r, t); \\ \frac{\partial \theta_2(z, r, t)}{\partial t} + W_2(z, r, t) \frac{\partial \theta_2(z, r, t)}{\partial z} &= \\ &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r D_2 \frac{\partial \theta_2(z, r, t)}{\partial r} \right) - \alpha \theta_2(z, r, t) + \beta \theta_2(z, r, t). \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Начальные и граничные условия для уравнений второй среды:

$$\left. \begin{aligned} P(z, r, t) &= P_1; \\ \theta(z, r, t) &= \theta_1; \\ W(z, r, t) &= W_1; \\ \varepsilon(z, r, t) &= \varepsilon_0 \end{aligned} \right\} \quad z = z_1, \quad t = t_1;$$

$$\left. \begin{aligned} P(z, r, t)|_{r=R} &= P(z, r, t); \\ P(z, r, t)|_{z=z_2} &= P_2(z, r, t); \\ -D_2 \frac{\partial \theta(z, r, t)}{\partial r} \Big|_{r=R} &= 0; \\ -W(z, r, t) \frac{\partial \theta(z, r, t)}{\partial z} \Big|_{z=z_2} &= h(\theta_a(z_2, r, t) - \theta(z_2, r, t)); \\ -\frac{\partial \varepsilon(z, r, t)}{\partial z} \Big|_{z=z_2} &= \gamma(\varepsilon(z, r, t) - \varepsilon_a(z, r, t)); \\ \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \Big|_{r=R} &= 0; \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Для третьего слоя скорость фильтрования жидкости через колонки фильтра, с учетом процесса коагуляции и суффозии, роста гидравлического давления в колонке фильтра и изменение концентрация раствора внутри фильтра вычисляются с помощью соотношения:

$$\left. \begin{aligned} P_3(z, r, t) &= P_2(z, r, t) - \rho g(z - z_2); \\ W_3(z, r, t) &= \frac{Q}{\pi R^2}; \\ \frac{\partial \theta_3(z, r, t)}{\partial t} + W_3(z, r, t) \frac{\partial \theta_3(z, r, t)}{\partial z} &= \\ &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r D_3 \frac{\partial \theta_3(z, r, t)}{\partial r} \right). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Начальные и граничные условия для уравнений третьей среды:

$$\left. \begin{aligned} P(z, r, t) &= P_2; \\ \theta(z, r, t) &= \theta_2; \\ W(z, r, t) &= W_2; \end{aligned} \right\} z = z_2, \quad t = t_2;$$

$$\left. \begin{aligned} P(z, r, t)|_{r=R} &= P(z, r, t) \\ P(z, r, t)|_{z=z_3} &= P_3(z, r, t); \\ -D_3 \frac{\partial \theta(z, r, t)}{\partial r} \Big|_{r=R} &= 0 \\ -W(z, r, t) \frac{\partial \theta(z, r, t)}{\partial z} \Big|_{z=z_3} &= \\ &= h(\theta_a(z_3, r, t) - \theta(z_3, r, t)); \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Для четвертого слоя скорость фильтрования жидкости через колонки фильтра, с учетом процесса кольтматации и суффозии, роста гидравлического давления в колонке фильтра и изменение концентрация раствора внутри фильтра вычисляются с помощью соотношения:

$$\left. \begin{aligned} P_4(z, r, t) &= P_4(z, r, t) - \int_{z_3}^{z_4} \frac{\mu W_4(z, r, t)}{k \varepsilon_4(z, r, t)} dz; \\ W_4(z, r, t) &= \frac{Q}{\pi R^2 \varepsilon_4(z, r, t)} \\ \frac{\partial \varepsilon_4(z, r, t)}{\partial t} &= -\alpha \theta_4(z, r, t) + \beta \theta_4(z, r, t) \\ \frac{\partial \theta_4(z, r, t)}{\partial t} + W_4(z, r, t) \frac{\partial \theta_4(z, r, t)}{\partial z} &= \\ &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r D_4 \frac{\partial \theta_4(z, r, t)}{\partial r} \right) - \alpha \theta_4(z, r, t) + \beta \theta_4(z, r, t). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Начальные и граничные условия для уравнений четвертой среды:

$$\left. \begin{aligned} P(z, r, t) &= P_3; \\ \theta(z, r, t) &= \theta_3; \\ W(z, r, t) &= W_3; \\ \varepsilon(z, r, t) &= \varepsilon_0 \end{aligned} \right\} z = z_3, \quad t = t_3;$$

$$\left. \begin{aligned} P(z, r, t)|_{r=R} &= P(z, r, t); \\ P(z, r, t)|_{z=z_4} &= P_4(z, r, t); \\ -D_4 \frac{\partial \theta(z, r, t)}{\partial r} \Big|_{r=R} &= 0; \\ -W(z, r, t) \frac{\partial \theta(z, r, t)}{\partial z} \Big|_{z=z_4} &= h(\theta_a(z_4, r, t) - \theta(z_4, r, t)); \\ -\frac{\partial \varepsilon(z, r, t)}{\partial z} \Big|_{z=z_4} &= \gamma(\varepsilon(z_4, r, t) - \varepsilon_a(z_4, r, t)); \\ \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \Big|_{r=R} &= 0; \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Для пятого слоя скорость фильтрования жидкости через колонки фильтра, с учетом процесса кольматации и суффозии, роста гидравлического давления в колонке фильтра и изменение концентрация раствора внутри фильтра вычисляются с помощью соотношения:

$$\left. \begin{aligned} P_5(z, r, t) &= P_4(z, r, t) - \rho g(z - z_4); \\ W_5(z, r, t) &= \frac{Q}{\pi R^2}; \\ \frac{\partial \theta_5(z, r, t)}{\partial t} + W_5(z, r, t) \frac{\partial \theta_5(z, r, t)}{\partial z} &= \\ &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r D_5 \frac{\partial \theta_5(z, r, t)}{\partial r} \right); \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Начальные и граничные условия для уравнений пятой среды:

$$\left. \begin{aligned} P(z, r, t) &= P_4; \\ \theta(z, r, t) &= \theta_4; \\ W(z, r, t) &= W_4; \end{aligned} \right\} \quad z = z_4, \quad t = t_4;$$

$$\left. \begin{aligned} P(z, r, t)|_{r=R} &= P(z, r, t) \\ P(z, r, t)|_{z=z_5} &= P_5(z, r, t); \\ -D_5 \frac{\partial \theta(z, r, t)}{\partial r} \Big|_{r=R} &= 0 \\ -W(z, r, t) \frac{\partial \theta(z, r, t)}{\partial z} \Big|_{z=z_5} &= \\ &= h(\theta_a(z_5, r, t) - \theta(z_5, r, t)); \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Здесь P_1, P_2, P_3, P_4 – соответственно гидравлические давление в первом, втором и третьем слое; W_1, W_2, W_3, W_4 – соответственно скорость потока жидкости в первом, втором и третьем слое; Q – объем жидкости выходящий из колонки фильтровального агрегата, $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ – соответственно концентрация подаваемой, жидкости к колонку фильтра, внутри перегородки фильтра и выходе, ε – пористость фильтра, α и β – эмпирические параметры учитывающие при процессе кольматации и суффозии.

Для численного интегрирования поставленной задачи разработан вычислительный алгоритм для проведения вычислительного эксперимента на вычислительном кластере с целью синтеза основных параметров, их диапазонов изменения и принятия управленческого решения по повышению производительности фильтровальных агрегатов и качества выходного продукта.

3 Вычислительный эксперимент и анализ результатов

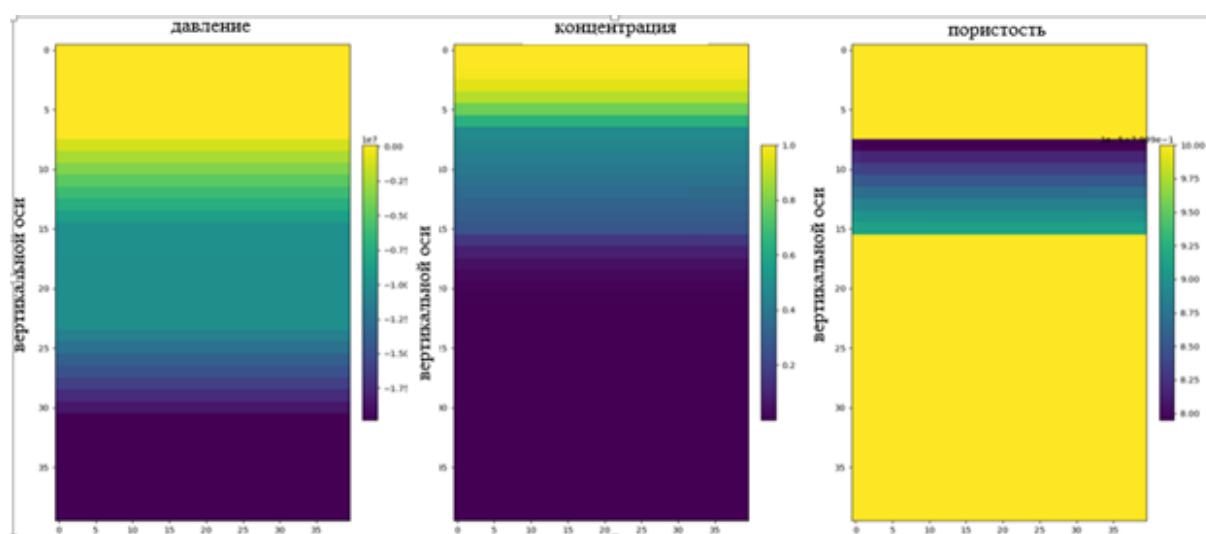
С целью исследования нестационарного технологического процесса фильтрования жидких растворов проведены численные расчеты на вычислительном кластере результаты которых приведены на рис. 2-6.

Вычислительные эксперименты были проведены со следующими исходными данными:

$$P_{\text{kirish}} = 1e^5 \text{ Pa}, \quad r = 0.1 \text{ m}, \quad \theta_{\text{kirish}} = 1 \text{ kg/m}^3, \quad \rho = 1000 \text{ kg/m}^3, \quad g = 9.81 \text{ m/s}^2, \\ \mu = 1e^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s} (\text{suv uchun}), \quad k_i = 1e^{-12} \text{ m}^2, \quad \varepsilon_0 = 0.4, \quad Q = 0.01 \text{ m}^3/\text{s}, \quad \alpha = 1e^{-3} \text{ 1/s}, \\ \beta = 1e^{-4} \text{ 1/s}, \quad D_i = 1e^{-9} \text{ m}^2/\text{s}.$$



а)

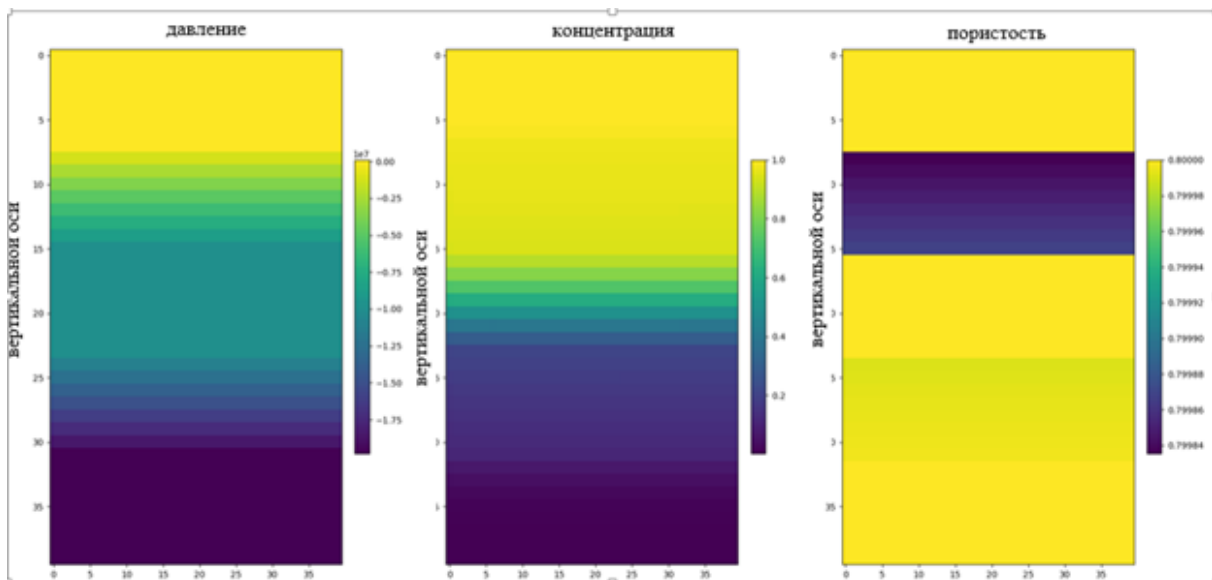


б)

Рис. 2 а) Изменение давления, концентрация и пористости в виде изолинии со временем при $t = 10$ часов; б) Изменение давления, концентрация и пористости в виде гистограмм со временем при $t = 10$ часов

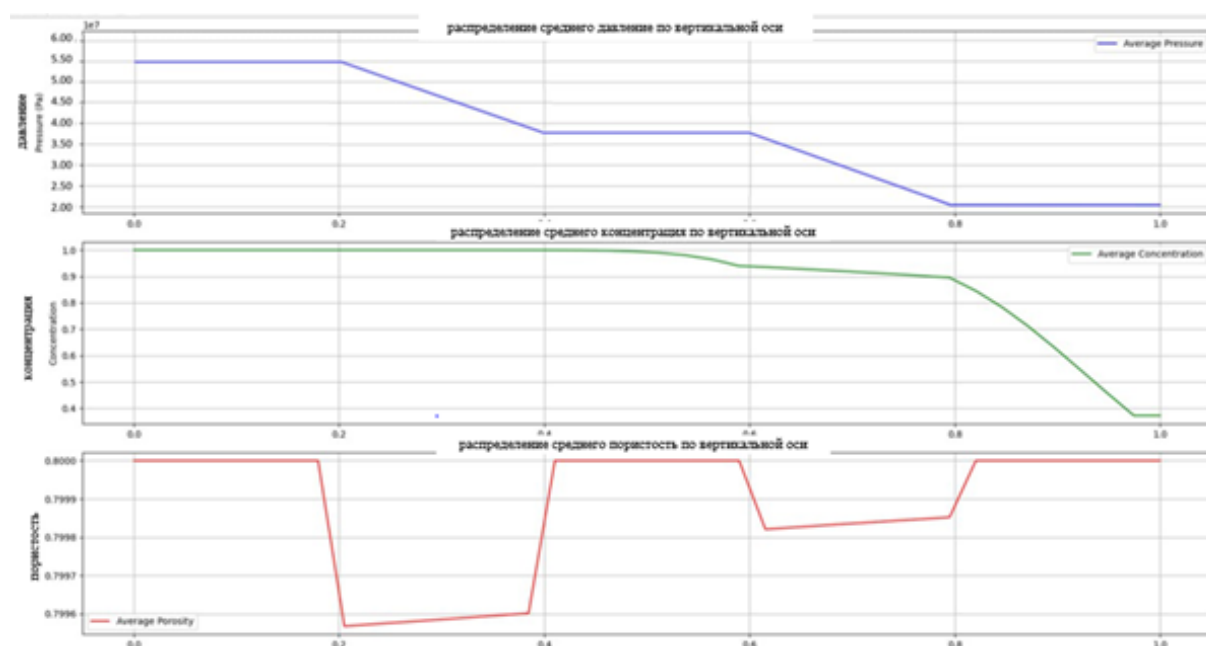


а)

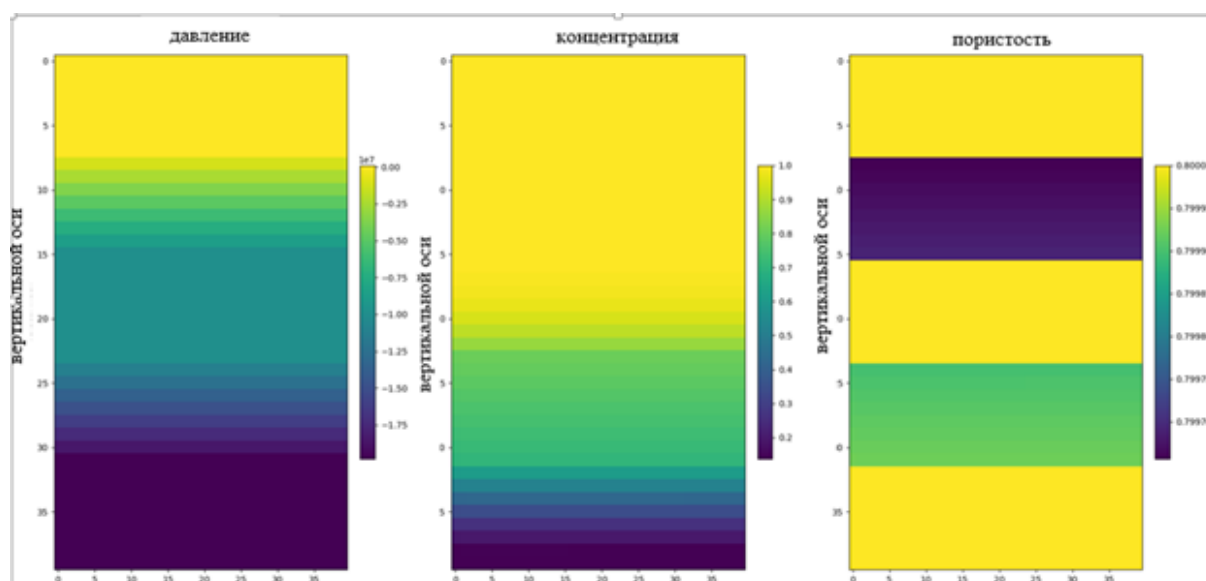


б)

Рис. 3 а) Изменение давления, концентрация и пористости в виде изолинии со временем при $t = 300$ часов; б) Изменение давления, концентрация и пористости в виде гистограмм со временем при $t = 300$ часов



а)



б)

Рис. 4 а) Изменение давления, концентрация и пористости в виде изолинии со временем при $t = 500$ часов б) Изменение давления, концентрация и пористости в виде гистограмм со временем при $t = 500$ часов

4 Заключение

Для проведения комплексного исследования нестационарного технологического процесса фильтрации малоконцентрированных растворов предложена математическая модель и численный алгоритм с учетом процесса коагуляции и суффозия, основанный на закона Дарси и уравнениях конвекции-диффузии.

На основе проведенных анализов численных расчетов определены основные параметры существенно действующий на процесс фильтрования суспензии и их диапазоны изменения в зависимости от степени засоренности раствора и технико - экономические характеристики агрегата и его режима работы.

Анализ расчетов показали, что когда время фильтрования суспензии повышается более 300 часов наблюдается резкий рост гидравлического давления в слоях и максимальное накопления частиц на поверхности перегородки фильтра и уменьшение порового пространства в нем и соответственно уменьшается скорости прохода жидкости через фильтровальную перегородку агрегата и следовательно начинается процесс отрыва частиц осевой в поровом пространстве фильтровальной перегородки.

Проведенными численными расчетами установлены, что в подборе режима работы фильтра существенную роль играет в технологию фильтрования суспензии первоначальная концентрация подаваемой жидкости к колонке агрегата.

Литература

- [1] Шехтман Ю.М. Фильтрация малоконцентрированных суспензий. – М.: Изд-во АН СССР, 1961. – 213 с.
- [2] Абуталиев Ф.Б. Об уравнениях ионообменной фильтрации и методах их решения // Проблемы вычислительной и прикладной математики. – 1976. – Вып 40. – С. 44–56.
- [3] Федоткин И.М., Криль С.И. Разделение суспензии и гиперфильтрование. – Киев: Техника, 1972. – 233 с.
- [4] Абуталиев Ф.Б., Равшанов Н. Моделирование технологического процесса сепарирования трудноразделяемых смесей // Докл. АН РУз. – 1997. – № 7. – С. 26–30.
- [5] Абуталиев Ф.Б., Равшанов Н. Моделирование фильтрования жидких растворов через пористую среду // Доклады АН РУз. – 1999. – № 4. – С. 16–18.
- [6] Абуталиев Ф.Б., Ризаев Н.У., Рахимов М. Расчет процесса ионообменного фильтрования // Вопросы вычислительной и прикладной математики: сб.научн.тр. – Ташкент: Изд-во ИК АН РУз, 1975. – Вып. 33. – С. 152–161.
- [7] Абуталиев Ф.Б., Рахимов М. Об уравнениях ионообменного фильтрования и методы их решения на ЭВМ // Вопросы вычислительной и прикладной математики: сб.научн.тр. – Ташкент: Изд-во ИК АН РУз, 1976. – Вып. 40. – С. 144–152.
- [8] Ravshanov N., Saidov U.M. Modelling technological process of ion-exchange filtration of fluids in porous media // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1015, No. 3. – 032114.
- [9] Ravshanov N. et al. Mathematical model and numerical algorithm for studying suspension filtration in a porous medium considering the processes of colmatation and suffusion // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 862. – 062003.
- [10] Равшанов Н., Палванов Б., Мухаммадиев А. Компьютерное моделирование процесса фильтрации жидкости ионизированных растворов для защиты экосистемы от источников загрязнения // Вестник ТУИТ. – 2015. – № 2(34). – С. 100–105.
- [11] Равшанов Н., Туракулов Ж.А. Прямая и обратная задача для исследования процесса фильтрации ионных растворов через пористую среду // Проблемы вычислительной и практической математики. – 2022. – № 5(43). – С. 58–71.
- [12] Равшанов Н., Туракулов Ж.А. Численное исследование технологического Процесс фильтрации жидкостей растворов // Проблемы вычислительной и практической математики. – 2023. – № 2(47). – С. 29–50.
- [13] Чан Юэ, Цюань Чжан и Чжицян Жа Ж. аэрозольных наук. – 2016. – Т. 101, № 174.

- [14] *Тостко Т. и др.* Перенос микрочастиц в насыщенных пористых средах, зависящий от ионной силы: моделирование явлений мобилизации и иммобилизации в переходных химических условиях // *Environmental Science and Technology*. – 2009. – Т. 43. – С. 4425–4431.
- [15] *Йим С. и др.* Корейский журнал химической инженерии. – 2018. – Т. 14, № 5. – С. 354–358. – DOI: 10.1007/BF02707051.
- [16] *Маджид Хасанизаде С., Грей У.Г.* Термодинамические основы капиллярного давления в пористых средах // *Водные ресурсы. рез.* – 1993. – № 29(10). – С. 3389–3407.
- [17] *Гитиса В.* Хим. Инженерный журнал. – 2010. – № 163. – С. 78–85.
- [18] *Голубев В., Михайлов Д.* Моделирование динамики фильтрации двухчастичной суспензии через пористую среду // *Труды МФТИ*. – 2011. – № 3(2). – С. 143–147.
- [19] *Леонтьев Н.* 013 Учеб. НАН России. Мех. жидкости и газа 3 -
- [20] *Коростина О.А. и др.* Моделирование процессов фильтрации растворов солей тяжелых металлов и биосурфактанта в почве
- [21] *Голубев В.И., Михайлов Д.Н.* Моделирование динамики фильтрации двухчастичной суспензии через пористую среду // *ТРУДЫ МФТИ. Прикладная механика*. – 2011. – Том 3, – №2. – С. 143–147.
- [22] *Ravshanov N., Saidov U.M.* J. Phys.: Conf. Ser. 1015 032114. – 2018. DOI: 10.1088/1742-6596/1015/3/032114.
- [23] *N. Ravshanov, U.M. Saidov, D.I. Mutin* IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 537 042018. – 2019. – DOI: 10.1088/1757-899X/537/4/042018.
- [24] *Равшанов Н., Туракулов Ж., Саидов У.* Численное исследование технологического процесса фильтрования жидких растворов // *Проблемы вычислительной и прикладной математики*. – 2023. – №2(47). – С. 29–53.
- [25] *Равшанов Н., Туракулов Ж.* “Математическое моделирование процесса фильтрования малоконцентрированных растворов через пористую среду” // *Информационные технологии моделирования и управления* – 2024. – №3(137).

Поступила в редакцию 16.10.2024

UDC 519.6

NUMERICAL STUDY OF THE PROCESS OF FILTRATION OF LOW-CONCENTRATION SOLUTIONS THROUGH A POROUS MEDIUM

Turakulov J.

jahondasturchi@gmail.com

Namangan Institute of Engineering and Technology

7, Kasansay Str., Namangan, 160115 Uzbekistan.

A numerical study of the non-stationary technological process of filtering low-concentration solutions through a porous medium, proceeding in accordance with Darcy's law taking into account the phenomena of colmatation and suffusion, was carried out. To determine the main parameters of the technological process and determine their ranges of change based on the developed numerical algorithm, computational experiments were carried out, the results of which made it possible to determine the degree of influence

of solution contamination, technical and economic characteristics of the unit and its operating modes. The numerical calculations have established that when the suspension filtration time exceeds 450-500 hours, a sharp increase in hydraulic pressure in the layers of the unit column is observed, maximum accumulation of particles on the surface of the filter partition and a decrease in its pore space occurs and, consequently, the speed of fluid passage through the filter partition of the unit decreases. Then the process of detachment of particles deposited in the pore space of the filter partition begins. Analysis of numerical calculations showed that the technology of filtering the suspension and the initial concentration of the liquid supplied to the unit column play a significant role in selecting the filter operating modes.

Keywords: mathematical model, numerical algorithm, computational experiment, filtration, solution concentration, porous medium.

Citation: Turakulov J. 2024. Numerical study of the process of filtration of low-concentration solutions through a porous medium. *Problems of Computational and Applied Mathematics*. 5(61): 18-30.

ПРОБЛЕМЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ И ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ

№ 5(61) 2024

Журнал основан в 2015 году.

Издается 6 раз в год.

Учредитель:

Научно-исследовательский институт развития цифровых технологий и
искусственного интеллекта.

Главный редактор:

Равшанов Н.

Заместители главного редактора:

Азамов А.А., Арипов М.М., Шадиметов Х.М.

Ответственный секретарь:

Ахмедов Д.Д.

Редакционный совет:

Азамова Н.А., Алоев Р.Д., Амиргалиев Е.Н. (Казахстан), Бурнашев В.Ф.,
Загребина С.А. (Россия), Задорин А.И. (Россия), Игнатъев Н.А.,
Ильин В.П. (Россия), Исмагилов И.И. (Россия), Кабанихин С.И. (Россия),
Карачик В.В. (Россия), Курбонов Н.М., Маматов Н.С., Мирзаев Н.М.,
Мирзаева Г.Р., Мухамадиев А.Ш., Назирова Э.Ш., Нормуродов Ч.Б.,
Нуралиев Ф.М., Опанасенко В.Н. (Украина), Расулмухамедов М.М., Расулов А.С.,
Садуллаева Ш.А., Старовойтов В.В. (Беларусь), Хаётов А.Р., Халджигитов А.,
Хамдамов Р.Х., Хужаев И.К., Хужаеров Б.Х., Чье Ен Ун (Россия),
Шабозов М.Ш. (Таджикистан), Dimov I. (Болгария), Li Y. (США),
Mascagni M. (США), Min A. (Германия), Schaumburg H. (Германия),
Singh D. (Южная Корея), Singh M. (Южная Корея).

Журнал зарегистрирован в Агентстве информации и массовых коммуникаций при
Администрации Президента Республики Узбекистан.

Регистрационное свидетельство №0856 от 5 августа 2015 года.

ISSN 2181-8460, eISSN 2181-046X

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

За точность фактов и достоверность информации ответственность несут авторы.

Адрес редакции:

100125, г. Ташкент, м-в. Буз-2, 17А.

Тел.: +(998) 712-319-253, 712-319-249.

Э-почта: journals@airi.uz.

Веб-сайт: <https://journals.airi.uz>.

Дизайн и вёрстка:

Шарипов Х.Д.

Отпечатано в типографии НИИ РЦТИИ.

Подписано в печать 30.10.2024 г.

Формат 60x84 1/8. Заказ №7. Тираж 100 экз.

PROBLEMS OF COMPUTATIONAL AND APPLIED MATHEMATICS

No. 5(61) 2024

The journal was established in 2015.
6 issues are published per year.

Founder:

Digital Technologies and Artificial Intelligence Development Research Institute.

Editor-in-Chief:

Ravshanov N.

Deputy Editors:

Azamov A.A., Aripov M.M., Shadimetov Kh.M.

Executive Secretary:

Akhmedov D.D.

Editorial Council:

Azamova N.A., Alov R.D., Amirgaliev E.N. (Kazakhstan), Burnashev V.F.,
Zagrebina S.A. (Russia), Zadorin A.I. (Russia), Ignatiev N.A., Ilyin V.P. (Russia),
Ismagilov I.I. (Russia), Kabanikhin S.I. (Russia), Karachik V.V. (Russia), Kurbonov
N.M., Mamatov N.S., Mirzaev N.M., Mirzaeva G.R., Mukhamadiev A.Sh., Nazirova
E.Sh., Normurodov Ch.B., Nuraliev F.M., Opanasenko V.N. (Ukraine), Rasulov A.S.,
Sadullaeva Sh.A., Starovoitov V.V. (Belarus), Khayotov A.R., Khaldjigitov A.,
Khamdamov R.Kh., Khujaev I.K., Khujayorov B.Kh., Chye En Un (Russia),
Shabozov M.Sh. (Tajikistan), Dimov I. (Bulgaria), Li Y. (USA), Mascagni M. (USA),
Min A. (Germany), Schaumburg H. (Germany), Singh D. (South Korea),
Singh M. (South Korea).

The journal is registered by Agency of Information and Mass Communications under the
Administration of the President of the Republic of Uzbekistan.

The registration certificate No. 0856 of 5 August 2015.

ISSN 2181-8460, eISSN 2181-046X

At a reprint of materials the reference to the journal is obligatory.
Authors are responsible for the accuracy of the facts and reliability of the information.

Address:

100125, Tashkent, Buz-2, 17A.

Tel.: +(998) 712-319-253, 712-319-249.

E-mail: journals@airi.uz.

Web-site: <https://journals.airi.uz>.

Layout design:

Sharipov Kh.D.

DTAIDRI printing office.

Signed for print 30.10.2024

Format 60x84 1/8. Order No. 7. Printed copies 100.

Содержание

Равшанов Н., Шадманов И.

Многомерная математическая модель одновременного тепло- и влагопереноса при сушке и хранении хлопка-сырца на открытых площадках 5

Туракулов Ж.

Численное исследование процесса фильтрования малоконцентрированных растворов через пористую среду 18

Мирзаахмедов М.К.

Математическое моделирование процессов термо-электро-магнитоупругой деформации тонких пластин сложной конструктивной формы 31

Халджигитов А.А., Джумаёзов У.З., Усмонов Л.С.

Новые связанные краевые задачи термоупругости в деформациях 43

Нормуродов Ч.Б., Зиякулова Ш.А.

Численное моделирование уравнений эллиптического типа дискретным вариантом метода предварительного интегрирования 59

Фаязов К.С., Рахимов Д.И., Фаязова З.К.

Некорректная начально-краевая задача для уравнения смешанного типа третьего порядка 69

Игнатъев Н.А., Абдуллаев К.Д.

Разметка документов по семантическим ролям 80

Зайнидинов Х.Н., Ходжаева Д.Ф., Хурамов Л.Я.

Продвинутые модели обработки сигналов в системе умного дома 91

Абдурахимов А.А., Пономарев К.О., Прохошин А.С.

Интеграция методов машинного обучения для раннего обнаружения патогенов в растениях на основе анализа хлорофилла 107

Xalikov A.A., Xurramov A.Sh.

"Pop-Namangan-Andijon" uchastkasining temir yo'l transport tarmog'ida radioaloqa ishonchliligini hisoblashning mantiqiy-ehtimoliy modeli 115

Contents

Ravshanov N., Shadmanov I.

Multidimensional mathematical model of simultaneous heat and moisture transfer during drying and storage of raw cotton in open areas 5

Turakulov J.

Numerical study of the process of filtration of low-concentration solutions through a porous medium 18

Mirzaakhmedov M.K.

Mathematical modeling of thermo-electro-magnit-elastic deformation processes of thin plates of complex constructive form 31

Khaldjigitov A.A., Djumayozov U.Z., Usmonov L.S.

New coupled thermoelasticity boundary-value problems in strains 43

Normurodov Ch.B., Ziyakulova Sh.A.

Numerical modeling of elliptic type equations by a discrete variant of the pre-integration method 59

Fayazov K.S., Rahimov D.I., Fayazova Z.K.

Ill-posed initial-boundary value problem for a third-order mixed type equation . . 69

Ignatev N.A., Abdullaev K.D.

Document annotation by semantic roles 80

Zaynidinov H., Hodjaeva D., Xuramov L.

Advanced signal processing models in a smart home system 91

Abdurakhimov A.A., Ponomarev K.O., Prokhoshin A.S.

Integration of machine learning methods for early detection of pathogens in plants based on chlorophyll analysis 107

Khalikov A.A., Khurramov A.Sh.

The logical-probable model of calculating the reliability of the radio communication in rail transpot network of the "Pop-Namangan-Andijan"plot 115