

## Вынос частиц двухфазным фильтрационным потоком из пористой среды при волновом воздействии

А.И. Никифоров, Р.В. Садовников\*

Институт механики и машиностроения ФИЦ КазНЦ РАН, Казань, Россия

Обсуждаются вопросы влияния волнового воздействия на процесс срыва и выноса частиц из пористого тела двухфазным фильтрационным потоком. При моделировании этого процесса решается задача о влиянии волнового поля на силу, под действием которой частицы срываются со стенок пор. Впервые для ее решения использована функция распределения пор по размерам. Получено выражение для критической скорости потока при волновом воздействии. Критическое значение частоты волнового воздействия зависит от радиуса капилляра, и чем меньше радиус капилляра, тем более высокие частоты нужны для усиления эффекта от воздействия. При более высокой частоте колебаний пик максимального изменения толщины осадочного слоя смещается в сторону пор малого радиуса. Для поддержания влияния волнового поля на фильтрационные параметры пористой среды волновое воздействие должно производиться на динамически изменяющемся диапазоне частот, чтобы увеличить охват воздействия как можно большего количества пор. Показано, что вынос частиц при волновом воздействии увеличивается за счет действия инерционных сил, которые уменьшают влияние сил, удерживающих частицы на поверхности пор.

**Ключевые слова:** волновое воздействие, суффозия, пористая среда, двухфазная фильтрация, метод контрольных объемов

**Для цитирования:** Никифоров А.И., Садовников Р.В. (2021). Вынос частиц двухфазным фильтрационным потоком из пористой среды при волновом воздействии. *Георесурсы*, 23(4), с. 58–64. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2021.4.7>

**Введение.** Волновое воздействие применяется на практике, как один из эффективных методов воздействия на пласт для улучшения его фильтрационных свойств. Волновое поле интенсифицирует срыв частиц со стенок поровых каналов и их вынос двухфазным фильтрационным потоком из пористого тела. Как следствие, улучшается просветность, пористость и проницаемость пористой среды, т.е. происходят структурные изменения ее фильтрационных свойств. Для описания этого явления необходимо применение методов микромеханики с последующим переносом процессов, происходящих в каждой из пор, на всю пористую среду.

В случае однофазного течения в пористой среде предложена математическая модель (Шехтман, 1961), в которой для описания процессов срыва частиц со стенок пор (суффозия) и осаждения частиц на стенках капилляров (кольматация) с блокированием части поровых каналов предложены кинетические соотношения. Аналогичные кинетические соотношения использованы в (Gruesbeck et al., 1982).

В работе (Sharma et al., 1987) сформулирована математическая модель для общего класса задач, связанных с переносом суспензии частиц в пористых средах. Пористая среда представлена сетью поровых каналов с сужениями. Удержание частиц и снижение проницаемости записаны с точки зрения различных механизмов осаждения и срыва

частиц. Скорости осаждения и срыва оцениваются с использованием соответствующих физических моделей. Для определения распределения потока жидкости в сети и для расчета проницаемости применено понятие эффективной среды. Представление пористой среды сетью каналов вместе с балансовыми соотношениями для скоростей осаждения и срыва частиц обеспечивает согласованную модель, которая находит применение в процессах фильтрации и миграции.

Ю.И. Капрановым для описания движения монодисперсной взвеси в пористой среде (Капранов, 1989, 1999, 2000) предложен подход, позволивший автору сформировать точную систему уравнений для интегральных характеристик и дать возможность описывать изменения структурных параметров среды в процессе кольматации. Выделяемый при этом класс равновесных режимов послужил основой построения определяющих соотношений для интегральных моделей и исследования изменения параметров среды и потока в условиях равновесных режимов.

В (Никифоров и др., 1998) предложена математическая модель переноса дисперсных частиц двухфазным потоком в нефтяном пласте, в котором пористая среда представлена в виде двух взаимопроникающих континуумов, один из которых связан с подвижными жидкостями и частицами, а другой с неподвижными. Получено уравнение, определяющее динамику функции распределения пор по размерам. Входящие в него скорость изменения радиуса порового канала и скорость уменьшения количества капилляров определенного радиуса оценены, исходя из модельного представления пористой среды в виде пучка капилляров

\* Ответственный автор: Роман Валерьевич Садовников  
e-mail: [sadovnikov@imm.knc.ru](mailto:sadovnikov@imm.knc.ru)

© 2021 Коллектив авторов

с сужениями. Записаны соответствующие выражения для динамической пористости, проницаемости и массообмена между двумя средами.

В работе (Никифоров и др., 2013) представлена математическая модель переноса дисперсных частиц двухфазным фильтрационным потоком, в которой учтены процессы осаждения частиц в пористом теле и их срыва со стенок пор. Показано, что основная масса твердой породы выносятся из нефтяного пласта потоком воды. Выявлен эффект перераспределения твердых частиц в поровых каналах различного размера.

В монографии (Ганиев и др., 2008) рассмотрены волновые процессы в пористых насыщенных жидкостью средах, волновые механизмы ускорения процессов фильтрации, а также исследованы методы создания дополнительных фильтрационных потоков и рассмотрены возможности управления волновыми процессами в пласте. На основе теоретических и экспериментальных исследований вынужденных нелинейных колебаний насыщенной жидкостью пористой среды изучены эффекты, которые проявляются в волновых полях и влияют на фильтрационные процессы в продуктивных пластах, а также на очистку призабойных зон скважин

Гидро- и термодинамические явления, возникающие в пористых средах, насыщенных нефтью, газом и (или) водой, при распространении в них упругих волн с частотами колебаний от инфразвуковых до ультразвуковых исследуются в работе (Кузнецов и др., 2001). Изложены физические основы вибрационного и акустического воздействий на пласт для повышения нефтегазоотдачи и увеличения темпов разработки истощенных и обводненных нефтяных месторождений. Рассмотрены вопросы довытеснения нефти, после воздействия колебаниями. На различных типах моделей пористой среды и кернов исследовано влияние колебаний на довытеснение нефти из глинодержающих коллекторов, к которым относятся терригенные коллектора, содержащие до 15–20 % глинистых минералов в качестве цементирующего материала. Установлено, что в глинодержающих коллекторах под действием колебаний изменяются микропотоки и расположение активных глинистых минералов относительно скелета коллектора. В экспериментах на набивных моделях пласта установлено, что колебания изменяют характер влияния минерализации закачиваемой воды на нефтеизвлечение.

В работе (Сеяков и др., 1995) на основе перколяционной модели анализируются возможные механизмы необратимого изменения проницаемости насыщенной пористой среды при акустическом воздействии. Среди механизмов взаимодействия акустического поля с насыщенной пористой средой, приводящего к необратимым изменениям проницаемости, выделены и проанализированы такие, как: диссипация энергии вязкого пуазейлевского течения при наличии взаимного перемещения жидкой и твердой фаз, разрушение поверхностного слоя поровых каналов под действием касательных напряжений, возникающих на границе твердой и вязкой жидкостей, кавитация в поровых каналах при прохождении акустической волны, диссипация энергии акустического поля за счет возникновения беспотокового движения жидкости в поровых каналах, когда суммарное перемещение жидкости отсутствует. На основании оценок и расчетов авторы установили, что

для акустического воздействия с наиболее применяемой частотой  $\sim 10^4$  Гц определяющим механизмом, приводящим к изменению фильтрационных характеристик среды, является механизм, связанный с диссипацией энергии акустического поля за счет возникновения беспотокового движения жидкости, так называемого теплового скольжения. Локализация энерговыделения в отдельных группах капилляров приводит к разрушению и выносу из них цементирующего вещества (глины, биотита и т.д.) в результате возникновения термоупругих напряжений и, как следствие, увеличению радиусов поровых каналов. Поскольку проницаемость  $\sim r^4$ , где  $r$  – радиус капилляра, то даже небольшое его изменение достаточно для изменения его фильтрационных характеристик и, следовательно, эффективной проницаемости всей среды.

В настоящей работе исследуется явление выноса дисперсных частиц из пористого тела двухфазным фильтрационным потоком при волновом воздействии. При моделировании этого процесса решается задача о срыве частицы со стенки порового канала двухфазным потоком жидкости под действием волнового поля. Впервые для ее решения использована функция распределения пор по размерам. Возникающая задача Коши для функции распределения пор по размерам в каждом сеточном узле расчетной области и вся задача фильтрации в целом решаются методом контрольных объемов. Показано, что вынос частиц при волновом воздействии увеличивается за счет действия инерционных сил, которые уменьшают влияние сил, удерживающих частицы на поверхности пор.

**Математическая модель.** Математическая модель переноса частиц двухфазным фильтрационным потоком основана на законах сохранения массы и импульса, которые дополняются замыкающими соотношениями. При выводе замыкающих соотношений использовано представление пористой среды в виде пучка капилляров, что позволило описать процесс срыва частиц на микроуровне и его влияние на пористую среду в целом на макроуровне. Основные гипотезы и предположения, вывод уравнений и соотношений подробно изложены в работах, обзор которых приведен в (Газизов и др., 2002; Никифоров и др., 2011; Никифоров и др., 2013). В этой статье приводятся основные результирующие уравнения и соотношения. В крупномасштабном приближении модель представлена следующими уравнениями сохранения масс фаз и компонентов (Никифоров и др., 2013):

$$\frac{\partial}{\partial t}(mS_i) + \nabla \mathbf{v}_i = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(C_i m S_i) + \nabla (C_i \mathbf{v}_i) = q_{C_i}, \quad (2)$$

где  $i$  – обозначает фазу ( $i = o$  – нефть,  $i = w$  – вода),  $m = m(x, y, z)$  – динамическая пористость,  $\mathbf{v}_i$  – скорость фильтрации фазы,  $S_i$  – насыщенность пористой среды фазой,  $C_i$  – объемная концентрация частиц в фазе,  $q_{C_i}$  – интенсивность изменения объема частиц в фазе. Уравнения движения фаз записываются в виде обобщенного закона Дарси:

$$\mathbf{v}_i = -k \frac{k_{ri}(S_i)}{\mu_i} \nabla p_i, \quad (3)$$

где  $p_i$  – давление в фазе;  $\mu_i$  – динамическая вязкость фазы;  $k_{ri}$  – относительная фазовая проницаемость,

$k$  – абсолютная проницаемость пористой среды. Условие полного насыщения пористого тела фазами имеет вид:

$$S_o + S_w = 1. \tag{4}$$

Система уравнений (1)–(4) описывает динамику процесса переноса частиц фазами (нефтью и водой) и при решении конкретной задачи должна быть дополнена граничными и начальными условиями. Для описания структурных изменений пористости и абсолютной проницаемости пласта за счет срыва частиц со стенок поровых каналов, применяются методы микромеханики пористых сред. При этом пористая среда представляется в виде пучка капилляров различного поперечного сечения.

**Уравнение для функции распределения пор по размерам.** При срыве частиц со стенок поровых каналов изменяется структура порового пространства (динамическая пористость и абсолютная проницаемость), поэтому необходимо дополнить систему замыкающими соотношениями, которые строятся с использованием функции распределения пор по размерам для идеализированной модели пористой среды в виде пучка капилляров различных радиусов и формулируются в виде краевой задачи Коши. Задача Коши для функции распределения пор по размерам имеет вид (Газизов и др., 2002; Никифоров и др., 2011):

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r}(u_r \varphi) = 0, \tag{5}$$

$$\varphi(r, 0) = \varphi^0(0), \tag{6}$$

где  $u_r$  – скорость расширения поровых каналов за счет процесса суффозии.

**Расширение порового канала.** Частицы могут быть сорваны потоком жидкости со стенки порового канала при достижении потоком некоторой критической скорости, при которой нарушается условие равновесия сил, действующих на частицу. С одной стороны на частицу действует гидродинамическая сила давления потока жидкости, стремящаяся вовлечь частицу в движение, а с другой стороны частица удерживается на стенке порового канала силами притяжения, трения и неровностями поверхности. В предположении ламинарности течения жидкости, гидродинамическая сила давления жидкости на частицу совпадает со Стоксовской силой при средней скорости набегающего потока, равной средней скорости жидкости в капилляре кольцевого поперечного сечения  $r_0 < r \leq r_0 + l$ , где  $l$  – диаметр частицы,  $r_0$  – радиус капилляра. Удерживающая сила пропорциональна весу частицы (аналог силы трения с некоторым фиктивным коэффициентом трения  $C_{fi}$ ). Условие равновесия для сил, действующих на частицу, запишется в виде (Никифоров и др., 2013):

$$6\pi\mu_i u_{mi} \frac{l}{2} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{l}{2r_0} \right)^2 \right] - C_{fi} \frac{\pi}{6} l^3 \rho_p g = 0, \tag{7}$$

где  $C_{fi}$  – фиктивный коэффициент сопротивления частицы в фазе,  $\rho_p$  – плотность частицы. Отсюда критическая скорость, при которой частица отрывается от стенки, определяется по формуле:

$$u_i^* = C_{fi} \frac{l^2 \rho_p g}{18\mu_i \left[ 1 - \left( 1 - \frac{l}{2r_0} \right)^2 \right]}. \tag{8}$$

Интенсивность суффозии пропорциональна разности между средней скоростью потока жидкости в капилляре и критической скоростью (Шехтман, 1961):

$$u_r = \frac{\partial h}{\partial t} = -\delta(u_m - u^*)h \frac{r + 0.5h}{r}.$$

В условиях двухфазной фильтрации интенсивность суффозии примем в виде:

$$u_{ri} = -\delta(u_{mi} - u_i^*)h \frac{r + 0.5h}{r}, \tag{9}$$

где

$$u_{mi} = \frac{|\mathbf{v}|r^2}{8\zeta k(k_{ro}/\mu_o + k_{rw}/\mu_w)\mu_i}, \mathbf{v} = \mathbf{v}_o + \mathbf{v}_w, \tag{10}$$

$u_{ri}$  – скорость расширения порового канала для фазы,  $u_{mi}$  – средняя скорость потока фазы в капилляре,  $\zeta$  – извилистость капилляра,  $\delta$  – кинетическая константа суффозии,  $r$  – радиус капилляра,  $\mathbf{v}$  – суммарная скорость фильтрации,  $h$  – толщина осадочного слоя частиц в капилляре.

Если  $q_{Ci}$  – интенсивность изменения объема частиц в  $i$  – ой фазе, то за время  $\Delta t$  объем частиц изменится на величину  $q_{Ci} \Delta t$ . За это же время радиусы капилляров изменятся на величину  $\Delta r = u_{ri} \Delta t$ , что приведет к уменьшению пористости и просветности. Учитывая, что объем пор, занятый  $i$  – ой фазой, пропорционален насыщенности  $S_i$ , получим:

$$q_{Ci} \Delta t = m S_i \left[ \int_0^\infty (r + \Delta r)^2 \varphi dr - \int_0^\infty r^2 \varphi dr \right] / \int_0^\infty r^2 \varphi dr$$

или, пренебрегая слагаемым второго порядка малости, получим:

$$q_{Ci} = 2m S_i \int_0^\infty r u_{ri} \varphi dr / \int_0^\infty r^2 \varphi dr. \tag{11}$$

Так как, в силу хаотичности распределения поровых каналов нет возможности указать по каким порам движется нефть, а по каким вода, поэтому в целом в элементарном объеме пористой среды скорость расширения капилляра принимается в виде суммы (Никифоров и др., 2013):

$$u_r = u_{ro} + u_{rw}. \tag{12}$$

Условие равновесия для сил (7), действующих на частицу, при волновом воздействии дополняется силой инерции, возникающей из-за колебаний стенки капилляра:

$$6\pi\mu_i u_{mi} \frac{l}{2} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{l}{2r_0} \right)^2 \right] - C_{fi} \frac{\pi}{6} l^3 \rho_p g + C_{fi} \frac{\pi}{6} l^3 \rho_p \omega^2 r = 0. \tag{13}$$

Тогда выражение для критической скорости потока при волновом воздействии будет иметь следующий вид:

$$u_i^* = \begin{cases} C_{fi} \frac{l^2 \rho_p (g - \omega^2 r)}{18\mu_i \left[ 1 - \left( 1 - \frac{l}{2r_0} \right)^2 \right]}, & \text{если } \omega \leq \sqrt{g/r}, \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \tag{14}$$

т.е. критическая скорость потока для тех капилляров, в которых нарушается условие  $\omega \leq \sqrt{g/r}$ , считается равной нулю и все частицы могут поступать в поток, так как скорость фильтрации при заданном перепаде давления не равна нулю. Анализ формулы (14) позволяет сделать вывод, что увеличение частоты колебаний при волновом воздействии приводит к уменьшению значения критической скорости потока, при которой частицы могут быть сорваны потоком со стенки капилляра, в отличие от критической скорости потока без волнового воздействия. Таким образом, сила инерции стенки капилляра, которая возникает при волновом воздействии, уменьшает влияние сил, удерживающих частицу на стенке капилляра. Предельное

значение частоты  $\omega^* = \sqrt{g/r}$  зависит от радиуса порового канала (капилляра) и чем меньше радиус канала, тем более высокие частоты нужны для усиления эффекта от воздействия. Для поддержания влияния волнового поля на критическую скорость потока, волновое воздействие должно производиться на динамически изменяющемся диапазоне частот, чтобы увеличить охват воздействия как можно большего количества капилляров различных радиусов. При срыве частиц со стенок поровых каналов частицы выносятся жидкостью, при этом увеличивается радиус порового канала и, следовательно, повышается его пропускная способность, т.е. увеличивается пористость и проницаемость пористой среды в целом. Для учета этих изменений необходимо записать дополнительные соотношения.

#### Изменение структуры порового пространства.

Описание изменения структуры порового пространства основано на представлении пористой среды в виде пучка параллельных капилляров (Никифоров и др., 2013). Изменение динамической пористости определяется через просветность и имеет следующий вид:

$$m = m_f m_0, \quad m_f = \int_0^\infty r^2 \varphi dr / \int_0^\infty r^2 \varphi_0 dr, \quad (15)$$

где  $m_f$  – фактор увеличения пористости,  $m_0$  – начальное значение пористости. Формула для изменения абсолютной проницаемости получается сопоставлением выражения для расхода жидкости через пучок капилляров с выражением для расхода жидкости по закону Пуазейля и имеет вид:

$$k = k_f k_0, \quad k_f = \int_0^\infty r^4 \varphi dr / \int_0^\infty r^4 \varphi_0 dr, \quad (16)$$

где  $k_f$  – фактор увеличения проницаемости пористой среды,  $k_0$  – начальное значение проницаемости.

Анализ формул для факторов пористости и абсолютной проницаемости среды показывает, что они пропорциональны  $r^2$  и  $r^4$ , соответственно, где  $r$  – радиус капилляра. Это позволяет сделать вывод, что даже небольшого изменения радиуса капилляра достаточно для изменения его фильтрационных характеристик и, следовательно, эффективной пористости и проницаемости всей среды. Аналогичный вывод был сделан авторами (Селяков и др., 1995) при анализе эффективной проницаемости для перколяционной модели пористой среды.

Неизвестными в математической модели (1)–(16) являются: давление  $p$ , насыщенности порового пространства пласта нефтью и водой  $S_p$ , концентрации частиц  $C_p$ , скорости фильтрации фаз  $v_f$ .

**Метод решения.** Численная аппроксимация уравнений (1)–(16) по пространству строится методом контрольных объемов. Искомые поля давления, водонасыщенности и концентрации частиц связываются с узлами прямоугольной сетки и с серединой высоты ячейки, а сама ячейка служит контрольным объемом. Интегрирование уравнений по сеточным блокам (контрольным объемам) производится в предположении постоянства значений характеристик пласта по блоку. При вычислении поверхностных интегралов в уравнениях для водонасыщенности и концентрации примесей учитывается направление потоков. Для аппроксимации производных по времени

используется схема IMPES метода (Aziz et al., 1979), что приводит к системе разностных уравнений относительно давления  $p$ , водонасыщенности порового пространства пласта  $S_w$ , концентрации частиц  $C_p$ .

Задачи Коши для функций распределения пор по размерам (5)–(6), (9)–(11) решаются методом конечных элементов на сетке одномерных конечных элементов с использованием линейного представления искомых функций на каждом элементе. Для аппроксимации по времени применяется неявная схема. При интегрировании конвективных членов учитываются характеристические направления. Значения функций распределения пор по размерам рассчитываются в той области, для которой эта величина имеет физический смысл, т.е. сеткой покрывалась конечная часть интервала  $[0, \infty)$ , за пределы которого решение не распространялось за время решения задачи (1)–(16). Этим пределом является максимальный размер пор чистого (без осевших частиц) пористого тела (Никифоров и др., 2011).

Метод решения задачи подробно изложен в (Газизов и др., 2002; Никифоров и др., 2011), в данной работе кратко приводятся его основные этапы. На каждом временном слое необходимо вычислить: 1) поле давления во всех узлах пространственной сетки, 2) поле водонасыщенности, 3) поля концентрации частиц, 4) суммарную скорость фильтрации, 5) функцию распределения пор по размерам, 6) структурные изменения пористости и проницаемости пласта.

Метод численного решения задачи довольно сложен ввиду того, что для расчета полей давления, насыщенности, концентрации частиц, необходимо рассчитывать структурные изменения пористости и проницаемости на каждом временном шаге в каждом узле сетки расчетной области. Это связано с решением задач Коши для функции распределения пор по размерам и требует значительных затрат времени и ресурсов компьютера. Вопросы ускорения вычислений в таких задачах подробно рассмотрены в (Nikiforov et al, 2017) для вычислительного кластера с распределенной памятью, а в (Nikiforov et al, 2019) – для вычислительной системы с гибридной архитектурой, что позволило значительно повысить производительность расчетов.

**Численные результаты.** Численные результаты получены для образца нефтенасыщенной пористой среды с линейными размерами  $(L \times B \times H) = (0.3 \text{ м} \times 0.1 \text{ м} \times 0.1 \text{ м})$  (рис. 1). При этом принимались следующие значения параметров:  $\rho_p = 2000 \text{ кг/м}^3$  – плотность частиц,  $l = 0.000004 \text{ м}$  – диаметр частиц,  $\delta = 0.000005$ ,  $\zeta = 1$ ,  $\rho_o = 817 \text{ кг/м}^3$  – плотность нефти,  $\mu_o = 5 \text{ мПа} \cdot \text{с}$  – вязкость нефти,  $\rho_w = 1182 \text{ кг/м}^3$  – плотность воды,  $\mu_w = 1 \text{ мПа} \cdot \text{с}$  – вязкость воды,  $C_{fo} = 0.03$ ,  $C_{fw} = 0.3$  – коэффициенты сопротивления частицы сферической формы в нефти и воде, соответственно;  $m_0 = 0.2$ ,  $k_0 = 0.6 \text{ мкм}^2$  – начальные значения динамической

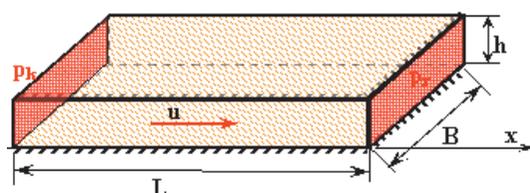


Рис. 1. Образец пористой среды

пористости и проницаемости пористой среды. Начальное распределение радиусов пор по размерам приведено на рис. 2.

Через входное сечение  $x = 0$  поступает вода, а через выходное сечение  $x = L$  отбирается жидкость, которая движется в образце под действием постоянного перепада давления  $\Delta p = P_1 - P_2$ , где  $P_1$  – давление на входе в образец,  $P_2$  – давление на выходе. Капиллярными силами пренебрегается. Начальная концентрация частиц в фазах равна нулю, т.е. все частицы находятся на стенках пор. Концентрация частиц в нагнетаемой во входном сечении воде равна нулю, т.е.  $C_w(0,t) = 0$ . Так как через входное сечение поступает только вода, а остаточная нефть при этом неподвижна, то для концентрации частиц в нефти принято граничное условие  $C_o(0,t) = 0$ . Кровля и подошва образца  $z = 0$  и  $z = H$  считаются непроницаемыми. Относительные фазовые проницаемости аппроксимировались квадратичными функциями насыщенности  $k_{ro} = A_o(1 - S_{o*} - S_w)^2$  и  $k_{rw} = A_w(S_w - S_{w*})^2$ , где  $A_o = 1$ ,  $A_w = 1$ ,  $S_{o*} = 0$ ,  $S_{w*} = 0$ , – насыщенность пласта остаточной нефтью и связанной водой, соответственно. Сетка расчетной области имеет  $61 \times 11 \times 1 = 671$  ячеек. Сетка одномерных конечных элементов для расчета функции распределения пор по размерам в каждой ячейке расчетной области состояла из 26 конечных элементов.

Распределение концентрации частиц в воде по длине образца приведено на рис. 3 для перепада давления  $\Delta p = 0.01$  МПа, а на рис. 4 – для перепада давления  $\Delta p = 0.002$  МПа на различные моменты времени:  $t_1 = 0.01$ ,  $t_2 = 0.03$ ,  $t_3 = 0.05$ ,  $t_4 = 0.056$ ,  $t_5 = 0.06$ ,  $t_6 = 0.1$ ,  $t_7 = 0.3$ ,  $t_8 = 0.6$ ,

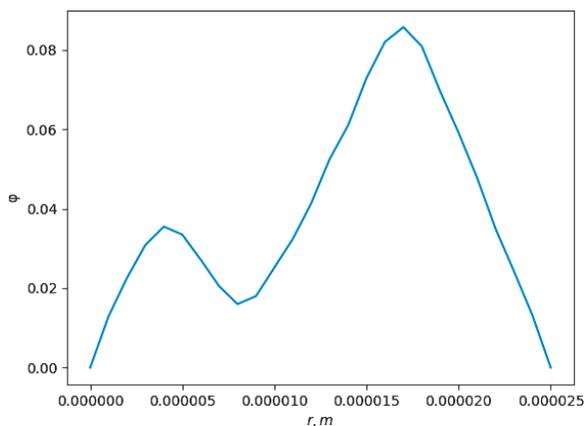


Рис. 2. Распределение радиусов пор по размерам

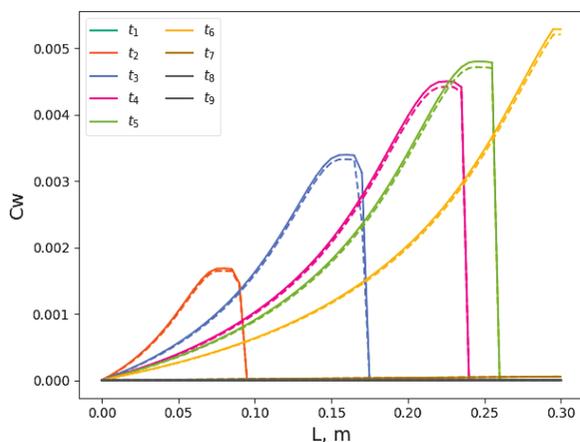


Рис. 3. Концентрация частиц в воде,  $\Delta p = 0.01$  МПа,  $\omega = 2150$  Гц

$t_9 = 1$  сут (пунктирной линией – без волнового воздействия, сплошной – с волновым воздействием). Видно, что чем меньше перепад давления и, следовательно, скорость фильтрации, тем больше влияние волнового воздействия на срыв частиц.

На рис. 5 на те же моменты времени  $t_1, \dots, t_9$  представлено распределение концентрации частиц в нефти по длине образца для перепада давления  $\Delta p = 0.002$  МПа. Видно, что при волновом воздействии концентрация частиц, сорванных со стенок капилляров, выше в воде, чем в нефти, что связано со значениями коэффициентов трения частиц в жидкостях.

На рис. 6 и 7 представлено в безразмерном виде изменение толщины осадочного слоя  $\Delta h^* = \Delta h / (\Delta h_{max} - \Delta h_{min})$ , где  $\Delta h$  – разница толщин осадочного слоя в зависимости от радиусов пор в различные моменты времени в образце без волнового воздействия (т.е. вынос за счет действия только гидродинамической силы давления) и с волновым воздействием ( $\omega = 150$  Гц и  $\omega = 2150$  Гц);  $\Delta h_{max}$ ,  $\Delta h_{min}$  – максимальное и минимальное значения изменения толщины во всем диапазоне радиусов поровых каналов и за все моменты времени, соответственно. Из представленных на рис. 6 и 7 результатов видно, что волновое воздействие увеличивает вынос частиц, толщина осадочного слоя частиц в поровых каналах уменьшается и, следовательно, повышаются фильтрационные параметры пористой среды: пористость и проницаемость. При более высокой частоте колебаний пик максимального изменения толщины осадочного слоя смещается в сторону пор малого радиуса (рис. 7).

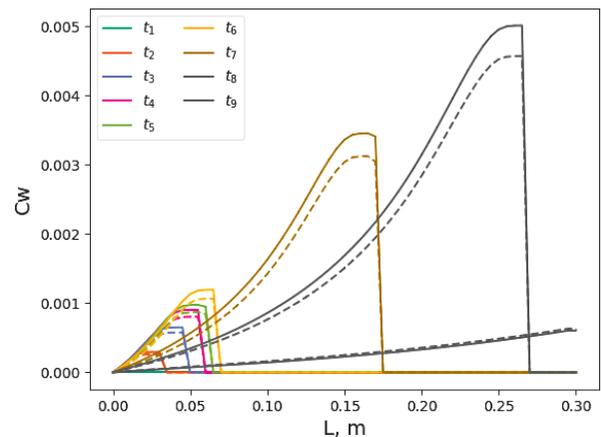


Рис. 4. Концентрация частиц в воде,  $\Delta p = 0.002$  МПа,  $\omega = 2150$  Гц

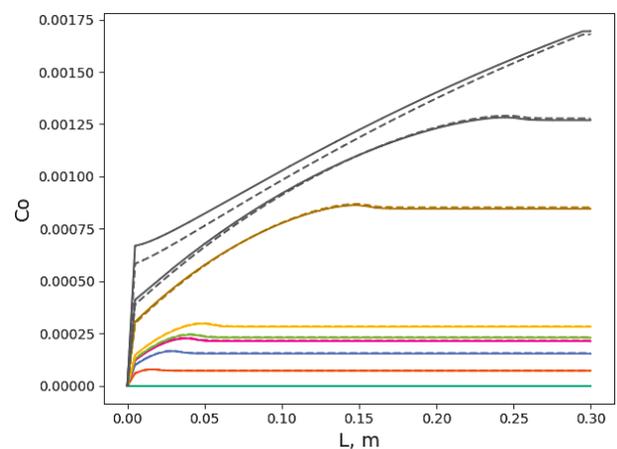
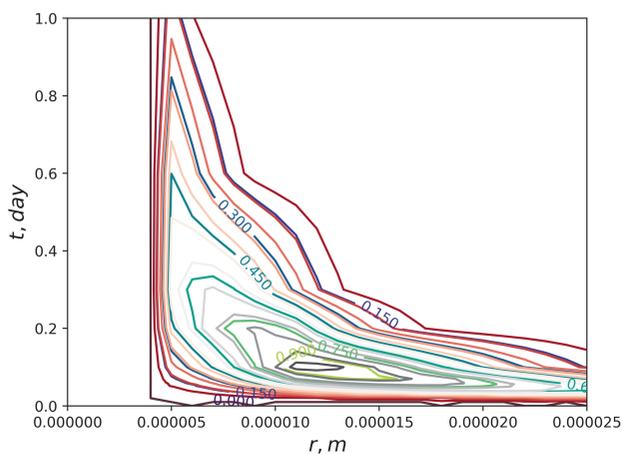
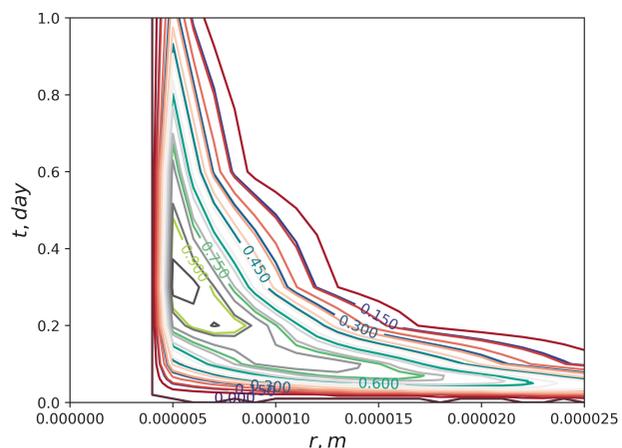


Рис. 5. Концентрация частиц в нефти,  $\Delta p = 0.002$  МПа,  $\omega = 2150$  Гц

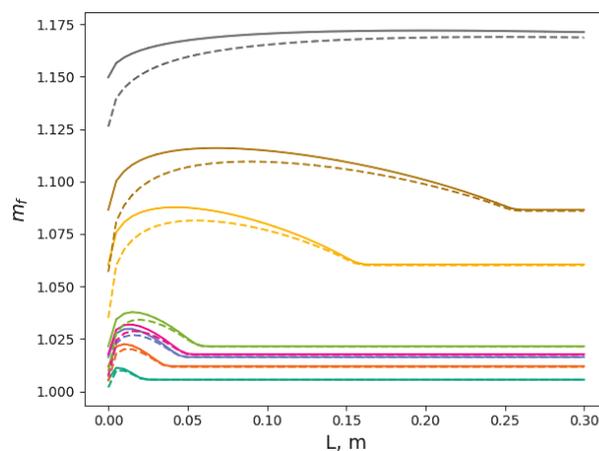
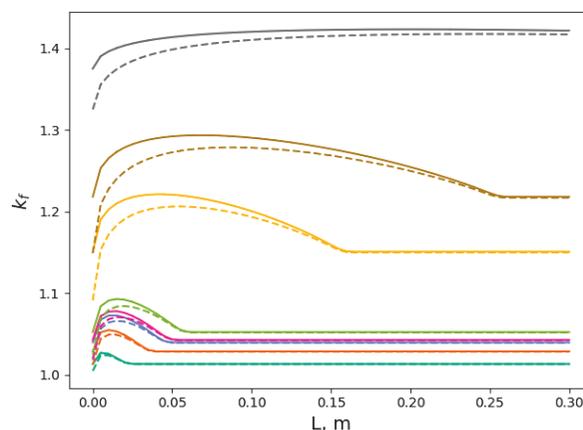
Рис. 6. Изменение толщины осадочного слоя частиц ( $\omega = 150$  Гц)Рис. 7. Изменение толщины осадочного слоя частиц ( $\omega = 2150$  Гц)

Изменение динамической пористости и проницаемости на моменты времени  $t_1, \dots, t_9$  представлено на рис. 8, 9 (пунктирной линией – без волнового воздействия, сплошной – с волновым воздействием, соответственно). Таким образом, представленная математическая модель позволяет учитывать влияние волнового поля на вынос частиц из пористой среды.

**Заключение.** Разработана математическая модель волнового воздействия на пористую среду при двухфазной фильтрации с целью ее очистки от осевших на стенках пор дисперсных частиц. Получено выражение для критической скорости потока, учитывающее влияние волнового поля. Показано, что вынос частиц при волновом воздействии увеличивается за счет действия силы инерции, которая уменьшает влияние силы, удерживающей частицы на поверхности пор. Критическое значение частоты волнового воздействия зависит от радиуса капилляра, и чем меньше радиус капилляра, тем более высокие частоты нужны для усиления эффекта от воздействия. При более высокой частоте колебаний пик максимального изменения толщины осадочного слоя смещается в сторону пор малого радиуса. В модели не учитываются процессы осаждения частиц на стенках и блокирование пор, что планируется в дальнейших исследованиях. Результаты могут быть использованы для моделирования процессов очистки призабойной зоны скважин при виброволновом воздействии.

### Финансирование

Работа выполнялась в рамках государственного задания ФИЦ КазНЦ РАН.

Рис. 8. Изменение динамической пористости образца,  $\Delta p = 0.002$  МПа,  $\omega = 2150$  ГцРис. 9. Изменение динамической проницаемости образца,  $\Delta p = 0.002$  МПа,  $\omega = 2150$  Гц

### Литература

- Газизов А.Ш., Никифоров А.И., Газизов А.А. (2002). Математическая модель вытеснения нефти водой с применением полимердисперсных систем. *Инженерно-физический журнал*, 75(1), с. 91–94. <https://doi.org/10.1023/A:1014878908997>
- Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е. (2008). Нелинейная волновая механика и технология. М: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 712 с.
- Капранов Ю.И. (1989). Структурная модель процесса механической коагуляции пористой среды. *Динамика сплошной среды*. АН СССР, Сиб. Отд., Инс. гидродинамики, вып. 90, с. 27–39.
- Капранов Ю.И. (1999). О фильтрации взвеси твердых частиц. *Прикладная математика и механика*, 63(4), с. 620–628.
- Капранов Ю.И. (2000). Изменения поровой структуры в потоке монодисперсной взвеси. *ПМТФ*, 41(2), с. 113–121. <https://doi.org/10.1007/BF02465273>
- Кузнецов О.Л., Симкин Э.М., Чилингар Дж. (2001). Физические основы вибрационного и акустического воздействий на нефтегазовые пласты. М.: Мир, 260 с.
- Никифоров А.И., Низаев Р.Х., Хисамов Р.С. (2011). Моделирование потокоотклоняющих технологий в нефтедобыче. Казань: Фэн, 224 с.
- Никифоров А.И., Никаньшин Д.П. (1998). Перенос частиц двухфазным фильтрационным потоком. *Матем. моделирование*, 10(6), с. 42–52.
- Никифоров А.И., Садовников Р.В., Никифоров Г.А. (2013). Перенос частиц двухфазным фильтрационным потоком. *Вычислительная механика сплошных сред*, 6(1), с. 47–53. <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2013.6.1.6>
- Селяков В.И., Кадет В.В. (1995). Перколяционные модели процессов переноса в микронеднородных средах. Москва: Недра, 222 с. <https://doi.org/10.1007/978-94-015-8626-9>
- Шехтман Ю.М. (1961). Фильтрация малоконцентрированных суспензий. М.: Недра, 161 с.
- Aziz, Kh., Setty, A. (1979). *Petroleum Reservoir Simulation*, London: Applied Science Publ.

Gruesbeck C., Collins R.E. (1982). Entrainment and Deposition of Fine Particles in Porous Media. *SPE Journal*, pp. 847–856.

Nikiforov, A.I., Sadovnikov, R.V. (2017). Solution of problems of oil reservoirs flooded with water using polymer-dispersed systems on a multiprocessor computer system. *Math Models Comput Simul*, 9, pp. 221–231. <https://doi.org/10.1134/S2070048217020090>

Nikiforov, A.I., Sadovnikov, R.V. (2019). Application of Parallel Programming Methods for Simulating Flow Diversion Technologies on Hybrid Architecture Computers. *Program Comput Soft*, 45, pp. 18–26. <https://doi.org/10.1134/S0361768819010067>

Sharma M.M., Yortsos Y.C. (1987). Transport of Particulate Suspensions in Porous Media: Model Formulation. *AIChE Journal*, 33(10), pp. 1636–1643.

## Сведения об авторах

*Анатолий Иванович Никифоров* – доктор физ.-мат. наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории Математическое моделирование процессов фильтрации, Институт механики и машиностроения ФИЦ КазНЦ РАН  
Россия, 420111, Казань, ул. Лобачевского, д. 2/31

*Роман Валерьевич Садовников* – кандидат тех. наук, старший научный сотрудник лаборатории Математическое моделирование процессов фильтрации, Институт механики и машиностроения ФИЦ КазНЦ РАН

Россия, 420111, Казань, ул. Лобачевского, д. 2/31

Статья поступила в редакцию 08.10.2020;

Принята к публикации 18.10.2021; Опубликована 30.11.2021

IN ENGLISH

ORIGINAL ARTICLE

# Particle transport by two-phase filtration flow from a porous medium under wave action

*A.I. Nikiforov, R.V. Sadovnikov\**

*Institute of Mechanics and Engineering, FRC Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Kazan, Russian Federation*

*\*Corresponding author: Roman V. Sadovnikov, e-mail: sadovnikov@imm.knc.ru*

**Abstract.** The paper discusses the influence of wave action on the process of detachment and transport of particles from a porous body by a two-phase filtration flow. When modeling this process, the problem of the influence of the wave field on the force under the action of which the particles are detached from the pore walls is solved. For the first time, a pore-size distribution function is used for its solution. An expression for the critical flow velocity under wave action has been obtained. Critical frequency value of wave action depends on the capillary radius and the smaller the capillary radius is, the higher frequency is needed to enhance the effect of the action. At higher frequency of oscillation the peak of maximum change in the thickness of the sedimentary layer is shifted towards the pores of small radius. To maintain the influence of the wave field on the filtration parameters of the porous medium, the wave action should be carried out at a dynamically changing frequency range to increase the coverage of the effect of as many pores as possible. It is shown that particle transport during wave action increases due to the action of inertial forces, which reduce the influence of forces holding the particles on the pore surface.

**Keywords:** wave action, porous medium, two-phase filtration, control volume method

## Acknowledgements

The work was carried out within the framework of the state assignment of the FRC KSC RAS.

**Recommended citation:** *Nikiforov A.I., Sadovnikov R.V. (2021). Particle transport by two-phase filtration flow from a porous medium under wave action. Georesursy = Georesources, 23(4), pp. 58–64. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2021.4.7>*

## References

- Aziz, Kh., Setary, A. (1979). Petroleum Reservoir Simulation, London: Applied Science Publ.
- Gazizov A.Sh., Nikiforov A.I., Gazizov A.A. (2002). Mathematical Model of Oil Displacement by Water with the Use of Polymer-Disperse Systems. *Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal = Journal Of Engineering Physics And Thermophysics*, 75(1), pp. 91–94. <https://doi.org/10.1023/A:1014878908997>
- Ganiev R.F., Ukrainsky L.E. (2008). Nonlinear wave mechanics and technology. Moscow: NITs “Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika”, 712 p. (In Russ.)
- Gruesbeck C., Collins R.E. (1982). Entrainment and Deposition of Fine Particles in Porous Media. *SPE Journal*, pp. 847–856.
- Kapranov Yu. I. (1989). Structural Model of Mechanical Colmatization of Porous Medium. Dynamics of Continuous Media. USSR Academy of Sciences, Siberian Branch, Institute of Hydrodynamics, vol. 90, pp. 27–39. (In Russ.)

Kapranov Y.I. (1999). About filtration of suspended solid particles. *Prikladnaya matematika i mekhanika*, 63(4), pp. 620–628. (In Russ.)

Kapranov Yu.I. (2000). Changes of pore structure in monodisperse suspension flow. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika = Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 41(2), pp. 113–121. (In Russ.) <https://doi.org/10.1007/BF02465273>

Kuznetsov, O.L.; Simkin, E.M., Chilingar, J. (in Russian). (2001). Physical basis of vibration and acoustic effects on oil and gas reservoirs. Moscow: Mir, 260 p. (In Russ.)

Nikiforov A.I., Nizaev R.H., Khisamov R.S. (2011). Modelling of flow-deflecting technologies in oil production. Kazan: Fen, 224 p. (In Russ.)

Nikiforov A.I., Nikanshin D.P. (1998). Particle transfer by two-phase filtration flow. *Matem. modelirovanie*, 10(6), pp. 42–52. (In Russ.)

Nikiforov A.I., Sadovnikov R.V., Nikiforov G.A. (2013). About transport of dispersed particles by a two-phase filtration flow. *Computational Continuum Mechanics*, 6(1), pp. 47–53. (In Russ.) <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2013.6.1.6>

Nikiforov, A.I., Sadovnikov, R.V. (2017). Solution of problems of oil reservoirs flooded with water using polymer-dispersed systems on a multiprocessor computer system. *Math Models Comput Simul*, 9, pp. 221–231. <https://doi.org/10.1134/S2070048217020090>

Nikiforov, A.I., Sadovnikov, R.V. (2019). Application of Parallel Programming Methods for Simulating Flow Diversion Technologies on Hybrid Architecture Computers. *Program Comput Soft*, 45, pp. 18–26. <https://doi.org/10.1134/S0361768819010067>

Selyakov V. I., Kadet V. V. (1995). Percolation models of transport processes in microheterogeneous media. Moscow: Nedra, 222 p. (In Russ.) <https://doi.org/10.1007/978-94-015-8626-9>

Sharma M.M., Yortsos Y.C. (1987). Transport of Particulate Suspensions in Porous Media: Model Formulation. *AIChE Journal*, 33(10), pp. 1636–1643.

Shechtman, Y.M. (1961). Filtration of low-concentration suspensions. Moscow: Nedra, 161 p. (In Russ.)

## About the Authors

*Anatoly I. Nikiforov* – DSc (Physics and Mathematics), Chief Researcher, Laboratory of Mathematical Modeling of Hydrogeological Processes, Institute of Mechanics and Engineering, FRC Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences 2/31, Lobachevsky st., Kazan, 420111, Russian Federation

*Roman V. Sadovnikov* – PhD (Engineering), Senior Researcher, Laboratory of Mathematical Modeling of Hydrogeological Processes, Institute of Mechanics and Engineering, FRC Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences 2/31, Lobachevsky st., Kazan, 420111, Russian Federation

Manuscript received 8 October 2020;

Accepted 18 October 2021; Published 30 November 2021