

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Толмачёва Кристина Игоревна

**Развитие многоконтинуальных моделей
фильтрации суспензии**

Специальность 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2023

Диссертация подготовлена на кафедре гидромеханики
механико-математического факультета Московского государственного
университета имени М.В. Ломоносова

Научные руководители:

Осипцов Андрей Александрович, доктор физико-математических наук
Карликов Владимир Павлович, доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Смирнов Николай Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, профессор кафедры газовой и волновой динамики механико-математического факультета

Индрупский Илья Михайлович, доктор технических наук, профессор, Институт проблем нефти и газа Российской академии наук, заместитель директора по научной работе, главный научный сотрудник лаборатории газонефтеконденсатоотдачи пластов имени С.Н. Закирова

Урманчиев Саид Федорович, доктор физико-математических наук, профессор, Институт механики имени Р.Р. Мавлютова — обособленное структурное подразделение Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией “Механика многофазных систем”

Защита диссертации состоится 20 октября 2023 года в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета МГУ.011.5 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119192, Москва, Мичуринский проспект, дом 1, НИИ механики МГУ, кинозал.

E-mail: pelevina.daria@gmail.com

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/011.5/2570>.

Автореферат разослан " " 2023 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета МГУ.011.5,
кандидат физико-математических наук

Д.А. Пелевина

Общая характеристика работы

Актуальность и степень разработанности темы исследования. Задача о течениях в пористых средах представляет большой интерес в связи с широким распространением многофазной фильтрации в различных технологических и природных процессах, включая движение подземных вод и течения жидкостей, сопровождающие различные технологии нефтесервисной индустрии.

В нефтегазовой промышленности моделирование фильтрации суспензий применяется для описания течений в трещине гидроразрыва пласта (ГРП) и углеводородных пластах в процессе добычи нефти или газа, а также при нагнетании воды в пласт для поддержания высокого пластового давления.

Моделирование фильтрации суспензий уже много десятков лет является актуальной и исследуемой темой. Выделяют три основных подхода к описанию процесса фильтрации: континуальный [Iwasaki T. // Journal (American Water Works Association), 1937], стохастический [Litwiniszyn J. // Bull. Acad. Polon. Sci., Ser. Sci. Tech., 1963] и моделирование сети пор [Rajagopalan R. // AIChE Journal, 1976].

В открытой литературе до сих пор не сформулирована замкнутая и равномерно пригодная модель переноса частиц в пористой среде с учетом их осаждения и вымывания. Единственным надежным источником замыкающих соотношений для модели переноса твердых включений в пористой среде являются эксперименты на искусственных (насыпных) образцах пористой среды или на ядрах породы. Обычно для каждого эксперимента по кольматации (загрязнению суспензией пористого образца) подбирается индивидуальная формула для интенсивности захвата частиц со свободными параметрами, значения которых никак не коррелируют с параметрами породы и течения.

В работе [Rajagopalan R. // AIChE Journal, 1976] при помощи моделирования на масштабе одного зерна пористой среды (ячейка Хаппеля) было получено выражение для интенсивности осаждения сферических частиц одинакового размера, диаметр которых существенно меньше диаметра зерен породы. В реальных процессах фильтрации диаметр переносимых частиц может изменяться в широком диапазоне и предложенное выражение будет давать неточный

результат.

В экспериментальных и теоретических работах были предложены различные выражения для интенсивности осаждения частиц (например, [Herzig J. P. // Industrial and Engineering Chemistry, 1970]), каждое из которых содержит свободные параметры. Предложенное в литературе выражение для интенсивности вымывания частиц (захват осажденных или изначально неподвижных частиц в пористой среде потоком фильтрующейся жидкости) содержит два свободных параметра [Gruesbeck C. // Society of Petroleum Engineers Journal, 1982].

Моделирование фильтрации в упаковке проппанта, сопровождающей процессы очистки трещины ГРП и долгосрочную добычу углеводородов, требует описания ряда гидро- и геомеханических эффектов и является слабо изученной проблемой, по сравнению, например, с процессом образования и распространения трещины ГРП [Osiptsov A. A. // Journal of petroleum science and engineering, 2017]. Геомеханические эффекты описываются с использованием моделей линейной упругости [Wang J. // Journal of Fluid Mechanics, 2018], что не позволяет описать необратимые (пластические) деформации, возникающие в трещине ГРП и окружающем пласте в реальных полевых условиях.

Цели работы:

- Построение моделей фильтрации суспензии в пористой среде с учетом различных факторов, сопутствующих нефтесервисным процессам (перенос и осаждение твердых частиц, вязкопластическая реология полимерной несущей жидкости, геомеханические эффекты);
- Выбор замыкающих соотношений для интенсивности осаждения и вымывания (мобилизации) частиц в пористой среде на основе сравнения с экспериментальными данными из открытых источников;
- Численная реализация моделей фильтрации и проведение серии параметрических расчетов для оптимизации ряда нефтесервисных технологий: очистки трещины гидроразрыва с учетом фильтрации в канале трещины и окрестной породе, заводнения пласта и очистки прискважинной области.

Научная новизна.

- Развита следующие трехконтинуальные модели фильтрации суспензии:

- (i) модель фильтрации суспензии с двумя жидкими фазами, учитывающая следующие эффекты: перенос, захват и вымывание твердых частиц; фильтрация жидкости через упаковку захваченных мелких частиц, заполняющих поровое пространство; влияние захваченных частиц на пористость и проницаемость породы;
- (ii) сопряженная модель вытеснения флюидов в трещине ГРП, заполненной пропантом, и окружающем пласте с учетом геомеханических (сжатие упаковки пропанта, вдавливание зерен пропанта в стенки трещины) и гидромеханических (вязкопластическая реология вытесняемой жидкости, сжимаемость жидкостей, перенос твердых частиц) эффектов;
- На основе сравнения результатов численных расчетов с результатами лабораторных экспериментов по фильтрации суспензий были получены: 1) диапазоны применения различных замыкающих соотношений, описывающих захват и вымывание частиц; 2) корреляции между свободными параметрами этих соотношений и параметрами фильтрации;
 - Построена модель отрыва сферической частицы от плоской поверхности в потоке вязкой жидкости, на основе которой получено выражение для критической скорости вымывания частиц; полученное выражение внедрено в многофазную модель фильтрации;
 - На основании результатов численных расчетов предложен алгоритм для анализа эффективности очистки прискважинной зоны, учитывающий захват и вымывание твердых частиц.

Положения, выносимые на защиту.

- Для достаточно мелких частиц, переносимых вместе с жидкостью в пористой среде (отношение диаметров частиц и зерен породы менее 10^{-2}), формула с экспоненциальной зависимостью коэффициента кольтматации от концентрации осажденных частиц лучше всего описывает процесс осаждения частиц; для описания одновременного захвата и вымывания включений в пористой среде формула с линейной зависимостью интенсивности захвата частиц от концентрации осажденных частиц и степенной зависимостью от координаты подходит лучше всего; для переноса более крупных

включений (отношение диаметров переносимых частиц и зерен породы более 10^{-2}) лучше всего подходит формула с линейной зависимостью интенсивности захвата частиц от концентрации осажденных включений.

- В заданном диапазоне параметров, характерном для терригенного нефтяного пласта Западной Сибири, максимальная добыча нефти в результате очистки трещины ГРП достигается при быстром падении давления в скважине (отношение проницаемости пласта к проницаемости трещины менее 10^{-6}); при увеличении проницаемости пласта давление должно падать тем медленнее, чем меньше начальная толщина трещины ГРП; при ненулевом пределе текучести жидкости ГРП давление в скважине должно падать медленнее, чем в случае с нулевым пределом текучести.
- Для выбранного диапазона параметров течения, чем выше концентрация захваченных частиц в пористой среде, тем быстрее падает проницаемость породы вблизи скважины и тем меньше оптимальная продолжительность очистки прискважинной зоны в процессе циклического заводнения пласта.

Практическая значимость. Результаты диссертации могут быть использованы для моделирования:

- Различных нефтесервисных процессов: 1) бурение скважины; 2) образование трещины ГРП; 3) очистка трещины ГРП и добыча углеводородов; 4) заводнение пласта и очистка прискважинной области.
- Течения магмы;
- Течений в различных фильтрационных установках;
- Закачки углекислого газа в пласт;
- Течений грунтовых вод.

Методология и методы исследования. Исследование процессов фильтрации суспензии проводится в рамках многоконтинуального подхода. При составлении численных схем используется конечно-разностная аппроксимация уравнений. Система уравнений многофазной фильтрации решается методом расщепления по физическим процессам (неявный метод по давлению и явный по

насыщенностям флюидов и объемным концентрациям частиц). Квазилинейное параболическое уравнение относительно давления на каждом шаге по времени решается методом простой итерации, в рамках которой проводится решение систем уравнений с трехдиагональной матрицей методом прогонки при выполнении условия диагонального преобладания. Устойчивость численных расчетов переноса насыщенностей флюидов и объемных концентраций частиц достигается использованием условия Куранта-Фридрихса-Леви для ограничения шага по времени в зависимости от разрешения расчетной сетки и текущих полей скорости фаз. Свободные параметры моделей находятся в процессе численного решения задачи оптимизации с помощью методов Ньютона и градиентного спуска.

Степень достоверности результатов. Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием непротиворечивых моделей механики многофазных сред и строгих математических методов исследования; совпадением результатов численных расчетов с аналитическими решениями, экспериментальными данными, а также с известными в литературе решениями; контролем сходимости и устойчивости численных решений.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях: II Всероссийская научная конференция «Теплофизика и физическая гидродинамика» с элементами школы молодых ученых (Ялта, 2017); International Summer School-Conference «Advanced Problems in Mechanics» (Санкт-Петербург, 2017); 9th International Conference on Computational and Experimental Methods in Multiphase and Complex Flow (Таллин, 2017); Конференция-конкурс молодых ученых НИИ механики МГУ (Москва, 2016); XVIII Всероссийская конференция «Современные проблемы аэрогидродинамики», посвященная 60-летию Российского национального комитета по теоретической и прикладной механике и 125-летию его первого председателя академика АН СССР Н.И. Мухелишвили (Сочи, 2016); X Международная летняя школа «Компьютерные технологии анализа инженерных проблем механики» (Москва, 2016); Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2016» (Москва, 2016).

Постановки задач и результаты работы обсуждались на научных семинарах кафедры гидромеханики для студентов и аспирантов (2015-2019); семинарах

в Московском научно-исследовательском центре компании Шлюмберже (2015-2016); семинарах лаборатории механики многофазных сред НИИ механики МГУ под руководством проф. А.Н. Осипцова (2015-2021); семинарах лаборатории моделирования многофазных систем центра по добыче углеводородов Сколковского института науки и технологий под руководством проф. А.А. Осипцова (2018-2021); семинарах проектного центра по энергопереходу Сколковского института науки и технологий под руководством проф. А.А. Осипцова (2022-2023); совместном семинаре «Газпромнефть НТЦ» (г. Санкт-Петербург) и Новосибирского государственного университета «Моделирование в нефтяном инжиниринге» под руководством д.ф.-м.н. С.В. Головина (2023).

Результаты диссертации также докладывались автором и обсуждались на семинаре НИИ механики МГУ по механике сплошных сред под руководством А.Г. Куликовского, В.П. Карликова, О.Э. Мельника и А.Н. Осипцова. Кроме того, на основании данных результатов успешно защищена при окончании аспирантуры научно-квалификационная работа на тему: «Развитие многоконтинуальных моделей фильтрации суспензий».

За результаты, изложенные в диссертации, автор была награждена дипломом за лучший доклад секции «математика и механика» подсекции «гидромеханика» конференции «Ломоносов 2016».

Публикация результатов. По теме диссертации опубликовано 12 работ, из них 7 опубликованы в изданиях, индексируемых в базах Web of Science, Scopus, RSCI. Также по материалам диссертации получен 1 патент.

Личный вклад автора. В диссертации приведены результаты, полученные лично автором. Автор участвовала в формулировке моделей, планировании и обсуждении результатов численных расчетов. Численный алгоритм был реализован в программном коде лично автором. Все графики и таблицы, представленные в диссертации, автор построила лично. Положения, выносимые на защиту, получены лично соискателем. Постановки задач и обсуждение результатов принадлежат научным руководителям. Личный вклад автора в работах [4 - 7] составляет 4/5, [11] — 2/3, [3, 12] — 1/3, [2, 10] — 1/4, [1] - 1/5, [6, 9, 13] — 1/6.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Список литературы содержит 118 наименований. Полный объем

диссертации составляет 161 страницу, включает 66 рисунков.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность к.ф.-м.н. С.А. Боронину за полезные рекомендации при формулировке постановок задач, проведении численных расчетов и обсуждении результатов. Автор глубоко признательна д.ф.-м.н. И.А. Гарагашу, сформулировавшему математические модели геомеханических эффектов, необходимых для построения модели очистки трещины гидроразрыва пласта.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертация посвящена развитию многоконтинуальных моделей фильтрации суспензии, поиску замыкающих соотношений модели для описания интенсивностей захвата и вымывания частиц, а также моделированию течений в пласте и закрепленной трещине гидроразрыва, заполненной твердыми частицами, с использованием построенных моделей.

Во **введении** отмечена актуальность темы исследования, степень разработанности темы, дано резюме диссертации, отмечены цели и задачи работы, объект и предмет исследований, научная новизна результатов, их теоретическая и практическая значимость. Также описаны методы исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту, отмечены степень достоверности и апробация результатов, личный вклад автора, приведен список публикаций.

Глава 1 посвящена обзору литературы по теме диссертации. Представлен обзор различных подходов к описанию процесса фильтрации суспензии. В рамках континуального подхода перечислены все выражения, необходимые для замыкания модели, и представлен обзор наиболее часто используемых в открытой литературе. В частности, перечислены самые распространенные формулы для описания процессов захвата и вымывания частиц.

Также в главе 1 описаны нефтесервисные технологические процессы, модели которых построены в следующих главах диссертации, а именно, заводнение и очистка прискважинной зоны, а также очистка трещины гидроразрыва пласта (рисунок 1). Заводнение прискважинной области представляет собой закачку нагнетаемой жидкости (воды) из вертикальной скважины в пласт, заполнен-

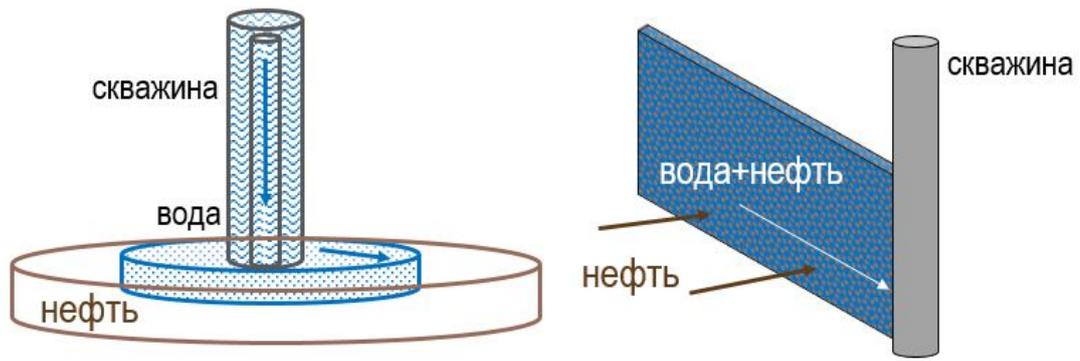


Рисунок 1: Схема течения в прискважинной области и в трещине гидроразрыва.

ный нефтью. На дне скважины могут остаться частицы раскрошенной породы после бурения, закачиваемая жидкость может содержать различные примеси, которые, проникая в пористую среду, будут осаждаться и снижать ее проницаемость. Для очистки прискважинной области давление в скважине снижается и формируется обратное радиальное течение из пласта к скважине. При этом происходит вымывание ранее захваченных частиц и восстановление проницаемости породы, что приведет к более эффективной добыче нефти в соседних добывающих скважинах.

Трещина гидроразрыва пласта формируется путем закачки гидроразрывной жидкости с под в пласт под достаточно высоким давлением. В уже сформированную трещину закачивают суспензию с твердыми частицами определенного диапазона диаметров (пропант). При сбросе давления в скважине, трещина закрывается на упаковку пропанта, что позволяет сохранить ее высокую проницаемость в процессе добычи углеводородов. Для очистки трещины от гидроразрывной жидкости, давление в скважине снижается и формируется, во-первых, течение пластовой жидкости в пласте в перпендикулярном к стенкам направлении, во-вторых, многофазное течение в упаковке пропанта от кончика трещины к скважине. Данный процесс может сопровождаться захватом различных твердых частиц в порах, сжатием пропантной пачки, вдавливанием пропанта в стенки трещины.

В главе 2 построена модель фильтрации суспензии с одной жидкой фазой с учетом переноса, осаждения и вымывания твердых частиц в порах. Модель построена в рамках трехконтинуального подхода: жидкая фаза, взвешенные частицы и осажденные частицы. Новым элементом модели является учет филь-

трации жидкости внутри упаковки осажденных частиц, для описания которого были введены три параметра пористости (рисунок 2): ϕ_t – пористость среды, образованная скелетом породы (крупные поровые каналы) и осажденными частицами (мелкие поровые каналы), ϕ_c – пористость среды, образованная только скелетом породы; ϕ_0 – начальная пористость среды:

$$\phi_t = \phi_0 - \sigma, \quad \phi_c = \phi_0 - \sigma / C_{max} \quad (1)$$

Здесь C_{max} – максимальная концентрация твердых сферических частиц (концентрация плотной упаковки), σ – концентрация осажденных частиц.

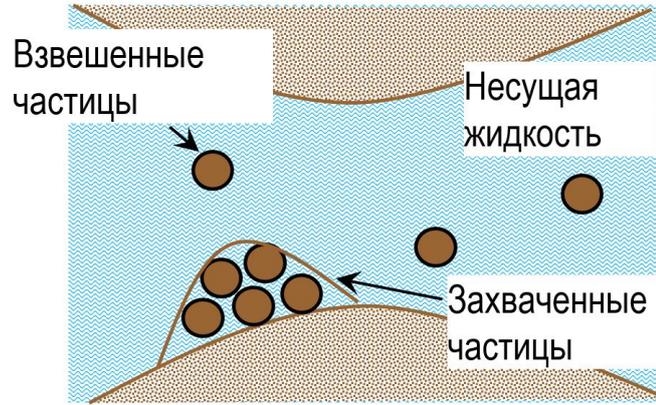


Рисунок 2: Три континуума в модели фильтрации: жидкая фаза, взвешенные и захваченные частицы.

Система уравнений имеет следующий вид:

$$\frac{\partial(\phi_c C)}{\partial t} + \frac{1}{r^j} \frac{\partial(u^p r^j)}{\partial x} = -q, \quad \frac{\partial \sigma}{\partial t} = q, \quad (2)$$

$$\frac{\partial(ur^j)}{\partial x} = 0, \quad u = u^p + u^f \quad (3)$$

$$u_l = -\frac{k(\sigma)}{\mu(C)} \frac{\partial p}{\partial r}, \quad u^f = -\left[(1-C) \frac{k(\sigma)}{\mu(C)} + \frac{k_s(\sigma)}{\mu_0} \right] \frac{\partial p}{\partial r}, \quad (4)$$

$$u = -\left[\frac{k(\sigma)}{\mu(C)} + \frac{k_s(\sigma)}{\mu_0} \right] \frac{\partial p}{\partial r}, \quad u^p = -C \frac{k(\sigma)}{\mu(C)} \frac{\partial p}{\partial r}. \quad (5)$$

$$\mu(C) = \mu_0 \left(1 - \frac{C}{C_{max}} \right)^{-1.89}, \quad k(\sigma) = k_0 \left(1 - \frac{\sigma}{\phi_0 C_{max}} \right)^3 \quad (6)$$

$$k_s = \phi_0 k_{s0} \left(\frac{\sigma}{\phi_0 C_{max}} \right), \quad k_{s0} = 0.204 r_g^2 \phi_s^{4.58}. \quad (7)$$

Здесь r – координата вдоль пористой среды, C – концентрация взвешенных частиц, u_l – скорость фильтрации суспензии в крупных поровых каналах, u – скорость фильтрации суспензии в крупных и мелких поровых каналах, u^f – скорость фильтрации жидкости в крупных и мелких каналах порового пространства, u^p – скорость фильтрации взвешенных частиц в крупных поровых каналах, p – давление, $j = 0$ в плоском течении и $j = 1$ в радиально-симметричном, q – интенсивность коагуляции (осаждения) и мобилизации (вымывания) частиц в поровом скелете, k – проницаемость породы, μ – вязкость суспензии, μ_0 – вязкость несущей жидкости, k_0 – проницаемость породы при отсутствии осажденных частиц, k_{s0} – проницаемость мелких поровых каналов при полной закупорке порового пространства ($\sigma = \phi_0 C_{max}$); r_g – радиус взвешенных частиц, $\phi_s = 1 - C_{max}$ – пористость среды, образованной осажденными частицами.

Использовались следующие начальные и граничные условия (L – длина пористой области):

$$C(x, 0) = 0, \quad \sigma(x, 0) = \sigma_0(x), \quad p(x, 0) = P_r \quad (8)$$

$$C(0, t) = C_0, \quad p(0, t) = P_w \text{ или } u(0, t) = U_{in}, \quad p(L, t) = P_r \quad (9)$$

Для системы уравнений (2)-(7) составлена конечно-разностная численная схема и реализована в программном коде. Проведено сравнение результатов численных расчетов и аналитического решения в случае малой концентрации взвешенных частиц. Получено хорошее соответствие результатов.

Выражение для интенсивности вымывания частиц было предложено в работе [Gruesbeck C. // Society of Petroleum Engineers Journal, 1982]:

$$q = \alpha \sigma (u - u_c) \theta(u - u_c) \quad (10)$$

где α и u_c – свободные параметры модели, а θ – функция Хевисайда, причем u_c является критической скоростью вымывания частиц, то есть минимальной скоростью течения жидкости, начиная с которой вымывание частиц становится возможным.

Для сокращения числа замыкающих параметров модели в главе 2 предложена формула для критической скорости вымывания частиц. Рассмотрена задача

о начале движения сферической частицы на плоской поверхности за счет ее сдвига, что позволило найти выражение для критической скорости вымывания u_c , зависящее только от усредненных характеристик пористой среды и суспензии:

$$u_c = \frac{\phi R \operatorname{tg}(\phi_0^{fr}) (\Delta \rho g \frac{4}{3} \pi r_p + 2c_1/r)}{40.8 \pi \mu} \quad (11)$$

Здесь ϕ_0^{fr} – угол внутреннего трения, c_1 – параметр адгезии, имеющий порядок 10^{-5} кг/с² для частиц в воде, r_p – радиус захваченных частиц, R – радиус пор.

В **главе 3** проведено сравнение формулы (11) с экспериментальными данными для значений критической скорости мобилизации в трубах (рисунок 3) и пористой среде (экспериментальное значение [Gruesbeck С. // Society of Petroleum Engineers Journal, 1982] – 5.7 мм/с, с использованием формулы – 5.3 – 6.3 мм/с в зависимости от угла внутреннего трения). Получено хорошее соответствие с экспериментальными данными.

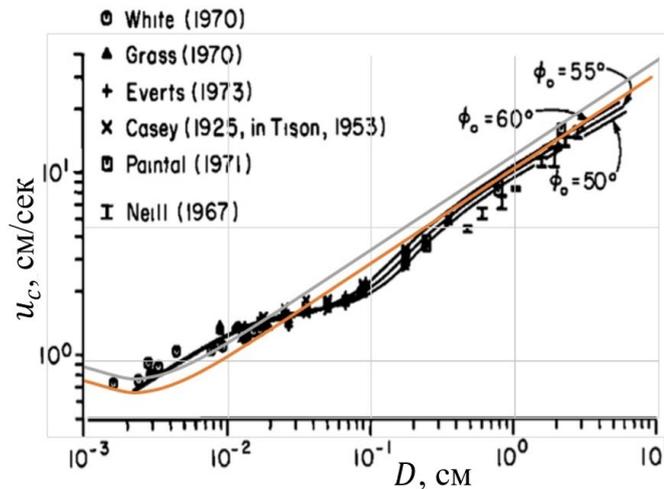


Рисунок 3: Сравнение с экспериментами по вымыванию частиц в трубах. Серая кривая – угол внутреннего трения 55° , оранжевая кривая – 50° . По вертикальной оси – u_c в см/сек, по горизонтальной D – диаметр частиц в см.

Так же проведено сравнение результатов численного моделирования с экспериментами из открытых источников по загрязнению пористых образцов. В цилиндрические пористые образцы с постоянной скоростью и постоянной концентрацией взвешенных частиц закачивалась суспензия. В конце эксперимента образцы высушивались и разрезались перпендикулярно к направлению филь-

трации в нескольких местах для анализа количества захваченных частиц. Для каждой серии экспериментов сначала была подобрана наиболее подходящая формула для интенсивности захвата частиц, затем методом Ньютона или методом градиентного спуска были найдены значения свободных параметров. Некоторые результаты (эксперименты [Shangping Xu // Water Resources Research, 2006] и [Bradford S.A. // Journal of contaminant hydrology, 2006]) представлены на рисунке 4.

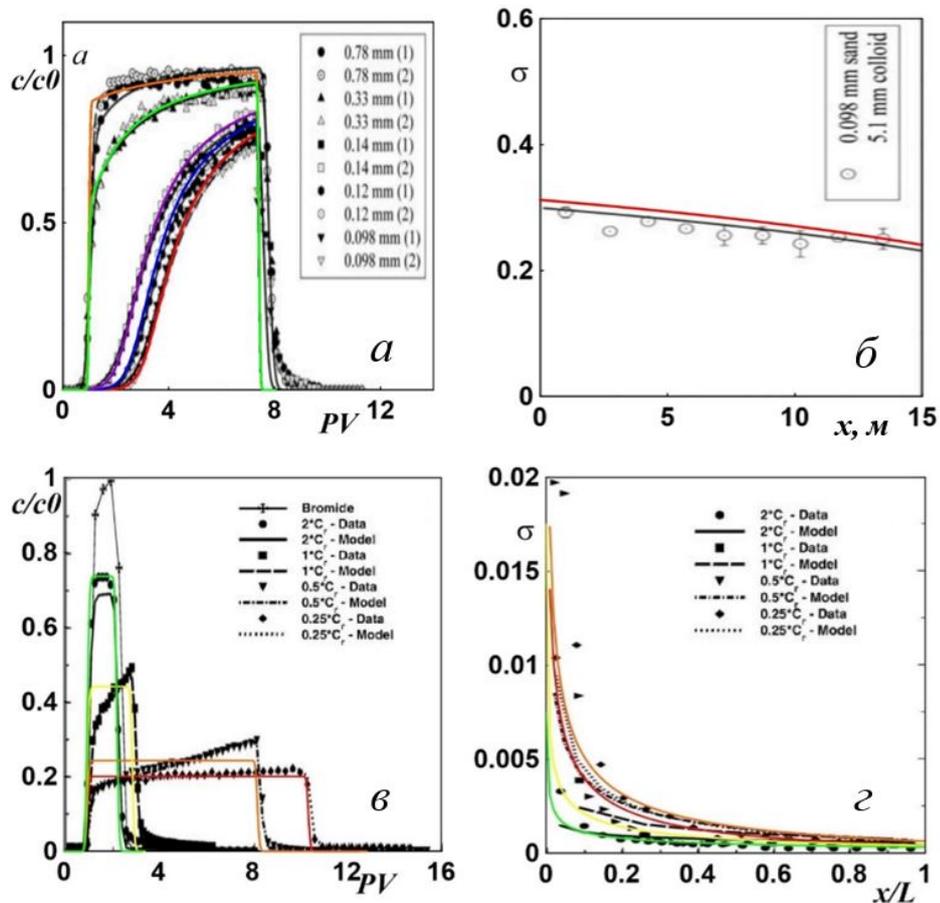


Рисунок 4: Сравнение численных расчетов (цветные сплошные кривые) с экспериментальными данными (символы). Отношение концентрации взвешенных частиц на выходе из образца к начальной концентрации (a и $в$) в зависимости от количества закаченных поровых объемов (PV). Концентрация захваченных частиц вдоль пористого образца – $б$ и $г$. Цветные кривые соответствуют разным размерам закачиваемых частиц и гранул породы.

Эксперименты по осаждению частиц проводились при различных диаметрах закачиваемых частиц и зерен породы в некотором диапазоне объемных концентраций закачиваемых частиц. Эксперименты удалось разделить на группы по размеру частиц и значению концентрации. Получено, что если размер закачиваемых частиц значительно меньше размера зерен пористой среды (отношение диаметров менее 10^{-2}), а частицы не могут осаждаться под действием сил

ближнего взаимодействия, то следующее соотношение наиболее точно описывает интенсивность захвата частиц:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = \gamma C e^{-\beta \sigma}, \quad (12)$$

где γ и β – свободные параметры. Если частицы могут и застревать, и осаждаться в порах, то для описания данных экспериментов следует использовать формулу:

$$q = \kappa C (1 - \phi_c) \left(1 - \frac{\sigma}{\sigma_{max}}\right) \left(\frac{d_{50} + x}{d_{50}}\right)^{-0.432} \quad (13)$$

Здесь $\sigma_{max} = C_{max} \phi_0$ – максимальная концентрация осажденных частиц, d_{50} – средний диаметр зерен пористой среды, κ – свободный параметр модели.

Если закачиваемые частицы более крупные (отношение диаметров более 10^{-2}), то необходимо использовать следующую двухпараметрическую зависимость:

$$q = C u \lambda_0 (1 + \beta \sigma) \quad (14)$$

Здесь λ_0 и β – свободные параметры модели.

В **главе 4** построена модель фильтрации суспензии с двум жидкими фазами. В отличие от модели, построенной во второй главе, также учитывается слабая сжимаемость жидкостей:

$$\rho = \rho_0 (B(p - p_0) + 1), \quad (15)$$

где B – коэффициент сжимаемости, ρ – плотность жидкости, ρ_0 – референсная плотность жидкости, p – давление жидкости, p_0 – референсное давление, соответствующее плотности ρ_0 .

Построенная в главе 4 модель используется в **главе 5** для моделирования заводнения и очистки прискважинной области. Во время заводнения моделируется радиальное течение суспензии от скважины вглубь пласта с учетом осаждения твердых частиц. В скважине и в глубине пласта задано условие постоянства давления, пласт изначально заполнен нефтью. Во время очистки, давление в скважине снижается и формируется обратное течение по направлению к скважине. Ранее захваченные в породе частицы могут вымываться обратным потоком воды.

Для анализа степени снижения проницаемости породы и эффективности очистки были проанализированы следующие параметры: проницаемость породы вблизи скважины, скин-фактор S и нормированная скорость вблизи скважины I :

$$S = \left(\frac{k_0}{k_{av}} - 1 \right) \ln \left(\frac{r_f}{r_w} \right), \quad I = \frac{U(x = r_w, t)}{U(x = r_w, t = 0)}$$

Здесь k_{av} – средняя проницаемость прискважинной зоны (вдоль поврежденной захваченными частицами области), r_f – радиус поврежденной породы (области со сниженной проницаемостью за счет кольтматации, или радиус области, куда проникли частицы), r_w – радиус скважины, U – скорость жидкости в скважине.

Проведено три расчета с разной концентрацией закачиваемых частиц C (10^{-6} , 10^{-5} и 10^{-4}). Для описания интенсивности захвата частиц использовалось выражение (13). Результаты моделирования представлены на рисунке 5: чем выше концентрация захваченных частиц, тем быстрее проницаемость вблизи скважины достигает минимального значения и делает невозможным дальнейшую закачку жидкости. Чем выше концентрация взвешенных частиц при заводнении, тем меньше оптимальная продолжительность очистки, когда скорость вблизи скважины принимает максимальные значения до падения и выхода на плато.

Таким образом, моделирование течений в прискважинной области позволяет определить интенсивность загрязнения пласта, возможность (превышение критической скорости вымывания) и оптимальную скорость очистки прискважинной зоны.

В **главе 6** построена модель течения в трещине гидроразрыва пласта (ГРП). Одномерная модель для описания течения в трещине получена путем осреднения трехмерных уравнений по высоте и ширине трещины.

Пласт вокруг трещины заполнен нефтью и при снижении давления на границе трещины (в скважине) формируется течение от кончика трещины к скважине и из глубины пласта перпендикулярно к трещине. Приток нефти из пласта задается в качестве источникового члена в уравнении сохранения массы для нефти в трещине ГРП. В существующих моделях очистки трещины гидроразрыва приток вычисляется аналитически с использованием решения задачи о течении слабо-сжимаемой жидкости в полубесконечной области. В предполо-

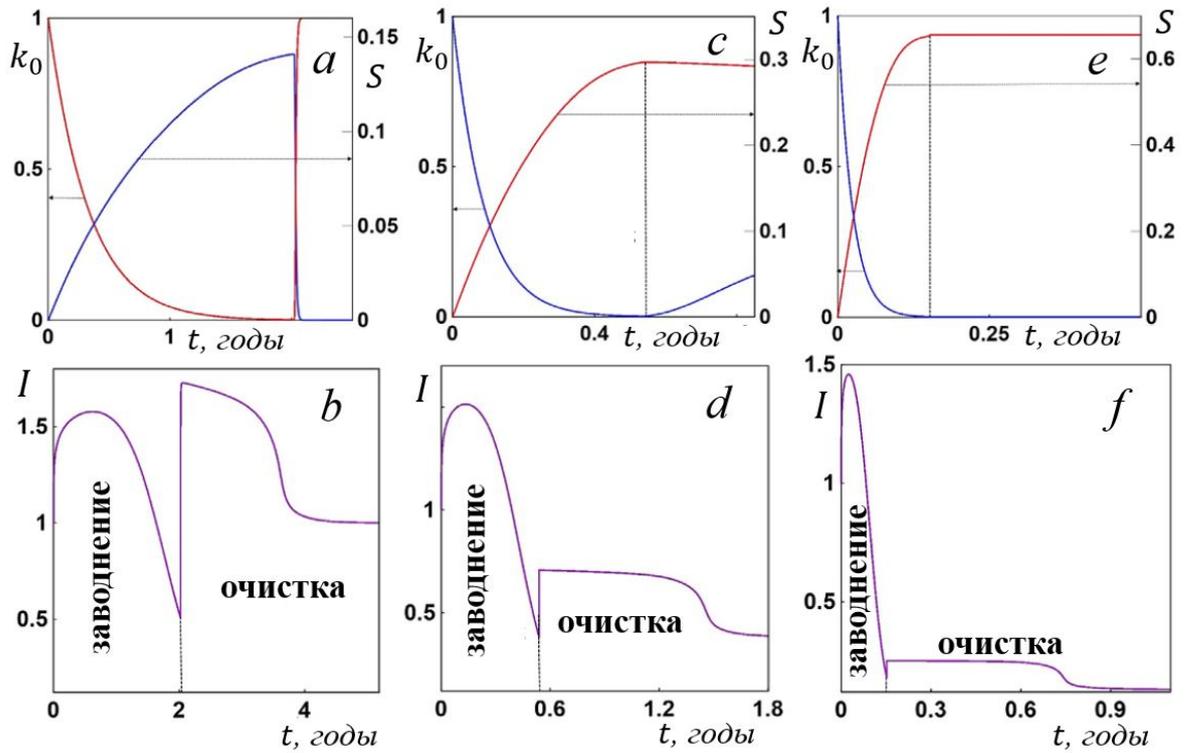


Рисунок 5: Проницаемость пласта вблизи скважины k_0 (левая ось) и скин-фактор S (правая ось) – графики (a, c, e); графики (b, d, f) – изменение нормированной скорости I со временем. $C_0 = 10^{-6}$ (a, b); $C_0 = 10^{-5}$ (c, d); $C_0 = 10^{-4}$ (e, f).

жении постоянного давления на границе этой области (в трещине ГРП) может быть получено следующее решение (формула Картера):

$$q_r = -\frac{k_r}{\mu_{oil}} \frac{P_r - P_f}{\sqrt{\kappa t \pi}}, \quad (16)$$

где q_r – скорость фильтрации, k_r – проницаемость пласта, μ_{oil} – вязкость нефти, P_r – начальное давление в пласте, P_f – давление в трещине, κ – коэффициент пьезопроводности.

В процессе очистки трещины гидроразрыва давление жидкости в ней уменьшается со временем, что приводит к необходимости учета переменного значения параметра P_f при построении аналитического решения для притока из пласта. Это может быть сделано при помощи интеграла Дюамеля, а соответствующее выражение для скорости фильтрации через стенки трещины ГРП примет вид:

$$q_r = -\frac{2k_r}{\mu_{oil} \sqrt{\kappa \pi}} \int_0^t \frac{dP_f(t)}{d\tau} d(\sqrt{t - \tau}) \quad (17)$$

Полученное решение имеет существенные для приложений ограничения, поскольку не учитывает многофазное течение в пласте (как правило, в нефтенос-

ных пластах присутствует еще и вода), а также перенос твердых частиц в породе. Это приводит к необходимости описания притока из пласта при помощи численного моделирования в предположении линейного режима фильтрации (линии тока в пласте направлены перпендикулярно стенке трещины ГРП).

Результаты моделирования очистки закрепленной трещины, изначально заполненной упаковкой пропанта с гидроразрывной жидкостью, представлены на рисунке 6. Проведены расчеты с использованием формулы Картера, интегральной формулы и при помощи численного моделирования течения в пласте. Получено, что результаты расчетов в модели, где приток из пласта вычисляется по формуле Картера, сильно недооценивает приток нефти, а результаты с использованием интегральной формулы и численного моделирования практически совпадают, что подтверждает правильность численного алгоритма и его реализации в программном коде.

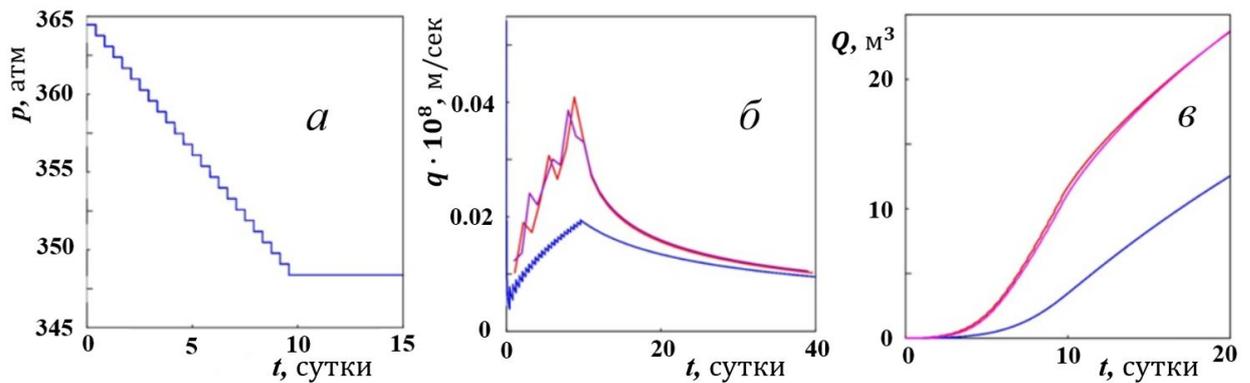


Рисунок 6: Снижение давления в скважине (а), величина притока к скважине q (б) и объем добытой нефти Q (в) с течением времени. Синие кривые - с использованием формулы Картера, красные - численного притока, фиолетовые - с использованием интегральной формулы.

Для корректного моделирования очистки трещины гидроразрыва необходимо учитывать сложную реологию сшитых полимерных жидкостей в рамках модели Гершеля-Балкли (вязкопластическая жидкость). Уравнение движения в таком случае имеет вид [Al-Fariss T., Pinder K. L. // The Canadian Journal of Chemical Engineering, 1987]:

$$u = - \left[\frac{k}{\mu_{eff}} \left(\nabla p - \frac{\nabla p}{|\nabla p|} \alpha \tau_0 \right) \right]^{\frac{1}{n}} \quad (18)$$

$$\mu_{eff} = \frac{H}{4} \left(3 + \frac{1}{n} \right)^n (8C'k\phi)^{\frac{1-n}{2}}, \quad \alpha = \sqrt{\frac{\phi C'}{2k}}, \quad (19)$$

Здесь H и n – параметры псевдо-степенной зависимости, τ_0 – предел текучести, C' – коэффициент Козени-Кармана.

Геомеханические эффекты также оказывают значительное влияние на снижение проводимости трещины ГРП. Модели сжатия упруго-пластической пачки проппанта и модель вдавливания жестких зерен проппанта в жестко-пластическую стенку трещины были построены И.А. Гарагашом в работе [4]. Сжатие проппанта влияет на пористость трещины:

$$\varphi_0 = \varphi_0^0 - \varepsilon_{33} \quad (20)$$

где ε_{33} – деформации. Раскрытие трещины уменьшается и за счет вдавливания, и за счет сжатия проппанта:

$$w = w_0(1 - \varepsilon_{33}) - 2r_g e_0, \quad (21)$$

где e_0 – относительная глубина вдавливания проппанта, нормированная на радиус зерна.

Скорость снижения давления в скважине по-разному влияет на гидро- и геомеханические эффекты, возникающие в трещине ГРП и окружающем пласте: с точки зрения геомеханики, чем медленнее снижается давление в скважине, тем больше будет объем добытой нефти, поскольку в этом случае будет минимизировано снижение пористости и проницаемости трещины; с точки зрения гидромеханики, чем быстрее падает давление в скважине, тем выше будет приток из пласта и скорость фильтрации в трещине, а значит, и объем добытой нефти.

Ввиду сложности построенной сопряженной гео- и гидромеханической модели невозможно выбрать оптимальный режим сброса давления в скважине аналитически, поэтому было проведено параметрическое численное исследование. Для заданного набора параметров трещины и пласта проведена серия расчетов с тремя вариантами сброса давления: за 2 часа, 1 день и 1 неделю. В процессе расчетов варьировались следующие параметры: проницаемость пласта, начальное раскрытие и длина трещины, а также предел текучести гидроразрывной жидкости.

В данном случае только четыре безразмерных параметра, описывающих гид-

ромеханические свойства, меняются в ходе параметрического исследования:

$$K = \frac{k_r}{k_{f0}}, \quad X = \frac{L}{w_0}, \quad N_y = \frac{\alpha\tau_y L}{\Delta p}, \quad \text{Sh} = \frac{T}{T_{drop}} \quad (22)$$

где Δp – характерная депрессия давления в скважине (разница между начальным давлением жидкости в трещине ГРП и характерным забойным давлением в процессе очистки), T_{drop} – время сброса давления в скважине (масштаб времени изменения граничного условия); T – масштаб времени, определяемый фильтрацией в трещине ГРП; K – отношение проницаемости трещины к проницаемости пласта, X – отношение длины трещины к начальному раскрытию трещины, N_y – безразмерный критический градиент давления, определяемый пределом текучести, и Sh – число Струхалия, определяющее отношение внутреннего масштаба времени к масштабу времени изменения граничного условия, w_0 – начальное раскрытие трещины.

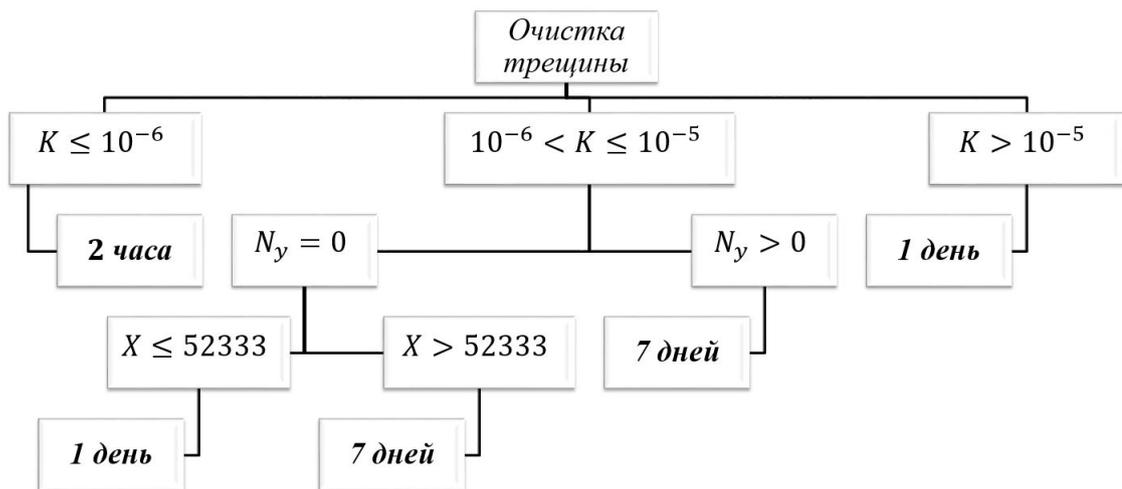


Рисунок 7: Схема выбора оптимальной скорости снижения давления в скважине.

В результате параметрического исследования построена схема, с помощью которой можно определить оптимальную скорость снижения давления в скважине для заданных параметров месторождения (рисунок 7). Чем выше проницаемость пласта, тем медленнее необходимо снижать давление на границе; чем больше начальное раскрытие, тем меньше геомеханические эффекты влияют на течение и тем быстрее можно снижать давление в скважине; если предел текучести не равен нулю, то при совпадении всех остальных параметров необходимо снижать давление еще медленнее, чем в случае нулевого предела текучести.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Развита модель фильтрации суспензии с одной жидкой фазой с учетом переноса, осаждения и вымывания твердых частиц. Новым элементом модели является учет течения жидкости внутри упаковки твердых частиц. Результаты численного моделирования совпали с существующими аналитическими решениями. Было проведено сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными по загрязнению пористых образцов. Учет течения жидкости между осажденными частицами необходим в случае достаточно большой концентрации осажденных частиц.

2. На основании сравнения результатов численного моделирования и результатов экспериментов из открытых источников составлена база замыкающих соотношений для описания интенсивности захвата частиц. Выбор замыкающих соотношений зависит от отношения размера частиц к размеру зерен пористой среды и от возможности частиц осаждаться на стенках пор под действием сил ближнего взаимодействия.

3. Выведено полуэмпирическое соотношение для определения критической скорости мобилизации частиц в поток жидкости. Формула показала хорошее совпадение с экспериментами по захвату частиц потоком в трубах и пористой среде.

4. Построена модель фильтрации с двумя жидкими фазами. В качестве замыкающих соотношений для захвата и вымывания частиц выбраны ранее найденные выражения. Построенная модель используется для расчетов заводнения и очистки прискважинной области. На основе полученных результатов расчетов динамики проницаемости и скорости суспензии вблизи скважины, предложен алгоритм определения интенсивности и оптимальной скорости очистки прискважинной зоны.

5. Построена сопряженная гео- и гидромеханическая модель очистки трещины гидроразрыва. Учтены такие эффекты как сжатие и вдавливание проппанта, двухфазный приток из пласта, неньютоновская реология и сжимаемость жидкости гидроразрыва. В типичных пластовых условиях наибольшее влияние на снижение проводимости трещины оказывает сжатие проппанта.

6. Для заданного диапазона параметров месторождения проведен параметрический анализ очистки трещины гидроразрыва. Поскольку гео- и гидромеханические факторы по-разному реагируют на скорость снижения давления на границе, в зависимости от значений входных параметров для каждого из случаев была определена оптимальная скорость снижения давления в скважине.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных RSCI, Scopus:

1. S.A. Boronin, K.I. Tolmacheva, I.A. Garagash, I.R. Abdrakhmanov, G. Yu Fisher, A.L. Vainshtein, P.K. Kabanova, E.V. Shel, G.V. Paderin, A.A. Osiptsov. Integrated modeling of fracturing-flowback-production dynamics and calibration on field data: Optimum well startup scenarios // Petroleum Science. – 2022 - DOI:10.1016/j.petsci.2022.12.009. (Impact factor JCR 4.76, Scopus).
2. E.P. Redekop, S.A. Boronin, K.I. Tolmacheva, A.A. Burukhin, A.A. Osiptsov, E.V. Belonogov. Effects of salinity and rock clogging on injectivity dynamics of flooding wells: Experiments, modeling and validation on field data // Journal of Petroleum Science and Engineering. - 2021 - Vol. 202 - P. 108504 - DOI:10.1016/j.petrol.2021.108504. (Impact factor JCR 5.17, Scopus).
3. A.A. Osiptsov, I.A. Garagash, S.A. Boronin, K.I. Tolmacheva, K. E. Lezhnev, G.V. Paderin. Impact of Flowback Dynamics on Fracture Conductivity // Journal of Petroleum Science and Engineering. - 2020 - Vol. 188 - P. 106822 - DOI:10.1016/j.petrol.2019.106822. (Impact factor JCR 5.17, Scopus).
4. K.I. Tolmacheva, S.A. Boronin, A.A. Osiptsov. Formation damage and cleanup in the vicinity of flooding wells: Multi-fluid suspension flow model and calibration on lab data // Journal of Petroleum Science and Engineering. - 2019 - Vol. 178 - P. 408-418 - DOI:0.1016/j.petrol.2019.03.035. (Impact factor JCR 5.17, Scopus).
5. С.А. Боронин, А.А. Осипцов, К.И. Толмачёва. Многоконтинуальная модель фильтрации суспензии в пористой среде // Механика жидкости и

газа. Известия Российской академии наук. - 2015 - № 6 - С. 50-62 (RSCI).
Перевод: S.A. Boronin, A.A. Osiptsov, K.I. Tolmacheva. Multi-fluid model of suspension filtration in a porous medium // Fluid Dynamics. – 2015 – Т. 50 – №. 6 – Р. 759-768 - DOI:10.1134/S0015462815060058. (Impact factor SJR 0.36, Scopus).

6. K.I. Tolmacheva, S.A. Boronin, A.A. Osiptsov. Multi-fluid model for suspension filtration in porous media: Effects of particle trapping and mobilization // WIT Transactions on Engineering Sciences - 2017 - Vol. 115 - P. 153–159 - DOI:10.2495/MPF170161. (Impact factor SJR 0.211, Scopus).
7. S.A. Boronin, K.I. Tolmacheva, A.A. Osiptsov, A.N. Sitnikov, A.A. Yakovlev, B.V. Belozarov, E.V. Belonogov, R.R. Galeev. Damage to formation surrounding flooding wells: Modelling of suspension filtration with account of particle trapping and mobilization // Journal of Physics: Conference Series. - 2017 - Vol. 925 - № 1 - P. 012009 - DOI:10.1088/1742-6596/925/1/012009. (Impact factor SJR 0.183, Scopus).

Статьи в сборниках конференций:

8. A. Vainshtein, G. Fisher, G. Strizhnev, S. Boronin, A. Osiptsov, I. Abdrakhmanov, G. Paderin, A. Prutsakov, R. Uchuev, I. Garagash, K. Tolmacheva, E. Shel, D. Prunov, N. Chebykin, I. Fayzullin. Field Testing of the Flowback Technology for Multistage Fractured Horizontal Wells: Generalization to Find an Optimum Balance Between Aggressive and Smooth Scenarios // SPE Russian Petroleum Technology Conference. - 2021 - P. SPE-206635-MS - DOI:10.2118/206635-MS (Scopus).
9. A. Vainshtein, G. Fisher, S. Boronin, A. Osiptsov, I. Fayzullin, G. Paderin, A. Shurunov, A. Prutsakov, R. Uchuev, I. Garagash, K. Tolmacheva, E. Shel, D. Prunov, N. Chebykin. Field Testing of the Flowback Technology for Multistage-Fractured Horizontal Wells: Test Results and Primary Interpretation of the Results // SPE Russian Petroleum Technology Conference. - 2020 - P. SPE-202056-MS - DOI:10.2118/202056-MS (Scopus).
10. A. Osiptsov, A. Vainshtein, S. Boronin, I. Faizullin, G. Paderin, A. Shurunov, R. Uchuev, I. Garagash, K. Tolmacheva, K. Lezhnev, D. Prunov, N. Chebykin.

Towards Field Testing of the Flowback Technology for Multistage-Fractured Horizontal Wells: Modeling-Based Design and Practical Implications // SPE Russian Petroleum Technology Conference. - 2019 - P. SPE-196979-MS - DOI:10.2118/196979-MS (Scopus).

11. S.A. Boronin, K.I. Tolmacheva, A.A. Osiptsov, D.M. Orlov, D.A. Koroteev, A.N. Sitnikov, A.A. Yakovlev, B.V. Belozеров, E.V. Belonogov, R.R. Galeev. Modelling of injection well capacity with account for permeability damage in the near-wellbore zone for oil fields in Western Siberia // SPE Russian Petroleum Technology Conference. - 2017 - P. SPE-187806-MS - DOI:10.2118/187806-MS (Scopus).
12. A.A. Osiptsov, S.A. Boronin, K.I. Tolmacheva, B.V. Belozеров, E.V. Belonogov, A.A. Yakovlev. Improving well injectivity by interchanging injection and production when flooding to maintain reservoir pressure // Saint Petersburg European Association of Geoscientists. - 2018 - Vol. 2018 - № 1 - P. 1-5 - DOI:10.3997/2214-4609.201800209 (Scopus).

Патент:

13. Г.В. Падерин, А.В. Шурунов, Е.В. Шель, И.Г. Файзуллин, А.Л. Вайнштейн, А.А. Осипцов, С.А. Боронин, И.А. Гарагаш, К.И. Толмачева. Патент РФ на изобретение № 2745684 «Способ сохранения безопасного диапазона проводимости трещины при выводе на режим скважины с ГРП». Патенто-обладатель: Общество с ограниченной ответственностью «Газпромнефть Научно-Технический Центр». - Заявка № 2020134094 от 16.10.2020 г. - Зарегистрирован 30.03.2021 г.