АЗЕРБАЙДЖАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА

На правах рукописи

РАЗРАБОТКА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ПРАКТИЧЕСКИХ ОСНОВ СООТНОШЕНИЙ ВОЛН-ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ФИЛЬТРАЦИИ УГЛЕВОДОРОДОВ В ПОРИСТЫХ СРЕДАХ

Специальность: 2003.01 – Механика жидкостей, газов и плазмы

Отрасль науки: Механика

Соискатель: **Бабек Низами оглы Султанов**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора философии

Баку – 2024

Диссертационная работа выполнена на кафедре «Теоретическая механика и механика сплошной среды» Механико-Математического факультета Бакинского Государственного Университета.

Научные руководители: действительный член НАНА, доктор физико-математических наук, профессор **Гулиев Гатам Гидаят оглы**,
Чл-корр. НАНА, доктор технических наук, профессор **Панахов Гейлани Минхадж оглы**.

Официальные оппоненты: чл.-корр.НАНА, доктор технических наук, профессор **Джалалов Гариб Исаг оглы**,
доктор физико-математических наук, профессор **Агаларов Джафар Гасанага оглы**,
доктор философии по математике, доцент **Расулова Севиндж Рамиз гызы**.

Диссертационный совет BED 4.23 Высшей Аттестационной Комиссии при Президенте Азербайджанской Республики, действующий на базе Бакинского Государственного Университета.

Председатель диссертационного совета: действительный член НАНА, доктор физико-математических наук, профессор **Мехтиев Магомед Фарман оглы**

Ученый секретарь диссертационного совета: доктор философии по математике, доцент **Салманова Гюльнар Муса гызы**

Председатель научного семинара: чл-корр. НАНА, доктор физико - математических наук **Гардашов Рауф Хаджи оглы**

BAKI DÖVLƏT UNİVERSİTETİ p.h.ş.
Baku State University l.e.p.l.
ELMİ KATİB
SCIENTIFIC SECRETARY
İmzanı təsdiq edirəm:
"04" 05 2024

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы и степень разработки.

Полезные ископаемые имеют очень важное значение для развития и поддержания благосостояния общества. На протяжении более века одной из наиболее важных сырьевых основ экономики являются углеводороды (нефть, газ, газоконденсат), состоящие по большей части из самых разных примесей - .

Ввиду залегания углеводородных запасов на значительных глубинах под землей (от 1-го до 5-ти, сверхглубокие до 10-ти километров), в кавернах, пористых грунтах и т.д. называемых в общем случае коллекторами, возникает необходимость проведения разведочных работ для анализа свойств этих коллекторов и оценки объемов запасов, предпочтительных способов добычи и т.д. Одним из основных способов разведки является сейсморазведка. С другой стороны, непрерывно менялся ландшафт, происходили землетрясения, коллекторы испытывали значительные деформации и давления вышестоящих горных пород. Также, в процессе добычи флюида, меняется соотношение горного и пластового давления в коллекторах, что сопровождается значительными деформациями.

Взаимовоздействие параметров скоростей волн, давлений и деформаций, плотностей практически непосредственно влияют на характер фильтрационного течения флюидов, так как эти параметры главным образом воздействуют на пористость среды. Справедливо также и обратное: характер течения фильтруемого флюида, и его физические, химические свойства, меняют упруго-деформационные свойства грунта, через который проходит волна давления. Тем не менее, возможно и важно уловить некоторые закономерности этих процессов.

Изучение процессов распространения волн давления, образования структур в горных породах в результате длительных изменений напряжений, их влияние на фильтрацию

флюидов и, наоборот, влияние фильтрации флюидов на структуры горных пород способствуют лучшему пониманию и изучению механических процессов в среде. Решение этих вопросов является актуальным, поскольку оценка процессов фильтрации жидкости в пористой среде за счет деформаций коллекторов играет очень важную роль для оценки практических основ возникающих здесь соотношений.

Имеется большое количество исследований, в которых учитываются деформационные процессы в задачах фильтрации флюидов в коллекторах. Однако при этом целый ряд вопросов взаимовлияния волн-деформаций в коллекторах исследован в недостаточной степени. Потому, можно говорить, что выбранное направление является актуальным.

Объект и предмет исследования.

Объектом исследования диссертационной работы являются волны и процесс фильтрации в пористых флюидонасыщенных средах. Предметом исследования является распространение различных волн в грунтах, их математические модели, разработка экспериментальных и теоретических основ процессов фильтрации и анализ полученных численных результатов.

Цель работы. Целью диссертационной работы является разработка теоритических и практических основ соотношений волн-деформаций при фильтрации углеводородов в пористых средах для создания более совершенных моделей, учитывающих влияние деформаций на распространение волн в глубоко залегающих грунтовых средах, а также определение влияния консолидации горных пород на процессы фрактальности и фильтрации в этих коллекторах.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Установлена связь между параметрами деформации и упругими свойствами среды.

2. Изучаются закономерности напряженно-деформированного состояния грунта при прохождении циклических ударных волн через горные породы.

3. Установлена связь между изменением напряжений и перемещений за фронтом ударной волны в горных породах с различными характеристиками.

4 Рассмотрено возможное влияние течения флюидов при фрактальном законе их фильтрации на консолидацию пласта породы.

5. Рассмотрено влияние консолидационного давления на фрактальность закона фильтрации в флюидонасыщенных пористых средах.

6. Проведена оценка характера распространения волн давления в пористой среде в случае действия нелинейного закона фильтрации флюидов.

7. Установлена возможность управления гидродинамической неустойчивостью с целью повышения флюидонасыщенности добываемой поровой жидкости методом нарастающего циклического воздействия в пористом материале пласта породы.

Научная новизна исследования.

1.Определен характер взаимовлияния волн-деформаций в пласте.

2.Исследованы закономерности напряжённо-деформированного состояния грунта при прохождении через него ударных волн.

3.Проведена оценка влияния воздействия волн давления на деформационные и фильтрационные свойства флюидонасыщенных грунтов.

4.Исследовано взаимовлияние консолидации грунтового слоя при фрактальном законе фильтрации жидкостей и консолидирующего горного давления на фильтрацию флюидов в пласте с учётом фрактальности.

5.Исследована возможность управления гидродинамической неустойчивостью в процессе вытеснения флюида при нарастающем циклическом воздействии в пористой среде.

Методы исследования.

Для решения поставленных задач применены численные методы решения уравнений математической физики, уравнения упругой динамики и неклассически-линеаризированный подход, уравнения подземной гидродинамики, уравнения теории консолидации и фрактальности.

Достоверность результатов. Достоверность полученных в работе теоретических и экспериментальных результатов следует из того, что они основаны на общих законах и уравнениях механики сплошных сред и обеспечиваются строгими математическими выводами, оценками, выбором численных методов, высокая эффективность которых при построении численной модели обусловлена использованием априорной информации о свойствах решения, сопоставлением решений задач, полученных различными методами, качественным и количественным совпадением теоретических результатов с экспериментальными данными и с результатами работ других авторов.

Практическая ценность. Полученные в диссертационной работе результаты расширяют и углубляют теоретические знания о перемещении грунтов при распространении ударных волн, а также создают основу для решения задач, связанных с регулированием процессов фильтрации и вытеснения флюидов в неоднородных и трещиновато-поровых нефтяных пластах.

Апробация. Основные научные результаты и ход выполнения диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных семинарах и заседаниях: кафедры «Теоретической механики и механики сплошной среды» Механико-математического факультета Бакинского Государственного Университета, отдела «Механики жидкости и газа» Института Математики и Механики, а также на национальных и международных конференциях: на республиканской научной конференции «Математика, механика и их приложения», посвященная 98-летию Общенационального Лидера Гейдара Алиева (Баку, 2021); на международной

научной конференции «Современные проблемы механики и математики» посвященной 110-летию академика Ибрагима Ибрагимова (Баку 2022); на международной научной конференции «Математический анализ и его приложения в современной математической физике» (Узбекистан, Самарканд 2022); на международной научной конференции «2nd International Conference on Engineering and Applied Natural Sciences» (Турция, Конья 2022); на республиканской научной конференции «Теория функций, функциональный анализ и их приложения», посвященная 110-летию академика Ибрагима Ибрагимова (Баку 2022); на международной научной конференции «Современные проблемы математики и механики» посвященной 100-летию Общенационального Лидера Гейдара Алиева (Баку 2023).

Личный вклад автора.

Основные результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно, а также при содействии научного руководителя. Разработка основных научных результатов осуществлялась при непосредственном участии автора, либо при участии его в качестве ответственного исполнителя.

Публикации.

По материалам диссертационной работы были опубликованы 6 статей в отечественных и зарубежных научных журналах, один из которых проиндексирован в базе «Scopus», один журнал одновременно входит в базу индексирования «Scopus» и «Web of Science» и еще один журнал проиндексирован в “zbMath”. Также по теме диссертационной работы были опубликованы 6 тезисов, из которых 2 тезиса опубликованы в зарубежных международных конференциях.

Точность полученных результатов.

Точность полученных результатов обеспечивается корректностью постановки и решения задач на основе законов линейной и нелинейной эластодинамики с применением линеаризации неклассического типа, известных законов фильтрации и законов консолидации грунта. Точность в ходе

численного решения для соответствующих скоростных параметров и параметров давления, определяется выбранным масштабом шагов изменения параметра деформации и параметра времени.

Наименование учреждения, где выполнена диссертационная работа.

Работа выполнена на кафедре «Теоретическая механика и механика сплошной среды» Механико-Математического факультета Бакинского Государственного Университета.

Структура и объем диссертации (в знаках, с указанием объема каждого структурного подразделения в отдельности).

Данная диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и использованной научно-технической литературы.

Общий объем диссертационной работы – 233854 знаков (титульная страница – 461 знаков, оглавление – 1393 знаков, введение – 29568 знаков, первая глава – 56713 знаков, вторая глава – 42035 знаков, третья глава – 104140 знаков).

Данная работа изложена на 162 страницах, включает в себя 52 рисунка, включая графические; 11 таблиц и списка литературы из 126 научных публикаций.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

В первой главе диссертационной работы исследованы особенности распространения волн в грунтах. Здесь кратко изложены сведения о типах волн и их скоростях при распространении сквозь пористый – гранулированный грунт.

Исследованиям в области распространения волн в пористых средах и грунтах большое внимание уделяли Я.Б. Зельдович, А.Х. Мирзаджанзаде, Ю.А. Амензаде, А.Н. Гузь, Г.Г.Гулиев, С.Д. Акбаров, Р.М. Саттаров, О.Л. Кузнецов, Дж.К. Агаларов, Р.Ю. Амензаде, М.А. Байот, Б.Г. Холодарь, А.А. Ильюшин, А.Г. Авербух, Р. Добрий, Г. Кольски, А.В. Ильюшонок, В.И. Терешенков, Р.К. Хисматулин и другие.

Волна подразумевает под собой колебание частиц грунта. В общем случае частицы при таком колебании описывают эллиптическую траекторию, причем энергия передается от частицы к частице в плоскости параллельной фокальному расстоянию. В частном случае частицы могут двигаться по округлой траектории либо вдоль небольшой прямой линии.Таким образом, в сумме, перемещение таких частиц приводит к тому, что грунт деформируется в продольном и/или поперечном направлении при прохождении волны сквозь него. Колебания грунта могут быть довольно сложными из-за взаимодействия волн с мягкими поверхностными отложениями и генерацией поверхностных волн. Характеристики распространения волн зависят от индивидуальных свойств и параметров материалов, составляющих эти среды: жесткого скелета и жидкости. Осевые и поперечные деформации могут проявляться, когда волны распространяются параллельно горизонтальной либо вертикальной оси коллектора. Сдвиговые же деформации зачастую возникают, если поперечное сечение коллектора меньше длинны поперечной волны. Причем во флюидонасыщенных пористых грунтах поперечные волны могут либо вовсе затухать либо значительно терять свою интенсивность, так как, очевидно, модуль сдвига в жидкостях и газах равен нулю. И вся работа по распространению поперечных волн возлагается на твердый скелетный каркас такого грунта и зависит от его свойств.

Далее рассматривается взаимовлияние параметров волн напряжений и упругих параметров среды. Так как материал глубоко лежащего грунта земли фактически не имеет начального состояния, ведь начальное состояние сформировано миллионы лет назад, то под начальным состоянием грунта мы подразумеваем текущее его состояние. Поэтому здесь необходимо применить метод неклассически линеаризированного подхода. Применение такого подхода к рассматриваемому кругу задач имеет определенное методологическое преимущество по сравнению с прямым

использованием общей нелинейной теории. Прежде всего, нелинейная проблема сводиться к линейным (неклассическим) и хорошо изученным математическим задачам. В случае однородных деформированных состояний получаются простые аналитические формулы, в структуре которых в явном виде выделяются вклады линейных (именно эти составляющие и должны называться упругими свойствами среды) и нелинейных воздействий на количественные показатели параметров упругих свойств. Для связи параметров деформации с упругими свойствами применяют упругие потенциалы. Эти потенциалы подразумевают под собой закон распределения внутренней упругой энергии материала с определенными данными упругими параметрами при той или иной деформации. Для получения аналитических формул, выражающих изменение отношения параметра распространения упругих волн к параметру плотности или деформации, следует использовать эти упругие потенциалы. Иначе говоря, упругий потенциал можно определить как величину, идентичную свободной энергии тела. Одним из простых и относительно удобных упругих потенциалов является потенциал гармонического типа. Он имеет следующий вид (А.Н. Гузь, 2004[1]; Г.Г. Гулиев, 2018[2]):

$$\Phi^{S} = \frac{1}{2}\lambda S_1^2 + \mu S_2 \qquad (1)$$

где λ, $\mu -$ параметры Ламе, $S_1, S_2 -$ система инвариантов зависящих от параметра деформации.

Далее, отсюда были получены основные формулы связывающие параметры скоростей продольных и поперечных волн от величины параметра деформации вида:

---

[1] Гузь, А.Н. Упругие волны в телах с начальным (остаточным) напряжением. // А.Н. Гузь. - Киев: АСК, -2004. -300с.

[2]Гулиев, Г.Г. Об упругих параметрах деформированных сред // Structural Engineering & Mechanics, -2018. 67(1), – стр. 53-67

$$C_{l_{x_1}} = C_{l_0}\sqrt{\frac{\rho_0}{\rho}(1+2\varepsilon_0)^{\frac{5}{2}}}$$

$$C_{S_{x_2}} = C_{S_{x_3}} = C_{S_{x_0}}\sqrt{\frac{\rho_0}{\rho}(1+2\varepsilon_0)^{\frac{3}{2}}} \cdot \qquad (2)$$

$$\cdot\left[(1+2\varepsilon_0)\left(\frac{2-\nu}{1-2\nu}\right) - \sqrt{1+2\varepsilon_0}\left(\frac{1+\nu}{1-2\nu}\right)\right]$$

$$\frac{P_0}{\mu} = \frac{2+2\nu}{1-2\nu}\left(\sqrt{1+2\varepsilon_0} - 1\right)$$

Параметр $\frac{P_0}{\mu}$ – характеризует давление. Эти формулы, справедливые при гармоническом типе упругого потенциала, были подвергнуты сравнению с потенциалами квадратичного типа и потенциалом Мурнагана проведённые другими исследователями с применением констант для конкретных материалов, а именно: плагиогранита, стали и оргстекла.

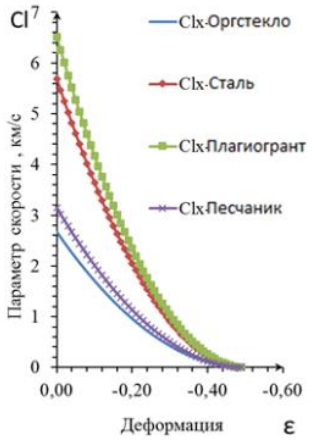


Рисунок 1.
Изменение параметра распространения продольной волны Cl_x для различных материалов в зависимости от величины деформации ε.

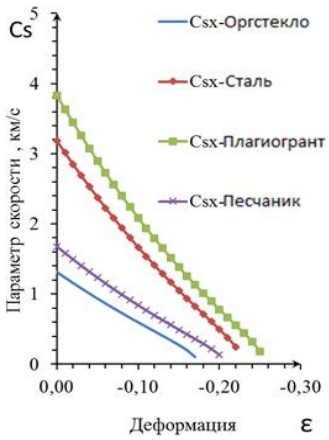


Рисунок 2.
Изменение параметра распространения поперечной волны Cs_x для различных материалов в зависимости от величины деформации ε.

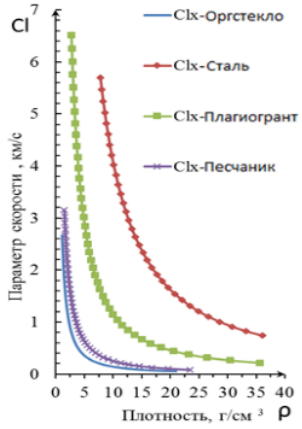


Рисунок 3.
Изменение параметра распространения продольной волны Cl_x различных материалов в зависимости от значений плотности ρ.

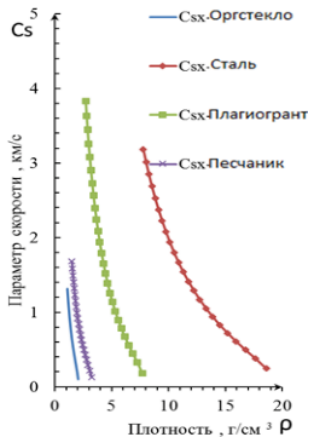


Рисунок 4.
Изменение параметра распространения поперечной волны Cs_x различных материалов в зависимости от величины деформации ε.

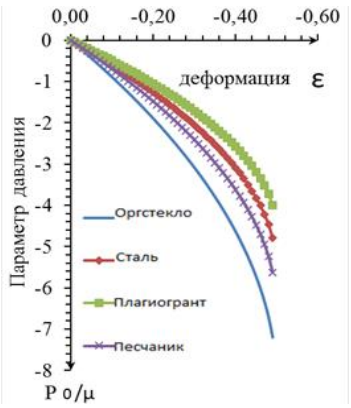


Рисунок 5.
Изменение давления параметр P_0/μ различных материалов в зависимости от величины деформации ε.

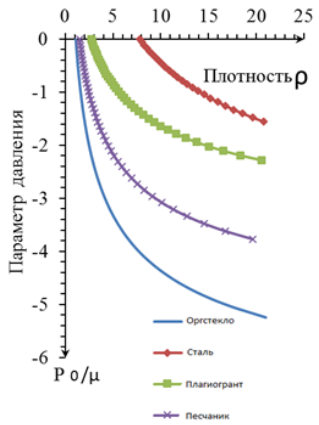


Рисунок 6.
Изменение давления параметр P_0/μ различных материалов по значениям плотности ρ.

При использовании всех вышеперечисленных видов упругих потенциалов наблюдается общее уменьшение значений удельных параметров скоростей и увеличение значений давлений с увеличением параметра деформации. Конкретные критические значения скоростей различаются лишь количественно в случае применения соответствующего вида потенциала (Рисунки 1-6).

Во второй главе исследовано напряжённо-деформированное состояние грунта при прохождении через него ударных волн. Даются основные понятия и рассматриваются особенности распространения ударного воздействия на грунтовую среду.

В области поведения грунтов при динамических нагрузках уделяли большое внимание М.Б. Ахундов, Н.Б. Расулова, Е.А. Вознесенский, В.Т. Трофимов, В.Г. Коваленко, О.В. Зеркаль, В.А. Калачев, А.М. Капитонов, Е.Н. Самарин, А.Д. Сашурин и другие.

Ударная волна, воздействуя на мягкий грунт, вызывает в нем большие напряжения и перемещения частиц среды. После прохождения, ударная волна меняет структуру и свойства

грунта. Поэтому определение напряжений и перемещений за фронтом ударной волны может подсказать новые значения параметров для деформированного грунта. Ударная волна характеризуется резким сжимающим воздействием на среду и более длительной, относительно своего сжимающего воздействия, зоной разряжения. Т.е. особенностью распространения ударной волны в грунте является относительно быстро меняющееся во времени динамическое воздействие. Под динамическим воздействием понимается нагрузка произвольного вида, создаваемая силой переменной величины и направления. Формы реакции грунтов на динамическое воздействие могут быть сведены к нескольким вариантам: 1. усталостное разрушение; 2. динамическое уплотнение; 3. снижение прочности, что выражается в виде частичного разупрочнения или полной потери устойчивости. Механизмы динамической неустойчивости грунтов можно разделить на следующие виды: усталость (накопление повреждений под действием переменных циклических напряжений), тиксотропия (уменьшение вязкости и/или прочностных характеристик (разжижение грунтов) при знакопеременном циклическом воздействии), квазитиксотропия (то же что и тиксотропия, но при более низкочастотных воздействиях и более продолжительно по времени, медленно-текущая тиксотропия), дилатация и дилатантно-тиксотропные эффекты (увеличение объема пород (пористости) при насыщении или ином воздействии, например волновом), динамическая дилатансия (увеличение пористости при сдвиговых воздействиях). Таким образом, изучение распространения ударных волн в средах остается важным аспектом современной науки и техники. При распространении ударной волны в твердых средах (по типу грунтов или горных пород) под действием высокого давления, слои породы сдавливаются (т.е. изменяют свою структуру), сжимаются и, переходя в пластическое состояние, перемещаются в радиальном направлении от центра распространения ударной волны. В результате чего, в

зависимости от величины давления, пористости грунта, могут возникать: зона вытеснения, зона уплотненной породы, и при относительно малых давлениях либо при удалении от центра возникновения ударной волны, где напряжения сжатия становятся меньше предела прочности материала, однако все еще велики смещения частиц среды, возникает зона разрыва среды. При распространении ударных возмущений в грунтовом массиве возникает множество характерных областей, отличающихся друг от друга механизмами деформирования, реализовавшимися в данном процессе. Таким образом, возникает важная задача определения характера влияния давления на перемещение частиц среды, ибо, очевидно, что пористость вещества напрямую зависит от расположения твердых непроницаемых частиц скелета грунта. И, так как вызываемое давлением перемещение частиц среды приводит к перестройке внутренней структуры грунта и возникновению напряженного состояния среды (как скелета породы, так и содержащегося в нем флюида), следует выяснить характер перемещений и напряжений в среде. Далее определяем распределение перемещений и нормальных напряжений за фронтом ударной волны. Для этого допустим, опять же, что давление на грунт оказывается вследствие распространения в нем ударной волны.

В некоторой достаточно малой области среды можно рассмотреть одномерные ударные волны, распространяющиеся вдоль оси x плоским фронтом. На границу воздействует давление $P(t)$. При достижении некоторого критического для данного грунта значения давления P^*, отношение давления $P(t)$ и деформации ε можно выразить в линейном виде ($P(t)=k\varepsilon$, k - коэффициент, тангенс угла наклона между значениями параметров P и ε). Согласно упрощенной модели грунта, предложенной А.Ю. Иллинским[3], А.П. Синицин[4] получил

[3] Иллинский, А.Ю. О плоском движении песка // Украинскийматематический журнал, -1954. -№ 4, Т.У.П. - С. 430-441.

уравнение для определения закона распространения фронта ударной волны *x=S(t),* распространяющейся в невозмущенном грунте без учета упругих возмущений. Рассматривая случай, когда *P>P**, а грунт с первоначальной плотностью ρ_0 и скоростью распространения упругих волн α_0 запрессовывается до нового состояния, получено характерное уравнение показывающее связь параметра давления и деформации. На основе этого определяется закон распространения фронта волны вида (У.С. Саримсаков, 1988[5]):

$P(t)=\rho_0\varepsilon_*\frac{d(S\dot{S})}{dt}+f(S,\dot{S},\ddot{S},\dddot{S},\alpha,\rho,\varepsilon_*,\theta_*)$, зная который можно найти распределение перемещений и напряжений за фронтом ударной волны. Функция f представляет характер изменения зависимости давления от деформации. Продолжая аналогию, полученное уравнение обобщено для распространяющихся последующих *n* волн через данную среду с учетом естественного влияния предыдущей волны на эту же среду.

$$[P(t)]_{n+1}=\rho_n(\theta_*)_n\frac{d((S)_n(\dot{S})_n)}{dt}+\rho_n(\theta_*)_n\frac{1-(\varepsilon_*)_n}{{\alpha_n}^2}\cdot$$
$$\cdot[(1-(\varepsilon_*)_n)\left((\ddot{S}^2)_n(S^2)_n+(\dddot{S})_n(\dot{S})_n{(S)_n}^2\right)+$$
$$+3(\ddot{S})_n{(\dot{S})_n}^2(S)_n+{(\dot{S})_n}^4] \qquad (3)$$

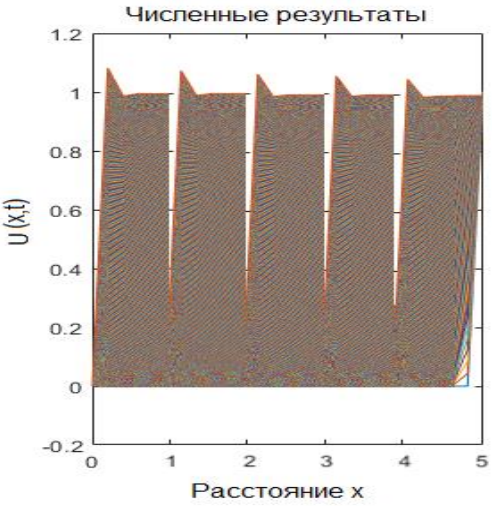
Таким образом на основе того обобщенного уравнения проведены численные оценки распределения перемещений и

---

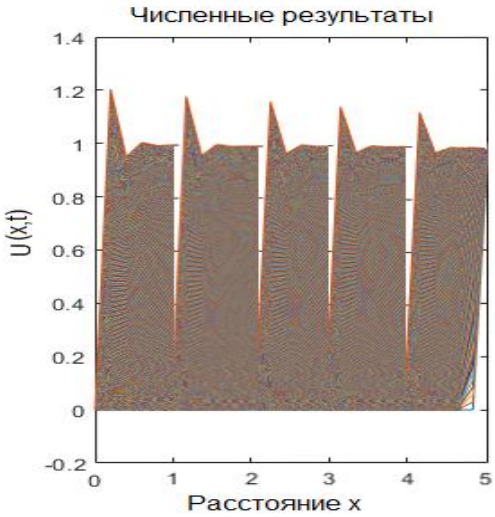
4 Синицын, А.П. Распространение волн в затвердевшем упруго-пластическом слое // Материалы Всесоюзного симпозиума по распространению упруго-пластических волн в сплошных средах. -Баку: АН Азб.ССР, -1966, -6с.

[5] Саримсаков, У.С., Бабичев, А.И., Эльмуратов, И.Т. Определение перемещений и напряжений за фронтом интенсивной ударной волны в мягком грунте //-Самарканд: Математическое моделирование задач прикладной математики. Министерство высшего и среднего специального образования Уз.ССР., - 1988. –с.113-116.

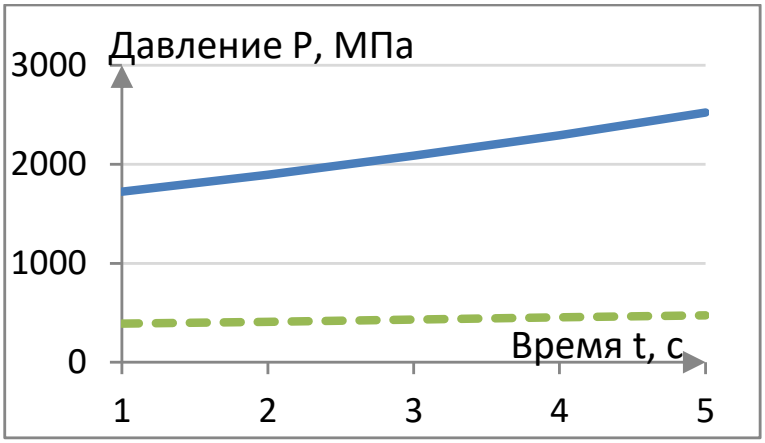
изменения напряжений с использованием конкретных числовых параметров для материалов чаще всего встречающихся в флюидонасыщенных пластах – доломита и песчаника. Результаты показывают наличие диапазона, в пределах которых меняется плотность, давление и перемещение грунта.



1.Распределение перемещений для доломита



2.Распределение перемещений для песчаника



3.Распределение пиковых значений давления по времени для доломита (сплошная линия) и для песчаника (пунктирная линия).

Рисунок 7. *Распределение перемещений и максимальных давлений при прохождении циклических ударных волн.*

В третьей главе проведены исследования влияния волны давления на деформационные и фильтрационные свойства флюидонасыщенных грунтов. Проведена оценка характера консолидации грунтового слоя при фрактальном законе фильтрации жидкости в виду того что структуру грунтового массива можно представить как фрактальную. Такое представление достаточно точно отражает и заменяет сложную

реальную структуру грунта с произвольным расположением и размерами пор, многослойностью и многофазностью и т.д.

В области свойств фрактальности и исследования пористости грунтов занимались А.Х. Мирзаджанзаде, Р.Н. Бахтизин, А.Х. Шахвердиев, М.М. Гасанов, Б.Х. Хужаёров, Г.М. Панахов., О.В. Иселидзе, В. Бохайенко, А. Гладкий, А.В. Мащенко, А.Б. Пономарев, В. Булаватцкий, Дж.К. Тцугава, Я.А. Пачепский, Ж. Чжан, Чж. Хуэй, Д. Йонг-Фен и другие.

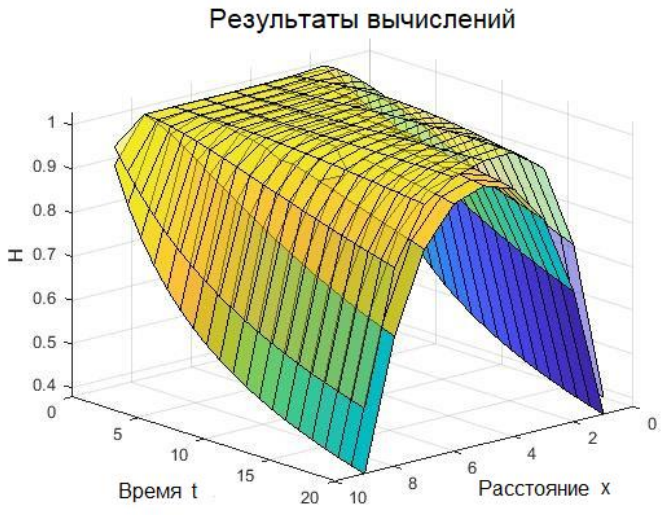
Консолидация водонасыщенных грунтов подразумевает процесс сближения частиц грунта и уменьшения объема пор, сопровождаемый вытеснением из них флюида заключённого в этих порах. Получено двумерное уравнение консолидации двухфазного, полностью водонасыщенного грунта, когда фрактальность геометрии порового пространства учитывается лишь в законе фильтрации Дарси (Г.М. Панахов, 2023[6]):

$$\frac{\partial H}{\partial t} = C_v \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(D_{a_+}^{\alpha} H \right)(x) + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left(D_{0_+}^{\beta} H \right)(z) \right), \qquad (4)$$

где $C_v = \frac{(1+e)(1+\xi)k}{2\gamma a}$ называется коэффициентом консолидации.

Проведена оценка влияния фрактальности закона фильтрации на процесс консолидации для следующих значений исходных параметров: $H_0 = 1, \beta = 0.5$ (фрактальность закона фильтрации), $\beta = 0$ (классический закон фильтрации), $\Delta t = 0.01$, $\Delta z = 0.1$, $k_* = 20$, $n = 10$. Полученные результаты отражены в графиках (Рисунок 8):

[6] Панахов, Г.М., Мусейбли, П.Т., Султанов, Б.Н. Эффекты консолидации грунтов на фрактальность законов фильтрации. // -Poland: International Journal of Applied Mechanics and Engineering. The Journal of University of Zielona Góra. -2023. v.28, №1, - стр.84-94.



Из полученных результатов следует, что учет фрактальности закона фильтрации дает завышение расчетных значений функции напора, причем это завышение с течением времени становится все более ощутимым.

Рисунок 8. *Графики влияния фрактальности закона фильтрации на консолидацию грунтового слоя. Верхний график построен с учетом фрактальности закона фильтрации.*

Здесь наибольшая разность достигла со временем ~22% для соответствующих точек на графике. Далее необходимо оценить влияние консолидации грунта, к примеру, вызванные протяженным по времени влиянием горного давления вышестоящих пород на рассматриваемый участок грунта и вызывающие изменение структуры скелета и соответственно порового пространства, на процессы фрактального закона фильтрации. Горное давление, передаваемое на грунт, насыщенный жидкостью, делится между жидкостью, находящейся в его порах и твердой структурой грунта, которая представляет собой минеральные частицы, окруженные пленкой жидкости и соединенные между собой. Напряжение, возникающее в структуре грунта, вызывает значительное сжатие этой структуры и влияет на его способность сопротивления сдвигу. Размер частиц грунта при фрактальном законе фильтрации также имеет большое значение в том, какой будет напряженно-деформированное состояние грунта. Увеличение максимального размера частиц приводит к более явному влиянию на касательное напряжение. В процессе эксплуатации месторождений углеводородов с течением времени увеличивается эффективное давление, что, в свою очередь,

приводит к уменьшению объема порового пространства и значительному снижению коэффициента пористости. Изменение коэффициента пористости и объема пор, заполненных жидкостью, напрямую влияет на скорость снижения давления. В результате получим фрактальные структуры фильтрации жидкости в грунтах, обладающих свойствами ползучести. Оценка влияния консолидации на фрактальность структуры фильтрации при проходящих в них процессах разветвления пор, связана с решением соответствующих задач. Построение закономерностей влияния консолидации грунтового массива на фрактальность структуры требует получения обобщенной и разрешимой системы уравнения. Однако, естественно, что полученная обобщенная система уравнений и здесь будет математически сложна, как в смысле ее решения, так и анализа. Поэтому необходимо прибегнуть к упрощающим преобразованиям и применить относительно простые численные методы. Если предположим флюид практически несжимаемым, а также выразим функцию напора в линейном виде мы вновь опишем уравнение консолидации с учетом фрактальности. Сделав соответствующие упрощения и придя к обратной задаче для нахождения параметра коэффициента консолидации - C_v необходимо будет решить вспомогательную задачу с известными начальными и конечными данными функций консолидации. Таким образом, с помощью этого коэффициента получим уравнение влияния консолидации на фрактальность закона фильтрации флюида в грунте:

$$H_{i,k+1} = H_{i,k} + \frac{(H_{i,m} - H_{i,m-1})(f_{i+1,k} - 3f_{i,k} + 3f_{i-1,k} - f_{i-2,k})}{(f_{i+1,m-1} - 3f_{i,m-1} + 3f_{i-1,m-1} - f_{i-2,m-1})} \qquad (5)$$

Проведены численные оценки для параметров $k = 0$ и $0 \leq i \leq n$; $H_{i,k} = H_0 = 1$, $k \neq 0$ и $i = 0$ или $i = n$; $H_{i,k} = 0$, $\beta = 0.5$ (фрактальность закона фильтрации), $\Gamma(1-\beta) \approx 1{,}77245, \Delta t = 0.01$, $\Delta x = 0.1$, $k_{max} = m = 20$, $i_{max} = n = 10$. В результате получены характерные графики, из которых следует: В данных условиях начальных и граничных условий, а также закона

консолидации, изменение фрактальности имеет практически нарастающий волнообразный характер с увеличением глубины. Также и резкое, экспоненциальное увеличение абсолютного значения фрактальной функции напора.

Были получены следующие графики (Рисунок 9) изменения фрактальности при данном законе консолидации грунта.

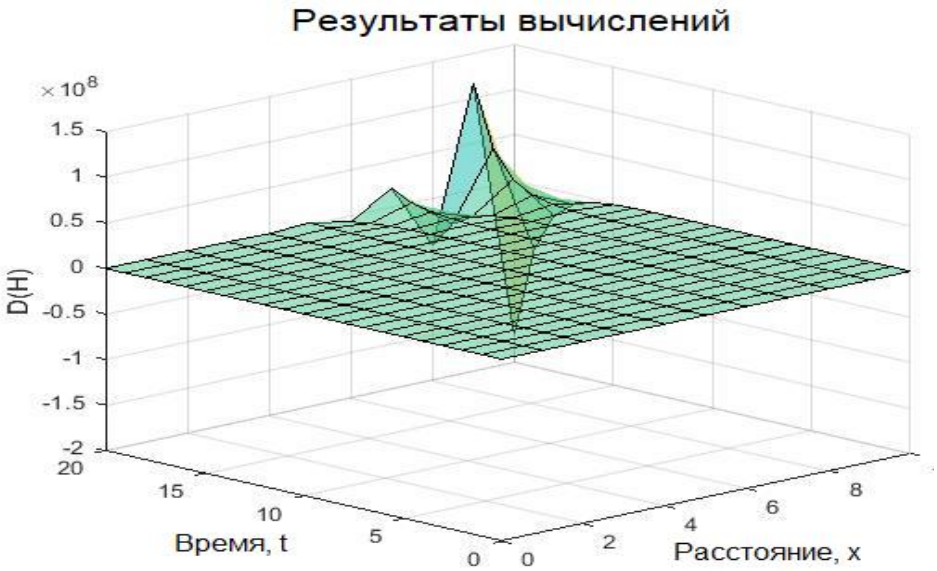


Рисунок 9. *Графики изменения фрактальности по координате и во времени при данном законе консолидации.*

Коэффициент консолидации же спадает со значения ≈0,670677598 в начальной точке, до значения ≈0,425436241 в конечной. Данный спад в данном случае можно грубо аппроксимировать как непрерывную почти прямую спадающую (формулы приблизительных аппроксимаций приведены на Рисунок10). В общем и целом можно сказать, что однородный грунт при данных начальных параметрах и постоянных под действием горного давления будет расширять свою фрактальную структуру.

Хоть и графики показывают неограниченный рост, в реальных грунтах процесс довольно быстро сходит на нет ввиду диссипации энергии, неоднородной слоистой структуры и инородных включений в грунте, упругости, эластичности и

сжимаемости как скелета, так и флюида и еще целый ряд других факторов.

Попытка учесть все факторы в разы усложняет составление и решение задачи. Куда более целесообразным кажется использование эмпирических данных с упрощенными моделями поведения грунта. Далее представляет интерес исследование распространения волны давления в пористой среде в случае нелинейного закона фильтрации. Как известно, капельные жидкости, как например нефть и вода, которые чаще всего встречаются в промысловой и бытовой практике, являются слабожимаемыми веществами.

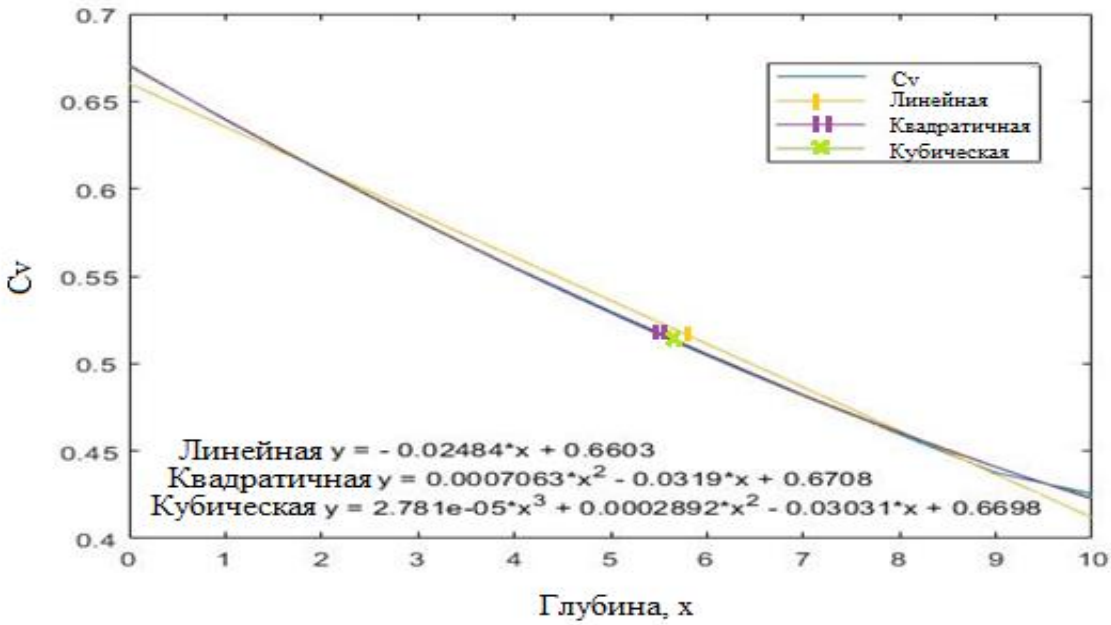


Рисунок 10. *Изменение параметра консолидации по координате x.*

Это значит, что относительное изменение их объема составляет всего доли процента. Однако при высвобождении растворенных во флюиде пузырьков газа, которые могут менять в разы свой объем, являясь как бы маленькими пружинками; а также упругие свойства самой горной породы – все вышеперечисленное вместе могут не пренебрежимо ощутимо влиять на процессы фильтрации жидкости. Допустим, что в одной из точек пласта происходит резкое повышение давления до некоторого значения Δp. Ввиду, как упоминалось ранее,

упругих свойств пласта и инерции; влияние одного объема флюида, подверженного давлению, на еще невозмущенный объем флюида занимает некоторое время. Таким образом, происходит постепенное повышение давления, слой за слоем, которое можно интерпретировать как набегающую волну давления. Попытаемся рассмотреть картину распределения давлений в пласте в процессе распространения этой набегающей волны давления. Проведя данное исследование, ожидаем получить характерные графики. Рассмотрим два случая: 1 - В первом случае допустим, что процесс фильтрации флюида происходит по линейному закону – закону Дарси (Г.Б. Пыхачёв,1973[7]).

$$\frac{\partial(mp)}{\partial t} + div(\rho\upsilon) = 0; \upsilon = \frac{K_f}{\gamma}\frac{\Delta P}{\Delta L} = -\frac{k}{\mu} grad(p) \qquad (6)$$

Это справедливо при малых скоростях течения жидкости, и естественно ни о турбулентностях, и тем более ни о каких кавитационных разрывах в сплошной жидкости речи быть не может. После ряда преобразований придем к дифференциальному уравнению.

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \chi \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}; p(x,0) = 0; p(0,t) = \Delta p; \lim_{x\to\infty} p(x,t) = 0 \qquad (7)$$

Согласно Леонтьеву[8] (2017) такая задача (7) сводится к обыкновенному дифференциальному уравнению, решение которой имеет вид:

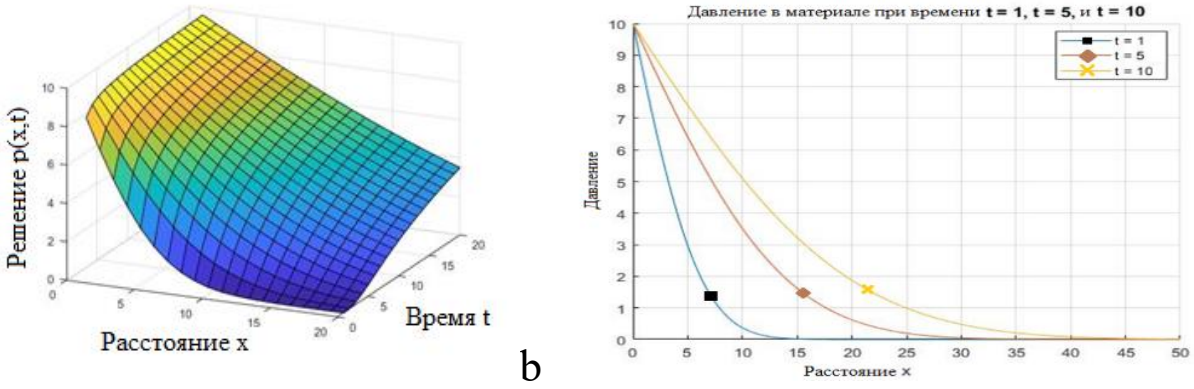
$$p(x,t) = \Delta p\left[1 - erf\left(\frac{x}{2\sqrt{t\chi}}\right)\right] \qquad (8)$$

---

[7] Пыхачев, Г.Б. Подземная Гидравлика / Г.Б.Пыхачев, Р.Г.Исаев. -Москва: Недра, -1973. - 354с.

[8] Леонтьев, Н. Е. Основы теории фильтрации / Н.Е.Леонтьев, -Москва: Макс Пресс, - 2017. - 87 с.

Применяя конкретные числовые данные коэффициентов для доломита и средне вязкой нефти, получим графики распределения давления, где наблюдается медленное повышение давление с течением времени для каждой очередной точки пространства.



a b

Рисунок 11. *Распределение давления по координатам и времени при применении линейного закона фильтрации Дарси. a-трёхмерный вид, b-двумерный вид характера изменения давления.*

Второй случай – теперь же представим нелинейный закон фильтрации в форме нелинейного закона фильтрации Форхгеймера-Дюпюи.

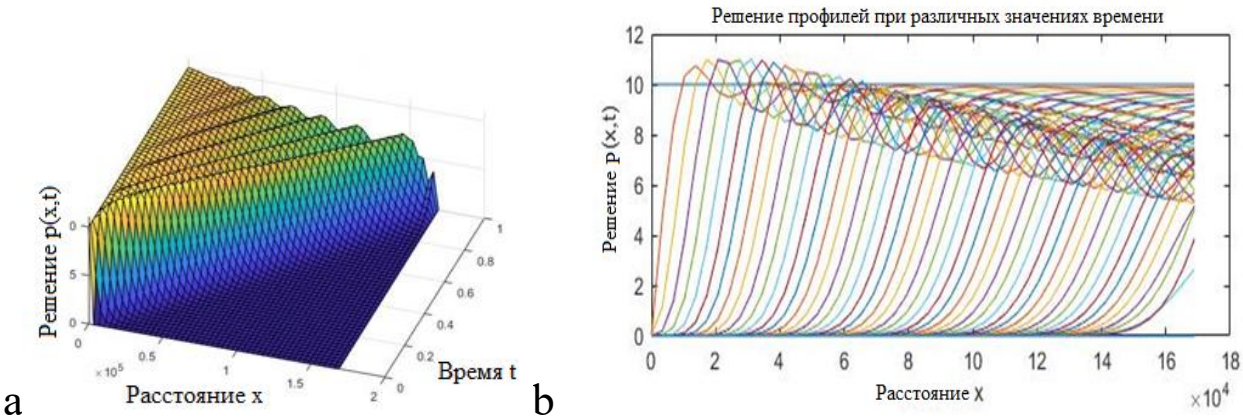
$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = \frac{\mu}{k}\upsilon + \frac{\rho}{k_\rho}\upsilon^2 \tag{9}$$

Также после преобразований, для тех же численных коэффициентов материалов, получим выражение

$$\frac{\partial(m(p)\rho(p))}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\rho(p)\left(-\frac{\mu(p)}{k(p)} \pm \sqrt{\frac{\mu^2(p)}{k^2(p)} + 4\frac{\rho(p)}{k_\rho(p)}grad(p)}\right)}{2\frac{\rho(p)}{k_\rho(p)}}\right) \tag{10}$$

Это выражение описывает несколько отличные графики с явной волнообразной структурой вызванной нелинейностью (Рисунок 12).

Так, здесь давление колеблется с затуханием вокруг значения Δp при этом стремясь к данному значению. При этом увеличение давления в начальной и близлежащих точках происходит с небольшим запаздыванием. И в то же время оно оказывается немного больше истинного значения Δp.



a b

Рисунок 12. *Распределение давления по координатам и времени при применении нелинейного закона фильтрации вида Форхгеймера-Дюпюи. a-трёхмерный вид, b-двумерный вид характера изменения давления.*

И если в первом случае с дистанцией происходит резкое повышение давления до Δp с последующим плавным убыванием до нуля. то во втором случае давление плавно возрастает и колеблясь убывает для данного момента времени t. И чем, в данный момент, дальше находится координата x, тем с меньшей амплитудой, но большим временем затухания будет колебаться значение давления пока оно не достигнет Δp. Далее было исследована неустойчивость вытеснения при гидродинамическом воздействии в пористой среде. Неравновесное состояние при вытеснении более выражено при прорыве нефти водой, нагнетаемой в пористую среду. Например, вытеснение нефти из однородного коллектора с использованием полимерного раствора, вязкость которого практически такая же, как и вязкость вытесняемой нефти, обычно предполагаемое как поршневое вытеснение, может столкнуться с неустойчивостью на определенной стадии,

учитывая адсорбцию полимера на стенах коллектора и ряд других физико-химических процессов. Проявление нестационарных эффектов возможно и в сравнительно макрооднородных нефтенасыщенных пластах. В виду высоких значений вязкостной неустойчивости (соотношениях вязкости нефти и воды) имеют место локальные прорывы закачиваемой воды, что отражается на показателях безводной и текущей нефтеотдачи пласта. В коллекторе при высоких значениях остаточной нефтенасыщенности образуются значительные поверхности раздела между нефтяной и водной фазами. Такая гидродинамическая ситуация может быть использована для реализации нестационарных методов воздействия на пласт в процессе его заводнения. Одним из эффективных методов добычи тяжелых, высоковязких нефтей является воздействие на пласт гидродинамическими методами. Возникает задача управления гидродинамической ситуацией на фронте вытеснения путем создания условий для усиления эффекта вовлечения защемленной в порах нефти в общий поток как за счет уменьшения поверхностного натяжения, так и в результате преодоления капиллярного давления на удалении от источника давления. Согласно работам других авторов с одной стороны с уменьшением скорости фильтрации размер поровых каналов с иммобильной нефтью растет. При этом на фронте вытеснения возникают языки прорыва. Образуются структуры возрастающей сложности, как это происходит с фракталами. С другой стороны с увеличением приложенного давления и скорости фильтрации, все большее число поровых каналов перестает участвовать в вытеснении. Для преодоления капиллярного давления на определенном расстоянии от скважины отмечается необходимость генерировать дополнительное «локальное» давление. В неоднородных пластах эффективность циклического заводнения выше, чем эффективность обычного заводнения. Это обусловлено тем, что в условиях заводнения неоднородного пласта остаточная нефтенасыщенность участков пласта с ухудшенными

коллекторскими свойствами существенно выше, чем нефтенасыщенность основной заводненной части пласта. При повышении давления упругие силы пласта и жидкости способствуют внедрению воды в участки пласта с худшими коллекторскими свойствами, капиллярные же силы удерживают внедрившуюся в пласт воду при последующем снижении пластового давления. Под воздействием перепадов давления происходит перераспределение жидкостей в горизонтальных пластах и внедрение вытесняющей жидкости в поры за счет преодоления капиллярных сил. При решении задачи повышения охвата зон с ухудшенными коллекторскими свойствами, но насыщенных углеводородами, можно полагаться на метод циклического воздействия на пласт.

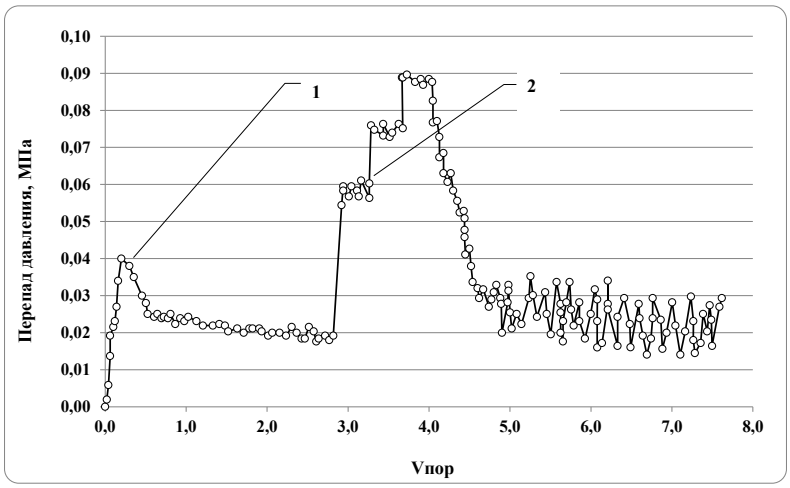


Рисунок 13. *Динамика вытеснения нефти водным раствором кальцинированной соды на различных режимах гидродинамического давления: 1 - режим вытеснения при постоянном давлении нагнетания; 2 - режим вытеснения при нарастающем давлении нагнетания. Во всех случаях вытеснение велось путем непрерывной закачки растворов в количестве 3-х кратного объема пор.*

Таким образом предлагается технологическое решение повышения эффективности процесса охвата вытеснения нефти водой путем создания циклически нарастающего гидродинамического давления, позволяющего преодолевать сопротивление капиллярных сил по простиранию зоны нагнетания.

На рисунке 13 показаны результаты экспериментальных исследований в режимах вытеснения при постоянном давлении нагнетания при циклически нарастающем давлении нагнетания. На рисунке 14 в свою очередь показано изменение степени нефтенасыщенности пористой среды в процессе вытеснения при применении предлагаемого решения в модели пласта.

Для оценки эффекта ускорения внедрения воды в неоднородности на основе аппроксимирующего линейного уравнения с постоянными коэффициентами, полученного из экспериментов на вытеснение водой и водными растворами, и с последующими преобразованиями придем к общему уравнению, связывающему скорость фильтрации и ступенчатая функция параметра давления, которая скачкообразно увеличивается на величину h в промежутке времени t.

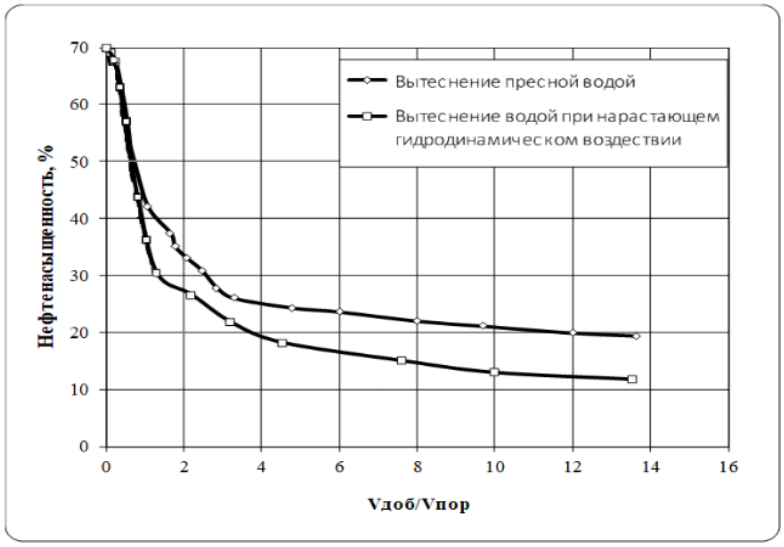


Рисунок 14. *Изменение нефтенасыщенности пористой среды при вытеснении*

Перераспределение давления после закачки с постоянным расходом до следующего цикла имеет вид плоскорадиальной фильтрации. Получить значение давления в любой точке пласта в некоторый произвольный момент времени можно выполнив интегрирование уравнения, которое описывает давление и имеет форму дифференциального параболического уравнения в частных производных. Точное решение такого уравнения напрямую решить весьма сложно. Поэтому можно прибегнуть к методу последовательной смены стационарных состояний. В

результате дискретным образом получим значения давлений для данной координаты при значениях скоростей закачки $4{,}6 \cdot 10^{-7}\,\frac{\text{м}}{\text{с}}$ и $0{,}12 \cdot 10^{-5}$ м/с. Таким образом, расчетный пример дает возможность оценить распределение давления по простиранию пласта на дискретных участках коллектора по мере продвижения фронта вытеснения и, тем самым, временные рамки изменения гидродинамического перепада давления.

Это позволяет определить продолжительность и этапность регулирования давления нагнетания с целью достижения ожидаемого гидродинамического эффекта и, как следствие, увеличения притока нефти к галерее добывающих скважин. Были проведены промысловые экспериментальные исследования. Как показали наблюдения за основными эксплуатационными показателями окружающих (реагирующих) скважин на участке внедрения технологии в целом по всем скважинам наблюдается положительная реакция на гидродинамическое воздействие – по большинству эксплуатационных объектов имеет место повышение, либо стабилизация значений среднесуточного дебита нефти.

Благодарность

Выражаю большую признательность в содействии и помощи сотрудникам кафедры Теоретической механики и механики сплошной среды Бакинского Государственного Университета, отдела «Механика жидкости и газа» Института Математики и Механики, отдела «Современная геодинамика и космическая геодезия» Института Геологии и Геофизики.

Личный вклад автора.

Основные результаты диссертационной работы были получены автором самостоятельно при помощи научного руководителя. Основные научные разработки выполнялись при непосредственном участии автора или с его участием как ответственного исполнителя.

Основные выводы работы

1.Установлена связь между параметрами деформации и упругими свойствами деформируемой среды от различных видов упругих потенциалов.

2.Впервые рассмотрено напряжённо-деформированное состояние грунта при прохождении через него циклических ударных волн.

3.Оценена динамика изменений напряжений и перемещений за фронтом циклических ударных волн распространяющихся в грунтовых средах.

4.Численно оценены перемещения при прохождении волн давления для грунтов с различными свойствами.

5.Даны решения задач консолидации грунтов при фрактальном законе фильтрации и задач фрактальной фильтрации возникающей вследствие консолидирующего воздействия горного давления.

6.Рассмотрена задача распространения волн давления в пористой среде в случае нелинейного закона фильтрации.

7.Оценено влияние волн давления на деформационные и фильтрационные свойства флюидонасыщенных пород.

8.Показаны возможности регулирования неустойчивости вытеснения при нарастающем циклическом гидродинамическом воздействии в пористой среде.

Основные результаты работы опубликованы в следующих публикациях:

1. Sultanov, B.N. Elastic parameters of materials at high and ultrahigh deformations in case of their description by harmonic potential // -Baku: Transactions of ANAS, issue mechanics, ser. of phys.-tech. & math. science. -2019. v.39, issue 7, -p.52-62.

2. Sultanov, B.N. The compare of elastic parameters of materials and their wave propagation velocities at extremely high deformations in the case of harmonic potential in initially strained media // - Baku: Transactions of ANAS, issue mechanics, ser. of phys.-tech. & math. science. -2020. v.40, issue 8, -p. 44-50.

3. Султанов, Б.Н. Сравнение упругих параметров материалов при экстремально высоких деформациях // Республиканская виртуальная научная конференция «Математика, механика и их приложения», посвященная 98-летию Общенационального Лидера Гейдара Алиева, -26-27 мая - 2021, -Баку: -с.185-186.
4. Sultanov, B.N. Pressure wave propagation in a porous medium in the case of a nonlinear filtration law // -Bakı: “Genc Tetqiqadci” Elmi-praktiki jurnal. Fizika-riyaziyyat və texnika elmləri, - 2022. v. VIII, № 1, - s. 6 – 12.
5. Panahov, G.M., Sultanov, B.N.Cyclic shock wave in soil and determination of changes in stresses and displacements // -Baku: Transactions of ANAS, issue mechanics, ser. of phys.-tech. & math. science. - 2022. V. 42, issue 7, - p. 44-52.
6. Sultanov, B.N. Propagation of cyclic shock waves in a soil and determination of changes in displacements / “Funksiyalar nəzəriyyəsi, funksional analiz və onların tətbiqləri”, akademik İbrahim İbiş oğlu İbrahimovun anadan olmasının 110-illiyinə həsr olunmuş Respublika elmi konfransı, - 28-29 noyabr -2022, - s. 463-466.
7. Panahov, G.M., Sultanov, B.N., Sadigova, Z. S. The effect of soil consolidation on the filtration law fractality / 2-nd International conference on Engineering and Applied Natural Sciences, - Konya, Turkey: - 15-18 October, - 2022, – p. 374-375.
8. Panahov, G.M., Abbasov, E.M., Sultanov, B.N. Capillary instability control under hydrodynamic impact on the reservoir / The international conference “Mathematical Analysis and its Applications in Modern Mathematical Physics”, -Samarkand, Uzbekistan: - September 23-24, -2022, - p. 176-178.
9. Panahov, G.M., Sultanov, B.N. Fractal modeling of consolidation under filtration in water saturated soils / “Modern Problems of Mathematics and Mechanics” Proceedings of the İnternational scientific conference devoted to the 110-th Anniv. of academician İbrahim İbrahimov, - Bakı: - 29 June - 1 July, - 2022, - p. 171-172.

10. Panahov, G.M., Museibli, P.T., Sultanov, B.N. Effect of soil consolidation on the fractality of the filtration law // -Poland: International Journal of Applied Mechanics and Engineering. The Journal of University of Zielona Góra. -2023. V. 28, № 1, - p. 84-94.
11. Panahov, G.M., Abbasov, E.M., Sultanov, B.N. Control of capillary instability under hydrodynamic impact on the reservoir // -Poland: "Nafta-Gaz" Monthly Journal of the Oil and Gas Institute, National Research Institute, - 2023. – p. 71-83.
12. Panahov, G.M., Sultanov, B.N. Influence of cyclic shock waves on reservoir structures and formations / "Modern problems of Mathematics and Mechanics" International conference dedicated to the 100-th Anniv. of National Leader Heydar Aliyev, - Baku: - 26-28 Aprel, - 2023, -p. 322-324.

Личный труд соискателя в публикациях, выполненных в соавторстве:

[1], [2], [3], [4], [6] - выполнено самостоятельно.

[9], [12] - постановка задачи, проведение исследований и интерпретация результатов.

[5], [7], [8], [10], [11] - вклад соавторов равноценен.

Подпись соискателя

Защита диссертации состоится “15” Апреля 2024-го года, в 12:00 на заседании Диссертационного совета BED 4.23 действующего на базе Бакинского Государственного Университета.

Адрес: AZ-1148, город. Баку, ул.акад. З. Халилова 23, 301 ауд.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Бакинского Государственного Университета.

Электронная версия диссертации и автореферата размещена на официальном сайте Бакинского Государственного Университета.
(www.bsu.edu.az)

Автореферат разослан по соответствующим адресам

"12" марта 2024-го года.

Подписано в печать: 26.02.2024
Формат бумаги: $60\times84^{1/16}$
Объём: 37474
Тираж: 70