

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе

МФТИ



Баган Виталий
Анатольевич

2023 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию **Петуховой Софии Максимовны**
«Вариации фильтрационных свойств карбонатного коллектора при квазистационарном и
сейсмическом воздействии (по данным ГФО «Михнево»)»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.6.9. Геофизика

Диссертация С.М. Петуховой посвящена исследованию закономерностей реакции флюидонасыщенного коллектора на экзогенное и эндогенное воздействие.

Актуальность темы диссертации обусловлена необходимостью развития объективных непрерывных методов контроля основных параметров массива горных пород. В качестве индикаторов динамического деформирования коллектора рассматриваются гидрогеологические отклики. Для дистанционного мониторинга фильтрационных свойств флюидонасыщенного коллектора применяется «невозмущающий» метод оценки вариаций проницаемости по фазовым характеристикам системы «пласт-скважина». Комплексный анализ реакции флюидонасыщенного коллектора на квазистационарные факторы (атмосферное давление и земные приливы) и эпизодическое воздействие (удаленные катастрофические землетрясения) направлен на выявление возможных структурных изменений.

Цель диссертационной работы заключается в выделении основных закономерностей вариаций динамических параметров коллектора под влиянием атмосферного давления, земных приливов и при прохождении сейсмических волн от

удаленных землетрясений, которые использованы для разработки модели реакции коллектора на экзогенное и эндогенное воздействие.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

- Достоверном определении влияния на фильтрационные свойства карбонатных коллекторов, расположенных на небольших глубинах, в слабонапорных и напорных условиях на изменение атмосферного давления, земных приливов и сейсмические волны;

- Достоверном определении косейсмического и постсейсмического влияния на поровое давление напорного карбонатного коллектора сейсмических волн;

Теоретическая значимость работы заключается в определении закономерностей реакции флюидонасыщенного коллектора квазистационарные факторы (атмосферное давление, земные приливы) и эпизодическое сейсмическое воздействие с учетом различий структурных и фильтрационных параметров пород.

Практическая значимость диссертации заключается в определении закономерностей влияния распространяющихся волн в коллекторах на фильтрационные свойства, что может объяснить механизмы повышения нефтеотдачи пластов при звуковом воздействии, а также выбрать месторождения, на которых возможна подобная стимуляция дебета скважин.

Обоснованность и достоверность полученных результатов обеспечивается применением актуальных измерительных методик, стандартных методов обработки экспериментальных данных, используемых в процессе работы с большим массивом натуральных измерений, выполненных в пределах геофизической обсерватории «Михнево» в течении многолетнего периода наблюдений, сопоставлением полученных результатов с опубликованными данными, полученными в разных регионах.

Содержание диссертации определено целью и основными задачами. Диссертация С.М. Петуховой состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения.

Во введении обоснована актуальность работы, обозначен объект исследования, поставлены цель и задачи исследования. Автором отмечены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. Представлены положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен обзор научных работ, содержащих результаты исследований гидрогеологических откликов, зарегистрированных при разных видах динамического воздействия. Выполнен сравнительный анализ проницаемости разных типов коллекторов порового и трещинно-порового типов, определенных различными методами в вмещающем массиве и в зонах разломов. Рассмотрены режимы

деформирования флюидонасыщенных коллекторов при квазистационарном и сейсмическом воздействии. В соответствии с теорией пороупругости в недренлируемых условиях изменения атмосферного давления вызывают вариации порового давления флюидонасыщенного коллектора, которые регистрируются в виде изменений уровня подземных вод. Для характеристики приливного воздействия на коллектор определяются фазовые соотношения между приливными компонентами, выделенными в вариациях смещения, объемной деформации и уровне подземных вод. Изменение фильтрационных свойств флюидонасыщенных коллекторов при сейсмическом воздействии может быть обусловлено рядом механизмов, различных для ближней и дальней зоны землетрясений.

Во второй главе представлена методика обработки экспериментальных данных. На основе имеющегося аппаратно-измерительного комплекса измерений, стандартных методов обработки создан программный комплекс оценки фильтрационных свойств карбонатного коллектора по данным прецизионного гидрогеологического мониторинга. В его составе представлена методика оценки барометрической и приливной чувствительности флюидонасыщенного коллектора. Приливной анализ выполнен по полусуточной волне лунного типа M_2 , которая наиболее устойчиво проявляется в амплитудных спектрах уровня подземных вод и смещения грунта.

В третьей главе приводятся результаты исследования режима деформирования флюидонасыщенного коллектора, представлены результаты оценки фильтрационных параметров коллектора. Сделан вывод о различии свойств слабонапорного и напорного коллекторов. Представлены результаты исследования влияния квазистационарных и эпизодических факторов на флюидонасыщенный коллектор, полученные по данным высокоточного мониторинга уровня подземных вод за период с 2010 по 2023 гг. На основе приливного анализа выполнена оценка проницаемости и водопроницаемости карбонатного коллектора. За период наблюдений было зарегистрировано порядка ста гидрогеологических откликов, вызванных прохождением сейсмических волн от удаленных землетрясений. Установлено различие в реакции карбонатного коллектора в напорных и слабонапорных условиях на прохождение сейсмических волн от удаленных землетрясений. Определено максимальное значение скорости смещения грунта, принятое за пороговый уровень сейсмического воздействия, при котором прослежены постсейсмические эффекты, свидетельствующие о неупругом деформировании карбонатного слаботрещиноватого коллектора. Выполнен сравнительный анализ реакции коллектора в напорных и слабонапорных условиях на прохождение атмосферного фронта от катастрофического извержения вулкана Тонга.

В четвертой главе представлены результаты изучения основных закономерностей динамики деформирования флюидонасыщенного коллектора по экспериментальным данным, полученным на территории геофизической обсерватории «Михнево». Выполнена оценка относительной деформации карбонатного коллектора под влиянием квазистационарного фактора - земным приливом. Определены диапазоны относительной деформации, при которых выделены различные гидрогеологические отклики в виде осцилляции порового давления, косейсмических и постсейсмических эффектов. Постсейсмические эффекты установлены в напорных условиях при шести землетрясениях. Для данных землетрясений по модели пороупругой реакции выполнено моделирование откликов порового давления при прохождении объемных и поверхностных волн. Предложена новая модель реакции карбонатного коллектора на квазистационарное и сейсмическое воздействие, которая в совокупности с представленной блок-диаграммой механизмов гидрогеологических эффектов, может быть использована для оценки возможных изменений фильтрационных свойств флюидонасыщенного коллектора.

В Заключении представлены основные результаты диссертационной работы.

По содержанию диссертации имеется **ряд вопросов и замечаний**:

- 1 Остаются вопросы к теоретическим зависимостям, использованным для анализа, в частности:
 - 1.1 В выражении (2.17) не расшифрованы отдельные величины (вероятно, присутствует опечатка в определении величины N);
 - 1.2 Не указаны законы изменения коэффициента нарушенности;
 - 1.3 Не ясно, как определена девиаторная часть деформации по полученным данным;
 - 1.4 Не показано, каким образом и при каких предположениях из выражения (2.17) следует выражение (2.18), также отсутствуют ссылки на литературу, где можно было бы это уточнить;
 - 1.5 Отсутствует вывод или ссылка на литературу, где можно было бы уточнить неочевидное выражение (4.6);
 - 1.6 Остается неясным вопрос осреднения параметров по циклу при умножении на n в выражении (4.8), а именно какая средняя амплитуда колебаний деформаций или напряжений применялись для оценок накопленной необратимой деформации при циклическом деформировании с изменяющейся амплитудой в циклах;
 - 1.7 Вызывает вопросы учет или неучет необратимых деформаций и упрочнения среды по мере их накопления;
 - 1.8 Математическая модель также требует уточнения в области изменения ее параметров при неупругом деформировании: каким образом меняются такие параметры как

коэффициент нарушенности и скорость волн при циклических сейсмических воздействиях?

2. На рисунках 3.9 и 3.10 диссертации показано, что косвенно определенная проницаемость карбонатных пластов изменяется на два порядка за время порядка шести месяцев. В диссертации не указаны причины подобного значительного изменения параметра. Также отсутствует анализ применимости разработанной методики для определения проницаемости, анализ характерной погрешности, что затрудняет оценку достоверности полученных результатов;

3. На стр. 66 диссертации присутствует некорректное цитирование работы (Гасеми, Баюк, 2020): в работе указаны не те значения фильтрационных свойств породы, что в тексте диссертации; представляется некорректным сравнение оценок, представленных в тексте диссертации, с оценками из статьи (Гасеми, Баюк, 2020) с учетом различий в составе, внутренней структуре и условиях залегания исследуемых пород.

4. На стр. 12 текста диссертации приведено сильное утверждение, не подкрепленное достаточно строгим доказательством: «Проницаемость (k) определяется только геометрией пустотного пространства». На той же странице некорректно указано, что в таблице 1 градиент напора должен быть равен единице;

5. В качестве модели влияния давления, твердых приливов и сейсмического воздействия в диссертации приводится некоторая блок-схема влияния эффектов, изображенная на рисунке 4.17. Однако математические соотношения, характеризующие модель, распределены по трем главам диссертации, чем сильно затруднено последующее применение модели специалистами для своих задач. Было бы корректно по отношению к читателям описать модель на нескольких последовательных страницах;

6. В диссертации отсутствует описание приближений и ограничений, в рамках которых соискателем разработана модель влияния на карбонатные коллектора внешних факторов.

7. Имеются также небольшие замечания по оформлению иллюстраций, например,

7.1 часть иллюстраций в главе 1 приведена на английском языке. Следовало бы выполнить перевод всех подписей (рис. 1.8–1.12);

7.2 на рисунке 3.28 в главе 3 не совсем ясно, к чему относятся подписи 10^{-8} , 10^{-7} , 10^{-6} ; если к плотности сейсмической энергии, то шкала практически не видна.

Приведенные замечания не снижают значимости полученных результатов и не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы С.М. Петуховой.

Основные результаты диссертации опубликованы в 10 научных работах, в том числе 5 научных статьях в рецензируемых журналах, включенных ВАК в перечень периодических изданий, в которых необходимо публиковать результаты диссертационных исследований

(включая 3 статьи в журналах, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus).

Результаты исследования прошли апробацию на всероссийских и международных научных конференциях, научных семинарах. Имеется Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023680306 от 28.09.2023 г.

Автореферат полностью и точно отражает основное содержание диссертации.

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.6.9. Геофизика, а именно пунктам:

П.8 Взаимодействие геосфер, деформационных и геофизических полей. Геофизические проявления напряженно-деформированного состояния недр и оценка напряженно-деформированного состояния оболочек Земли по геофизическим данным. Временная эволюция геофизических характеристик земных недр. Изучение процессов взаимодействия геофизических полей разной природы в земных недрах и их влияние на физические характеристики геологического вещества;

П.12 Математическое моделирование и мониторинг геодинамических процессов различных пространственных и временных масштабов. Моделирование блочно-иерархических, самоподобных, пористых, флюидонасыщенных сред. Математическое моделирование эффективных физических свойств горных пород. Развитие методов теории эффективных сред для определения эффективных физических свойств горных пород. Экспериментальные и теоретические исследования процедур осреднения геофизических полей и физических характеристик таких сред;

П.16 Методы обработки и интерпретации результатов измерений геофизических полей;

П.17 Компьютерные системы обработки, численной инверсии и комплексной интерпретации геолого-геофизических данных, включая ГИС-технологии.

Заключение: Диссертационная работа Петуховой Софии Максимовны «Вариации фильтрационных свойств карбонатного коллектора при квазистационарном и сейсмическом воздействии (по данным ГФО «Михнево»)» является завершенной научно-квалификационной работой, которая содержит научно обоснованную разработку оценки вариаций фильтрационных свойств флюидонасыщенного коллектора под влиянием земных приливов.

Диссертация удовлетворяет требованиям ВАК России, предъявляемым к кандидатским диссертациям, и соответствует критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней (утверждено Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г.), а соискатель Петухова София Максимовна заслуживает

присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности
1.6.9. Геофизика.

Отзыв на диссертацию обсуждён и одобрен на заседании кафедры прикладной
механики МФТИ, Физтех «22» декабря 2023 г., протокол № 3.

Зав. каф. прикладной
механики МФТИ, Физтех
канд. техн. наук, доцент



Сергей Серафимович Негодяев

26.12.2023

Почтовый адрес: 141700, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер.,9

Телефон: +7 (495) 408-76-09

Адрес электронной почты: negodiaev.ss@mipt.ru

Организация – место работы: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», Физтех-Школа аэрокосмических технологий

Должность: Директор

Web-сайт организации: <https://mipt.ru>