

АННОТАЦИЯ

диссертационной работы,
представленной на соискание степени доктора философии (Ph.D.)
по специальности 6D070800 – Нефтегазовое дело
Акашевой Жибек Кайратовны

«Исследование течения жидкости в пористой среде на основе поромасштабного моделирования»

Основное содержание работы. Настоящая работа посвящена определению характеристик пористой среды и течения жидкости в пористой среде в масштабе пор с помощью поромасштабного моделирования на основе цифровых моделей керна, построенных с использованием микрокомпьютерной томографии (μ -КТ), а также определению зависимости абсолютной проницаемости от других характеристик пористой среды для образцов карбонатного керна.

Оценка современного состояния решаемой научной или научно-технологической проблемы (задачи). В настоящее время по всему миру повышенный интерес исследователей вызывает процесс фильтрации жидкости в пористой среде, так как фильтрационные течения жидкости в пористой среде широко распространены в природе и технике. За рубежом динамично развивается такое направление, как цифровая физика горных пород (digital rock physics), которое позволяет определить характеристики горных пород и прогнозировать характеристики течения жидкости в масштабе пор. Распространены 2 подхода: прямое численное моделирование (direct numerical simulation) и поросетевое моделирование (pore-network modeling). Однако, на территории Казахстана в данный момент времени для определения характеристик пористой среды в основном используют стандартные лабораторные исследования, хотя они являются трудоемкими и ресурсоемкими по времени и финансовым затратам. Большое количество работ посвящено актуальным проблемам механики жидкости и газа во всем мире, в тоже время исследования в области поромасштабного моделирования течения жидкости в пористой среде в масштабе пор является новым направлением для исследований в Республике Казахстан.

Для неразрушающего исследования структуры пористой среды возможно применение μ -КТ. В Казахстане рентгеновская томография, с помощью которой возможно изучение образцов керна имеется только в лаборатории ТОО «КазНИПИМунайгаз», г. Актау. Разрешение рентгеновской томографии в данной лаборатории не позволяет проводить качественные исследования в масштабе пор. Таким образом, рентгеновская томография имеет ограниченное применение и ограниченный круг использования в Казахстане.

Изучение изменения поровой структуры из-за кислотной обработки пород является актуальной задачей в контексте интенсификации добычи

углеводородов из карбонатных пластов и закачки CO_2 в водоносные горизонты для последующего хранения. Требуются исследования в целях достижения максимального прироста абсолютной проницаемости при маленьких объемах закачки кислоты в нефтеносные пласты для повышения нефтеотдачи. Закономерности зависимостей характеристик пористой среды для карбонатных пород могут применяться для гидродинамического моделирования нефтяными и нефтесервисными компаниями, а также для проведения оценки геологических запасов нефти и газа Департаментом по разработке и добычи нефти Министерства РК.

Основание и исходные данные для разработки темы. Традиционно характеристики пористой среды и течения жидкости определяются экспериментальными методами на специальном лабораторном оборудовании, однако это требует значительных временных (до 3-5 месяцев) и финансовых ресурсов. Неточность измерительных приборов, неправильные условия эксперимента, неправильная обработка данных, а также случайные и человеческие ошибки при проведении лабораторных экспериментов могут привести к некорректным результатам. Использование компьютерного моделирования позволит сократить количество затрачиваемых временных ресурсов, вместе с тем, моделирование является менее дорогостоящим и ресурсоемким способом.

Имеется большое количество исследований, посвященных зависимости проницаемости от других характеристик пористой среды, однако они не всегда применимы для карбонатных пород, так как рассчитаны для идеальных пористых сред.

В Казахстане оборудование для μ -КТ имеется только в лаборатории г. Актау, но на момент проведения стадии экспериментов, оно вышло из строя. Был проведен один эксперимент с использованием медицинской томографии (разрешение 625 микрон) до и после кислотной обработки образцов керна соляной кислотой. Поскольку ее разрешение является грубым, полученные данные не позволили увидеть поровую структуру в 3D и провести поромасштабное моделирование для определения характеристик пористой среды и течения жидкости, а также выявления закономерностей зависимости абсолютной проницаемости от других характеристик пористой среды. Именно поэтому, было принято решение проводить μ -КТ за рубежом в лаборатории рентгеновской томографии в Казанском Федеральном Университете.

В данной работе были просканированы 8 образцов карбонатного керна с помощью μ -КТ для построения цифровой модели и проведения поромасштабного моделирования в масштабе пор. Было исследовано изменение характеристик пористой среды и течения жидкости после кислотной обработки образцов карбонатного керна соляной кислотой и изучена зависимость абсолютной проницаемости от других характеристик пористой среды.

Обоснование необходимости проведения данной научно-исследовательской работы. В Республике Казахстан большая часть

трудноизвлекаемых запасов сосредоточена на месторождениях с карбонатными коллекторами. Для улучшения такого метода повышения нефтеотдачи как кислотная обработка призабойной зоны скважины, необходимо исследовать воздействие кислотных растворов на карбонатные породы (скорость закачки и концентрация кислоты) для достижения наивысшего коэффициента нефтеотдачи. Существует необходимость в выявлении зависимости абсолютной проницаемости от других характеристик пористой среды именно для карбонатных пород. Имеющиеся зависимости абсолютной проницаемости от пористости были определены для идеальных пористых сред, что исключает получение достоверных результатов для образцов реальных карбонатных пород. Исследование течения жидкости в пористой среде в масштабе пор с помощью поромасштабного моделирования позволяет извлекать характеристики пористой среды (абсолютная проницаемость, пористость, удельная поверхность, гидравлическая извилистость, радиус пор, радиус горловин пор, координационное число) и течения жидкости (относительные фазовые проницаемости).

В настоящее время в целях детального изучения пористой структуры породы в 3D для выполнения расчетов по определению характеристик горных пород пользуется популярностью рентгеновская μ -КТ. Одним из преимуществ μ -КТ является способность визуализации динамических процессов внутри пористой среды путем записи изображений образца в разные моменты времени. Данный подход является неразрушающим для горных пород и в тоже время относительно недорогим. Посредством поромасштабного моделирования определяются макроскопические характеристики образцов, которые впоследствии могут быть применены для анализа скважин или месторождения. Кроме того, появляется возможность проведения многократного моделирования процессов течения жидкости на одном образце горной породы (например, полимерное заводнение, кислотная обработка, закачка поверхностно-активных веществ и т.д.), что имеет стратегическое значение для эффективного использования природных ресурсов нефти и газа.

Применение μ -КТ позволит нефтяным и нефтесервисным компаниям сформировать цифровую базу образцов кернов, что значительно облегчит процесс доступа для последующей работы. Важно отметить, что моделирование на цифровых моделях образцов керна, полученных с помощью μ -КТ, проводится впервые в Казахстане.

Таким образом, в настоящее время в Республике Казахстан и во всем мире необходимы исследования течения жидкости в пористой среде именно в масштабе пор для оптимизации процессов, происходящих в пористой среде. Другими словами, необходим поиск альтернативного метода определения характеристик пористой среды и течения жидкости, который будет достоверным, и в тоже время эффективным с точки зрения затрат времени, финансов и ресурсов.

Сведения о планируемом научно-техническом уровне разработки. Научные результаты, полученные в рамках выполнения данной диссертации,

позволят определять характеристики пористой среды и течения жидкости на основе поромасштабного моделирования без проведения ресурсоемких лабораторных экспериментов. Будут установлены закономерности зависимости абсолютной проницаемости от других характеристик пористой среды для карбонатной породы.

Патентные исследования и выводы из них. В рамках выполнения данной диссертации планируется получение авторского свидетельства на альтернативный метод определения характеристики образца карбонатного керна.

Сведения о метрологическом обеспечении диссертации. Лабораторные исследования проводились на современном оборудовании лаборатории «Рентгеновская микрокомпьютерная томография» Казанского Федерального Университета, г. Казань. Оборудование проходит ежегодную поверку и калибровку.

Актуальность. Абсолютная и относительные фазовые проницаемости играют важную роль при разработке нефтегазовых месторождений, закачке CO_2 в пласты с целью дальнейшего хранения, а также миграции загрязнителей в подземных водоносных слоях. Имеется необходимость в конкретных зависимостях между абсолютной проницаемостью и другими свойствами образцов. Широко используемым соотношением является уравнение Козени-Кармана, которое связывает абсолютную проницаемость с пористостью, удельной поверхностью пор и гидравлической извилистостью. Однако, уравнение Козени-Кармана предсказывает некорректные значения абсолютной проницаемости для большинства образцов реальных горных пород, поскольку было получено эмпирически для идеализированной пористой среды из одинаковых капиллярных трубок, и поэтому имеется необходимость в исследовании зависимости абсолютной проницаемости от других свойств, которая будет применима для широкого диапазона образцов.

Изменение микроструктуры образцов горных пород может оказывать сильное влияние на совместное течение жидкостей в поровом пространстве. В условиях постоянного развития нефтегазодобычи и потребности в эффективных методах улавливания и хранения CO_2 , изучение поровой структуры карбонатных образцов при взаимодействии с кислотными растворами становится особенно актуальным. Карбонатные породы не только являются неотъемлемой частью нефтяной индустрии, но и могут способствовать экологической устойчивости за счет улавливания и хранения углекислого газа в них.

Научная новизна диссертации заключается в установлении закономерности влияния кислотной обработки карбонатных образцов на характеристики течения одно- и двухфазной жидкости с помощью рентгеновской томографии и поромасштабного моделирования. Аналогов подобных исследований в Казахстане не имеется.

Связь данной работы с другими научно-исследовательскими работами. Данная диссертация выполнена в рамках научных проектов

«Исследование влияния режимов растворения образцов карбонатного керна на характеристики течения двухфазной жидкости сквозь него в масштабе пор» от Министерства образования и науки Республики Казахстан по приоритету «Рациональное использование природных ресурсов, в том числе водных ресурсов, геология, новые материалы и технология, безопасные изделия и конструкции», по подприоритету «Геология и разработка месторождений полезных ископаемых» ИРН №АР08052055 (2020-2022) и «Прогнозирование характеристик пористой среды с учетом режимов растворения породы в масштабе пор на основе машинного обучения» от Министерства образования и науки Республики Казахстан по приоритету «Геология, добыча и переработка минерального и углеводородного сырья, новые материалы, технология, безопасные изделия и конструкции», по подприоритету «Геология и разработка месторождений полезных ископаемых», ИРН №АР09058419 (2021-2023).

Целью диссертации является изучение влияния изменения поровой структуры карбонатных образцов из-за взаимодействия с кислотными растворами на характеристики течения одно- и двухфазной жидкости, а также влияние на геометрические параметры образцов.

Предметом исследования данной диссертации являются характеристики течения одно- и двухфазной жидкости в пористых средах и геометрические параметры образцов.

Объектом исследования данной диссертации являются образцы карбонатного керна.

Задачи исследования:

1. Провести обзор и анализ современного состояния изучаемой тематики в мире и Казахстане;
2. Провести моделирование течения одно- и двухфазной жидкостей в идеализированных пористых средах;
3. Разработать процедуру проведения лабораторных экспериментов и провести серию экспериментов по закачке кислотных растворов в образцы карбонатного керна и их сканирование с помощью рентгеновского томографа до и после кислотной обработки;
4. Провести статистическую реконструкцию изображений образцов до и после кислотной обработки, а также создать их 3D цифровые модели;
5. Провести расчет характеристик образцов на основе статистической реконструкции изображений;
6. Провести расчет абсолютной проницаемости и гидравлической извилистости с использованием поромасштабного моделирования;
7. Провести расчет относительных фазовых проницаемостей при течении двухфазной жидкости с использованием поромасштабного моделирования.

Научная гипотеза. Цель по замене физических экспериментов для определения характеристик течения жидкости и пористой среды при помощи поромасштабного моделирования будет достигнута, если при помощи μ -КТ и

поромасштабного моделирования будут определены с достаточной точностью такие характеристики течения жидкости и пористой среды как: абсолютная проницаемость, пористость, распределение пор по размерам, радиус пор, гидравлическая извилистость, удельная поверхность, относительная фазовая проницаемость.

Практическая значимость работы заключается определении зависимости абсолютной проницаемости от других характеристик пористой среды для карбонатных пород, так как многие имеющиеся зависимости были получены для идеальных пористых сред, а не на основе использования образцов реального керна. Альтернативный метод определения характеристик пористой среды и течения жидкости позволит хотя бы частично заменить проведение временнозатратных и ресурсоемких физических экспериментов с использованием специального лабораторного оборудования. Полученные зависимости абсолютной проницаемости от других характеристик пористой среды для карбонатных пород возможно использовать при прогнозировании разработки и добычи нефти с месторождений с карбонатными породами.

Место задач в выполнении научно-исследовательской работы или экспериментально-исследовательской работы в целом. В ходе выполнения исследования будет проведен обзор и анализ современного состояния изучаемой тематики в мире и Казахстане, будет проведено моделирование течения одно- и двухфазной жидкостей в идеализированных пористых средах, будет разработана процедура проведения лабораторных экспериментов, а также будут проведены эксперименты по закачке кислотных растворов в образцы карбонатного керна, будет проведено сканирование с помощью рентгеновского томографа, будет проведена статистическая реконструкция изображений образцов карбонатного керна до и после кислотной обработки, будут созданы их 3D цифровые модели; будут проведены следующие расчеты: расчет характеристик образцов на основе статистической реконструкции изображений, расчет абсолютной проницаемости и гидравлической извилистости, относительных фазовых проницаемостей при течении двухфазной жидкости.

Методологическая база. В рамках данной диссертации для достижения поставленных целей использовались: инструмент моделирования течения одно- и двухфазной жидкостей OpenFoam®; методы/методологии проведения физических экспериментов на образцах карбонатного керна; статистическая реконструкция образцов на основе их томографических снимков; инструменты моделирования течения одно- и двухфазной жидкости Avizo® и PnFlow®; аналитические методы. Таким образом, методы, используемые в рамках диссертации, являются описательными и экспериментальными.

Положения, выносимые на защиту:

1. Наибольший прирост абсолютной проницаемости образцов карбонатного керна достигается при закачке 18% раствора соляной кислоты при скоростях 4 и 8 мл/мин с минимальным расходом раствора;

2. Связь связанной и общей пористостей образцов карбонатного керна подчиняется параболическому закону;

3. Кислотная обработка образцов карбонатного керна изменяет зависимость между абсолютной проницаемостью и пористостью, при этом степенной показатель значительно превышает значение данного показателя в уравнении Козени-Кармана;

4. С увеличением прироста абсолютной проницаемости образцов карбонатного керна снижается остаточная насыщенность нефти.

Личный вклад автора заключается в проведении обзора и анализа литературы по теме диссертационной работы, постановке темы и определении задач для достижения цели, проведении численного моделирования, проведении сканирования μ -КТ, проведении экспериментальных исследований, проведении поромасштабного моделирования, обработке и анализе полученных результатов, интерпретации полученных результатов.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались и обсуждались на международных конференциях:

- Международная научно-практическая конференция «Сатпаевские чтения – 2019», (г. Алматы, Казахстан, 2019);

- 2-я международная научная конференция «Альтернативные источники энергии, материалы и технологии» (AESMT'19), (г. София, Болгария, 2019);

- 7-я международная конференция «Наноматериалы и передовые системы хранения энергии» (INESS-2019), (г. Алматы, Казахстан, 2019);

- Международная научно-практическая конференция «Сатпаевские чтения – 2020», (г. Алматы, Казахстан, 2020);

- Международная научно-практическая конференция «Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании» (CITech-2020), (г. Алматы, Казахстан, 2020);

- Виртуальная ежегодная Каспийская техническая конференция SPE 2020 (онлайн, 2020).

Публикации. Основные результаты исследования изложены в 1 статье в международных, рецензируемых журналах, входящих в базу данных Scopus/Web of Science, 5 статьях в изданиях из перечня, утвержденных Комитетом по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования Республики Казахстан, 6 докладах на международных научно-практических конференциях, 6 статьях в других научных журналах, 1 авторском свидетельстве и 1 монографии.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка использованных источников, содержащего 185 наименований, и 5 приложений. Работа изложена на 98 страницах текста, содержит 46 рисунков и 18 таблиц в основной части, а также 26 рисунков и 1 таблицу в приложении.

Основные заключения данной диссертационной работы. Была проанализирована зарубежная и отечественная научная литература в области

применения поромасштабного моделирования для исследования характеристик течения жидкости и пористой среды.

Были проведены физические эксперименты на восьми образцах карбонатного керна по закачке кислотных растворов, которые были просканированы до и после кислотной обработки породы с помощью микрокомпьютерной томографии для построения цифровых моделей образцов керна. По построенным цифровым моделям образцов карбонатного керна были определены характеристики пористой среды и течения жидкости до и после проведения кислотной обработки.

Была определена закономерность зависимости абсолютной проницаемости от других характеристик пористой среды до и после кислотной обработки для образцов карбонатного керна. Выявлено, что до и после закачки HCl, абсолютная проницаемость k однородного и неоднородного образцов имеет хорошую корреляцию с пористостями и средним радиусом пор. Это имеет важное преимущество, так как средний радиус пор и пористость среды сравнительно легко определяются.

Было показано, что рассчитанные гидравлические извилистости τ плохо коррелируют с извилистостями, полученными с использованием существующих эмпирических моделей, оставаясь практически постоянными по пористости до и после кислотной обработки породы. Средние значения гидравлической извилистости для однородного и неоднородного образцов составили $\sim 1,9$, а для трещиноватого образца $\sim 1,8$.

Взаимосвязь между абсолютной проницаемостью k , гидравлической извилистостью τ и удельной поверхностью S описывается степенными законами $k \sim \tau^{-\alpha}$ и $k \sim S^{-\beta}$, где $\alpha = 7 - 42$ и $\beta = 5 - 18$, которые намного превышают эти показатели в уравнении Козени-Кармана ($\alpha = \beta = 2$). Сравнительно высокие значения α по сравнению с β указывают на то, что гидравлическая извилистость τ оказывает большее влияние по сравнению с удельной поверхностью S при оценке абсолютной проницаемости.

Как показали результаты, взаимосвязь между связанной и общей пористостями более достоверно описывается параболическим уравнением $\phi_{con} = a\phi^2 + b\phi + c$ до и после кислотной обработки. Было показано, что в результате кислотной обработки породы, увеличивается связанность пор между собой для однородного и неоднородного образцов, что видно из уменьшения перколяционного порога пористости.

Результаты показали интенсивное уменьшение количества более мелких пор и увеличение количества более крупных пор в результате кислотной обработки породы у всех под-образцов. Кроме этого, наблюдается расширение диапазона распределения радиуса пор в сторону увеличения пор из-за кислотной обработки породы, что означает образование новых крупных пор, хотя практически не появились новые мелкие поры. Рост среднего радиуса пор составил от 6,5 до 17% для образца 7 и от 6,6 до 9% для образца 10.

Рост пористости и абсолютной проницаемости, в среднем выше у под-образцов образца 10 (24%; 201%) при закачке 18% раствора соляной кислоты

на скорости 2 мл/мин, чем у под-образцов образца 7 (13%; 127%) при закачке 12% раствора соляной кислоты на скорости 8 мл/мин, хотя средние начальные пористость и абсолютная проницаемость по под-образцам от 10-1 до 10-5 существенно меньше, чем по под-образцам от 7-1 до 7-5. Приросты пористости и абсолютной проницаемости у под-образцов образца 7 составили 1-33% и 44-331%, соответственно, тогда как эти показатели для под-образцов образца 10 составили, соответственно, 18-30% и 114-368%.

Наблюдается влияние концентрации соляной кислоты в растворе и скорости закачки раствора в образцы на относительную фазовую проницаемость. Так, относительные фазовые проницаемости у под-образцов 7-2 и 7-3, которые отличаются небольшими приростами в пористости и абсолютной проницаемости, существенно увеличились в результате кислотной обработки породы. У под-образца 7-3 произошло изменение смачиваемости от водосмачиваемого к смешанному, что характеризуется сильным увеличением относительной фазовой проницаемости воды после кислотной обработки. Увеличились относительные фазовые проницаемости нефти у всех под-образцов образца 10, в который был закачан более концентрированный раствор соляной кислоты при низкой скорости.

У большинства под-образцов остаточная насыщенность нефти уменьшилась от 20 до 46% в результате кислотной обработки, тогда как у некоторых она увеличилась (на 7-17%). Остаточная насыщенность воды для всех под-образцов уменьшилась на 25-60%. Наблюдается явное влияние роста абсолютной проницаемости на остаточные насыщенности нефти и воды – с увеличением прироста абсолютной проницаемости интенсивно уменьшается остаточная насыщенность.

Краткие выводы по результатам диссертационных исследований.

– Кислотная обработка породы значительно изменила распределение пор по размерам.

– Наличие естественных трещин заметно влияет на зависимость абсолютной проницаемости от других характеристик образцов. Взаимосвязь между абсолютной проницаемостью, гидравлической извилистостью и удельной поверхностью описывается степенными законами. Построенная закономерность между связанной и общей пористостями позволила найти перколяционный порог пористости.

– В результате кислотной обработки породы, значительно изменились остаточные насыщенности нефти и воды.

– Предложенный альтернативный метод определения характеристик течения одно- и двухфазной жидкостей позволяет получить достоверные результаты.

– Применение микрокомпьютерной томографии эффективно при построении цифровых моделей образцов карбонатного керна в целях дальнейшего поромасштабного моделирования и определения характеристик пористой среды без применения специализированного лабораторного оборудования.

– Найденные зависимости абсолютной проницаемости от других характеристик пористой среды могут быть успешно использованы при расчетах захоронения CO₂, гидродинамическом моделировании месторождений с карбонатными породами.

Оценка полноты решений поставленных задач. Поставленные задачи были выполнены полностью.

Рекомендации и исходные данные по конкретному использованию результатов. Зависимость абсолютной проницаемости от других характеристик пористой среды для карбонатных пород может применяться для гидродинамического моделирования нефтяными и нефтесервисными компаниями, а также для проведения оценки геологических запасов нефти и газа на месторождениях с карбонатным типом коллектора Департаментом по разработке и добычи нефти Министерства РК. Полученные результаты также могут быть использованы в виде учебных материалов в ВУЗах. Поромасштабное моделирование вместе с микрокомпьютерной томографией может быть альтернативой проведению стандартных лабораторных экспериментов по определению характеристик пористой среды и течения жидкости.

Оценка технико-экономической эффективности внедрения. Полученная зависимость абсолютной проницаемости от других характеристик пористой среды для карбонатных пород позволит получать достоверные результаты гидродинамического моделирования. Альтернативный метод определения характеристик течения жидкости будет способствовать снижению временных и финансовых ресурсов по сравнению с проведением лабораторных исследований.

Оценка научного уровня выполненной работы в равнении с лучшими достижениями в данной области. Так как исследование характеристик пористой среды и течения жидкости на поромасштабном уровне с использованием микрокомпьютерной томографии выполняется впервые в Казахстане, данное исследование имеет высокую актуальность. Полученные результаты исследования зависимости абсолютной проницаемости от других характеристик пористой среды позволят использовать их при гидродинамическом моделировании месторождений с карбонатным типом коллектора.

Автор выражает благодарность научному руководителю Ph.D. Асилбекову Б.К., зарубежному руководителю - ассоциированному профессору Панфиловой И.В. и Ph.D. Ali Qaseminejad Raeini за ценные консультации и обратную связь в работе над диссертацией.