

АННОТАЦИЯ

диссертационной работы,
представленной на соискание степени доктора философии (Ph.D.)
по специальности 8D07202 – Нефтяная инженерия
Жолдыбаевой Асель Талгатовны

«Исследование закономерностей изменения фильтрационно-ёмкостных свойств коллектора с наличием глин при тепловом воздействии»

Актуальность. В условиях истощения запасов лёгкой нефти и смещения добычи в сторону трудноизвлекаемых ресурсов всё большее значение приобретают залежи высоковязкой нефти, разработка которых сопровождается существенными геолого-физическими и технологическими ограничениями. Одним из ключевых факторов, определяющих низкий коэффициент извлечения нефти из таких залежей, является сочетание высокой вязкости углеводородов и сложного минералогического состава коллекторов, в частности повышенного содержания глинистых минералов.

Для разработки залежей высоковязкой нефти широко применяются тепловые методы увеличения нефтеотдачи, включая закачку пара, горячей воды, технологии SAGD и пароциклическую обработку скважин. Данные методы обеспечивают снижение вязкости нефти и повышение её подвижности за счёт передачи тепловой энергии в пласт. Вместе с тем промысловый опыт и результаты лабораторных исследований свидетельствуют о том, что тепловое воздействие сопровождается не только положительным эффектом мобилизации нефти, но и существенными изменениями фильтрационно-ёмкостных свойств коллектора, обусловленными физико-химическим взаимодействием породы и закачиваемого агента.

Одним из наименее изученных и в то же время наиболее критичных процессов, сопутствующих тепловому воздействию, является набухание глинистых минералов. Данный процесс сопровождается снижением проницаемости, изменением относительных фазовых проницаемостей и ухудшением условий фильтрации флюидов в пористой среде. Несмотря на наличие отдельных экспериментальных исследований, в современной практике проектирования тепловых методов увеличения нефтеотдачи влияние набухания глин, как правило, либо игнорируется, либо учитывается качественно, без количественной формализации его воздействия на фильтрационно-ёмкостные свойства коллектора.

Таким образом, в настоящее время существует научное противоречие между необходимостью широкого применения тепловых методов увеличения нефтеотдачи для разработки залежей высоковязкой нефти и отсутствием количественно обоснованных закономерностей, описывающих изменение фильтрационно-ёмкостных свойств глинистых коллекторов в условиях теплового воздействия.

Оценка современного состояния решаемой научной или научно-технологической проблемы (задачи). Изучение разработки трудноизвлекаемых запасов нефти, в том числе коллекторов с высоковязкой нефтью, представляет значительный интерес для научного сообщества. Тепловые методы, лежащие в основе повышения нефтеотдачи в таких пластах, широко применяются в нефтегазовой отрасли на протяжении последних десятилетий. Эти методы используют тепло, передаваемое в пласт через горячую воду или пар, для мобилизации нефти. Однако взаимодействие закачиваемого агента с породой коллектора остаётся недостаточно изученным.

Особенно важным аспектом является влияние качества воды и её солёности на риск повреждения пласта. В последние годы увеличилось количество исследований, направленных на оптимизацию условий закачки и взаимодействия закачиваемой воды с породой коллектора, что позволяет повысить эффективность тепловых методов и снизить операционные риски. При этом в большинстве работ основной акцент сделан на тепловую энергию, поступающую в пласт, тогда как влияние закачиваемого агента на фильтрационно-ёмкостные свойства коллектора рассматривается ограниченно.

В последние годы усилилось внимание к исследованию взаимодействий между закачиваемым паром, водой и породой коллектора. Закачка пара может приводить к повреждению пласта, проявляющемуся, в частности, в миграции мелкодисперсных частиц и набухании глинистых минералов. При этом для парогенераторов требуется вода определённого качества. Соблюдение требований к качеству воды способствует снижению вероятности повреждения пласта и повышению эффективности тепловых методов увеличения нефтеотдачи.

Солёность закачиваемого агента играет определяющую роль в процессах взаимодействия между породой и флюидом при тепловых методах увеличения нефтеотдачи. Изменения солёности влияют на электростатические силы между поровой матрицей и мелкими частицами, а также на структурную устойчивость глинистых минералов. В условиях низкой солёности повышается риск повреждения пласта вследствие набухания глин. В последние два десятилетия исследования сосредоточены на оптимизации стратегий регулирования солёности закачиваемой воды, что позволяет повысить нефтеотдачу и снизить операционные затраты. Однако данные подходы, как правило, не сопровождаются формализацией влияния солёности на изменение фильтрационно-ёмкостных свойств коллектора.

Основание и исходные данные для разработки темы. Основанием для выполнения настоящего исследования послужила необходимость оптимизации стратегии разработки залежей высоковязкой нефти в коллекторах с повышенным содержанием глинистых минералов на примере участка Восточный Молдабек (Республика Казахстан), далее – изучаемый объект. Для данного объекта характерно сочетание высокой вязкости нефти и доли глинистых компонентов в составе коллектора, что существенно осложняет применение тепловых методов увеличения нефтеотдачи.

Присутствие глинистых минералов, обладающих способностью к набуханию, приводит к изменению проницаемости пласта и, как следствие, оказывает влияние на эффективность извлечения углеводородов. Это обуславливает необходимость детального изучения закономерностей изменения фильтрационно-ёмкостных свойств коллектора при тепловом воздействии и разработки методов их количественного учёта.

Для исследования выявленных закономерностей и их проверки в масштабе пласта в работе применяются методы геолого-гидродинамического моделирования, позволяющие интегрировать лабораторные данные и результаты минералогических исследований в единую расчётную схему.

Обоснование необходимости проведения данной научно-исследовательской работы. Проведение данного исследования обусловлено наличием значительных трудноизвлекаемых запасов высоковязкой нефти в Казахстане, объем которых оценивается примерно в 0,7 млрд тонн. Разработка таких ресурсов связана с серьезными техническими вызовами, обусловленными высокой вязкостью нефти, набуханием глин, низким КИН и сложной геологической структурой коллекторов. Данная работа направлена на оценку эффективности технологий, используемых для увеличения нефтеотдачи на участках с трудноизвлекаемыми запасами, а именно коллекторов с высоковязкой нефтью. В условиях растущего спроса на энергию значимость повышения коэффициента извлечения углеводородов из сложных коллекторов усиливается. Исследование ставит своей целью совершенствование технологий паровой закачки в коллекторах с высоким содержанием глинистых минералов. Результаты исследования создадут основу для развития и адаптации методов теплового воздействия, что позволит эффективнее использовать нефтяные ресурсы не только в Казахстане, но и в других регионах с аналогичными характеристиками.

Сведения о планируемом научно-техническом уровне разработки. Диссертационная работа предусматривает углублённое исследование влияния набухания глинистых минералов на фильтрационно-ёмкостные свойства коллектора и эффективность тепловых методов разработки. В процессе исследования выявляются количественные закономерности между набуханием глин и проницаемостью, что позволяет повысить точность прогнозных моделей.

Сведения о метрологическом обеспечении диссертации. Метрологическое обеспечение диссертации базируется на численном моделировании с использованием высокоточных данных, полученных при помощи современного оборудования. В работе выполнены исследования минералогического состава пород методами рентгеновской дифракции (XRD) и сканирующей электронной микроскопии (SEM), что обеспечило достоверную интерпретацию процессов набухания глинистых минералов.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

- установлены количественные закономерности изменения проницаемости глинистых коллекторов при тепловом воздействии в зависимости от солёности закачиваемой воды;

- разработана эмпирическая модель изменения проницаемости, отражающая влияние набухания глинистых минералов;
- предложен научно обоснованный подход к интеграции эффекта набухания глин в геолого-гидродинамические модели;
- показано, что игнорирование процессов набухания глинистых минералов приводит к завышению прогнозных показателей нефтеотдачи при тепловых методах разработки.

Целью диссертационного исследования является установление закономерностей изменения фильтрационно-ёмкостных свойств глинистых коллекторов при тепловом воздействии и разработка научно обоснованного подхода к учёту этих изменений при моделировании тепловых методов увеличения нефтеотдачи. Для достижения поставленной цели в работе решается научная задача количественного описания влияния набухания глинистых минералов на проницаемость и фазовую фильтрацию флюидов в условиях закачки пара.

Предмет исследования – закономерности влияния набухания глинистых минералов на фильтрационно-ёмкостные свойства коллектора и фильтрацию флюида в условиях тепловых методов увеличения нефтеотдачи.

Объект исследования – терригенный коллектор участка Молдабек Восточный с содержанием глинистых минералов и высоковязкой нефтью.

Задачи исследования:

1. Проанализировать современное состояние исследований тепловых методов увеличения нефтеотдачи в коллекторах с высоким содержанием глинистых минералов.
2. Исследовать минералогический состав глинистых пород изучаемого объекта методами XRD и SEM и оценить их потенциал к набуханию.
3. Экспериментально установить влияние солёности закачиваемой воды на изменение проницаемости глинистых коллекторов.
4. Сформировать эмпирическую зависимость изменения проницаемости от солёности и температурных условий теплового воздействия.
5. Разработать и адаптировать геолого-гидродинамическую модель, учитывающую процессы набухания глин.
6. Оценить влияние набухания глинистых минералов на динамику фильтрации флюидов и нефтеотдачу при закачке пара.
7. Провести технико-экономическую оценку эффективности учёта набухания глин при выборе тепловых МУН.
8. Определить оптимальные технологии тепловых методов для минимизации негативного влияния набухания глин и повышения эффективности извлечения нефти из пластов с высоковязкой нефтью.

Научная гипотеза. Научная гипотеза диссертационной работы заключается в том, что набухание глинистых минералов в условиях теплового воздействия является системным процессом, закономерно изменяющим проницаемость коллектора в зависимости от солёности закачиваемого агента и температуры, и может быть количественно описано и интегрировано в ГДМ.

Практическая значимость Теоретическая значимость работы заключается в развитии представлений о фильтрации флюидов в глинистых пористых средах при тепловом воздействии. Практическая значимость состоит в возможности использования полученных закономерностей и методики моделирования при проектировании тепловых методов увеличения нефтеотдачи на месторождениях с высоковязкой нефтью.

Место задач в выполнении научно-исследовательской работы или экспериментально-исследовательской работы в целом. В рамках данной работы выполнен анализ современного состояния методик моделирования закачки пара и их применения для месторождений с высоким содержанием глинистых минералов. Проведен анализ по минералогическому составу пород изучаемого объекта и физико-химическим свойствам флюида, а также разработана цифровая модель изучаемого объекта, учитывая процессы набухания глин в условиях тепловых методов увеличения нефтеотдачи. Лабораторные эксперименты и анализ данных позволили установить ключевые зависимости между свойствами глинистых минералов и проницаемостью породы, что стало основой для разработки рекомендаций по оптимизации тепловых МУН.

Методологическая база. Методология исследования включает численное моделирование с использованием ПО Schlumberger IntersectTM и анализ результатов лабораторных экспериментов, что позволило оценить влияние набухания глинистых минералов на проницаемость.

Положения, выносимые на защиту:

1. Установлено, что набухание глинистых минералов в условиях теплового воздействия приводит к снижению проницаемости коллектора, что оказывает существенное влияние на динамику фильтрации флюидов и эффективность извлечения высоковязкой нефти.

2. Показано, что минералогический состав глин является определяющим фактором изменения фильтрационно-ёмкостных свойств коллектора при тепловом воздействии.

3. Установлена количественная зависимость изменения проницаемости глинистых коллекторов от солёности закачиваемого агента и температурных условий теплового воздействия, позволяющая формализовать эффект набухания глин.

4. Предложен научно обоснованный подход к учёту процессов набухания глинистых минералов в гидродинамическом моделировании тепловых методов увеличения нефтеотдачи, обеспечивающий повышение достоверности прогноза нефтеотдачи.

Личный вклад автора. Автором проведен анализ литературных источников, разработана численная модель на основе лабораторных данных и проведены вычислительные работы на основе высокоразрешающего симулятора. Полученные результаты легли в основу рекомендаций для повышения эффективности тепловых методов разработки коллекторов с высоковязкой нефтью. Постановка цели, задачей, а также технико-

экономическое обоснование применения разработанного способа проводились совместно с научными руководителями.

Апробация работы. Основные результаты исследования опубликованы в рецензируемых журналах, что подтверждает актуальность и значимость выполненной работы.

Публикации. Результаты исследования изложены в рамках ПЦФ BR21881822 «Разработка технических решений для оптимизации геологотехнических операций при бурении скважин и добычи нефти на поздней стадии эксплуатации месторождений» (2023–2025 гг.) в журнале *Energies*, входящем в базу данных Scopus в первом квартile (Q1) и соответствует 82-му процентилю. Это говорит о высокой репутации журнала в области инженерных и энергетических исследований.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, шести разделов, заключения, списка использованных источников, содержащего 90 наименований, и 5 приложений. Работа изложена на 105 страницах, содержит 39 рисунков и 15 таблиц в основной части, а также 11 рисунков в приложении.

Основные положения и выводы диссертационной работы. В диссертационной работе на основе совокупности лабораторных исследований, численного моделирования и технико-экономического анализа установлено, что эффект набухания глинистых минералов оказывает существенное влияние на изменение фильтрационно-ёмкостных свойств коллектора и, как следствие, на эффективность применения тепловых методов увеличения нефтеотдачи. Полученные результаты относятся к условиям исследуемого объекта, характеризующегося высоковязкой нефтью и наличием в составе коллектора глинистых минералов, склонных к набуханию при изменении минерализации закачиваемых флюидов. В ходе исследования показано, что процессы набухания глин приводят к снижению абсолютной проницаемости пласта и ухудшению условий фильтрации, что отрицательно сказывается на технологической эффективности тепловых методов воздействия, в том числе закачки пара. Лабораторные эксперименты подтвердили определяющую роль минерализации закачиваемого агента в процессах набухания глинистых минералов. Установлено, что последовательное снижение минерализации закачиваемых агентов сопровождается устойчивым уменьшением проницаемости керновых образцов. В экспериментальной части диссертационной работы показано, что при увеличении доли дистиллированной воды в составе закачиваемого агента проницаемость снижалась с 518 мД до 11,2 мД, что свидетельствует о высокой чувствительности фильтрационных свойств коллектора к химическому составу флюида. Результаты численного моделирования и технико-экономической оценки показали, что, несмотря на потенциально более высокий уровень нефтеотдачи при применении ПЦОС, наличие набухающих глин существенно ограничивает его практическую и экономическую эффективность. Для условий исследуемого объекта внутренняя норма доходности (IRR) при использовании закачки пара составила порядка 2%, что указывает на низкую инвестиционную

привлекательность данного метода. В то же время применение закачки горячей воды, характеризующейся менее интенсивным тепловым воздействием обеспечило значительно более высокий экономический результат с уровнем IRR около 25%. Таким образом, результаты диссертационного исследования обосновывают необходимость дифференцированного подхода к выбору тепловых методов увеличения нефтеотдачи с учетом минералогического состава коллектора и свойств закачиваемых агентов. Для пластов с высоковязкой нефтью и наличием набухающих глин закачка горячей воды может рассматриваться как более технологически устойчивый и экономически целесообразный метод по сравнению с традиционными технологиями закачки пара.

Оценка полноты решения поставленных задач. Все задачи, сформулированные в диссертационной работе, решены в полном объеме. В рамках исследования получена и экспериментально обоснована зависимость проницаемости коллектора от минерализации закачиваемого агента для условий высоковязкой нефти и наличия набухающих глин.

Рекомендации и области практического применения результатов. Полученные результаты и установленные зависимости могут быть использованы нефтяными и нефтесервисными компаниями при проведении моделирования разработки месторождений, а также при оценке геологических запасов нефти и газа на объектах с аналогичными геолого-физическими условиями. Материалы диссертационной работы могут быть применены профильными подразделениями, занимающимися проектированием разработки месторождений, включая уполномоченные органы Республики Казахстан. Результаты исследования также целесообразно использовать в образовательном процессе высших учебных заведений нефтегазового профиля. Разработанная методика моделирования в сочетании с установленной зависимостью может рассматриваться как альтернативный подход к традиционным лабораторным методам определения фильтрационных характеристик пород.

Оценка технико-экономической эффективности внедрения. Применение полученной зависимости проницаемости от минерализации закачиваемого агента позволяет повысить достоверность численного моделирования тепловых методов увеличения нефтеотдачи в коллекторах с набухающими глинами. Использование альтернативного подхода к оценке фильтрационных характеристик способствует сокращению временных и финансовых затрат по сравнению с проведением полномасштабных лабораторных исследований.

Оценка научного уровня выполненной работы. Исследование влияния процессов набухания глинистых минералов на эффективность тепловых методов увеличения нефтеотдачи для условий месторождений Республики Казахстан выполнено впервые, что определяет научную новизну и практическую значимость диссертационной работы. Полученные результаты расширяют существующие представления о механизмах изменения фильтрационно-ёмкостных свойств коллекторов при тепловом воздействии и могут быть

использованы при проектировании разработки месторождений с аналогичными условиями.

Автор выражает благодарность научному руководителю Ph.D. Сыздыкову А.Х., зарубежному руководителю – ассоциированному профессору Панфиловой И.В. и Доктору Ph.D., ассоциированному профессору Пурафшари Пейману (Pourafshary Peyman) за ценные консультации и обратную связь в работе над диссертацией.

