

АННОТАЦИЯ

диссертации, представленной на соискание степени доктора философии
(PhD) по специальности 6Д070800 – «Нефтегазовое дело»
Логвиненко Александра Валерьевича

Актуальность. До недавнего времени традиционная лёгкая нефть являлась основным источником углеводородного сырья, полностью удовлетворяя мировой спрос на энергоносители. Однако с начала 2000-х годов наблюдается устойчивый рост глобального потребления нефти, обусловленный как увеличением численности населения, так и индустриализацией развивающихся стран. Это, в свою очередь, обусловило сокращение доступных запасов лёгкой нефти и ограничение объёмов её поставок на мировой рынок. Возникшая диспропорция между спросом и предложением стимулировала активный поиск альтернативных и ранее недостаточно освоенных источников углеводородов.

В числе таких источников особое внимание уделяется высоковязкой нефти и природному битуму, которые рассматриваются как наиболее перспективные ресурсы для обеспечения устойчивого энергоснабжения в средне- и долгосрочной перспективе. Эти виды углеводородного сырья характеризуются значительными разведанными запасами, географической распространённостью и потенциальной возможностью промышленного освоения при внедрении современных технологий добычи.

Высоковязкая нефть на протяжении последних десятилетий используется в качестве сырья для нефтеперерабатывающих предприятий, однако её физико-химические свойства — высокая вязкость, низкое содержание лёгких фракций и повышенная плотность — обуславливают необходимость применения специальных методов добычи и подготовки. Из-за более низкого качества и высокой себестоимости её добычи рыночная стоимость высоковязкой нефти традиционно ниже по сравнению с обычной лёгкой нефтью.

В соответствии с международными оценками, совокупные мировые запасы высоковязкой нефти и природного битума достигают порядка 5,6 триллионов баррелей. Эти ресурсы выявлены более чем в 70 странах мира, при этом основные их объёмы сосредоточены в Венесуэле и Канаде. Венесуэла обладает крупнейшими в мире запасами высоковязкой нефти, а Канада — природного битума, разработка которого активно ведётся в провинции Альберта [1–3]. Казахстан, в свою очередь, также располагает значительным потенциалом нетрадиционных углеводородов: по оценкам, ресурсы высоковязкой нефти в стране составляют около 42 млрд баррелей, дополнительно выявлены обширные месторождения природного битума [4].

Отсюда следует, что исследование особенностей добычи и переработки высоковязкой нефти и битумов представляет собой актуальное направление, имеющее важное значение для расширения минерально-сырьевой базы и обеспечения энергетической безопасности Казахстана.

Согласно данным международного анализа, при разработке залежей высоковязких нефти на территории Казахстана наибольший потенциал демонстрируют технологии парогравитационного дренирования (Steam Assisted Gravity Drainage, SAGD) и испарительно-экстракционного дренирования (VAPEX). Эти методы относятся к числу наиболее эффективных технологий освоения трудноизвлекаемых запасов и позволяют существенно повысить коэффициент нефтеотдачи по сравнению с традиционными подходами.

Тем не менее для условий Казахстана указанные технологии остаются относительно новыми и недостаточно апробированными. Это подтверждается ограниченным количеством научных публикаций и отсутствием комплексных экспериментальных и модельных исследований, направленных на оценку применимости SAGD и VAPEX в геологических и термобарических условиях отечественных месторождений. В связи с этим возникает необходимость в адаптации зарубежного опыта и разработке методических основ внедрения данных технологий с учётом региональных особенностей нефтяных пластов Казахстана.

При этом технология SAGD на международном уровне зарекомендовала себя как один из наиболее результативных термических методов добычи, обеспечивающий высокий КИН, превышающий показатели большинства альтернативных технологий. Для сравнения, в то время как при SAGD КИН может достигать высокого уровня, традиционные методы, наиболее распространённые в странах СНГ, характеризуются существенно меньшей эффективностью: при нагнетании пара КИН не превышает 45 %, а при пароциклической обработке скважин составляет лишь 15–20 %.

Таким образом, применение технологий SAGD и VAPEX в Казахстане представляется перспективным направлением для повышения эффективности разработки высоковязких нефти, требующим углублённого научного обоснования и адаптации к конкретным геолого-физическим условиям месторождений страны.

Обоснование необходимости проведения данной научно-исследовательской работы по теме. Для месторождений высоковязкой нефти и природного битума Казахстана наибольший КИН достигается за счет применения термического метода добычи SAGD. Ключевым недостатком данного метода являются большие капитальные затраты на бурение двух горизонтальных скважин высокой протяженностью до 1000 м. При этом существует более двадцати различных модификаций способа SAGD, одна из которых предполагает разработку пласта с помощью одной горизонтальной скважины SW-SAGD, у которой в свою очередь имеется очевидный недостаток, заключающийся в высоком паронефтяном отношении из-за мгновенного прорыва пара в близко расположенный к нагнетательной части добывающей участок. Подобная проблема приводит к крайне высокому росту требуемого количества пара на добычу одной тонны нефти. Однако благодаря бурению одной горизонтальной скважины вместо двух как при классическом способе SAGD капитальные затраты существенно сокращаются. Таким

образом, применяя односкважинную модификацию способа SAGD, возможно добиться низких капитальных затрат и паронефтяного отношения. Для решения данной задачи необходимо предотвратить прорыв пара в добывающий участок.

Необходимость разработки новых модификаций SAGD подтверждается рядом работ, в которых подчеркивается дороговизна данного способа в связи с бурением нескольких горизонтальных скважин большой протяженностью.

Сведения о метрологическом обеспечении НИР. Приобретено оборудование для генерации и закачки пара. В рамках проекта был приобретен парогенератор ЭПГ-20-8У и пароперегреватель ЭПГ-6П. Работа проводилась в аккредитованной в соответствии с требованиями ОСТ ИСО / МЭК 17025-2009 испытательной лаборатории «Химический синтез и нефтедобыча» КазНИТУ имени К.И.Сатпаева (№ KZ.T.02.2159 от 09.11.2017 г.).

Предлагается инновационная модификация SWC-SAGD.

Научные исследования по теме диссертации осуществлялись в рамках проекта выполнения Грантового Финансирования МОН РК и ХНИР:

1. 2017–2018 гг. – ХНИР с Фондом Первого Президента Республики Казахстан – Елбасы по проекту №219-17 на тему: «Лабораторные исследования вытеснения высоковязкой нефти химическими растворителями и 3D визуализация».

2. 2018–2020 гг. – «AP05135893» по теме: «Многодисциплинарный подход к оптимизации парогравитационного дренажа нефти с использованием геомеханических расчетов и изменения расположения скважин».

3. Дополнительно исследования проводились в рамках ПЦФ BR21882241 «Исследование и разработка комплексной системы улавливания и хранения СО₂ на промышленных объектах Республики Казахстан для сокращения выбросов парниковых газов» (2023-2025 гг.).

Патенты по исследованию:

1. Патент 35457 РК «Циклический способ парогравитационного дренажа нефти одиночной скважины», 2022 г.

2. Международная заявка на РСТ патент РСТ/KZ2020/000025 «Циклический способ парогравитационного дренажа одиночной скважины (SWC-SAGD)», 2022 г.

Цель диссертационной работы:

Цель диссертационной работы заключается в разработке и оптимизации подходов в улучшении эффективности метода парогравитационного дренажа, путем совершенствования схемы расположения скважин:

1. Изучение и разработка новых архитектурных решений и модификаций расположения скважин, которые позволяют повысить эффективность применения метода SAGD, улучшив равномерность и полноту охвата пласта, а также оптимизировав процессы нагнетания и добычи.

2. Оценка влияния предложенных изменений на экономическую рентабельность применения метода SAGD, включая анализ затрат и доходов, а также обоснование экономической целесообразности предложенных

решений для повышения общей эффективности разработки нефтяных месторождений.

Задачи исследования:

1. Анализ текущего состояния методов повышения эффективности способа SAGD:

- Провести обзор существующих подходов, сосредоточив внимание на изменении положения скважин.

2. Разработка новой модификации способа SAGD — SWC-SAGD:

- Разработать концепцию нового способа SWC-SAGD, включая определение основных принципов и обоснование необходимости данной модификации.

- Сформулировать основания для разработки SWC-SAGD, опираясь на выявленные недостатки существующих методов и потенциальные преимущества новой модификации.

3. Проведение лабораторных экспериментов для физического моделирования способа SAGD:

- Организовать и провести лабораторные эксперименты с высоковязкой нефтью, используя насыпные и 3D физические модели для исследования поведения паровой камеры и эффективности различных методов.

- Анализировать результаты лабораторных экспериментов для оценки применимости и оптимизации способа SAGD.

4. Гидродинамическое моделирование способов SAGD и SWC-SAGD:

- Выполнить гидродинамическое моделирование как традиционного способа SAGD, так и его модификации SWC-SAGD.

- Провести сравнительный анализ полученных моделей, оценить паронефтяное отношение и выявить преимущества и недостатки каждого метода в различных условиях разработки.

5. Проведение технико-экономического обоснования применения SWC-SAGD:

- Оценить экономическую целесообразность применения новой модификации SWC-SAGD, включая анализ затрат, доходов и рентабельности по сравнению с традиционным методом SAGD.

- Разработать рекомендации по внедрению SWC-SAGD в промышленную практику на основе полученных результатов.

Объектом исследования является термический метод добычи высоковязкой нефти и природного битума SAGD.

Предметом исследования являются различные вариации расположения скважин метода SAGD, в том числе односкважинная модификация SW-SAGD.

Научная новизна исследования заключается в разработка инновационного способа (модификации) SWC-SAGD, позволяющего предотвратить проникновение закачиваемого пара в добывающие участки, увеличить охват пласта паром:

1. Впервые предложена новый односекважинный способ (модификация) парового подогрева с добывчей (SAGD), именуемая SWC-SAGD, которая включает схему расположения нагнетательных и добывающих

участков и применение неперфорированных секций, предотвращающая проникновение закачиваемого пара в добывающие участки, что способствует более эффективному управлению процессом нагнетания.

2. Выявлена целесообразность применения водонефтяного барьера для предотвращения горизонтальных перетоков пара в односкважинном расположении SWC-SAGD, обеспечивающая предотвращение перемещения пара в нежелательные области пласта.

3. Осуществлена разработка метода, позволяющего увеличить охват пласта паром за счет чередующихся нагнетательных и добывающих участков, а также оптимизации их расположения, обеспечивающая равномерное воздействие на пласт и улучшение распределения парового потока, что ведет к более эффективной разработке нефтяных месторождений.

4. Разработан и обоснован новый подход к циклической системе разработки, при которой нагнетательные участки периодически переводятся в добывающие, и наоборот, что способствует более равномерному охвату пласта и повышению общей эффективности метода SAGD.

5. Впервые создана гидродинамическая модель применения предлагаемой технологии на примере нефти, аналогичной по свойствам нефти месторождения Сарыбулак.

Теоретическая и практическая значимость работы:

Предложена новая модификация SWC-SAGD, которая позволяет увеличить накопленную добычу высоковязкой нефти или природного битума, сократить капитальные и операционные расходы. Представлены результаты лабораторных экспериментов по физическому моделированию способа SAGD. Построены гидродинамические модели способов SAGD и SWC-SAGD. Проведено технико-экономическое обоснование применения способа SWC-SAGD.

Личный вклад автора:

Результаты проведенных физических экспериментов в лабораторных условиях, 3D гидродинамическое моделирование было выполнено лично соискателем. Постановка цели, задачей, а также технико-экономическое обоснование применения разработанного способа проводились совместно с научным руководителем.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Предложена новая модификация метода парового подогрева с добычей (SAGD), именуемая SWC-SAGD, включающая чередующиеся нагнетательные и добывающие участки, разделенные неперфорированными секциями.

Эта структура позволяет предотвратить проникновение закачиваемого пара в добывающие участки и увеличивает охват пласта воздействием за счет применения циклической системы разработки.

2. Обоснована целесообразность использования водонефтяного барьера, ранее применяемого для предотвращения вертикальных перетоков в методе SAGD, для предотвращения горизонтальных перетоков при односкважинном расположении SWC-SAGD.

Это решение способствует более эффективному удержанию пара в нагнетательных зонах и снижению его перемещения в нежелательные области пласта за счет использования водонефтяного барьера.

3. Разработана и обоснована циклическая система разработки, которая предполагает периодический перевод нагнетательных участков в добывающие и наоборот.

Этот подход обеспечивает более равномерный охват пласта и повышение общей эффективности разработки.

4. Доказана технологическая и экономическая целесообразность применения модификации SWC-SAGD для разработки месторождений высоковязких нефтей и природного битума, что подтверждает её потенциал для улучшения эффективности и экономической выгоды при разработке таких ресурсов.

Публикации

Основные положения диссертации изложены в 9 научных статьях и 2 патентах.

Объём и структура работы

Докторская диссертация состоит из введения, 4 разделов, заключения и 1 приложения. Работа изложена на 130 страницах машинописного текста, содержит 59 рисунков, 10 таблиц в основной части, а также 3 рисунка в приложении. Список используемых источников включает 94 наименований.