

АЗЕРБАЙДЖАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА

На правах рукописи

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ДОБЫЧИ НЕФТИ С УЧЕТОМ ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ ПЛАСТОВЫХ ФЛЮИДОВ

Специальность: 2526.01 - Технология разработки морских
месторождений полезных ископаемых

Отрасль науки: Технические науки

Соискатель: Ерлан Танатбергенович Баспаев

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора философии

Баку – 2025

Диссертационная работа была выполнена в Научно-исследовательском и Проектном Институте Нефти и Газа SOCAR.

Научный руководитель: Член-корреспондент НАНА, доктор технических наук, профессор
Багир Алекпер оглы Сулейманов

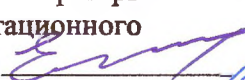
Официальные
оппоненты:

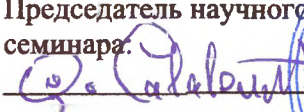
доктор технических наук,
профессор
Ариф Микаил оглы Мамед-заде
доктор технических наук, доцент
Валех Маммед оглы Шамилов

Доктор философии по технике
Турал Халиг оглы Шафиев

Диссертационный совет BED 2.03 Высшей Аттестационной Комиссии при Президенте Азербайджанской Республики, действующей на базе Азербайджанского Государственного Университета Нефти и Промышленности

Председатель
диссертационного
совета:  доктор технических наук, доцент
Ариф Алекбер оглы Сулейманов

Ученый секретарь
диссертационного
совета:  доктор философии по технике, доцент
Елена Евгеньевна Шмончева

Председатель научного
семинара:  Член-корреспондент НАНА,
доктор технических наук, проф
Гариб Исак оглы Джалалов

Заверяю подписи:

Ученый секретарь АГУНИ

к.т.н., доцент



Нармина Тарлан кызы Алиева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы и степень разработки. На современном этапе развития нефтегазодобывающей промышленности преобладает доля месторождений, находящихся на поздней стадии разработки. В процессе разработки подобных месторождений в результате изменения давлений и температур в поровом пространстве происходят сложные фазовые переходы.

Газоконденсатные коллекторы демонстрируют сложное поведение фаз и потоков при давлении ниже давления начала ретроградной конденсации. Для большинства газоконденсатных месторождений характерно снижение продуктивности добывающих скважин вследствие накопления ретроградного конденсата в призабойной зоне скважины. Исследование особенностей фильтрации газоконденсатных смесей в докритической области имеет существенный научный и практический интерес. Для повышения продуктивности эксплуатации газовых и газоконденсатных скважин необходимы эффективные и недорогостоящие методы удаления накопленной на забое жидкости.

В результате понижения забойного давления нефтяных скважин ниже давления насыщения газ выделяется из нефти и создается зона двухфазного течения, что является причиной изменения продуктивности скважины. Уменьшение температуры в призабойной зоне, приводит к росту вязкости нефти, интенсификации процесса выпадения асфальтосмолопарафиновых отложений. Снижение пластовых и забойных давлений также приводит к образованию песчаных пробок.

Существующие методы интенсификации добычи углеводородов зачастую не позволяют учитывать сложность процессов, возникающих при изменении фазового состояния жидкостей, что приводит к снижению эффективности процесса. Хотя накоплен значительный экспериментальный и теоретический материал, тем не менее, остается достаточно

большое количество вопросов, требующих дальнейшего поиска и систематического совершенствования методов интенсификации добычи нефти

В связи с этим разработка и применение новых технологий интенсификации добычи нефти с учетом фазового состояния пластовых флюидов весьма важная и актуальная задача.

Цель и задачи исследования

Цель работы-разработка и применение новых технологий интенсификации добычи нефти с учетом фазового состояния пластовых флюидов

Основные задачи исследования:

- Влияние докритического зародышеобразования на течение газоконденсатных систем в пористой среде
- Повышение эффективности удаления жидкости с забоя газовых скважин
- Разработка способа глушения скважины при забойных давлениях ниже давления насыщения.
- Разработка устьевого устройства для ударно-волнового воздействия на призабойную зону скважины;
- Предотвращение образования песчаных пробок в скважине.

Методы исследования

Поставленные задачи решались путем применения теоретических, экспериментальных и промысловых исследований.

Основные положения, выносимые на защиту

- Механизм течения газоконденсатной системы в пористой среде, основанный на образовании стабильных докритических зародышей конденсата;
- Состав твердого ПАВ для удаления жидкости с забоя наклонных газовых скважин;
- Способ глушения газопроявляющей скважины при забойном давлении ниже давления насыщения;
- Конструкция устьевого устройства для ударно-волнового воздействия на призабойную зону скважины;

- Способ для предотвращения образования песчаных пробок в скважине применением металлов с отрицательным электродным потенциалом.

Научная новизна исследования

1. Предложен механизм течения газоконденсатной системы в пористой среде, основанный на образовании стабильных докритических зародышей конденсата;

2. Разработан состав твердого ПАВ для удаления жидкости с забоя наклонных газовых скважин;

3. Предложен способ глушения газопроявляющей скважины при забойном давлении ниже давления насыщения;

4. Разработана конструкция устьевого устройства для ударно-волнового воздействия на призабойную зону скважины;

5. Предложен способ для предотвращения образования песчаных пробок в скважине применением металлов с отрицательным электродным потенциалом.

Практическая значимость результатов работы

Разработанное устьевое устройство для ударно-волнового воздействия на призабойную зону пласта успешно апробировано на скважинах №2067 и №2013 месторождения «Нефть Дашлары». В результате промыслового испытания предложенного устьевого устройства на скважинах месторождения наблюдалось увеличение добычи нефти этих скважин. В целом, за 8 месяцев дополнительно получено 283 тонны нефти.

На устьевое устройство для ударно-волнового воздействия на призабойную зону пласта получен Евразийский патент № 032854 от 31.07.19. На способ предотвращения образования песчаных пробок в скважине получен Евразийский патента № 036356 от 29.10.20 г. На способ глушения скважины получен Евразийский патента № 046618 от 29.03.24 г.

Апробация работы

Материалы диссертации докладывались и обсуждались на:

- II Международной научно-практической конференции Булатовские чтения (31 марта 2018 г.);

- III Международной научно-практической конференции Булатовские чтения (31 марта 2019 г.);

- Международной научно-практической конференции «Состояние и перспективы эксплуатации зрелых месторождений», Филиал ТОО «НИИ ТДБ КМГ» «КазНИПИмунайгаз» в городе Актау, 16-17 мая 2019 г.;

- IV Международной научно-практической конференции Булатовские чтения (31 марта 2020 г.).

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 13 трудов, из которых 6 статей, 4 материала конференции, 3 Евразийских патента.

Наименование учреждения, в котором выполнена диссертационная работа.

Диссертационная работа была выполнена в Научно-исследовательском и Проектном Институте Нефти и Газа SOCAR.

Структура и объём работы

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, первая глава состоит из 56 стр, вторая - 28 стр, третья - 48 стр, включает 209280 знаков, 8 рисунков, 15 графиков, 12 таблиц, списка литературы, включающего 128 наименований и приложений.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и степень разработки диссертационной работы, определены цель и основные задачи исследования, показаны методы исследования и научная новизна, указана ее практическая ценность.

В первой главе диссертации дан литературный обзор существующих методов интенсификации добычи углеводородов с учетом их фазового состояния

По мере разработки месторождений происходит обводнение продуктивных пластов, снижение дебитов скважин, падение пластового давления, что дополнительно осложняет добычу углеводородов. Для обеспечения рентабельности эксплуатации подобных месторождений при интенсификации

добычи нефти необходимо учитывать фазовые состояния пластовых флюидов.

Газоконденсатная система представляет собой углеводородный аэрозоль, дисперсную систему с газом в качестве дисперсионной среды и жидкостью в качестве дисперсной фазы. Фазовое поведение флюидов оказывают существенное влияние на фильтрацию углеводородных аэрозолей, в частности газоконденсатных смесей. Действительно, при давлении ниже давления начала ретроградной конденсации происходит выделение жидкости в пористой среде, что приводит к резкому снижению фазовой проницаемости по газу и сопутствующему уменьшению его расхода.

В ряде работ экспериментально обнаружено существование докритических кластеров жидкости в парах и аэрозолях. Однако механизм стабилизации докритических кластеров жидкости и их влияние на фильтрацию аэрозолей в пористой среде практически не изучено.

Вместе с тем, накоплен значительный экспериментальный и теоретический материал по исследованию газированных жидкостей (газовых эмульсий), в докритической области. Установлено, что при давлениях выше давления насыщения газированные жидкости, при стационарной фильтрации качественно меняют реологию, расход жидкости возрастает в 2–3 раза, а при нестационарной происходит существенное уменьшение пьезопроводности и увеличение сжимаемости системы. Был предложен следующий механизм наблюдаемых явлений. В процессе фильтрации газированной жидкости в докритической области на поверхности поровых каналов, при краевом угле смачивания $\theta > 0^\circ$, происходит образование стабильных зародышей газовой фазы, размер которых оценивается в 1-100 нм, образующих пристенный слой, что приводит к эффекту проскальзывания и увеличению расхода жидкости при снижении давления к давлению насыщения.

Таким образом, исследование особенностей фильтрации углеводородных аэрозолей, в частности газоконденсатных смесей, в докритической области имеет существенный научный

и практический интерес. Был рассмотрен механизм стабилизации докритических зародышей конденсата, приведены экспериментальные и теоретические исследования стационарной и нестационарной фильтрации газоконденсатных смесей при давлении выше давления ретроградной конденсации.

В экспериментах исследовалась рекомбинированная газоконденсатная смесь, состоящая из природного газа и нормального гексана (давление начала конденсации 17.5 МПа при температуре 333 °К, газоконденсатный фактор 4800 нм³/м³). Исследование фильтрации газоконденсатной системы проводилось на экспериментальной установке, включающую колонку с пористой средой (модель пласта)¹ [1]. На входе и выходе колонки с пористой средой устанавливалось различное давление (P_i и P_o , соответственно), и исследуемая газоконденсатная система фильтровалась под постоянным перепадом давления 0.8 МПа до установления постоянного расхода газа. Определялась зависимость расхода газа от среднего давления в модели пласта $P = (P_i + P_o)/2$.

После проведения стационарных и нестационарных исследований давление в системе понижалось до следующего уровня. На этом уровне проводились аналогичные замеры. Эксперименты проводились до тех пор, пока давление в системе не достигло величины 20.8 МПа. Таким образом, исследования проводились в интервале уровня давления $P/P_c = 1.2 - 2$ (P_c – давление начала конденсации).

На графике 1 приведена зависимость расхода газа (и относительного расхода газа $Q_0 = Q/Q_{p=32\text{МПа}}$) от давления.

Как видно из рисунка, при давлении в 1.5 раза (27.2 МПа), превышающем давление начала конденсации расход газа, возрастает практически на 30% по сравнению с расходом при давлении 20.8 МПа и на 25% по сравнению с расходом при 32 МПа. Рост расхода жидкости начинается уже при давлении в 1.74

¹ Suleimanov, B.A., Suleymanov A.A., Abbasov, E.M., Baspayev, E.T. A mechanism for generating the gas slippage effect near the dewpoint pressure in a porous media gas condensate flow // Journal of Natural Gas Science and Engineering, - 2018, №5- p.237-248.

раз (30.4 МПа) превышающем давление начала конденсации. При этом зависимость расхода газа от уровня давления носит немонотонный характер, и повышенные значения расхода достигаются в интервале уровня давления $P/P_c = 1.4-1.7$ (24.5-30 МПа).

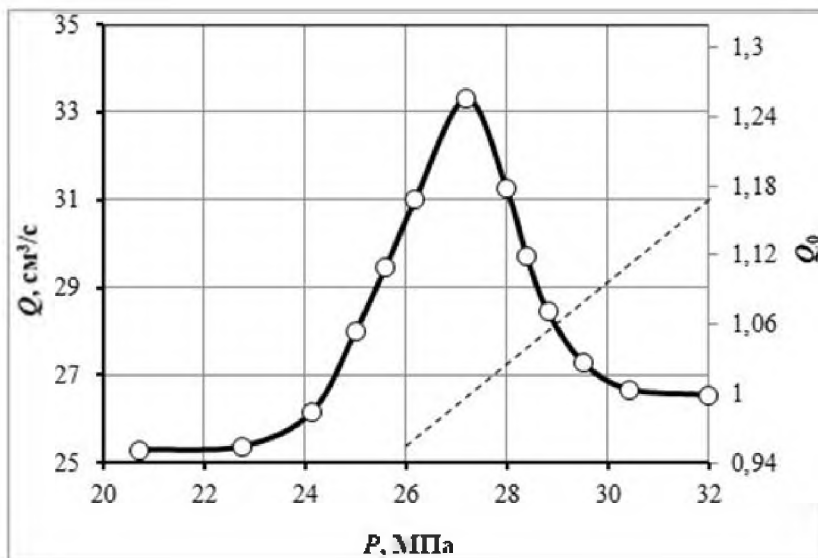


График.1. Зависимость расхода газа от давления

Исследования показали, что снижение уровня давления приводит к существенному увеличению времени восстановления давления и пьезопроводности системы. С уменьшением давления коэффициент сжимаемости существенно возрастает.

На графике 2 показана фазовая диаграмма (изотерма) газоконденсатной смеси (относительный объем - V_i/V_d , где V_i – текущий, а V_d – объем газоконденсатной смеси при давлении начала конденсации), полученная на модели пласта.

Как видно из графика 2, при классическом подходе до давления начала конденсации система однофазная (газ, с растворенной жидкостью), а ниже – двухфазная (газ и жидкость). В рамках традиционного подхода до давления начала конденсации имеет место фильтрация газа.

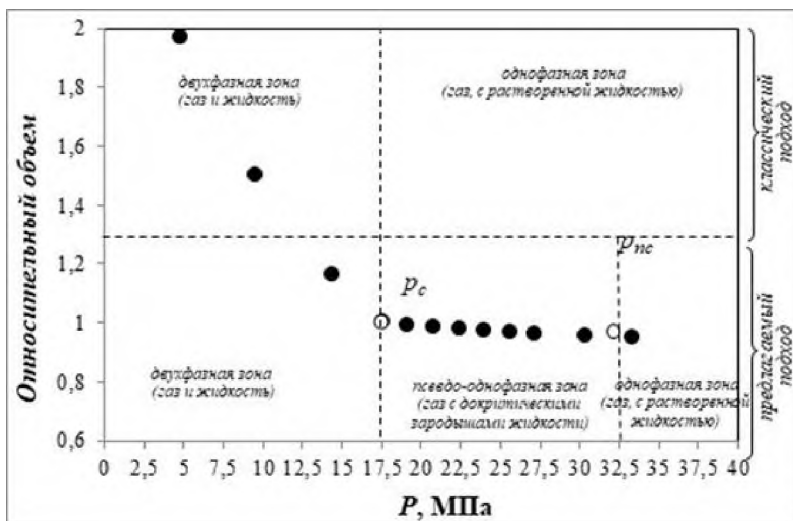


График.2. Фазовая диаграмма (изотерма) исследуемой газоконденсатной смеси

Согласно закону Дарси, расход газа со снижением среднего давления должен линейно снижаться, как показано на графике 1 (пунктирная линия).

Таким образом, в рамках классического подхода объяснить полученные результаты не удастся. Учитывая, что теория зародышеобразования справедлива как для чистых однокомпонентных, так и многофазных систем (газовых эмульсий, аэрозолей и т.д.) предлагается следующий подход для объяснения полученных результатов. Предполагается наличие 3-х зон (см. график 2): при $p > p_{nc}$ (p_{nc} - давление, при котором начинается выделение докритических зародышей конденсата, определяется экспериментально, из графика $1 p_{nc} = 32$ МПа) однофазная зона (газ, с растворенной жидкостью); при $p_{nc} \geq p \geq p_c$ псевдо-однофазная зона (газ с докритическими зародышами жидкости); при $p < p_c$ двухфазная зона. Несмотря на то, что существование докритических кластеров жидкой фазы подтверждается экспериментальными исследованиями, практические аспекты образования и стабилизации докритических зародышей жидкости не изучены. В связи с этим

нами предложен механизм стабилизации докритических зародышей, а также механизм течения газоконденсатной системы в пористой среде при наличии докритических зародышей жидкости.

В ряде исследований показано, что основную роль при стабилизации докритических зародышей играют поверхностное натяжение и электрический заряд, образующийся на поверхности зародышей путем селективной адсорбции ионов. В связи с этим в работе впервые рассмотрено докритическое зародышеобразование при ретроградной конденсации, с учетом поверхностных и электрических эффектов.

Определено, что поверхностный электрический заряд способствует тому, что уже при давлении, выше давления начала конденсации образуются стабильные зародыши жидкости. А при давлении ниже давления начала конденсации из паровой фазы в жидкости начинают образовываться докритические зародыши, и основной вклад в это вносит поверхностный электрический заряд.

Известно, что зародыши новой фазы, в основном, образуются на существующих поверхностях. При этом работа гетерогенного процесса всегда меньше работы гомогенного процесса. Примем, что образующиеся (адсорбирующиеся) на поверхности капилляров докритические зародыши жидкости подвижны, в результате пристенный слой обладает большей вязкостью, чем газ, движущийся в центре потока. Естественно предположить, что при снижении давления к давлению начала ретроградной конденсации, ввиду уменьшения работы образования зародышей, объемное содержание их возрастает, что может привести к увеличению толщины пристенного слоя конденсата

В ряде исследований показано, что даже абсолютно гладкая поверхность лишь частично покрывается докритическими зародышами, кроме того, на шероховатой поверхности (с шероховатостью наноразмеров) количество образующихся зародышей снижается и по данным заполненность ими поверхности может составить 20%. Очевидно, в пористой среде

возможны и более низкие значения. В работе определен расход жидкости в условиях неполного покрытия поверхности капилляра зародышами конденсата.

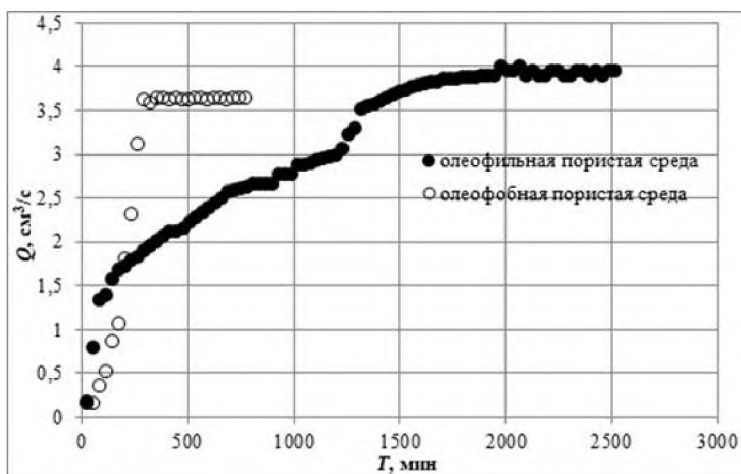
Пристенный слой даже для однофазных систем, например, для воды в тонких порах, имеет переменную вязкость. В нашем случае, зародыши образуются на поверхности порового канала, находясь, в объеме газа. При этом, естественно предположить, что на линии контакта зародышей конденсата, покрывающих поверхность порового канала и газа вязкость практически равна вязкости газа, а на стенке капилляра вязкости конденсата.

На основании полученных результатов можно предложить следующий механизм наблюдаемых эффектов. В процессе фильтрации газоконденсатной смеси в докритической области на поверхности поровых каналов, при красном угле смачивания $\theta > 0^0$, происходит образование стабильных зародышей конденсата, формирующих пристенный слой. Это приводит к эффекту проскальзывания и увеличению расхода газа при снижении давления к давлению начала ретроградной конденсации. Вместе с тем происходит уменьшение пропорциональной расходу площади потока жидкости нормальной к направлению течения, ввиду увеличения толщины пристенного слоя. Конкуренция этих двух эффектов приводит к тому, что зависимость расхода жидкости от давления имеет немонотонный характер. При этом до достижения максимума преобладает эффект проскальзывания, а дальнейшее снижение расхода связано с преобладанием уменьшения живого сечения поровых каналов за счет увеличения толщины пристенного слоя² [5].

Используя относительные проницаемости, в обобщенном законе Дарси можно определить основные параметры процесса фильтрации газоконденсатной смеси в реальной пористой среде при наличии проскальзывания и переменной вязкости пристенного слоя.

² Suleimanov, B.A., Suleymanov A.A., Abbasov, E.M., Baspayev, E.T. A mechanism for generating the gas slippage effect near the dewpoint pressure in a porous media gas condensate flow // Journal of Natural Gas Science and Engineering, - 2018, №5- p.237-248.

Известно, что зародыши новой фазы, в основном, образуются на существующих поверхностях. При $0^\circ < \theta < 180^\circ$ работа гетерогенного процесса всегда меньше работы гомогенного процесса. При этом, когда пористая среда (в нашем случае составленная кварцевым песком) смачивается конденсатом ($0^\circ < \theta < 90^\circ$) происходит интенсивное зародышеобразование на поверхности пористых каналов, что и приводит к эффекту проскальзывания. В случае, когда пористая среда не смачивается конденсатом ($90^\circ < \theta < 180^\circ$) зародышеобразование на поверхности поровых каналов практически не происходит и пористая среда становится «газосмачиваемой» (gaswet), что приводит к тому, что весь конденсат выносятся газом из пористой среды и эффект проскальзывания не наблюдается. Для подтверждения указанного предположения нами были проведены экспериментальные исследования в олеофильной и олеофобной пористой среде. Результаты экспериментов



приведены на графике 3.

График 3. Динамика расхода газа в олеофильной (стационарный расход газа до закачки н-гексана 3.27 см³/с) и олеофобной пористой среде (стационарный расход газа до закачки н-гексана 3.62 см³/с)

Как видно из графика, в олеофильной пористой среде имеет место значительное (почти на 20%) увеличение расхода по сравнению с расходом газа до закачки н-гексана. В олеофобной среде подобного увеличения не происходит и после вытеснения н-гексана расход газа становится равным расходу до закачки н-гексана. Таким образом, эксперимент подтверждает предложенный нами механизм влияния смачиваемости на стационарную фильтрацию газоконденсатных систем.

Определяющим фактором при восстановлении давления является сжимаемость, и в нашем случае сжимаемость газоконденсатной смеси увеличивается при снижении давления. Это может быть связано только с выделением конденсата и сопутствующей осушкой газа. В связи с этим, принимаем, что после выделения жидкости в пористой среде движется только газ.

Таким образом, в результате экспериментальных исследований стационарной фильтрации газоконденсатной смеси получено, что уже при давлении, значительно превышающем давление начала ретроградной конденсации $P = 1.74P_c$, начинается увеличение расхода газа, а при давлении $P = 1.5P_c$ он достигает своего пика и практически на 30% превышает расход вблизи критического давления. При этом зависимость расхода газа от уровня давления носит немонотонный характер и повышенные значения расхода достигаются в интервале уровня давления $P = 1.4 - 1.74P_c$. Установлено, что в олеофобной пористой среде увеличение расхода газа не происходит. Показано, что со снижением давления в процессе нестационарной фильтрации происходит существенное уменьшение пьезопроводности и увеличение сжимаемости системы.

Предложен механизм наблюдаемых эффектов на основе образования стабильных докритических зародышей конденсата, сопутствующего эффекта проскальзывания, а также изменения сжимаемости системы. Рассмотрен механизм стабилизации докритических зародышей совместным действием поверхностных и электрических сил. Предложены

математические модели для описания полученных экспериментальных результатов.

Эксплуатация газодобывающих скважин осложняется при скоплении жидкости на забое и в стволе скважины в результате конденсации жидкости из газовой фазы. В начале разработки, когда скорость газового потока значительная, а объем накопленной жидкости небольшой, вся собранная на забое жидкость с потоком газа поднимается на поверхность. С увеличением столба жидкости возрастает давление на забой скважины, что приводит к ощутимому снижению дебита газа, а со временем и абсолютному прекращению притока газа. Чтобы избежать этого, необходимо своевременно удалять накопившуюся на забое газовой скважины жидкость.

На данное время самой эффективной и выгодной технологией удаления накопленной на забое газовых скважин жидкости и восстановления свободного движения газа является введение на забой твердых поверхностно-активных веществ (ПАВ) в шарообразной или цилиндрической форме (химических шашек), способствующих вспениванию газожидкостной смеси на забое скважины и ее поднятию на дневную поверхность.

Разработан состава твердого ПАВ, включающий: сульфанол-70%, жидкое стекло-10%, КМЦ-15%, сода-4,9%, наночастицы алюминия 0,1%. Пенная система, полученная путем добавления 1 % данной композиции к 100 мл технической воды, отличается высокой кратностью и устойчивостью. Было выявлено, что выбранный состав обладает высокой поверхностной активностью и смачивающей способностью. Для этого состава с концентрацией 0,015-0,06% при температуре 20 °С поверхностное натяжение на границе углеводород-вода составляет $9,5 \cdot 10^{-4} \div 1,2 \cdot 10^{-4}$ Н/м.

Предложенный состав был подвергнут испытаниям в качестве реагента, предотвращающего солеотложения и коррозию. Концентрация реагента в пластовой воде составляла 0,05 %. Результаты показаны в таблице 1.

Исследования показали, что состав уменьшает солеотложения более чем в 2 раз, а степень защиты

увеличивается на 62,3 %. Степень защиты от коррозии для предложенного реагента составляет 35,5%.

Таблица 1

Влияние предложенного состава на солеотложение и коррозию

Образец	Скорость г/м ³ ·час		Защитный эффект, %	
	солеотложение	коррозия	солеотложение	коррозия
Пластовая вода	2,7	0,76		
Добавка предложенного состава	1,02	0,49	62,3	35,5

Исследования по изучению воздействия предложенного состава на асфальтосмолопарафиновые (АСП) отложения были проведены методом “холодного” пальца. Полученные результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Защита от АСП отложений при добавке предложенного состава

Составы	Концентрация реагента в нефти, %	Количество АСП, г	Защита от АСП, %
Безреагентная нефть	-	24,5	-
Добавка предложенного состава	0,01	16	34,6
	0,02	17	30,6
	0,05	18,5	24,5
	0,1	22	10,2

На основе проведённых исследований можно сделать вывод, что разработанный состав твердого ПАВ обладает высокой поверхностной активностью, смачивающей и многофункциональной защитной способностью [12].

Предложен способ доставки твердых стержней на забой наклонной или горизонтальной газовой скважины. Для этого

заранее на фонтанной арматуре устанавливается лубрикатор, в котором размещают сборку узлов, жестко соединенных между собой подряд и состоящих из капсулы, внутри которого находится необходимое количество твердых стержней из ПАВ, механического ясса, грузовой штанги и узла закрепления каната, к которому подкреплён канат подъемной лебедки, проведенный через регулирующий шкив. Для активации стержней, сначала с помощью подъемной лебедки весь узел на канате опускается в скважину до упора места сужения подъемной трубы, затем канат немного приподнимается и резко опускается вниз. Под действием ударной нагрузки, созданной механическим яссом, капсула, ударившаяся об суженный низ трубы, раскрывается. При последующем подъеме каната вверх капсула постепенно освобождается от стержней, которые, попав в жидкостную среду, активируются, растворяются в накопленной на забое жидкости. При движении газа через столб жидкости с растворенным ПАВ образуется пена, состоящая из пузырьков газа, разделенных пленкой жидкости. После определенного времени технологической выдержки проводится отработка для полного выноса из скважины пены и механических примесей, затем скважина запускается.

Во второй главе представлен анализ методов глушения скважин. Как известно, к жидкостям глушения (ЖГ) при подземном, капитальном ремонтах и консервации скважин, предъявляются особые требования. Одним из важнейших требований является отсутствие или минимальная степень отрицательного влияния их на коллекторские свойства продуктивных пластов, с которыми они контактируют. Для выполнения указанных требований ЖГ должны обладать определёнными для конкретных геологических условий физико-химическими и технологическими свойствами, что достигается тщательным подбором их компонентного состава.

Исследования химических реагентов для глушения скважин были проведены на реальных водах месторождения Узень. На современном этапе разработки нефтяных месторождений среди применяемых ЖГ на водной основе, основная роль принадлежит

водным растворам минеральных солей. ЖГ на водной основе являются наиболее технологичными, не токсичными и экологически безопасными³ [3].

Для совершенствования технологии глушения, применяемой на скважинах месторождения Узень, проведены исследования химических реагентов с учетом свойств пласта. Проведены исследования по определению расходной нормы исследуемых минеральных солей, их плотности, совместимости с соляной кислотой и с пластовой водой месторождения, массы образовавшегося осадка, массовой доли ионов щёлочноземельных металлов, их влияние на фильтрационно-емкостные свойства пород. На основе комплекса лабораторных исследований выбраны наиболее эффективные составы жидкостей глушения на основе минеральных солей [6].

Для повышения эффективности способа глушения газопроявляющих скважин, увеличения устойчивости пеногеля, снижения стоимости, экологической безопасности, снижения коррозионной активности разработана новая технология. Разработан способ глушения скважины, включающий последовательную закачку в скважину пеногеля и продавочной жидкости, а перед закачкой продавочной жидкости скважину закрывают на технологическую выдержку. В качестве пеногеля используют состав, образуемый смешением полиакриламида (ПАА), сернокислого алюминия, молочной сыворотки, активного ила и ОП-10.

В качестве газообразующих веществ используют биореагенты: молочную сыворотку – отход молочнокислого производства и активный ил – отход, получаемый при очистке сточных вод. Активный ил содержит большое количество микроорганизмов, которые активизируются при подаче питательной среды (молочной сыворотки). В результате жизнедеятельности микроорганизмов образуется значительное

³ Баспаев, Е.Т., Аяпбергенов, Е.О., Рзаева, С.Д. Анализ влияния жидкостей глушения скважин на фильтрационные свойства пород месторождения «Узень» / Е.О.Аяпбергенов, С.Д.Рзаева // SOCAR Proceedings, – 2018. № 3. – с.38-44.

количество газов. Наличие ПАВ – ОП-10 способствует вспениванию закачанного состава. Полимер - ПАА повышает устойчивость пены путем образования пленок на поверхности пузырьков. За счет добавки сернистого алюминия увеличивается прочность образованного пеногеля. Образовавшиеся в результате микробиологических процессов биоПАВы и биополимеры также способствуют увеличению устойчивости и прочности образовавшегося пеногеля. После закачки состава в скважину необходима технологическая выдержка для протекания микробиологических процессов и выделения продуктов для получения прочного пеногеля. Продавка пеногеля в скважину осуществляется солевыми растворами с плотностью, выбираемой на основе пластового давления скважины (1200-1800 кг/м³).

Следует отметить, что использование биореагентов в составе пеногеля способствует постепенному образованию биоПАВ и биополимеров и приводит к поддержанию устойчивости на определенном уровне в течение длительного времени. Добавка биореагентов обеспечивает низкую коррозионную активность и экологическую безопасность состава, что также является преимуществом способа глушения скважины.

Предлагаемый состав пеногеля не загрязняет пористую среду, не снижает ее проницаемость, легко выносится из скважины под действием пластового давления при фонтанном, газлифтном способах добычи или легко прокачивается насосом при механизированных способах добычи нефти.

Способ осуществляют в следующей последовательности: все реагенты, входящие в состав пеногеля, смешивают с помощью эжектора, установленного на линии, присоединенной к вспомогательному насосу цементировочного агрегата, а затем смесь основным насосом нагнетается в скважину. После закачки необходимого объема пеногеля скважину закрывают на технологическую выдержку. Далее нагнетают продавочную жидкость. После этого производится капитальный ремонт

скважины. После завершения подземного или капитального ремонта пеногель выносится из скважины.

Составы пеногеля готовят путем добавления к рассчитанному количеству биореагентов сухого полимера - ПАА, сернокислого алюминия и ОП-10 до полного растворения путем постоянного перемешивания на лабораторной мешалке. Устанавливается время формирования пеногеля, ее плотность, кратность и устойчивость. Результаты исследований показаны в табл.3.

Как видно из таблицы 3, предложенные составы (1-5) отличаются низкой плотностью и высокими значениями кратности и устойчивости по сравнению с прототипом, что повышает эффективность процесса глушения в газопроявляющих скважинах. Время образования устойчивого пеногеля составляет около 3 часов. В известном способе пеногель образуется сразу, что будет затруднять процесс закачки его в скважину.

Таблица 3

Состав и свойства пеногеля

№ состава	Компоненты состава, масс. %					Время образования, ч	Плотность, кг/м ³	Кратность, раз	Устойчивость, сут
	ПАА	Сернокислый алюминий	ОП-10	Молочная сыворотка	Активный ил				
1	1	0,5	0,3	50	48,20	3,0	0,68	2,0	5,3
2	1,5	1	0,2	48	49,30	2,8	0,70	1,9	5,6
3	2	1,5	0,15	45	51,35	3,0	0,70	2,0	6,1
4	2,5	2	0,1	43	51,40	2,9	0,69	2,1	5,7
5	3	2,5	0,05	40	54,45	2,9	0,72	2,0	6,2
По прототипу	КМЦ 1000-5,0; Сшиватель-3,0 Газовыделяющий агент -6,0 Газообразующий агент -10; Пенообразующий агент - 0,01; Вода - остальное					-	0,81	1,6	2,5

Проведены экспериментальные исследования для определения восстановления проницаемости пористой среды после глушения скважины пеногелем. Результаты показали, что после применения предложенного способа глушения проницаемость восстанавливается до 96 %, а в случае закачки известного пеногеля проницаемость восстанавливается до 68%.

Определялось влияние пеногеля на скорость коррозии. Исследования показали, что скорость коррозии очень низкая и составляет 0-0,02 г/м²час, так как в состав предложенного пеногеля, в отличие от известного входят отходы производства. В опыте по прототипу скорость коррозии составляет 0,08 г/м²час, так как в составе присутствует соляная кислота.

В третьей главе диссертационной работы представлены новые технологии воздействия на призабойную зону скважин, эксплуатирующихся при забойных давлениях ниже давления насыщения.

В последнее время с целью улучшения проницаемости призабойной зоны пласта в нефтяных и нагнетательных скважинах применяют волновой, вибрационный, гидроимпульсный и акустический методы, в основе которых лежат различные способы передачи энергии от скважинных источников колебаний в продуктивный пласт по скважинной жидкости. Эти методы повышения добычи нефти просты в использовании и не дороги по затратам, а также могут быть применены совместно с другими видами обработки призабойной зоны: кислотной, тепловой и т.д.

Среди наиболее перспективных и экологически безопасных методов интенсификации притока нефти и газа являются методы волнового воздействия на породу, которые заключаются в создании ударной волны. Методы ударно-волнового воздействия на продуктивный пласт представляют собой обработку призабойной зоны, которые делятся на два вида: непосредственное воздействие на ближнюю прискважинную зону пласта от источника упругих волн и удаленное воздействие от источника. При создании ударной волны с устья скважины волна, добежав до дна скважины, отражается и создает ударный

импульс. Интенсивность давления на дне скважины определяется формой и частотой изменения давления в устье.

Все принципиально различающиеся источники возбуждения ударно-волнового поля в конечном итоге используют эффект нелинейного взаимодействия интенсивного поля упругих колебаний от нефтенасыщенных и газоводонасыщенных пород, что приводит к снижению вязкости поровых флюидов, увеличивает скорость их фильтрации, а также проницаемость пласта и коэффициент вытеснения углеводородов.

Ударно-волновое воздействие за счет активизации процессов ползучести в горной породе приводит к изменению напряженно-деформированного состояния пласта, которое в свою очередь, сопровождается переформированием локальных фильтрационных потоков в пласте и вовлечением в движение нефти из застойных зон.

Нефтегазодобывающие и нагнетательные скважины, не дающие приток после бурения, а также во время эксплуатации из-за засорения призабойной зоны пласта, могут быть объектами применения технологии ударно-волнового воздействия на призабойную зону пласта в интервалах перфорации. Тип коллектора, степень минерализации воды, солевой состав и способ эксплуатации скважины не ограничивают условия применения этих технологий.

Исследования применения ударно-волнового действия на призабойную зону пласта показывают, что после него ликвидируются загрязнения (кольматации) призабойной зоны пласта, увеличивается приток нефти и газа, а также приемистость нагнетательных скважин, что в итоге увеличивает продуктивность скважин.

Для применения технологии ударно-волнового действия на призабойную зону пласта известны различные устройства, не обеспечивающие достаточную резонансную раскачку столба скважинной жидкости, которая создает в скважине ударные волны давления и разрежения, а также являющиеся недостаточно производительными и надежными.

Для снижения фильтрационных сопротивлений и восстановления гидродинамической связи пласта и скважины, разработана новая конструкция устьевого устройства для ударно-волнового воздействия на призабойную зону пласта, которая может быть использована для повышения нефтеотдачи путем воздействия через скважину на продуктивный пласт при освоении и ремонте эксплуатационных скважин. В данной работе, созданием надежной конструкции и постоянной и не прекращающей подачей сжатого воздуха с меньшим давлением, решена задача увеличения частоты закрытия и открытия устьевого устройства, что позволяет использовать её для создания в скважине ударных волн давления и разрежения.

Разработанное устьевое устройство состоит из двух основных частей, т.е. шиберной задвижки и привода автоматического управления задвижкой⁴ [11]. Применяемое как в нагнетательных, так и в добывающих скважинах устройство устанавливают на устье скважины с помощью фланцевых соединений, расположенных на крышке и корпусе шиберной задвижки, а затем запускают скважину. Пропускное отверстие шиберной задвижки автоматически “открывается” и “закрывается”. Периодическое открывание и закрывание шиберной задвижки приводит к регулярному прохождению волн давления и разрежения по полости насосно-компрессорной трубы. Волны давления и разрежения, перемещаясь по полости скважины от устья к забою и обратно, создают удары, в том числе в призабойной зоне.

Таким образом, применение разработанного устьевого устройства для ударно-волнового воздействия на призабойную зону пласта, улучшая гидродинамические связи и тем самым облегчая фильтрацию в системе «пласт-скважина», вводит в разработку низкопроницаемые и изолированные зоны продуктивного пласта, что способствует повышению его нефтеотдачи и снижает себестоимость нефти.

⁴ Исмаилов, Ф.С., Сулейманов, Б.А., Ибадов, Г.Г., Тастемиров, А.Р., Баспаев, Е.Т. Устьевое устройство для ударно-волнового воздействия на призабойную зону пласта, Евразийский патент № 032854– 2019.

Разработанное устьевое устройство для ударно-волнового воздействия на призабойную зону было апробировано на скважинах № 2013 и №2067 НГДУ «Нефть Дашлары». Снижение забойного давления ниже давления насыщения привело к ухудшению фильтрационной характеристики призабойной зоны, вследствие этого продуктивность скважин уменьшилась. В результате проведения ударно-волновой обработки призабойной зоны скважин дополнительная добыча нефти составила 283 тонны.

Разработка месторождений, сложенных слабосцементированными терригенными породами, сопровождается интенсивным пескопроявлением. В настоящее время применяется эффективное оборудование для предотвращения пескопроявления, что позволяет значительно повысить продуктивность эксплуатации скважин. Однако на старых месторождениях применение дорогостоящего оборудования экономически не выгодно. В связи с этим при низких скоростях водонефтяного потока в скважине происходит активное осаждение песка на забое скважины с образованием песчаной пробки, высота которой может достигать нескольких сотен метров.

Образование песчаной пробки происходит по следующей схеме. При выносе песка из продуктивного пласта потоком жидкости вода скапливается на забое скважины. При этом происходит налипание мелких глинистых частиц на внутреннюю и внешнюю поверхность НКТ. К глинистым частицам в свою очередь прилипают песчинки, постепенно образуя песчаную пробку.

Для предотвращения налипания глинистых частиц необходимо произвести покрытие поверхности труб металлической пленкой с отрицательным стандартным потенциалом. При этом отрицательно заряженные глинистые частицы при подходе к поверхности металла с отрицательным стандартным потенциалом будут отталкиваться от него и подхваченные потоком жидкости выноситься из скважины.

В предложенном способе предотвращения образования песчаных пробок в скважине, включающем спуск насосно-компрессорных труб, с использованием металла, обладающего отрицательным электродным потенциалом, внутреннюю поверхность насосно-компрессорных труб покрывают металлом с отрицательным электродным потенциалом, значение которого меньше $-0.7V$, а высоту покрытия выбирают равной максимальной высоте песчаной пробки, образующейся в скважине данного месторождения [8].

При осуществлении предлагаемого способа предотвращения образования песчаных пробок в скважине во время выноса песка из продуктивного пласта потоком флюида, глинистые частицы, обладающие отрицательным зарядом, проходящие через насосно-компрессорные трубы не налипают на их стенки, а наоборот, отталкиваются от них и выносятся подхваченные потоком флюида на дневную поверхность. Выбор высоты покрытия металлом с отрицательным электродным потенциалом внутренней поверхности насосно-компрессорных труб равной максимальной высоте песчаной пробки, образующейся в скважине, позволяет полностью удалить всю образовавшуюся пробку.

Для экспериментальной проверки предлагаемого способа, одинаковые по форме и площади внешней поверхности фильтры, изготовленные из различных металлов (хром - Cr, цинк - Zn, никель - Ni и железо - Fe) помещались в водный раствор бентонитовой глины (с концентрацией бентонита 3.4%). Через 3 часа измерялась масса осевших на поверхности фильтров глинистых частиц. Установлено, что относительная масса глинистых частиц, накопившихся на поверхности фильтров, внутренняя поверхность которых покрыта Cr или Zn (значение электродного потенциала меньше $-0.7V$) значительно меньше, чем на поверхности фильтров, внутренняя поверхность которых покрыта Ni и Fe.

На графике 4 приведены значения относительной массы осевших глинистых частиц и стандартного электродного потенциала использованных в эксперименте металлов. При этом

получено, что относительная масса глинистых частиц, осевших на поверхностях, покрытых Cr или Zn (значения электродного потенциала меньше - 0.7V) значительно меньше, чем на поверхностях, покрытых Ni и Fe (значения электродного потенциала больше -0.7V). С уменьшением стандартного электродного потенциала накопление глинистых частиц уменьшается, т.е. чем отрицательнее электрод, тем меньше относительная масса накопившихся глинистых частиц.

Как видно из графика, с уменьшением стандартного электродного потенциала металла масса глинистых частиц на его поверхности уменьшается.

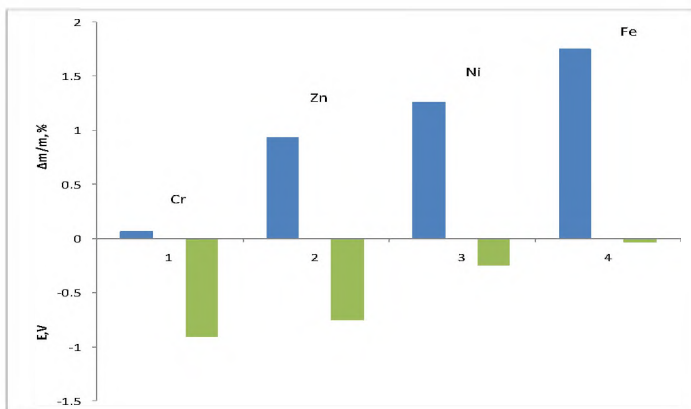


График 4. Относительная масса глинистых частиц, осевших на поверхности фильтров, покрытых пленками различных металлов: 1- Cr, 2- Zn, 3 – Ni, 4 – Fe и стандартный электродный потенциал металлов

Для объяснения полученных результатов были рассмотрены силы взаимодействия между частицей песка SiO_2 и частицей металла (Cr, Zn, Ni и Fe) в водной среде. Образование агрегатов частиц согласно теории ДЛФО (теория Дерягина, Ландау, Фервея, Овербека) определяется балансом сил Ван-дер Ваальсового притяжения и сил отталкивания, возникающих при перекрытии двойных электрических слоев этих частиц. Ван дер Ваальсовое взаимодействие между двумя частицами в водной

среде отличается от их взаимодействия в вакууме. В водной среде на частицы будет действовать расклинивающее давление. Отметим, что во всех рассмотренных случаях Ван дер Ваальсовое взаимодействие между металлической частицей (А: Cr, Zn, Ni, Fe) и частицей глины (В: SiO_2) в водной среде является притягательным.

Поэтому единственная возможность для предотвращения осаждения глинистых частиц на поверхности металла обусловлена потенциальной энергией отталкивания при перекрытии двойных электрических слоев частиц.

Определено, что наибольшее значение потенциальной энергии отталкивания имеют пары частиц (Cr - SiO_2) и (Zn - SiO_2), т.е. если покрытие поверхности металлических труб Cr или Zn позволит предотвратить осаждение глинистых частиц и образование песчаной пробки. Для достижения этого результата высота покрытия металлом с отрицательным электродным потенциалом внутренней поверхности насосно-компрессорных труб должна быть равна максимальной высоте песчаной пробки на месторождении⁵ [9].

Таким образом, предложен способ предотвращения образования песчаных пробок в скважине применением металлов с отрицательным электродным потенциалом. Показано, что использование покрытия НКТ пленкой металлов с низкими отрицательными электродными потенциалами ниже 0.7V позволяет предотвратить образование песчаной пробки в скважине. При этом высота покрытия металлом с отрицательным электродным потенциалом внутренней поверхности насосно-компрессорных труб должна быть равна максимальной высоте песчаной пробки на месторождении. Предложен механизм наблюдаемых явлений на основе теории ДЛФО.

⁵ Сулейманов, Б.А. Гасанов, Ф.Г., Аббасов, Х.Ф., Баспаев, Е.Т. Способ предотвращения образования песчаных пробок в скважине, Евразийский патент № 036356, – 2020.

ВЫВОДЫ

1. Предложен механизм течения газоконденсатной системы в пористой среде, согласно которому образование стабильных докритических зародышей конденсата приводит к эффекту проскальзывания и изменению сжимаемости системы. Рассмотрен механизм стабилизации докритических зародышей совместным действием поверхностных и электрических сил;

2. При стационарной фильтрации газоконденсатной смеси получено:

- при давлении, значительно превышающем давление начала ретроградной конденсации $P = 1.74P_c$, начинается увеличение расхода газа;

- при давлении $P = 1.5P_c$ он достигает своего пика и практически на 30% превышает расход вблизи критического давления;

- зависимость расхода газа от уровня давления носит немонотонный характер и повышенные значения расхода достигаются в интервале уровня давления $P = 1.4 - 1.74P_c$.

- в олеофобной пористой среде увеличения расхода газа не наблюдается.

3. Экспериментально изучена нестационарная фильтрация газоконденсатной системы. Показано, что со снижением уровня давления в процессе нестационарной фильтрации происходит существенное уменьшение пьезопроводности и увеличение сжимаемости системы.

4. Разработан состав твердого ПАВ для удаления жидкости с забоя наклонных газовых скважин, обладающий высокой поверхностной активностью, смачивающей и многофункциональной защитной способностью.

5. Предложен новый способ глушения газопроявляющих скважин на основе пеногеля при забойных давлениях ниже давления насыщения.

6. Разработано устьевое устройство для ударно-волнового воздействия на призабойную зону скважины, включающее шибберную задвижку и привод автоматического управления задвижкой, которое позволяет создавать в скважине ударные

волны давления и разрежения. Разработанное устройство успешно апробировано на двух скважинах месторождения «Нефть Дашлары», при этом дополнительная добыча нефти составила 283 тонны;

7. Предложен способ для предотвращения образования песчаных пробок в скважине путем покрытия внутренней поверхности насосно-компрессорных труб металлом с отрицательным электродным потенциалом, а высоту покрытия выбирают равной максимальной высоте песчаной пробки, образующейся в скважине данного месторождения.

Основное содержание и результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Сулейманов, Б.А., Сулейманов, А.А., Аббасов, Э.М., Баспаев, Е.Т. О влиянии докритического зародышеобразования на течение газоконденсатных систем в пористой среде // SOCAR Proceedings, – 2017. № 2. – с.34-48.

2. Suleimanov, B.A., Suleymanov A.A., Abbasov, E.M., Baspayev, E.T. A mechanism for generating the gas slippage effect near the dewpoint pressure in a porous media gas condensate flow // Journal of Natural Gas Science and Engineering, - 2018, №5- p.237-248.

3. Баспаев, Е.Т., Аяпбергенов, Е.О., Рзаева, С.Д. Выбор жидкости глушения скважин для условий месторождения Узень // Булатовские чтения: материалы II Международной научно-практической конференции: в 7 т: сборник статей / Краснодар: Издательский Дом – Юг / Т. 2 в 2 ч.: Разработка нефтяных и газовых месторождений. Ч. 1: - 31 марта, - 2018. - с.70-75.

4. Баспаев, Е.Т., Аяпбергенов, Е.О., Рзаева, С.Д. Анализ влияния жидкостей глушения скважин на фильтрационные свойства пород месторождения «Узень» / Е.О.Аяпбергенов, С.Д.Рзаева // SOCAR Proceedings, – 2018. № 3. – с.38-44.

5. Сулейманов, Б.А., Сулейманов, А.А., Аббасов, Е.М., Баспаев, Е.Т. Об эффекте проскальзывания при течении газоконденсатных систем в пористой среде // Булатовские чтения : материалы III Международной научно-практической конференции: в 5 т.: сборник статей / под общ. ред. д-ра техн. Издательский Дом – Юг / Т.1: Прогноз, поиск и разведка месторождений нефти и газа. Нефтегазопромысловая геология. Разведочная и промысловая геофизика: –31 марта, - 2019. – с. 124-142.

6. Баспаев, Е.Т., Аяпбергенов, Е.О., Рзаева, С.Д. Результаты лабораторных исследований жидкостей глушения на основе минеральных солей // Международная научно-практическая конференция «Состояние и перспективы эксплуатации зрелых месторождений», Филиал ТОО «НИИ ТДБ КМГ»

«КазНИПИмұнайгаз» в городе Актау: - 16-17 мая, - 2019 года. – 8 с.

7. Исмаилов, Ф.С., Сулейманов, Б.А., Ибадов, Г.Г., Тастемиров, А.Р., Баспаев, Е.Т. Устьевое устройство для ударно-волнового воздействия на призабойную зону пласта, Евразийский патент № 032854– 2019.

8. Баспаев, Е.Т. Предотвращение образования песчаных пробок в скважине применением металлов с отрицательным электродным потенциалом // SOCAR Proceedings, – 2020. №1. – с. 36-39.

9. Баспаев, Е.Т. Борьба с пескопроявлением в нефтяных скважинах применением металлов с отрицательным электродным потенциалом Булатовские чтения: материалы IV Международной научно-практической конференции: в 7 т.: сборник статей / под общ.ред. д-ра техн. Наук, проф. О.В. Савенок. – Краснодар: Издательский Дом – Юг / Т. 2: Разработка нефтяных и газовых месторождений: - 31 марта, – 2020. – с. 72-74.

10. Сулейманов, Б.А. Гасанов, Ф.Г., Аббасов, Х.Ф., Баспаев, Е.Т. Способ предотвращения образования песчаных пробок в скважине, Евразийский патент № 036356, – 2020.

11. Баспаев, Е.Т. Новое устьевое устройство для ударно-волновой обработки призабойной зоны скважины // SOCAR Proceedings, - 2021. № 1. –с. 56-62.

12. Баспаев, Е.Т. Повышение эффективности удаления жидкости с забоя газовых скважин // SOCAR Proceedings, - 2021. № 3. – с 68-77.

13. Сулейманов, Б.А., Рзаева, С.Д., Гурбанов, А.Г., Баспаев, Е.Т. Способ глушения скважины Евразийского патент № 046618 -2024.

Личный вклад соискателя

Работы [8,9,11,12] выполнены самостоятельно, в работах [3,4,6,10,13] участие в постановке задачи, проведении исследований и обобщении результатов, в работах [1,2,5,7] участие в постановке задачи и обобщении результатов.

Защита диссертации состоится 17 июня 2025 года в 11⁰⁰ на заседании Диссертационного совета ВЕД 2.03, действующего на базе Азербайджанского Государственного Университета Нефти и Промышленности.

Адрес: AZ1010, г. Баку, улица Д. Алиевой, 227

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Азербайджанского Государственного Университета Нефти и Промышленности.

Электронная версия диссертации и автореферата размещена на официальном сайте Азербайджанского Государственного Университета Нефти и Промышленности.

Автореферат разослан по соответствующим адресам

16 мая 2025 года

Подписано в печать: 12.05.2025

Формат: А5

Объём: 37494

Тираж: 70