АЗЕРБАЙДЖАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА

На правах рукописи

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СКВАЖИН С УЧЕТОМ ГИДРОМЕХАНИКИ ДВУХФАЗНЫХ СИСТЕМ

Специальность: 2525.01 – “Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений”

Отрасль науки: Технические науки

Соискатель: **Цао Жу**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора философии

Баку – 2026

Диссертационная работа выполнена на кафедре «Нефтегазовая инженерия» Азербайджанского государственного университета нефти и промышленности.

Научный руководитель:	Доктор философии по техническим наукам, доцент **Дадаш-заде Мирза Ахмед оглы**
Официальные оппоненты:	Член-корреспондент НАНА, доктор технических наук, профессор **Эфендиев Галиб Мамед оглы** Доктор технических наук, профессор **Мамедзаде Ариф Микаил оглы** Доктор философии по техническим наукам **Ахмедов Рауф Ахмед Ага оглы**

Диссертационный совет FD 2.03 Высшей Аттестационной Комиссии при Президенте Азербайджанской Республики, действующий на базе Азербайджанского Государственного Университета Нефти и Промышленности.

Председатель диссертационного совета:	Доктор технических наук, профессор **Искендеров Эльман Хейрулла оглы**
Ученый секретарь диссертационного совета:	Доктор философии по техническим наукам, доцент **Шмончева Елена Евгеньевна**
Председатель научного семинара:	Доктор технических наук, доцент **Гамидов Натиг Нейман оглы**

Подписи заверяю:
Ученый секретарь АГУНП, доктор философии по техническим наукам, доцент

Алиев Инглаб Намиг оглы

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы и степень разработанности проблемы.

Движение двухфазных газожидкостных систем представляет собой сложный гидродинамический процесс, характеризующийся взаимосвязанным переносом массы, импульса и энергии между фазами. Исследование таких процессов относится к фундаментальным задачам механики сплошных сред, гидродинамики и теории многофазных потоков и широко применяется при анализе природных и технических систем.

Теоретические основы исследования газожидкостных систем сформированы в классических работах по гидродинамике и турбулентности, в которых рассматриваются закономерности движения сплошных и многофазных сред, особенности турбулентных течений и механизмы межфазного взаимодействия.

В нефтегазовой промышленности процессы движения газожидкостных смесей играют ключевую роль при эксплуатации скважин и транспортировке продукции по трубопроводам. Формирование структуры потока, распределение фаз и режим течения определяют гидравлические потери и эффективность добычи углеводородов.

В процессе разработки месторождений изменение пластового давления, температуры и фильтрационных свойств пористой среды приводит к возникновению сложных гидродинамических процессов в системе «пласт – скважина». Особое значение имеет состояние призабойной зоны, так как её загрязнение и изменение фильтрационных характеристик существенно снижают продуктивность скважин.

Объектом исследования является система «пласт – скважина», содержащая газожидкостную смесь, движение которой определяется сложным взаимодействием фаз, реологическими свойствами жидкости и геометрией канала течения.

Реологические свойства нефти и нефтяных эмульсий существенно отличаются от ньютоновских жидкостей, что требует применения специальных моделей для описания течения вязкопластичных и аномальных сред.

Для описания движения газожидкостных потоков широко применяются двухжидкостные модели, модели дрейфового потока и усреднённые уравнения многофазных сред, разработанные в трудах ведущих исследователей.

Несмотря на значительное количество исследований, остаётся ряд нерешённых задач, связанных с точным определением параметров двухфазного потока, учётом реологических свойств жидкости и влиянием скин-фактора на фильтрационные процессы.

В инженерной практике установлено, что эффективность разработки нефтегазовых месторождений во многом определяется продуктивностью скважин, зависящей от состояния призабойной зоны и условий фильтрации флюидов.

В связи с этим особую актуальность приобретают методы повышения нефтеотдачи и интенсификации притока, направленные на улучшение фильтрационных характеристик и снижение гидродинамических сопротивлений.

Таким образом, разработка методов, учитывающих совместное влияние многофазности потока, реологических свойств и скин-фактора, является актуальной научной и практической задачей.

Цель исследования

Целью работы является разработка усовершенствованной методики определения параметров газожидкостного потока и забойного давления с учётом гидродинамических и реологических факторов.

Задачи исследования

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- Разработать математическую модель движения двухфазного потока в системе «пласт - скважина»;

- Установить закономерности распределения фаз и параметров потока;

- Разработать метод определения профиля скоростей;

- Определить расходные характеристики фаз;

- Разработать метод расчёта гидравлических потерь;

- Создать методику определения забойного давления на основе устьевых данных;

- Исследовать влияние скин-фактора на параметры потока и процесс фонтанирования.

Методы исследования

В работе использованы методы теоретического анализа, математического моделирования, численного расчёта, а также экспериментальные и промысловые исследования.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования являются процессы движения двухфазных газожидкостных систем в стволе нефтяных и газовых скважин.

Предметом исследования являются закономерности формирования гидродинамических параметров, определяющих забойное давление, профиль притока и характеристики межфазного взаимодействия в неравновесных условиях.

Научная новизна

Разработана новая гидродинамическая модель движения двухфазного газожидкостного потока с учётом реологических свойств жидкости.

Впервые установлены закономерности влияния скин-фактора на параметры потока и процесс фонтанирования.

Предложен оригинальный метод определения параметров потока на основе комплексного анализа гидродинамических характеристик.

Разработана усовершенствованная методика расчёта забойного давления на основе устьевой информации с учётом многофазности потока.

Основные положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся следующие основные положения:

- Инженерно-математический подход к определению основных гидродинамических характеристик нефтяных и газовых скважин с учётом гидромеханики двухфазных газожидкостных систем.

- Математические модели определения забойного давления и профиля притока, учитывающие влияние межфазного взаимодействия, структурной организации потока, поверхностных сил и неравновесных процессов.

- Методика определения гидродинамических характеристик скважин по данным устьевых измерений без применения глубинных измерительных приборов.

- Вычислительные алгоритмы прогнозирования эксплуатационных характеристик нефтяных и газовых скважин, обеспечивающие повышение точности инженерных расчётов.

Теоретическая значимость исследования

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в дальнейшем развитии методов математического моделирования гидромеханики двухфазных газожидкостных систем. Полученные аналитические зависимости расширяют представления о механизмах формирования забойного давления, межфазного взаимодействия и влияния структурной неоднородности потока на гидродинамические характеристики нефтяных и газовых скважин.

Практическая значимость

Разработанная методика позволяет повысить точность определения параметров потока и забойного давления, что способствует оптимизации работы скважин и повышению нефтеотдачи.

Апробация и публикации

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных и республиканских научных конференциях, научных семинарах и форумах, посвящённых вопросам разработки нефтяных и газовых месторождений, гидромеханики двухфазных систем и математического моделирования процессов фильтрации, включая 9th International Conference on Energy Science and Applied

Technology (ESAT 2024), 4th International Conference on Advances in Materials, Machinery, Electrical Engineering (AMMEE 2025) и Republican Scientific Conference of PhD Students and Young Researchers (2025). Результаты исследования получили положительную оценку специалистов и были использованы при дальнейшем развитии представленных в диссертации математических моделей.

Организация, в которой выполнена диссертация

Диссертационная работа выполнена на кафедре «Нефтегазовая инженерия» Азербайджанского государственного университета нефти и промышленности (АГУНП).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 11 научных работ, в том числе 7 научных статей и 4 материала международных и республиканских научных конференций. Среди опубликованных работ имеются 2 статьи, индексируемые в международной наукометрической базе данных Scopus.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, трёх глав, выводов и списка использованной литературы.

Общий объём диссертации составляет 206092 символов, включая введение – 8480 символ, глава 1 – 40635 символов, глава 2 – 96157 символов, глава 3 – 59102 символов, выводы – 1718 символов и 160 наименований использованной литературы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, связанная с необходимостью совершенствования методов определения основных характеристик нефтяных и газовых скважин с учётом гидромеханики двухфазных газожидкостных систем. Движение газожидкостных смесей в системе «пласт – скважина» представляет собой сложный многофакторный процесс, в котором одновременно изменяются распределение фаз, давление, скорость движения, плотность и эффективная вязкость смеси. При эксплуатации нефтяных и газовых месторождений изменение пластового давления, температуры, состава добываемой продукции и фильтрационных свойств коллектора сопровождается существенным изменением условий движения флюидов.

Особое значение имеет тот факт, что при снижении давления в стволе скважины растворённый в нефти газ выделяется из жидкой фазы, вследствие чего формируется двухфазный поток с переменным газосодержанием. Изменение объёмного содержания газа приводит к изменению эффективной плотности и гидравлического сопротивления смеси, а также к переходу между различными режимами течения. В зависимости от эксплуатационных условий могут формироваться пузырьковый, пробковый, кольцевой и переходные режимы течения. Каждый из этих режимов характеризуется различным распределением фаз и различным вкладом гравитационных, инерционных и межфазных сил в общий градиент давления.

В нефтегазовой промышленности точное определение гидродинамических характеристик скважин имеет непосредственное значение для оценки их продуктивности, расчёта забойного давления, определения профиля притока и выбора рационального режима эксплуатации. Особенно сложными являются условия, при которых жидкая фаза обладает неньютоновскими или аномальными реологическими свойствами. Нефти, содержащие асфальтены, смолы и другие высокомолекулярные компоненты, могут характеризоваться вязкопластическим, псевдопластическим и тиксотропным

поведением. В таких условиях применение моделей, основанных исключительно на предположении о ньютоновском поведении жидкости, может приводить к систематическим погрешностям.[1]

Дополнительным фактором является состояние призабойной зоны пласта. Загрязнение, изменение проницаемости, наличие дополнительных гидродинамических сопротивлений и формирование скин-зоны непосредственно влияют на приток жидкости и газа к скважине. В условиях двухфазной фильтрации влияние скин-фактора становится ещё более сложным, поскольку изменение сопротивления призабойной зоны отражается не только на величине дебита, но и на распределении давления и параметрах движущейся газожидкостной смеси.

Несмотря на значительное количество выполненных исследований, существующие модели не всегда обеспечивают необходимую точность расчётов при их применении к реальным нефтяным и газовым скважинам. Классические корреляционные зависимости, включая Lockhart–Martinelli, Hagedorn–Brown и Beggs–Brill, получили широкое распространение благодаря относительной простоте и возможности использования в инженерных расчётах. Вместе с тем их применимость определяется диапазонами экспериментальных условий, в которых были получены исходные зависимости. При существенном изменении свойств флюидов, режима течения, геометрии скважины или состояния призабойной зоны точность расчёта может снижаться. В диссертации отмечается, что применение существующих подходов в сложных промысловых условиях может сопровождаться значительными расхождениями между расчётными и фактическими значениями забойного давления, дебита и профиля притока. [2]

---

[1]Chhabra R. P., Richardson J. F. Non-Newtonian Flow and Applied Rheology: Engineering Applications. — 2nd ed. — Oxford: Butterworth-Heinemann, 2008. — 536 p.

[2]Govier G. W., Aziz K. The Flow of Complex Mixtures in Pipes. — New York: Van Nostrand Reinhold, 1972. — 800 p.

В связи с этим целью исследования является разработка усовершенствованной методики определения параметров газожидкостного потока и забойного давления с учётом гидродинамических и реологических факторов. Для достижения поставленной цели в работе решается комплекс взаимосвязанных задач, включающих разработку математической модели движения двухфазного потока в системе «пласт – скважина», исследование распределения фаз и параметров потока, определение профиля скоростей и расходных характеристик фаз, разработку метода расчёта гидравлических потерь, определение забойного давления по устьевой информации, а также исследование влияния скин-фактора на параметры потока и процесс фонтанирования.

В работе использованы методы теоретического анализа, математического моделирования, численного расчёта, а также экспериментальные и промысловые исследования. Объектом исследования являются процессы движения двухфазных газожидкостных систем в стволе нефтяных и газовых скважин, а предметом исследования являются закономерности формирования гидродинамических параметров, определяющих забойное давление, профиль притока и характеристики межфазного взаимодействия в неравновесных условиях.

Научная новизна работы заключается в разработке новой гидродинамической модели движения двухфазного газожидкостного потока с учётом реологических свойств жидкости; установлении закономерностей влияния скин-фактора на параметры потока и процесс фонтанирования; предложении оригинального метода определения параметров потока на основе комплексного анализа гидродинамических характеристик; а также разработке усовершенствованной методики расчёта забойного давления по устьевой информации с учётом многофазности потока.

Теоретическая значимость исследования связана с дальнейшим развитием методов математического моделирования гидромеханики двухфазных газожидкостных систем. Полученные зависимости позволяют расширить представления о

механизмах формирования забойного давления, межфазного взаимодействия и влиянии структурной неоднородности потока на гидродинамические характеристики нефтяных и газовых скважин. Практическая значимость заключается в возможности повышения точности определения параметров потока и забойного давления, что создаёт предпосылки для оптимизации работы скважин и повышения эффективности разработки месторождений.

В первой главе выполнен систематизированный анализ современного состояния исследований в области гидромеханики двухфазных газожидкостных систем. Рассмотрены основные теоретические представления о движении многофазных сред, современные математические и эмпирические модели, исторические этапы развития исследований двухфазных потоков, существующие проблемы и нерешённые вопросы, а также основные направления дальнейшего совершенствования методов определения характеристик нефтяных и газовых скважин.

Движение двухфазной газожидкостной системы рассматривается как сложный гидродинамический процесс, связанный с одновременным переносом массы, импульса и энергии между фазами. В отличие от однофазного течения, характеристики двухфазного потока определяются не только физическими свойствами отдельных компонентов, но и особенностями их взаимного движения. К числу наиболее существенных факторов относятся относительная скорость фаз, газосодержание, структура потока, межфазное трение, силы тяжести, поверхностное натяжение, реологические характеристики жидкой фазы и геометрические параметры канала.

Показано, что в условиях нефтяных и газовых скважин двухфазное течение формируется непосредственно в процессе подъёма продукции по стволу. При снижении давления происходит выделение растворённого газа, вследствие чего газовая фаза постепенно увеличивается, а параметры смеси изменяются по глубине скважины. В результате плотность смеси, её эффективная вязкость и гидравлическое сопротивление не

являются постоянными величинами. Это приводит к формированию переменного распределения давления и скорости по длине ствола.

Теоретическое описание таких процессов основывается на уравнениях сохранения массы, импульса и энергии для отдельных фаз. В зависимости от требуемой точности и степени детализации применяются гомогенные модели, разделённые модели, двухжидкостные модели, модели дрейфового потока и другие многофазные подходы. Гомогенные модели предполагают одинаковую скорость движения фаз и общие поля давления, что позволяет существенно упростить расчёт. Однако такое предположение ограничивает возможность описания реального относительного движения газа и жидкости.

В более сложных разделённых и двухжидкостных моделях учитывается различие скоростей фаз, а взаимодействие между ними описывается через соответствующие коэффициенты межфазного обмена. Такой подход позволяет более детально рассматривать распределение фаз и переходы между различными режимами течения. Вместе с тем повышение физической детальности модели сопровождается увеличением числа исходных параметров и вычислительной сложности.

Одним из основных параметров двухфазного потока является газосодержание, характеризующее объёмную долю газовой фазы в смеси. При увеличении газосодержания существенно изменяются эффективная плотность смеси, скорость движения фаз и величина гидравлических потерь. В условиях скважины данные изменения непосредственно отражаются на распределении давления и могут существенно влиять на величину забойного давления.

Особое внимание в первой главе уделено существующим инженерным корреляциям. В качестве наиболее распространённых подходов рассмотрены модели Lockhart–Martinelli, Hagedorn–Brown и Beggs–Brill. Эти модели получили широкое применение в нефтегазовой инженерии благодаря возможности относительно быстро определять градиенты давления и другие параметры двухфазного потока.

Модель Lockhart–Martinelli относится к числу ранних инженерных корреляций для расчёта гидравлического сопротивления двухфазного потока. Её преимуществом является относительная простота и небольшое количество исходных параметров. Вместе с тем модель была разработана на основе ограниченного набора экспериментальных данных и не учитывает многие особенности современных нефтегазовых скважин, включая сложные переходные режимы, изменение реологических характеристик жидкой фазы и влияние состояния призабойной зоны.

Корреляция Hagedorn–Brown широко применяется при расчёте градиента давления в вертикальных скважинах. По сравнению с более ранними моделями она обеспечивает более детальное описание распределения фаз и движения газожидкостной смеси. Однако её точность также зависит от соответствия рассматриваемых условий диапазону исходных экспериментальных данных. Влияние реологических характеристик жидкости и скин-фактора непосредственно в модели не рассматривается.

Модель Beggs–Brill получила широкое распространение благодаря возможности расчёта двухфазного потока в трубах различной ориентации. Она учитывает изменение режима течения в зависимости от условий движения смеси и поэтому является удобным инженерным инструментом. Однако использование эмпирических коэффициентов и зависимостей ограничивает её применение в условиях сложных геолого-технических систем и при нестандартных свойствах пластовых флюидов. Сравнение этих моделей в диссертации показывает, что ни одна из них не обеспечивает полного учёта совокупного влияния реологических свойств жидкости, состояния призабойной зоны и особенностей межфазного взаимодействия.

В первой главе также рассмотрено историческое развитие исследований двухфазных потоков. Первоначальные исследования были связаны преимущественно с задачами теплоэнергетики и ядерной энергетики, где газожидкостные потоки имели большое значение для расчёта теплообмена и

устойчивости оборудования. В дальнейшем сформированные теоретические и экспериментальные подходы получили широкое применение в нефтегазовой промышленности.

Значительный вклад в развитие теории двухфазных потоков внесли исследования Zuber, Wallis и Griffith, связанные с изучением механизмов образования и коалесценции пузырьков, межфазного взаимодействия и динамики поверхности раздела. В нефтегазовой отрасли дальнейшее развитие получили методы расчёта газожидкостных потоков в скважинах, насосно-компрессорных трубах и системах транспорта продукции.[3]

Важным этапом стало появление эмпирических и полуэмпирических корреляций, позволивших перейти от преимущественно экспериментального изучения потоков к инженерным расчётам. Впоследствии развитие вычислительной техники способствовало широкому внедрению методов вычислительной гидродинамики. CFD-подходы позволили моделировать движение отдельных фаз, межфазное взаимодействие, турбулентность, капиллярные и гравитационные эффекты, а также учитывать более сложную геометрию каналов. Вместе с тем высокая вычислительная сложность CFD-моделей ограничивает их применение для оперативных промысловых расчётов. [4]

Отдельный раздел первой главы посвящён проблемам и нерешённым вопросам существующих исследований. Установлено, что одной из основных проблем является отсутствие универсальной математической модели, способной одинаково адекватно описывать различные режимы двухфазного течения в широком диапазоне эксплуатационных условий.

Большинство классических корреляций основано на упрощающих предположениях относительно равновесия фаз, постоянства физических свойств и устойчивости режима

---

[3]Zuber N., Findlay J. A. Average Volumetric Concentration in Two-Phase Flow Systems // Journal of Heat Transfer. — 1965. — Vol. 87, No. 4. — P. 453–468.

[4]Versteeg H. K., Malalasekera W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method. — 2nd ed. — Harlow: Pearson Education, 2007. — 520 p.

течения. В реальных скважинах такие условия выполняются не всегда. Газожидкостная смесь характеризуется непрерывным перераспределением фаз, изменением скорости и давления, локальными пульсациями и переходами между режимами течения.

Существенным ограничением является также перенос результатов лабораторных исследований на промысловые условия. Геометрические размеры лабораторных установок значительно отличаются от размеров эксплуатационных скважин, вследствие чего изменяются критерии подобия, режим движения и относительное влияние поверхностных и капиллярных сил. Поэтому непосредственное использование лабораторных корреляций без дополнительной адаптации может приводить к систематическим ошибкам при определении гидродинамических параметров скважин.

Другой существенной проблемой является недостаточный учёт нестационарных, термодинамических и капиллярных эффектов. При движении газожидкостной смеси изменение давления и температуры сопровождается изменением физических свойств фаз и условий межфазного взаимодействия. Особенно существенным влияние капиллярных сил может становиться в низкопроницаемых коллекторах и при малых характерных размерах пор.

Реологические свойства жидкости также оказывают значительное влияние на структуру двухфазного потока. При наличии аномальной вязкости изменение содержания высокомолекулярных компонентов нефти может приводить к изменению эффективной вязкости, гидравлического сопротивления и распределения скоростей фаз. Следовательно, применение моделей, предполагающих ньютоновское поведение жидкой фазы, не всегда позволяет адекватно описать реальные процессы фильтрации и движения продукции.

Особое место занимает проблема идентификации режимов течения. В реальной скважине режим движения может изменяться по длине ствола вследствие снижения давления, изменения газосодержания и взаимодействия фаз. Переход от

пузырькового режима к пробковому, а затем к кольцевому сопровождается изменением гидравлического сопротивления и характера распределения давления. Поэтому корректное определение режима течения является важной предпосылкой для повышения точности последующих расчётов.

В первой главе также показано, что состояние призабойной зоны необходимо рассматривать совместно с характеристиками двухфазного потока. Скин-фактор отражает дополнительные гидродинамические сопротивления в околоскважинной зоне и непосредственно влияет на приток флюида. В условиях двухфазной фильтрации изменение скин-фактора может сопровождаться изменением профиля притока, распределения давления и условий фонтанирования. Поэтому исключение данного фактора из математической модели может приводить к искажению результатов расчёта продуктивности скважины.

На основании проведённого анализа сформулированы основные требования к совершенствованию математических моделей. Перспективная модель должна учитывать относительное движение фаз, межфазное трение, изменение структуры потока, реологические свойства жидкости, неравновесность процессов и дополнительные сопротивления в призабойной зоне. Одновременно модель должна сохранять приемлемую вычислительную сложность, чтобы быть пригодной не только для фундаментального анализа, но и для инженерных расчётов.

Современное направление развития связано с интеграцией классических гидродинамических моделей с вычислительными и интеллектуальными методами. Методы CFD позволяют более подробно исследовать локальную структуру потока, тогда как методы машинного обучения и нейронные сети могут использоваться для выявления нелинейных зависимостей между измеряемыми параметрами и расчётными характеристиками скважины. В диссертации отмечается, что такие подходы рассматриваются как перспективное направление повышения точности прогнозирования забойного давления и других эксплуатационных параметров.

При этом использование исключительно интеллектуальных методов также не решает всех задач. Нейросетевые модели требуют репрезентативных обучающих данных и корректного выбора входных параметров, тогда как физико-математические модели позволяют непосредственно учитывать физические закономерности движения фаз. Поэтому наиболее перспективным является сочетание физически обоснованных математических моделей с современными вычислительными и интеллектуальными методами.

В результате проведённого анализа в первой главе сформулирована научная проблема настоящего исследования: необходимость разработки инженерно-математического подхода, который позволит определить основные гидродинамические характеристики нефтяных и газовых скважин при совместном учёте двухфазности потока, реологических свойств жидкости, особенностей межфазного взаимодействия и влияния призабойной зоны.

Таким образом, результаты анализа литературы показывают, что дальнейшее развитие гидромеханики двухфазных систем должно быть направлено не только на повышение физической детальности моделей, но и на повышение их практической применимости. Разрабатываемые методы должны обеспечивать возможность определения забойного давления, профиля притока, гидравлических потерь и других характеристик на основе доступной промысловой информации.

Проведённый обзор обосновывает переход к математическому моделированию и исследованию двухфазных систем, представленным во второй главе диссертации. Вторая глава посвящена механике газожидкостных систем, моделированию гидродинамических характеристик потока, математическому описанию фильтрационных и приточных процессов, а также разработке методики определения забойного давления по информации, получаемой на устье скважины.

Во второй главе на основе модели А. Арманда выполнено углублённое исследование движения двухфазной газожидкостной смеси в трубах и вертикальном стволе

скважины. Основное внимание уделено выводу уравнений равновесия, распределению скоростей фаз, определению объёмного расхода смеси, закона гидравлического сопротивления, а также анализу эффективной вязкости двухфазной системы с учётом влияния объёмного газосодержания и межфазного взаимодействия.

В качестве исходной физической модели рассматривается элементарный цилиндрический объём газожидкостной смеси при установившемся равномерном движении в трубопроводе. Согласно основным положениям механики сплошной среды, сумма всех сил, действующих вдоль оси потока, должна быть равна нулю. Условие равновесия записывается в виде:

$$F_1-F_2-T=0 \quad (1)$$

или в развернутой форме:

$$p_1\pi r^2-p_2\pi r^2+\tau_{CM}2\pi rL=0 \quad (2)$$

где

F_1 и F_2 - силы давления на входе и выходе выделенного участка;

T - сила трения;

$\tau_{см}$ - касательное напряжение смеси;

r - радиус трубы;

L - длина элементарного участка.

Данное уравнение отражает физический баланс между перепадом давления и сопротивлением движению, возникающим вследствие вязкого трения на стенке трубы. Именно это соотношение является фундаментальной основой для дальнейшего построения математической модели двухфазного течения.

Для более точного описания структуры потока отдельно определяются касательные напряжения для жидкой и газовой фаз:

$$\tau_ж=\mu_ж\frac{dV_ж}{dr},$$
$$\tau_г=\mu_г\frac{dV_г}{dr} \quad (3)$$

где

$\mu_ж$, $\mu_г$ - динамические вязкости жидкой и газовой фаз;

$V_ж$, $V_г$ - скорости соответствующих фаз.

Поскольку в двухфазной системе присутствует межфазное взаимодействие, важную роль играет понятие объёмного газосодержания φ, характеризующее долю газовой фазы в общем объёме смеси. С увеличением φ изменяется структура течения, усиливаются межфазные силы, а также изменяется распределение скоростей по радиусу трубы.

На основе уравнения равновесия и после интегрирования уравнения движения получено распределение скорости жидкой фазы в равномерном ламинарном потоке:

$$V_ж = \frac{\Delta P R^2}{\mu_ж L}\left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) \quad (4)$$

Данное уравнение представляет собой классический параболический профиль скорости, характерный для ламинарного режима течения. Оно показывает, что максимальная скорость достигается на оси трубы, а по мере приближения к стенке скорость постепенно уменьшается до нуля.

Граничные условия принимаются в следующем виде:

$$\left.\frac{dV}{dr}\right|_{r=0} u(R)=0, \quad (5)$$

Первое условие отражает эффект прилипания жидкости к стенке трубы, а второе - симметрию потока относительно центральной оси.

Таким образом, профиль скорости имеет строго параболическую форму, что полностью соответствует классическим представлениям гидродинамики ламинарного течения.

Если φ = 0, то есть газовая фаза отсутствует, получаем классическое уравнение Стокса для однофазного ламинарного течения:

$$V_{max\ ж} = \frac{\Delta p}{4\mu_ж L} R^2 \quad (6)$$

На основе распределения скорости выводится объёмный расход смеси. Для кольцевого элемента площади:

$$dF=2\pi r dr \quad (7)$$

элементарный расход определяется как:

$$dQ=V_{ж}2\pi r dr \quad (8)$$

Интегрирование по всему сечению трубы даёт полный объёмный расход:

$$Q_{ж}=\frac{\pi\Delta P}{8\mu_{ж}}\frac{R^4}{L}(1-\varphi)^{1.53} \quad (9)$$

Полученная формула показывает, что увеличение объёмного газосодержания φ приводит к уменьшению расхода жидкой фазы, поскольку часть поперечного сечения начинает занимать газовая фаза, а также усиливаются межфазные потери энергии.

При φ = 0 данное выражение переходит в классический закон Пуазейля, что подтверждает физическую корректность разработанной модели.

Для оценки потерь давления в трубопроводе используется закон гидравлического сопротивления. Введя число Рейнольдса и коэффициент гидравлического сопротивления, для ламинарного режима получаем:

$$\lambda_{ж}=\frac{64}{Re_{ж}} \quad (10)$$

где $Re_{ж}$- число Рейнольдса жидкой фазы.

Установлено, что при Re <2300 течение сохраняет устойчивый ламинарный характер, а гидравлическое сопротивление определяется преимущественно вязкостными силами. При увеличении числа Рейнольдса происходит переход к переходному и затем турбулентному режиму, что сопровождается существенным ростом потерь давления.

На рисунке 1 представлена зависимость перепада давления от объёмного расхода при различных значениях газосодержания φ.

Особое внимание во второй главе уделено определению эффективной вязкости двухфазной смеси. В реальных условиях поток не может рассматриваться как простая сумма двух независимых фаз, поскольку между жидкостью и газом возникает сложное межфазное взаимодействие, приводящее к изменению

касательных напряжений и перераспределению энергии.

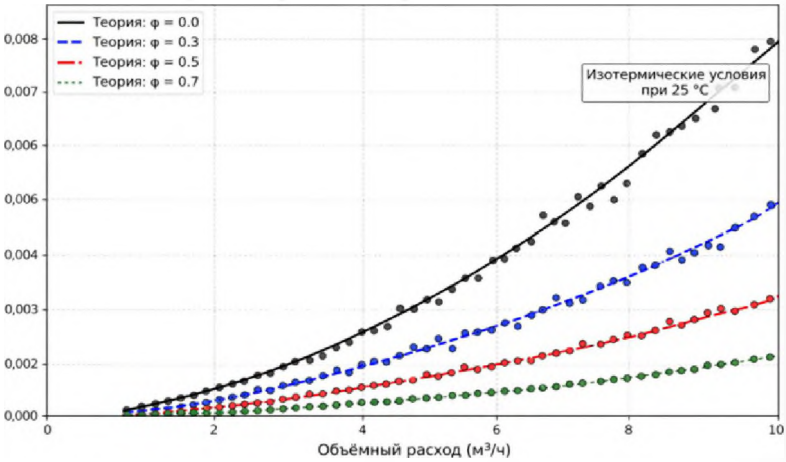


Рис. 1. Зависимость перепада давления от объёмного расхода при различных значениях газосодержания φ

Для описания этого эффекта используется выражение:

$$\tau_{см}=\tau_{ж}(1-\varphi)^{n} \qquad (11)$$

где n - эмпирический коэффициент, учитывающий структуру потока. Установлено, что при увеличении газосодержания возрастает эффективное касательное напряжение и гидродинамическое сопротивление.

Данное выражение показывает, что эффективное касательное напряжение определяется не только свойствами жидкой фазы, но и пространственным распределением газовой составляющей. При росте газосодержания изменяется структура потока, возрастает турбулентность межфазной границы, усиливается сопротивление движению и увеличиваются гидродинамические потери.

Проведённый анализ показал, что использование модели А. Арманда позволяет более точно учитывать влияние газовой фазы на параметры течения по сравнению с классическими однофазными моделями. Полученные зависимости хорошо согласуются с экспериментальными данными и могут использоваться как основа для инженерных расчётов при анализе

работы нефтяных и газовых скважин.

Таким образом, во второй главе сформирована физико-математическая база для дальнейшего исследования гидромеханики двухфазных систем, позволяющая перейти от упрощённых эмпирических зависимостей к более точному описанию реальных процессов движения газожидкостных смесей в скважинах и трубопроводах.

Данная формула является расходной формулой, впервые экспериментально полученной французским врачом Пуазейлем в 1840 году при исследовании движения воды в капиллярных трубах. В настоящей работе данная зависимость расширена для случая двухфазной газожидкостной смеси с учётом влияния газосодержания φ и межфазного взаимодействия.

Для определения потерь давления при ламинарном движении смеси в круглых трубах используется выражение:

$$h_w = \frac{\Delta P}{Y_ж} = \frac{32\mu_ж \cdot \nu_ж L}{Y_ж D^2 (1-\varphi)^{1.53}} \qquad (12)$$

Данное уравнение является законом гидравлического сопротивления.

При условии, когда φ = 0, то имеем формулу для однородной жидкости.

Умножая левую и правую части данного уравнения на $(2\nu_ж)$, находим потери давления:

$$h_w = \frac{32\mu_ж \cdot \nu_ж L}{Y_ж D^2 (1-\varphi)^{1.53}} \quad \frac{2\nu_ж}{2\nu_ж} = \frac{64\mu_ж}{Y_ж \cdot \nu_ж D^2} \quad \frac{L}{D} \frac{\nu_ж^2}{2} \frac{1}{(1-\varphi)^{1.53}} \qquad (13)$$

Значение удельной весовой жидкости и динамической вязкости определяем по кинематическому числу течения.

$$h_w = \frac{64\upsilon_ж}{r_ж D} \quad \frac{L}{D} \frac{\nu_ж^2}{2g} \frac{1}{(1-\varphi)^{1.53}} \qquad (14)$$

В данное уравнение вводим понятие числа Рейнольдса:

$$h_w = \frac{64}{Re_ж} \quad \frac{L}{D} \frac{1}{(1-\varphi)^{1.53}} \qquad (15)$$

Умножая левую и правую части данного выражения на значение $(\nu_ж g)$, имеем потери давления на трение:

$$\Delta P_{ж}=\frac{64}{Re_{ж}}\ \frac{L}{D}\frac{\nu_{ж}^2}{2}\rho_{ж}\frac{1}{(1-\varphi)^{1.53}} \qquad (16)$$

Непосредственное определение значения забойного давления позволяет определить закономерности фильтрации. Данные о забойном давлении используются при конструировании глубинного оборудования для механизированной эксплуатации и определения эффективности работы фонтанного подъемника.

Уравнение для вертикальной трубы можно записать:

$$\frac{dP}{dx}=\rho_{ж}g(1-\varphi)+\rho_{г}g\varphi+\frac{i_{ж}}{(1-\varphi)^{1.53}} \qquad (17)$$

где

$\frac{dP}{dx}$ - градиент давления;

$i_{ж}$ - гидравлический уклон;

$\rho_{г}$ - плотность газа в рабочих условиях.

$$\rho_{г}=\rho_0\frac{PT_0}{P_0TZ} \qquad (18)$$

где

ρ_0 - плотность газа в атмосферных условиях;

T_0- нормальная температура;

T - данная температура;

P_0 - атмосферное давление;

Z - коэффициент сжимаемости;

P - данное давление.

Вводим понятие

$$a=\rho_0\frac{T_0}{P_0TZ}$$

$$b=\rho_{ж}g(1-\varphi)+\frac{i_{ж}}{(1-\varphi)^{1.53}}\rho_{ж}g \qquad (19)$$

Тогда имеем

Согласно методам интегральной теории фильтрации имеем

$$\int_{P_y}^{P_3}\frac{dP}{aP+b}=\int_0^L dx \qquad (20)$$

где

$P_З$ - забойное давление;

$P_у$ - устьевое давление;

L - длина подъемника.

Вскрывая интеграл имеем

$$\ln\frac{aP_З+b}{aP_у+b}=La \qquad (21)$$

При определении истинного газосодержания воспользуемся экспериментальными данными А. Арманда:

$$\varphi=(1+0.073\ln X) \qquad (22)$$

X - массовое газосодержание.

$$X=\frac{M_г}{M_г+M_ж}$$

где

$M_г$ - массовый расход газа;

$M_ж$ - массовый расход жидкости.

$$\frac{aP_З+b}{aP_у+b}=e^{La} \qquad (23)$$

Разложим степенное значение в ряд

$$e^{La}=1+La \qquad (24)$$

Тогда имеем

$$\frac{aP_З+b}{aP_у+b}=1+\frac{L\rho_0 gT_0}{P_0TZ} \qquad (25)$$

В первом приближении коэффициент сжимаемости определяется в устьевых условиях.

С учётом обозначений имеем

$$P_З=P_у+\frac{L\rho_0 gT_0}{P_0TZ_у}\left[P_у+\frac{\rho_ж g(1-\varphi)+i_ж\rho_ж g(1-\varphi)^{-1.53}}{\frac{\rho_0 gT_0}{P_0TZ_у}\varphi}\right] \qquad (26)$$

При $\varphi=0$ мы имеем уравнение движения для однородной жидкости

$$P_З=P_у+\rho_ж gL+i_ж\rho_ж gL=P_у+\rho_ж gL(1+i_ж) \qquad (27)$$

При случае, когда $\varphi=1$, уравнение движения для однородного газа

$$P_3=P_y(1+\frac{L\rho_0 gT_0}{P_0TZ_y}) \quad (28)$$

Таблица 1.

Сопоставление расчётных и экспериментальных данных по скважинам

№ скважины	ρ нефти, кг/м³	L подъемника, м	$\frac{P_y}{P_0}$ (устьевое)	$Q_ж$, м³/с	$Q_г$, м³/с	X (массовое)	φ (истинное газосодержание)	ρ смеси, кг/м³	$\frac{P_3}{P_0}$ (расч.)	$\frac{P_3}{P_0}$ (эксп.)
392	855	1708	17	0.00095	0.0624	0.528	0.297	601.5	137.5	134.9
----		----	14.5	0.00127	0.0838	0.506	0.305	615.9	134.1	133.6
382		1744	13.0	0.00122	0.0803	0.507	0.303	595.9	135.0	132.2
----		----	15.5	0.00099	0.0659	0.505	0.284	633.1	139.4	140.6
99		1663	11.0	0.00146	0.0962	0.509	0.319	605.1	133.2	123.1
904		1606	7.5	0.00143	0.0945	0.511	0.290	604.5	108.9	112.1
37		1405	14.0	0.00107	0.0704	0.506	0.252	627.5	112.0	112.6
39		1780	15.0	0.00077	0.0472	0.505	0.315	658.5	139.1	143.6
580		1770	11.9	0.00139	0.0912	0.508	0.289	608.5	133.5	134.0
581		1482	14.5	0.00102	0.0685	0.506	0.288	629.6	115.8	116.3

Безразмерное давление:

$$\overline{P_y}=\frac{P_y}{P_0},$$

где P_y - устьевое давление, P_0 - атмосферное давление.

В таблице представлено сравнение расчётных и экспериментальных данных по скважинам.

Видно, что значения хорошо совпадают.

Расхождения незначительные и находятся в допустимых пределах.

Это подтверждает корректность и применимость модели.

В третьей главе исследовано влияние скин-фактора, аномальной вязкости и структурных особенностей двухфазного потока на процессы фильтрации в призабойной зоне пласта, распределение давления и дебит скважины. Особое внимание уделено анализу движения эластовязкопластической жидкости в условиях наличия скин-зоны, которая существенно изменяет гидродинамические характеристики системы и влияет на эффективность эксплуатации нефтяных и газовых скважин.

Известно, что при повреждении призабойной зоны пласта, загрязнении порового пространства, выпадении асфальтосмолопарафиновых веществ, солеотложениях и механическом кольматировании происходит формирование дополнительной зоны сопротивления фильтрации - скин-зоны. Наличие данной зоны приводит к увеличению перепада давления, снижению продуктивности скважины и ухудшению условий притока пластового флюида.

Для описания фильтрации в данных условиях используется модель движения эластовязкопластической жидкости с учётом структурного сопротивления. На следующем этапе получено выражение для элементарного перепада давления в радиальном потоке:

$$\frac{Q\eta}{2\pi h k_{ж}} r \cdot dr + \frac{\alpha \tau_0}{\sqrt{k_г}} dr = dP \qquad (29)$$

Данное уравнение отражает совместное влияние вязкостного сопротивления и дополнительного напряжения сдвига, возникающего в эластовязкопластической среде. В отличие от классического закона Дарси, здесь учитывается нелинейное сопротивление, связанное с предельным напряжением сдвига и изменением структуры потока.

Кроме того, поскольку в зоне скин-эффекта при

определённых граничных условиях формируется скин-коэффициент, необходимо учитывать специальные граничные условия фильтрации. Предполагается, что скин-зона имеет одну или несколько границ, перпендикулярных горизонтальной плоскости и параллельных поверхности пласта.

В случае горизонтального расположения скин-зоны выполняются условия:

$$r=R_K;P=P_K$$
$$r=R_C;P=P_C$$
$$r=R_S;P=P_S \qquad (30)$$

Подставляя указанные граничные условия в исходное уравнение и выполняя интегрирование по радиусу фильтрации, получаем:

$$\frac{Q\eta}{2\pi hk}\left[\frac{k}{k_s}\ln\frac{R_S}{R_C}+\ln\frac{R_K}{R_S}\right]+\frac{\alpha\tau_0}{\sqrt{k_г}}(R_K-R_C)=P_K-P_C \qquad (31)$$

После последовательных алгебраических преобразований выражение приводится к более удобной инженерной форме:

$$\frac{Q\eta}{2\pi hk}\left[\left(\frac{k}{k_s}-1\right)\ln\frac{R_S}{R_C}+\ln\frac{R_K}{R_S}\right]+\frac{\alpha\tau_0}{\sqrt{k_г}}(R_K-R_C)=P_K-P_C \qquad (32)$$

где

R_C- радиус скважины;

R_K - радиус контура питания;

R_S - радиус призабойной (скиновой) зоны;

P_K - давление на контуре питания;

P_C - забойное давление.

Полученное уравнение показывает, что величина перепада давления определяется не только расходом и геометрическими параметрами системы, но и степенью повреждения призабойной зоны, которая выражается через отношение проницаемостей.

Если проницаемость скин-зоны уменьшается, значение выражения возрастает, что приводит к увеличению скин-фактора и снижению продуктивности скважины.

В этих условиях объёмный расход нефти определяется выражением:

$$Q=\frac{kF}{\eta}\left[\frac{P'_K-P_C}{L-L_K}-\frac{\alpha\tau_0}{\sqrt{k_г}}\right] \quad (33)$$

Предположим, что $F=2\delta hL_K=R_K$ расстояние между скважинами. Тогда можно получить следующую формулу:

$$Q=\frac{2\delta kh}{\eta}\left[\frac{P'_K-P_C}{L-R_K}-\frac{\alpha\tau_0}{\sqrt{k_г}}\right] \quad (34)$$

$$P'_K-P_c=\frac{Q(L-R_K)}{2\delta kh}+\frac{\alpha\tau_0}{\sqrt{k_г}}(L-R_K) \quad (35)$$

Далее на основании выражений (34) и (35) вычислим общий (суммарный) перепад давления, соответствующий рассматриваемому участку течения:

$$\Delta P=\Delta P_B+\Delta P_H \quad (36)$$

Следовательно, окончательное выражение принимает вид:

$$\Delta P=(P_K-P_C)+(P'_K-P_K)=P'_K-P_C \quad (37)$$

В результате совместного использования формул (36)–(37) получаем:

$$\Delta P=\frac{Q\eta}{2kh}\left\{\left(S+\ln\frac{\rho}{2R_S}\right)+\frac{L}{\sigma}\right\}\frac{\alpha\tau_0}{\sqrt{k_г}}(L-R_C) \quad (38)$$

Полагая радиус зоны дренирования скважины равным (n), можно определить суммарный дебит системы и соответствующее количество скважин. В этом случае общий объём добычи имеет вид:

$$\sum Q=Q\cdot n,Q=\frac{\sum Q}{n} \quad (39)$$

С учётом подстановки в уравнение (39), где $B=2\sigma\cdot n\sigma=\frac{B}{2n}$ суммарный дебит скважины определяется следующим образом:

$$\sum Q=\frac{\frac{2\pi kh}{\eta}nL\left[\frac{P_K-P_C}{L}-\frac{\alpha\tau_0}{\sqrt{k_г}}\left(1-\frac{R_C}{L}\right)\right]}{\left(S+\ln\frac{B}{4nR_C}\right)+\frac{2nL}{B}} \quad (40)$$

Полученные результаты показывают, что увеличение радиуса скважины и снижение скин-фактора приводят к уменьшению перепада давления и росту дебита, тогда как увеличение расстояния до границы пласта и ухудшение фильтрационных свойств призабойной зоны вызывают обратный

эффект.

На рисунке представлена зависимость перепада давления от радиуса скважины и расстояния до границы пласта в области фильтрации.

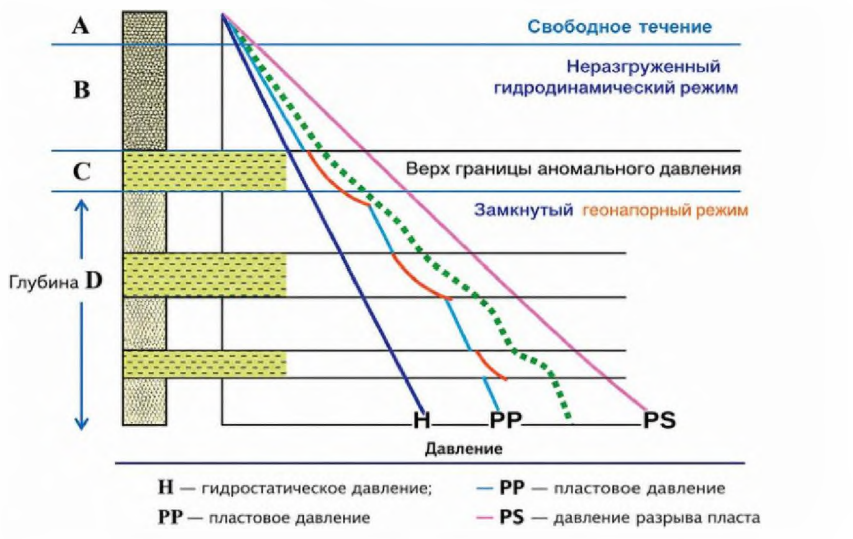


Рис. 2. Зависимость перепада давления от радиуса скважины и расстояния до границы пласта в области фильтрации

Проведённый анализ подтверждает, что учёт скин-фактора и аномальной вязкости является обязательным условием при расчёте продуктивности скважин и выборе оптимальных режимов эксплуатации. Разработанная модель позволяет значительно повысить точность инженерных расчётов и служит основой для практического прогнозирования работы нефтяных и газовых скважин в сложных условиях двухфазной фильтрации.

ВЫВОДЫ

1. Проведено комплексное исследование гидромеханики двухфазных газожидкостных систем, возникающих в нефтяных и газовых скважинах. Рассмотрены основные закономерности движения многофазных потоков в трубах и пластовых системах, а также их влияние на технологические параметры эксплуатации скважин [3, 4, 7, 11].

2. На основе анализа существующих теоретических и экспериментальных исследований уточнены особенности течения газожидкостных смесей в условиях сложных гидродинамических режимов. Показано, что учёт реологических свойств жидкости и режима потока существенно повышает точность расчёта гидродинамических параметров [1, 2, 4, 5].

3. Разработана математическая модель движения двухфазных систем, основанная на уравнениях сохранения массы, импульса и энергии. Предложенная модель учитывает влияние гравитационных сил, трения, а также особенностей распределения фаз в потоке [3, 4, 7].

4. Получены расчётные зависимости, позволяющие определять распределение давления и скорости движения фаз в скважине. На основе предложенных соотношений разработан метод определения забойного давления по данным устьевых измерений [10, 11].

5. Проведён численный анализ движения двухфазных потоков с использованием методов математического моделирования. Полученные результаты показывают хорошее согласование с известными экспериментальными и расчётными данными [3, 4, 10].

6. Установлено, что применение разработанной модели позволяет более точно учитывать влияние режима потока, фазового распределения и реологических характеристик жидкости на гидродинамические параметры системы [1, 2, 4, 5, 7].

7. Предложенные методы и расчётные зависимости могут быть использованы при проектировании и оптимизации

процессов добычи нефти и газа, а также при интерпретации промысловых данных [6, 8, 10, 11].

8. Практическая значимость результатов исследования заключается в возможности повышения эффективности эксплуатации нефтяных и газовых скважин за счёт более точного определения забойного давления и анализа процессов движения двухфазных потоков [8, 10, 11].

Основное содержание диссертационной работы отражено в следующих работах

1. Dadash-Zade, M.A. Characteristic features of the movement of elastic-viscoplastic liquid in pipes and layers / M.A. Dadash-Zade, R. Cao // Probe: Environmental Science and Technology. – 2023. – Vol. 5, No. 4. – P. 49–53.

2. Dadash-Zade, M.A. The impact of abnormal oil viscosity and oil well skin coefficient on production efficiency: a study based on inter-well interference / M.A. Dadash-Zade, R. Cao // Petrochemical. – 2024. – No. 3. – P. 40–42.

3. Dadash-Zade, M.A. Rheological properties of elastoviscoplastic liquid in tubes / M.A. Dadash-Zade, R. Cao // Advances in Resources and Environmental Science. – 2024. – Vol. 3, No. 2. – P. 21–24.

4. Dadash-Zade, M.A. Study of the motion of two-phase systems based on fluid mechanics and physical modelling of fluid / M.A. Dadash-Zade, R. Cao // Proceedings of the 9th International Conference on Energy Science and Applied Technology (ESAT 2024). – 2024. – P. 1–3.

5. Dadash-Zade, M.A. Analysis and calculation of two-phase flow in industrial pipelines using regime classification / M.A. Dadash-Zade, R. Cao // International Journal of Natural Resources and Environmental Studies. – 2024. – Vol. 2, No. 1. – P. 58–63.

6. Dadash-Zade, M.A. Modifying the effects around the well can have an impact on the drilling process / M.A. Dadash-Zade, R. Cao // Archives of Sciences. – 2024. – Vol. 74, No. 5. – P. 81–83.

7. Dadash-Zade, M.A. Fluid mechanics of gas-liquid system / M.A. Dadash-Zade, R. Cao // Journal of Science and Technology. – 2024. – Vol. 12, No. 2. – P. 286–287.

8. Dadash-Zade, M.A. The impact of surface conditions on natural gas filtration process under reservoir conditions / M.A. Dadash-Zade, R. Cao // International Journal of Electric Power and Energy Studies. – 2024. – Vol. 3, No. 1. – P. 28–32.

9. Dadash-Zade, M.A. Energetic strategy of Heydar Aliyev / M.A. Dadash-Zade, R. Cao // Proceedings of the Republican Scientific Conference of PhD Students and Young Researchers. – Baku, 2025.

10. Dadash-Zade, M.A. Determination of bottom-hole pressure considering gas-liquid hydrodynamics based on wellhead information / M.A. Dadash-Zade, R. Cao // International Journal of Basic and Applied Sciences. – 2025. – Vol. 14, No. 3. – P. 132–142.

11. Dadash-Zade, M.A. Determination of inflow profile based on input information considering the hydrodynamics of two-phase systems / M.A. Dadash-Zade, R. Cao // Proceedings of the 4th International Conference on Advances in Materials, Machinery and Electrical Engineering (AMMEE 2025). – 2025. – P. 21–24.

Личный вклад соискателя

Во всех опубликованных работах [1–11] соискателю принадлежит непосредственное участие в постановке задач исследования, проведении расчётов и математического моделирования, обработке и анализе полученных результатов, их научной интерпретации и подготовке материалов к публикации.

В работах [1–8, 10, 11] соискатель принимала непосредственное участие в выполнении исследований по теме диссертации и обобщении полученных результатов.

Защита диссертации состоится 08 декабря 2026 года в 11:00 на заседании Диссертационного совета FD 2.03, действующего на базе Азербайджанского Государственного Университета Нефти и Промышленности.

Адрес: AZ1010, г. Баку, проспект Азадлыг, 20.

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

Электронная версия автореферата размещена на официальном сайте Азербайджанского Государственного Университета Нефти и Промышленности (https://asoiu.edu.az/).

Автореферат разослан по соответствующим адресам "05" ноября 2026 года.

Подписано в печать: 27.10.2026
Формат бумаги: A5
Объём: 37652
Тираж: 70