

На правах рукописи



ИЗОТОВ АЛЕКСЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ТЕХНОГЕННЫХ
ТРЕЩИН В НИЗКОПРОНИЦАЕМОМ КОЛЛЕКТОРЕ
ПРИ ЗАВОДНЕНИИ ЗАЛЕЖЕЙ НЕФТИ**

Специальность 2.8.4. Разработка и эксплуатация
нефтяных и газовых месторождений

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тюмень - 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тюменский индустриальный университет» на кафедре «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений».

Научный руководитель: **Мулявин Семен Федорович**,
доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры «Разработка и эксплуатация нефтяных и
газовых месторождений» ФГБОУ ВО «Тюменский
индустриальный университет».

Официальные оппоненты: **Пономарева Инна Николаевна**,
доктор технических наук, доцент, профессор
кафедры «Нефтегазовые технологии» ФГАОУ ВО
«Пермский национальный исследовательский
политехнический университет»;

Байкин Алексей Николаевич,
кандидат физико-математических наук, старший
научный сотрудник ФГБУН «Институт
гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского
отделения Российской академии наук».

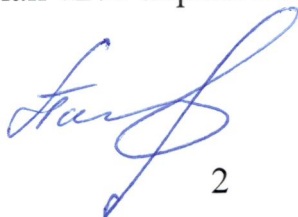
Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный
университет императрицы Екатерины II»,
г. Санкт – Петербург.

Защита состоится «04» июня 2026 года в 15 часов 00 минут на заседании
диссертационного совета 24.2.419.03, созданного на базе ФГБОУ ВО
«Тюменский индустриальный университет», по адресу: 625000, г. Тюмень,
ул. Мельникайте, 70, ауд. 312.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотечно-издательском
комплексе ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» и на сайте
www.tyuiu.ru.

Автореферат разослан «27» апреля 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Пономарева Татьяна Георгиевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Энергетической стратегией РФ до 2050 года, предусмотрен темп отбора запасов нефти на уровне 540 млн. т в год. Основная часть добычи должна быть обеспечена месторождениями, уже введенными в разработку с заводнением как базовой технологией воздействия. Несмотря на существенный за последние десятилетия прогресс в развитии технологий добычи, эффективность заводнения снижается. Развитие техногенных трещин в объеме пласта часто сопутствует закачке воды в нагнетательные скважины, особенно в низкопроницаемых коллекторах. Неконтролируемое увеличение протяженности трещин может приводить к раннему прорыву воды в добывающие скважины, снижению нефтеотдачи и нерациональному использованию закачиваемой воды. Таким образом, для повышения эффективности разработки нефтяных залежей, находящихся в низкопроницаемых коллекторах, актуально совершенствование традиционных и внедрение новых методов количественной оценки длины и скорости роста трещин при различных режимах закачки. Полноценный учет всех факторов, влияющих на развитие трещин, определяет эффективность заводнения и, соответственно, объем и полноту извлечения запасов нефти.

Степень разработанности темы исследования

Повышению эффективности разработки низкопроницаемых коллекторов с применением заводнения в качестве базовой технологии и оценке влияния техногенных трещин на выработку запасов посвящены работы отечественных и зарубежных исследователей, в их числе А. В. Афанасьев, И. Э. Апельцин, В. А. Байков, Ю. П. Борисов, А. Т. Горбунов, С. И. Грачев, С. К. Грачева, Р. Н. Дияшев, С. Н. Закиров, Р. Д. Каневская, Р. И. Медведский, Н. Н. Михайлов, С. Ф. Мулявин, А. В. Насыбуллин, А. П. Телков, М. М. Хасанов, К. С. Юсупов, А. Н. Янин, К. К. Butula, М. М. Sharma, Р. J. Van den Hoek, S. T. Yuster и др. Вопросам моделирования образования и развития трещин гидроразрыва пласта посвящены исследования таких ученых, как И. Ш. Базыров, А. Н. Байкин, Г. И. Баренблатт, Ю. Н. Гордеев, Ю. П. Желтов, А. В. Стрекалов, В. Р. Тагилова,

К. М. Федоров, С. А. Христианович, С. Г. Черный, Е. А. Detournay, А. F. Geertsma, L. R. Kern, M. J. Mayerhofer и др.

Основой исследования послужили принципы, сформированные Р. И. Медведским и представляющие собой ядро его научной школы, посвящённой изучению влияния техногенных трещин, образующихся при закачке воды, на эффективность разработки нефтяных месторождений. Данная работа является продолжением и развитием научных представлений, заложенных профессором Р. И. Медведским, под чьим научным руководством, ранее работал автор.

Цель диссертационной работы - повышение коэффициента извлечения нефти при заводнении низкопроницаемых пластов за счет прогнозирования развития техногенных трещин в процессе закачки воды в нагнетательные скважины на основе разработанной физико-математической модели и результатов геолого-промыслового анализа разработки месторождений Западной Сибири.

Основные задачи исследования

1. Разработать концепцию роста протяженных техногенных трещин, интегрирующую явление автоГРП и пути быстрого транспорта воды. Выявить влияние протяженных техногенных трещин в низкопроницаемом коллекторе, образующихся при закачке воды в нагнетательные скважины на процесс нефтеизвлечения и обводнение добывающих скважин.

2. Выявить и обосновать роль концентрации твердых взвешенных частиц, находящихся в закачиваемой воде, в снижении проницаемости породы призабойной зоны пласта и росте техногенных трещин.

3. Разработать физико-математическую модель для определения длины техногенной трещины в процессе закачки воды. Оценить длину трещин на основе фактических данных эксплуатации скважин и результатов расчета на физико-математической модели для различных условий эксплуатации.

4. Разработать методику учета влияния техногенных трещин в нагнетательных скважинах при расчете коэффициента охвата и плотности сетки скважин.

Объектом исследования является процесс развития техногенных трещин в пласте при заводнении низкопроницаемых коллекторов.

Предметом исследования является изучение влияния твердых взвешенных частиц содержащихся в закачиваемой воде на развитие техногенных трещин в пласте при заводнении низкопроницаемых коллекторов.

Научная новизна работы

1. Предложена концепция роста техногенных трещин в процессе закачки воды, содержащей механические примеси, на масштабах времен, сопоставимых с процессом заводнения, интегрирующая явления автоГРП, формирования техногенных трещин и путей быстрого транспорта воды.

2. Разработана физико-математическая модель роста техногенной трещины в нагнетательной скважине, вскрывающей терригенный пласт, учитывающая комбинацию численных фильтрационной, гидравлической, геомеханической моделей и загрязнение стенок трещин как зависящий от времени процесс, связанный с расходом воды и концентрацией примесей. Для условий нагнетательной скважины и нестационарного поля давлений получены зависимости полудлины техногенной трещины от величины приемистости, концентрации механических примесей и снижения проницаемости стенок трещины, выявлены условия остановки роста трещины в длину.

3. Предложена методика оценки плотности сетки скважин и коэффициента охвата, позволяющая учитывать наличие техногенных трещин в нагнетательных скважинах с наклонно-направленным профилем.

Теоретическая значимость работы

1. В рамках предлагаемой концепции понятие техногенных трещин включает как трещины автоГРП, так и формируемые пути быстрого транспорта воды. Принимается, что механизмом их формирования является загрязнение призабойной зоны пласта и повышение забойного давления в нагнетательных скважинах. Установленный механизм формирования техногенных трещин в низкопроницаемых пластах создает новый класс задач - анализ механизма загрязнения призабойной зоны пластов в зависимости от характеристик закачиваемой в пласт воды.

2. Концепция и модель роста техногенных трещин порождают новый класс задач – элементы гидродинамики заводнения в пласте с техногенными трещинами. Введен новый временной масштаб моделирования развития трещин (месяцы, годы). На основе анализа экспериментальных и промысловых данных показано, что формирование и раскрытие трещин при превышении давления развития и их рост в процессе заводнения являются разномасштабными временными процессами. Скорость развития техногенных трещин определяется медленными процессами загрязнения пласта вблизи трещин, при этом размеры трещин подстраиваются под целевую приемистость.

3. Предложенная методика учета техногенных трещин при оценке плотности сетки скважин и коэффициента охвата могут служить базой для построения обобщенных теоретических подходов к учету техногенных трещин в добывающих и нагнетательных скважинах, в том числе с горизонтальным окончанием и многостадийным гидроразрывом пласта.

Практическая значимость работы

1. Предложенная единая эволюционная концепция развития техногенных трещин позволяет корректно интерпретировать результаты исследований, определять стадию развития техногенных трещин, обоснованно подходить к выбору геолого-технических мероприятий и гидродинамическому моделированию.

2. Разработанная физико-математическая модель и алгоритм расчета позволяют спроектировать систему заводнения с учетом содержания твердых взвешенных частиц в воде, что позволяет минимизировать риски прорыва закачиваемой воды и повысит коэффициент извлечения нефти из низкопроницаемых пластов.

3. Предложенный способ расчета плотности сетки скважин с техногенными трещинами позволяет повысить обоснованность проектных решений, снизить затраты на формирование системы воздействия за счет учета вклада техногенных трещин в коэффициент охвата без влияния на величину конечной нефтеотдачи.

Методология и методы исследования

Исследования проведены с применением геолого-промыслового анализа технологических показателей объектов разработки, математического моделирования, численных и статистических методов.

Положения, выносимые на защиту

1. Разработана концепция, рассматривающая пласт как систему порового коллектора и протяженных техногенных трещин, свойства которых определяются и интерпретируются по данным гидродинамических, промыслово-геофизических и индикаторных методов исследования. Механизм формирования протяженных техногенных трещин как результат загрязнения призабойных зон скважин в процессе закачки воды и роста забойного давления выше давления распространения трещин.

2. Предложена физико-математическая модель роста техногенных трещин, в которой динамика их длины определяется относительно медленным процессом загрязнения пласта вокруг трещин, позволяющая оценить рациональную приемистость нагнетательной скважины без риска прорыва создаваемых водой трещин в добывающие скважины.

3. Расчет плотности сетки скважин и коэффициента охвата должен учитывать техногенные трещины в нагнетательных скважинах с наклонно-направленным профилем.

Личный вклад автора состоит в обосновании цели и задач исследования, выполнении обзора специальных источников, геолого-промыслового анализа состояния разработки ряда месторождений Западной Сибири. Формулировке научной новизны, теоретической и практической значимости работы. Разработке концепций, физико-математической модели, реализации численной модели. Выполнении расчетов, анализе и верификации результатов. Подготовке публикаций по теме диссертации.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность представленных в исследовании выводов, рекомендаций, защищаемых положений подтверждена теоретическими расчетами на гидродинамических и геомеханических программных комплексах.

Результаты работы апробированы на следующих конференциях и семинарах: Научно-практической конференции «Пути реализации нефтегазового потенциала Западной Сибири», г. Ханты-Мансийск, 23 - 26 ноября 2021 г.; Школа-семинар молодых ученых по теплофизике и механике многофазных систем «Трансформация нефтегазового комплекса 2030», г. Тюмень, 23 - 25 мая 2024 г.; Большая конференция по разработке месторождений, г. Москва, 1 - 2 октября 2025 г.; Нефтегазовый форум «Разведка, добыча, развитие», г. Тюмень, 15 - 16 октября 2025 г.; Научно-практическая конференция «Пути реализации нефтегазового потенциала Западной Сибири», г. Ханты-Мансийск, 11 - 13 ноября 2025 г.

Публикации

Основные положения диссертационной работы опубликованы в 10 публикациях, в изданиях, входящих в перечень рекомендуемых ВАК РФ.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

По набору рассмотренных вопросов и их научно-технической направленности диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.8.4. Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений, пункту 2. «Геолого-физические, геомеханические, физико-химические, тепломассообменные и биохимические процессы, протекающие в естественных и искусственных пластовых резервуарах и окружающей геологической среде при извлечении из недр и подземном хранении жидких и газообразных углеводородов и водорода известными и создаваемыми вновь технологиями и техническими средствами для развития научных основ создания эффективных систем разработки, обустройства и эксплуатации месторождений и подземных хранилищ жидких и газообразных углеводородов и водорода, захоронения кислых газов, включая диоксид углерода» и пункту 4. «Средства обеспечения комплексного интегрированного проектирования и системного (мультидисциплинарного) мониторинга процессов разработки, обустройства и эксплуатации месторождений и подземных хранилищ жидких и газообразных углеводородов и водорода в истощенных месторождениях, водонасыщенных пластах и соляных структурах с целью рационального недропользования».

Структура и объём работы

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, основных результатов и выводов по каждой главе, заключения, списка литературы, включающего 186 наименований. Работа изложена на 114 страницах машинописного текста, содержит 8 таблиц, 49 рисунков и 2 приложения.

Благодарности

Автор выражает благодарность научному руководителю, профессору кафедры разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений, д.т.н. Мулявину С.Ф., эксперту ООО «РН-ГИР», к.т.н. Черемисину Н.А., профессору, д.т.н. Федорову К.М. сотрудникам ООО «РН-ГИР» Афонину Д.Г., Галикееву Р.М., Самойлову М.И., Стрекалову А.В.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена актуальность темы диссертационного исследования. Сформулированы цель и задачи работы, определены объект и предмет исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость. Приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертационного исследования проведен анализ путей быстрого транспорта воды в межскважинном пространстве. Идентичные результаты промысловых исследований – стремительный прорыв закачиваемой воды, дискретные порции регистрируемого индикатора при трассерных исследованиях, аномальная гидродинамическая связь между скважинами и низкая прогностическая способность гидродинамических моделей – часто объясняются разными явлениями, такими как суперколлектор, каналы с низким фильтрационным сопротивлением (КНФС) или струйной фильтрацией.

Это несоответствие порождает разные интерпретации: одно и то же явление может моделироваться как зоны высокой проницаемости в гидродинамическом симуляторе, как канал в практике мониторинга разработки или как техногенные трещины при интерпретации переходных процессов давления без единой системы, позволяющей проводить последовательную перекрестную проверку. АвтоГРП часто применяется при моделировании как

мгновенное событие (подобно гидроразрыву пласта в добывающей скважине), тогда как эволюция трещин, вызванная заводнением, по своей природе является многомасштабной и длительной по времени. Предложена единая эволюционная концепция развития техногенных трещин (таблица 1), связывающая наблюдаемые явления и результаты исследований с последовательными стадиями развития (рисунок 1) техногенного суперколлектора.

Таблица 1 - Объединяющая физическая картина

Стадия	Соответствие явлению	Физическая сущность	Метод идентификации	Рекомендуемые геолого-технические мероприятия	Подход к моделированию
I	АвтоГРП	Локальные трещины	Индикаторная кривая	Регулирование режима закачки	Увеличение проводимости в призабойной зоне
II	Ручейковая фильтрация	Рост длины трещин	Кривая падения давления График Холла	Регулирование режима закачки Выравнивание профиля приемистости Кислотные обработки призабойной зоны	Задание динамических трещин
III	КНФС	Сквозные трещины между скважинами	Трассерные исследования Гидропрослушивание Технологический режим эксплуатации	Изоляционные работы со стороны добывающей и нагнетательной скважин	Задание соединения между забоями скважин в процессе эксплуатации
IV	Суперколлектор в терригенном пласте	Система трещин (техногенный суперколлектор)	Трассерные исследования Гидропрослушивание Технологический режим эксплуатации Матрица влияния скважин	Полимерное заводнение Изменение направления потоков фильтрации	Задание сети трещин

Предложенная схема стадирования четко разделяет (I) начало образования трещин вблизи скважины, (II) медленный рост (локализация потока), (III) соединение забоев скважин трещиной, (IV) интеграцию трещин в техногенную двойную среду (техногенный суперколлектор).

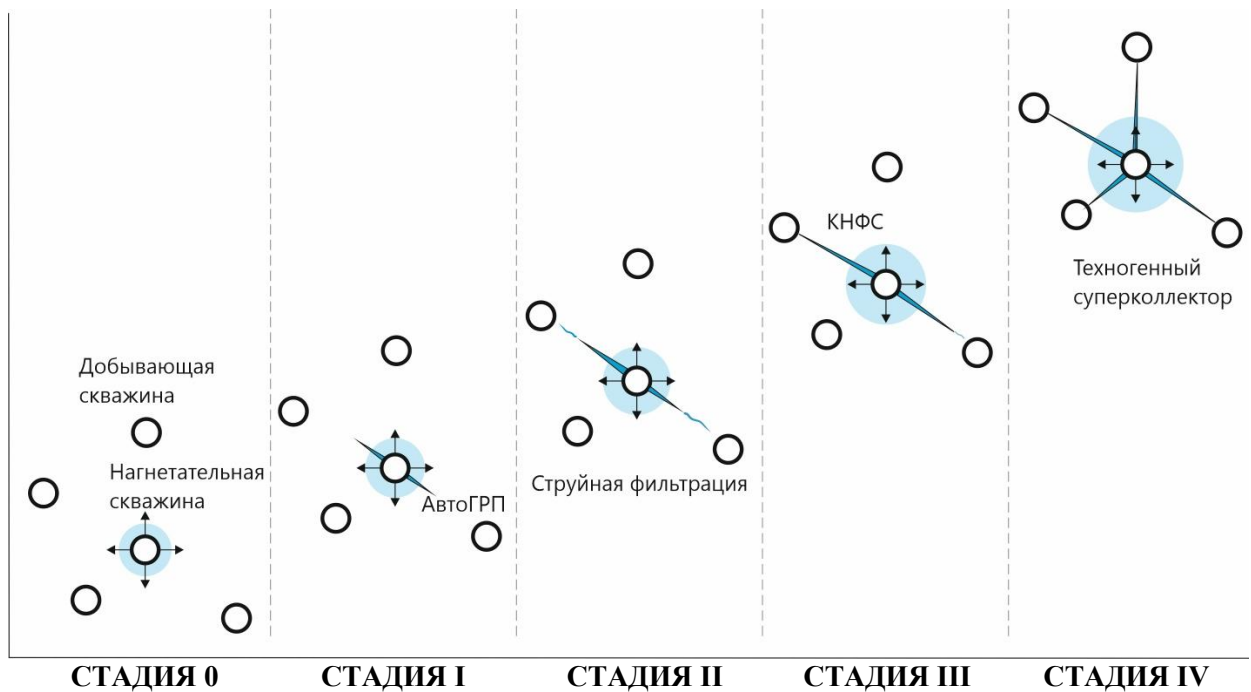


Рисунок 1 - Унификация стадий эволюции индуцированных водой трещин.

Во второй главе представлен анализ факторов, способствующих образованию и росту техногенных трещин при заводнении, а также подходы к моделированию развития трещин. В практике считается, что при заводнении целесообразно создавать забойные давления выше давления разрыва на 20-25 %, что благотворно влияет на охват. Для моделирования развития трещин гидроразрыва применяются одно-, двух- и трехмерные модели, различающиеся детальностью описания деформации породы. Наиболее распространенным подходом является использование одномерных моделей, в которых избыточное давление жидкости связывается с шириной трещины. Поскольку в нагнетательную скважину закачивается вода, увеличение длины будет сопровождаться ростом утечки из трещины, связанной с фильтрацией. Моделирование показывает, что время роста такой трещины может составлять до нескольких минут, после чего утечка приведет к снижению эффективного давления и остановке роста. Разработаны модели, описывающие рост длины техногенных трещин на длительных временных интервалах. Их недостатками является отсутствие стационарных решений с остановкой трещины, либо неучет значимых для прогнозирования длины факторов.

В третьей главе сформулирована и обоснована концепция роста длины техногенных трещин. Рост трещин происходит следующим образом: длина трещины (площадь стенок, обеспечивающая отток в пласт) подстраивается под баланс «закачка—утечки», а темп прироста длины контролируется медленным загрязнением зоны вокруг трещины (рисунок 2). Анализ проб воды, отобранных из водоводов систем поддержания давления на промыслах Западной Сибири, показывает, что вода содержит твердые взвешенные частицы (ТВЧ) различной природы в широком диапазоне концентраций (от 5 до 250 мг/л) и размеров (от 0,3 мкм до 80 мкм). При фильтрации воды твердые взвешенные частицы загрязняют пласт (рисунок 3, I). Коэффициент приемистости снижается, давление в трещине будет расти до критической величины. Индуцируемое давлением воды удлинение трещины вернет систему в устойчивое состояние за счет создания дополнительной площади фильтрации (рисунок 3, II), и рост остановится.

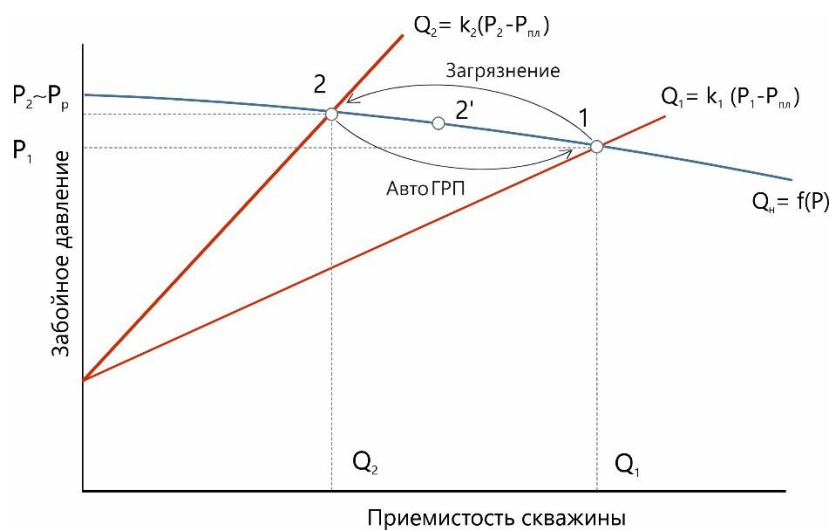


Рисунок 2 – Схематичное изображение процесса, приводящего к росту длины трещины

Через определенное время стенки трещины, включая созданную на предыдущем этапе часть, загрязнятся, что вызовет удлинение (рисунок 3, III). Разработана физико-математическая модель, описывающая рост техногенной трещины при заводнении, синтезированная на основе известных соотношений (1,2) модели Перкинса-Керна-Нордгрена (ПKN), распределения давления внутри

трещины (3) на основе закона Пуазейля для потока ньютоновской жидкости, с учётом оттока воды в пласт по длине трещины (4) согласно закону Дарси.

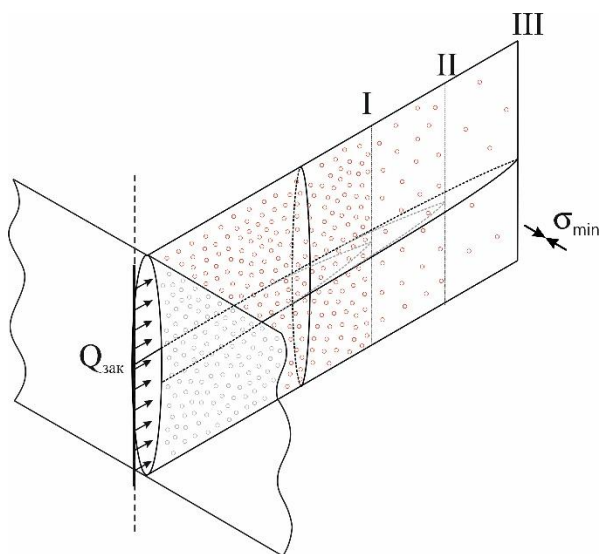


Рисунок 3 – Схематическое изображение роста трещины

Изменение пластового давления (5) учитывается на основе табулированных решений Грингартена и Рэйми для геометрии трещины. Впервые автором учитывается загрязнение стенок трещины как зависящий от времени неоднородный процесс, связанный с расходом и концентрацией частиц (8).

Трещина постоянной высоты, равной эффективной толщине пласта, распространяется вдоль оси x в однородной изотропной среде. Длина трещины в модели определяется из условия баланса между приемистостью скважины, утечкой через стенки трещины в пласт и объемом воды в трещине, при условии, что давление ($P_{\text{наг}}$) больше наименьшего горизонтального напряжения (σ_{min}) в плоскости (x, y) , т. е. $P_{\text{наг}} > \sigma_{\text{min}}$. В каждом вертикальном сечении, согласно модели РКН, формируется эллиптический профиль трещины с максимальным раскрытием на горизонтальной оси эллипса:

$$w_{\text{max}} = \frac{2h}{E'} (P_{\text{тр}}(x, t) - \sigma_{\text{min}}) \quad (1)$$

$$E' = \frac{E}{1-\nu^2}, \quad (2)$$

где: w_{max} – максимальная ширина трещины, м; E – модуль Юнга, Па; ν – коэффициент Пуассона, д. ед; $P_{\text{тр}}(x, t)$ – давление в сечении трещины в точке x , Па, в момент времени t . Уравнение течения воды через сечение в точке x по длине трещины можно записать в виде:

$$\frac{\partial P_{\text{изб}}(x,t)}{\partial x} = -\frac{64\mu}{\pi w_{\text{max}}^3 h} Q(x,t), \quad (3)$$

где: $P_{\text{изб}}(x,t) = P_{\text{тр}}(x,t) - \sigma_{\text{min}}$ соответствует избыточному давлению в сечении трещины, в точке x с учетом $P_{\text{изб}}(x,t)|_{x=0} = P_{\text{наг}} - \sigma_{\text{min}}$, $Q(x,t)$ – расход воды через сечение в точке x , м³/с; μ – вязкость воды, Па·с; h – высота трещины, м.

Утечка через единицу площади поверхности трещины в пористую среду, с учетом снижения проницаемости из-за загрязнения, может быть определена на основе закона Дарси как:

$$q(x,t) = \frac{k(x,y,z,t)}{\mu L_{\text{пр}}} [P_{\text{тр}}(x,y,z,t) - \hat{P}(x,y,z,t)], \quad (4)$$

где: $k(x,y,z,t)$ – проницаемость породы, м²; $\hat{P}(x,y,z,t)$ – текущее пластовое давление в точке с координатами x,y,z , Па; $L_{\text{пр}}$ – глубина проникновения ТВЧ, м.

Текущее пластовое давление в точке с координатами x,y,z на основе решения Грингартена и Рэйми можно записать в виде:

$$\hat{P}(x,y,z,t) = P_0(x,y,z) + \frac{1}{m\beta} \int_{x_w}^{L_{\text{тр}}(t)} \left[\int_0^t q(x,\tau) S(x',t-\tau) d\tau \right] dx', \quad (5)$$

где: $L_{\text{тр}}(t)$ – текущая длина трещины, м; x_w – координата начала трещины, м; m – пористость пласта, д. ед; β – сжимаемость насыщенной породы, 1/Па; η – пьезопроводность пласта, м²/с; $P_0(x,y,z)$ – начальное пластовое давление, Па; $S(x',t-\tau)$ – функция источника от отрезка трещины длиной dx' .

Материальный баланс потока воды по длине трещины, с учетом $Q(x,t)|_{x=L_{\text{тр}}} = 0$ и $Q(x,t)|_{x=0} = -Q_{\text{наг}}$, определяется в виде:

$$Q(x,t) = Q_{\text{наг}} - 2h \int_{x_w}^x q(x,t) dx, \quad (6)$$

где $2Q_{\text{наг}}$ – приемистость скважины, м³/с.

Предложена экспоненциальная кинетическая модель для снижения проницаемости стенки трещины по накопленному объему утечки через единицу площади с ненулевым предельным значением $k_{\text{п}}$ в виде:

$$k(x, t) = k_{\text{п}} + (k_0 - k_{\text{п}}) \exp(-CQ_{\text{ут}}(x, t)), \quad (7)$$

где: k_0 – начальная фазовая проницаемость для воды, м^2 ; $k_{\text{п}}$ – величина предельного снижения проницаемости, определяемая в лабораторном эксперименте по прокачке воды с ТВЧ через образец, м^2 ; C – коэффициент, отражающий скорость загрязнения, д. ед; $Q_{\text{ут}}$ – объем воды, прошедший через единицу площади, $\text{м}^3/\text{с}$.

Новизна состоит в привязке снижения проницаемости к локальному полю утечки вдоль трещины и включает явный учет предельного снижения проницаемости, идентифицируемый коэффициент засорения, калибруемый по сериям лабораторных экспериментов, интеграция в расчет течения в трещине, что обеспечивает монотонность и численную устойчивость при сопряжении с утечкой.

На рисунке 4 представлены результаты определения изменения проницаемости образцов керна месторождений Западной Сибири при прокачке воды с ТВЧ с концентрацией 100 г / куб. м, отобранной из водоводов системы ППД.

Рисунок иллюстрирует величину снижения проницаемости по мере роста объема прокачанной воды, выход на неснижаемую предельную проницаемость, что позволяет определить параметры для формулы (7).

Прокачанный объем воды на единицу площади, определяется как:

$$Q_{\text{ут}}(x, t) = \int_0^t q(x, \tau) d\tau \quad (9)$$

По мере фильтрации воды с ТВЧ и уменьшения проницаемости стенок, утечка воды из трещины будет снижаться, формируя избыточный объем внутри, и соответственно, давление в трещине будет расти.

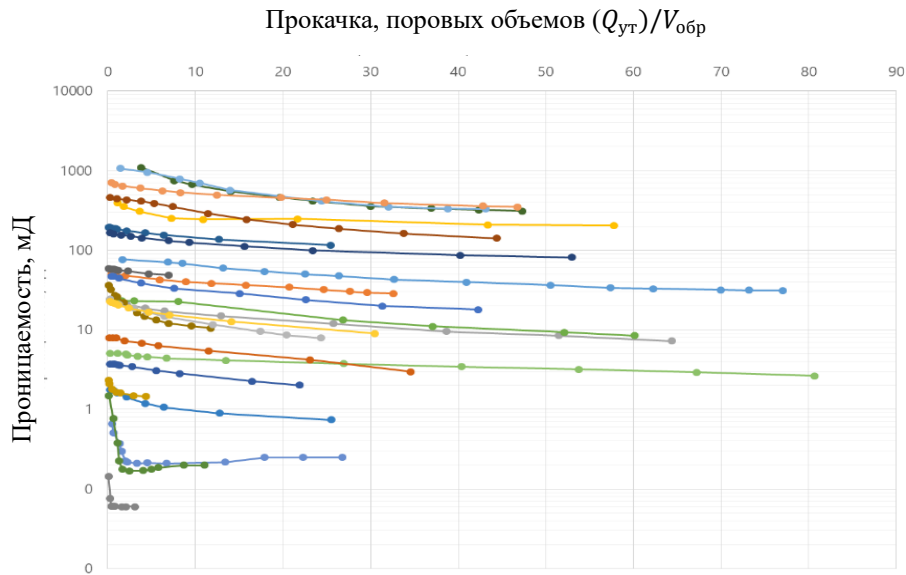


Рисунок 4 - Результаты изменения проницаемости образцов керна
при прокачке воды с ТВЧ

Избыточный объем определяется как:

$$Q_{изб}(x, t) = Q_{наг} - 2 h \int_{x_w}^{L_{тр}(t)} q(x, t) dx \quad (10)$$

Приращение фронта трещины при условии, что давление у кромки трещины $P_{изб}(x, t)|_{x=L_{тр}} = \sigma_{min} + \sigma_r$. можно рассчитать как подстройку длины трещины под избыточный объем воды, составляет:

$$\Delta L_{тр}(t) = \frac{Q_{изб}(x, t) \mu L_{пр}}{2 h k(x, t) [P_{тр}(x, y_w, t) - \hat{P}(x, y_w, t)]} \quad (11)$$

где: σ_r – предел прочности породы, Па.

$$L_{тр} = L_{тр}(t) + \Delta L_{тр}(t), \quad (12)$$

где: $L_{тр}(t)$ - длина трещины до приращения, м.

Разработана численная модель роста техногенной трещины, позволяющая спрогнозировать размер трещины на масштабах времен, сопоставимых с периодом закачки воды. Модель учитывает обратную связь между снижением приёмистости вследствие загрязнения и вынужденным ростом трещины для обеспечения заданного расхода.

На основе численного анализа установлены конкретные механизмы и динамика формирования техногенных трещин в условиях закачки воды с механическими примесями различной концентрации (12–100 мг/л).

На рисунке 5 показано развитие длины трещины, вызванное закачкой воды, в низкопроницаемом пласте ($k=1$ мД) для различных скоростей закачки и концентраций примесей. Закачка воды с расходом 100 - 400 куб. м /сут и содержанием примесей 0, 25 и 50 г/куб. м ведется в пласт с толщиной 10 метров. Давление на входе в трещину 42 МПа, при пластовом 24 МПа и $\sigma_{min} = 35$ МПа, $E=30$ ГПа, $\nu=0,25$ д.ед, $\beta=0,3 \cdot 10^{-10}$ 1/МПа. С учетом низкой проницаемости скважина стимулирована ГРП, начальная длина трещины 50 м.

Результаты показывают, что рост трещины не ограничивается короткой начальной стадией, а продолжается в течение длительных периодов времени, порядка нескольких месяцев. В случае закачки воды без примесей ($C=0$ г/куб. м) длина трещины монотонно увеличивается, что связано с локальным увеличением пластового давления, хотя скорость роста постепенно уменьшается со временем.

Присутствие механических примесей ($C=25$ г/куб. м) значительно усиливает долгосрочное распространение трещины. Важно отметить, что разница между сценариями закачки чистой воды и воды с примесями увеличивается со временем, а не уменьшается, что указывает на кумулятивный эффект воздействия примесей на рост трещины. Это поведение принципиально отличается от классического гидроразрыва пласта, при котором распространение трещины ограничено короткими временными масштабами мероприятия и быстро прекращается после снижения давления. Результаты исследования имеют практическое значение при выборе технологических режимов закачки воды для минимизации риска неконтролируемого роста техногенных трещин. Для обобщения наблюдаемых тенденций и выявления различных режимов распространения построена диаграмма роста трещины, в зависимости от скорости закачки и концентрации примесей (рисунок 6). Диаграмма показывает три характерных режима. При низких скоростях закачки и низких концентрациях примесей рост трещины незначителен, что приводит к относительно коротким локализованным трещинам.

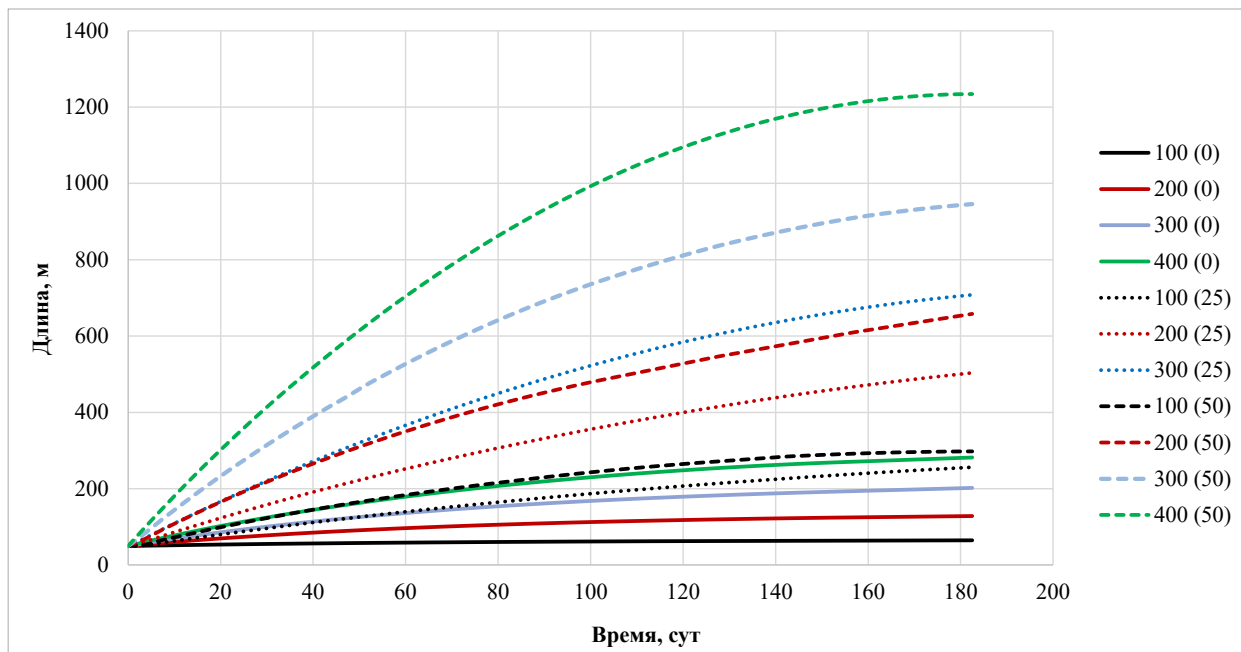


Рисунок 5 - Развитие длины трещины ($k = 1$ мД) при различных скоростях закачки. Сплошные линии соответствуют закачке чистой воды ($C = 0$ мг/л), пунктирные линии — закачке с механическими примесями

В промежуточных условиях возникает режим устойчивого роста, характеризующийся постепенным, но постоянным расширением трещины. При высоких скоростях закачки и/или повышенных концентрациях примесей образуются протяженные техногенные трещины, длина которых превышает несколько сотен метров за моделируемый период времени.

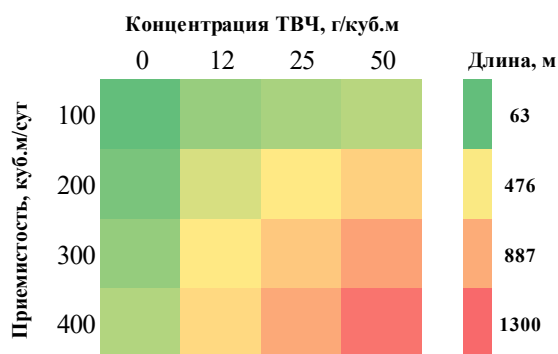


Рисунок 6 - Диаграмма режимов роста трещин, вызванных водой, при проницаемости пласта $k=1$ мД. Цветовая шкала представляет длину трещины через 180 дней в зависимости от скорости закачки и концентрации механических примесей

Эта диаграмма представляет собой практическую основу для оценки риска распространения трещин на большие расстояния и раннего прорыва воды при заводнении низкопроницаемых пластов.

Автором впервые предложен способ расчета эффективной плотности сетки скважин с техногенными трещинами в нагнетательных скважинах. За основу взята формула, предложенная С. Ф. Мулявиным для расчета эффективной плотности сетки с учетом горизонтальных скважин и расширенная для учета параметров трещин.

Эффективное число эквивалентных вертикальных скважин и плотность сетки скважин предлагается рассчитывать по формуле:

$$S = \frac{S_{\text{залежи}}}{N_{\text{эфф}}} \quad (13)$$

$$N_{\text{эфф}} = N_{\text{вс}} + a_H(L)N_{\text{гс}} + a_F \left(x_f, \theta, F_{cd}, \frac{h_f}{H} \right) N_{\text{вт}} \quad (14)$$

$$a_F \left(x_f, \theta, F_{cd}, \frac{h_f}{H} \right) = 1 + \frac{4x_f}{\pi \cdot R_k} \cdot |\cos \theta| \cdot f \left(\frac{x_f}{d} \right) \frac{F_{cd}}{1+F_{cd}} \cdot \frac{h_f}{H} \quad (15)$$

где a_H – зенитный угол ГС, рад; R_k – радиус дренирования скважины, м; L – длина горизонтального ствола скважины, м; $N_{\text{вс}}$ – количество вертикальных скважин без трещин; $N_{\text{гс}}$ – количество горизонтальных скважин без трещин; $N_{\text{вт}}$ – количество вертикальных скважин с трещиной; x_f – полудлина трещины, м; θ – угол между направлением трещины и скважиной, рад; F_{cd} – проводимость трещины; $\frac{h_f}{H}$ – отношение высоты трещины к нефтенасыщенной толщине пласта.

Рассчитан эквивалент вертикальных скважин для пятиточечной системы разработки с расстоянием между добывающими скважинами 500 метров с учетом образования техногенной трещины в нагнетательной скважине. Площадь залежи 500 000 м². Примем $F_{cd}=1$; $h_f/H=1$, ориентация техногенной трещины в направлении пары добывающих скважин $\theta=0^\circ$, $\cos(\theta)=1$. Отношение x_f/d для длин трещин 0, 100, 200, 300, 400 метров, согласно решению, полученному Р.И. Медведским составляет 0; 0,59; 0,41; 0,31, 0,18.

Если считать по формуле, предложенной С. Ф. Мулявиным, то наличие техногенных трещин в нагнетательных скважинах не влияет на величину коэффициента охвата. Если считать приведенную ПСС по предлагаемой

методике, то, например, при $x_f = 300$ м одна нагнетательная скважина с трещиной эквивалентна $\alpha_F \approx 1.96$ вертикальной скважины (таблица 2).

Таблица 2 - Результаты расчета для пятиточечной системы разработки

Полудлина трещины x_f , м	ПСС, га/скв без трещин	α_F	N_{BC}	$f\left(\frac{x_f}{d}\right)$	$N_{BC}f\left(\frac{x_f}{d}\right)$	$N_{эфф} = N_{BC} + N_{BC}f\left(\frac{x_f}{d}\right) + \alpha_F$	Отн. плотность S^*/S	ПСС, га/скв с учетом трещин
0	10	1.000	2	0	2,00	5,00	1,000	10,0
100	10	1.319	2	0,59	1,18	4,50	0,899	9,0
200	10	1.638	2	0,41	0,82	4,46	0,892	8,9
300	10	1.957	2	0,31	0,62	4,58	0,915	9,2
400	10	2.277	2	0,18	0,36	4,64	0,927	9,3

В условиях управления развитием техногенных трещин это позволяет повысить достигаемую величину коэффициента нефтеотдачи до 7 %, согласно зависимости нефтеотдачи от плотности сетки скважин

В четвертой главе приведены результаты апробации подхода к оценке длины техногенной трещины при закачке воды с примесями. В качестве объекта выбран участок одного из месторождений Западной Сибири, объект Ю₂₋₄ (континентальные отложения с пониженными ФЕС). Центральная часть: $h_n = 13,3$ м, $\phi = 15$ %, $k = 1,6$ мД; периферия: $h_n = 3,2$ м, $\phi = 14$ %, $k = 1,5$ мД. Нефть: $\rho = 0,733$ кг/м³, $\mu = 0,82$ мПа·с; $P_{пл} = 27,1$ МПа. Сформирована избирательная система разработки, расстояние между скважинами ~ 400 м.

Данные по качеству воды получены на основе исследования проб, отобранных из водоводов системы поддержания давления. В расчетах использовано значение $C = 1,65$, определенное для данного типа коллектора на основе обработки фактических результатов фильтрации воды с содержанием примесей около 50 г/куб. м. Принятая для расчета зависимость имеет вид: $k(t) = 0,2 + (1,5 - 0,2) \exp(-1,65 Q_{ут})$, а $Q_{ут} = Q_n m L_{обр}$, где m – пористость, 0,15 д. ед, а $L_{обр}$ – длина образца, 0,035 м. Рассмотрены приёмности 100 – 400 м³/сут. В модели размер ячеек 1 м, шаг по времени 7 дней. Начальное состояние: полудлина трещины ГРП 50 м.

Результат расчета (рисунок 7) показывает, что величина приемистости 200 м³/сут создает риск прорыва воды по трещине. При необходимости большей целевой приемистости закачки целесообразна очистка воды.

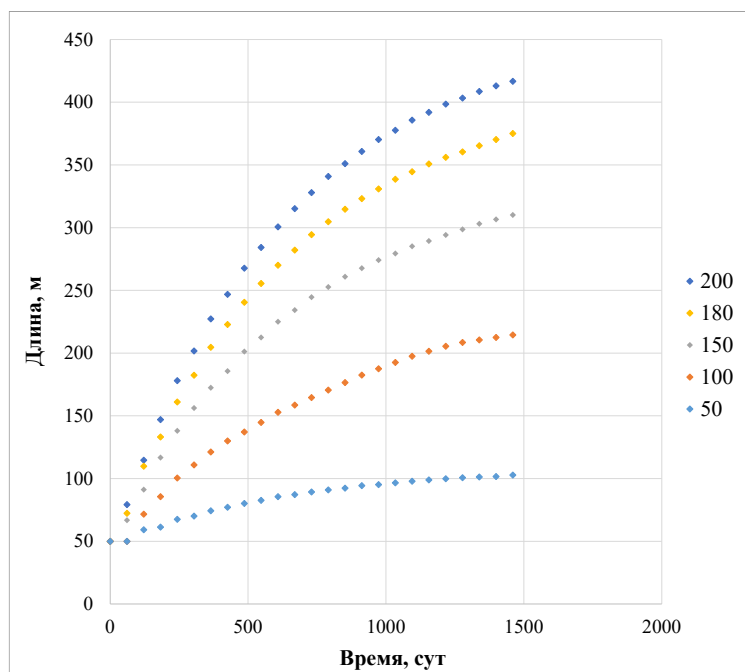


Рисунок 7 - Результаты расчета роста техногенной трещины

Для условий вводимого в разработку объекта применение наклонно-направленных скважин, с учетом технико-экономических показателей, не позволит обеспечить целевую компенсацию, потому принято решение перехода на ГС с МГРП. Разработанный метод внедрен в производственную деятельность добывающего Общества при расчете и обосновании целевых значений приемистости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложена единая эволюционная концепция развития техногенных трещин (стадии I–IV), позволяющая согласованно интерпретировать автоГРП, рост протяженности трещин, формирование КНФС и техногенного суперколлектора, а также связывать стадию процесса с моделированием трещин и набором диагностических данных (ГДИС, график Холла, трассеры).

2. По промысловым данным установлено, что закачиваемая вода систем ППД содержит ТВЧ в диапазоне 5–250 мг/л (размеры 0,3–80 мкм и выше), и загрязнение призабойной зоны/стенок трещины является физически обоснованным механизмом снижения приемистости и роста давления до

условий распространения трещины. В модель введена калибруемая зависимость снижения проницаемости стенок трещины с ненулевым предельным значением, что обеспечивает перенос лабораторных данных в расчёт утечек и рост трещины.

3. Разработана физико-математическая модель роста техногенной трещины, включающая загрязнение стенок трещины как зависящий от времени процесс. На численных экспериментах для типового низкопроницаемого пласта ($k \approx 1$ мД, $h \approx 10$ м, $Q = 100\text{--}400$ м³/сут, начальная полудлина трещины $x_f = 50$ м) показано, что рост трещины может продолжаться несколько месяцев и более, а на поздних стадиях скорость роста не стремится к нулю и составляет порядка 0,1–1,0 м/сут, что принципиально отличает процесс от ГРП.

4. Разработана методика учета техногенных трещин при расчете коэффициента охвата и приведенной плотности сетки скважин. Показано, что в пятиточечной системе при полудлине трещины 200 м одна нагнетательная скважина с трещиной эквивалентна 1,6 скважин без трещины. ПСС изменяется с 10 до 8,9 га/скв, эффект техногенной трещины сопоставим с уплотнением сетки примерно на 11 % без фактического бурения дополнительных скважин. Управление развитием техногенной трещины позволяет повысить конечную нефтеотдачу минимум на 7 % относительно варианта без ограничения.

Список основных работ, опубликованных по теме диссертации

Публикации в изданиях, включенных в международную базу цитирования Scopus:

1. Медведский, Р. И. Возможные причины снижения эффективности внутриконтурного заводнения / Р. И. Медведский, А. А. Изотов // Нефтяное хозяйство. – 2009. – № 3. – С. 59-61.

2. Изотов, А. А. О взаимосвязи факторов, влияющих на эффективность разработки низкопроницаемых коллекторов с применением заводнения / А. А. Изотов, Д. Г. Афонин // Нефтяное хозяйство. – 2020. – № 12. – С. 106-109.

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации:

3. Медведский, Р. И. Изменение приемистости скважины при загрязнении призабойной зоны / Р. И. Медведский, А. А. Изотов // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2009. – № 4(76). – С. 88-91.

4. Изотов, А. А. Влияние трещин автоГРП на коэффициент нефтеизвлечения и его прогнозирование / А. А. Изотов, Д. Г. Афонин // Нефтяная провинция. – 2021. – № 4-1(28). – С. 109-121.

5. Изотов, А. А. О техногенной трансформации продуктивных пластов вследствие повышенного давления нагнетания при заводнении / А. А. Изотов, Д. Г. Афонин // Нефтепромысловое дело. – 2021. – № 5(629). – С. 18-25.

6. Изотов, А. А. Целесообразность плавного запуска в работу нагнетательных скважин / А. А. Изотов, С. В. Соколов // Экспозиция Нефть Газ – 2021. – № 1(80). – С. 40-44.

7. Изотов, А. А. Механизм распространения индикатора в терригенном пласте при трассерных исследованиях / А. А. Изотов, Д. Г. Афонин // Экспозиция Нефть Газ – 2021. – № 5(84). – С. 31-34.

8. Квазистационарная модель развития трещины гидроразрыва пласта при переводе скважины после обработки в нагнетательный фонд / К. М. Федоров, А. А. Изотов, А. Я. Гильманов [и др.] // PRОнефть. Профессионально о нефти. – 2024. – Т. 9, № 2(32). – С. 91-100.

9. Изотов, А. А., Мулявин, С. Ф., Черемисин, Н. А. Оценка скорости роста техногенных трещин в нефтяном пласте под воздействием заводнения / А. А. Изотов, С. Ф. Мулявин, Н. А. Черемисин // Деловой журнал Neftegaz.RU. – 2026. – № 2(171). – С. 84-90.

10. Изотов, А. А., Мулявин, С. Ф. Идентификация динамики обводнения добывающей скважины после прорыва техногенной трещины от нагнетательной. Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2026. – №30(1). – С. 61-72.

Подписано в печать 26.03.2026. Формат 60x90 1/16. Усл. авт. л. 1,05.

Тираж 100 экз. Заказ № 3206.

Библиотечно-издательский комплекс
федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Тюменский индустриальный университет».
625000, Тюмень, ул. Володарского, 38.

Типография библиотечно-издательского комплекса.
625039, Тюмень, ул. Киевская, 52.