

На правах рукописи



ДАВЛЕТБАЕВ АЛЬФРЕД ЯДГАРОВИЧ

**НЕИЗОТЕРМИЧЕСКАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ УГЛЕВОДОРОДОВ В
НИЗКОПРОНИЦАЕМЫХ КОЛЛЕКТОРАХ С ТРЕЩИНОЙ
ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА ПРИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ
ВОЗДЕЙСТВИИ**

1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Уфа 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Уфимский университет науки и технологии».

Научный консультант: **Ковалева Лиана Ароновна**,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Федоров Константин Михайлович**
доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры моделирования физических процессов и систем Школы естественных наук Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Тюменский государственный университет»

Хайруллин Мухамед Хильмиеевич
доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории подземной гидродинамики Института механики и машиностроения - структурного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук»

Галиакбарова Эмилия Вильевна
доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры информационных технологий и прикладной математики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск

Защита состоится «30» октября 2025 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.479.05 на базе ФГБОУ ВО «Уфимского университета науки и технологии», по адресу: 450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимского университета науки и технологии» и на сайте <https://uust.ru/>.

Автореферат разослан «_____» 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.ф.-м.н., доцент



Киреев Виктор Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время существенно увеличилась доля добычи углеводородов из месторождений с трудноизвлекаемыми запасами нефти и газа – в первую очередь, с низкопроницаемыми коллекторами и тяжелыми нефтями. Приток углеводородов из низкопроницаемых коллекторов принципиально основан на применении гидравлического разрыва пласта (ГРП). Практика добычи высоковязких углеводородов демонстрирует особую эффективность тепловых методов воздействия на продуктивный пласт. Наибольшее распространение в мировой практике получили такие тепловые технологии воздействия на залежи с тяжелыми нефтями, как закачка пара (пароциклическая обработка, непрерывная закачка), внутрипластовое горение и другие методы. Эти методы имеют ограничение в применении к залежам, сочетающим оба этих осложняющих приток фактора: низкопроницаемый коллектор и высоковязкая нефть.

Технология высокочастотного (ВЧ) электромагнитного (ЭМ) воздействия предлагают принципиально иной подход к тепловой обработке продуктивных пластов. Ключевые особенности являются генерация объемного тепла непосредственно в пластовых условиях, бесконтактный механизм передачи энергии (без закачки теплоносителей) и преобразование электромагнитной энергии в тепловую через диэлектрические потери в среде.

Возможность комбинированного воздействия в пластах с сверхнизкой проницаемостью и высоковязкой нефтью представляется перспективной, но требует, с одной стороны, более подробного изучения теоретических аспектов влияния ЭМ излучения на многокомпонентные системы в сложнопостроенных геологических структурах, с другой – создание физико-математических моделей для прогнозирования притока в скважины с магистральной трещиной гидроразрыва. Актуальность темы диссертации посвящена решению важной научной проблемы, связанной с развитием теории нелинейной фильтрации многокомпонентных систем и процессов тепло- и массопереноса при комбинированном применении ВЧ ЭМ воздействия, гидроразрыва пласта, закачки смещающегося агента.

Целью работы является построение, развитие и обоснование физико-математической модели, описывающей сопряженные

процессы тепло- и массопереноса при нелинейной фильтрации высоковязких углеводородов в низкопроницаемых коллекторах с применением высокочастотного электромагнитного воздействия, комбинированного с закачкой растворителя и проведением гидравлического разрыва пласта.

Задачи исследования:

1. Теоретическое обоснование и формулировка физико-математической модели процесса тепломассопереноса в низкопроницаемом продуктивном пласте с трещиной гидроразрыва при высокочастотном электромагнитном воздействии.
2. Исследование влияния проводимости трещин гидроразрыва, а также наличия низкопроницаемой перемычки и ее размеров между трещинами соседних скважин на процесс фильтрации и распределение полей давления.
3. Изучение влияния неизотермической нелинейной фильтрации, термического расширения, адиабатического эффекта на процесс переноса тепла и массы в системе «трещина-пласт».
4. Исследование влияния объемных источников тепла, выделяющихся при распространении электромагнитных волн в ближней и дальней зонах продуктивного пласта и трещины гидроразрыва пласта, на изменение температуры в скважине.
5. Анализ фильтрационных и температурный полей при применении комбинированного высокочастотного электромагнитного воздействия, закачки растворителя, гидравлического разрыва пласта на месторождениях с низкопроницаемыми коллекторами для интенсификации притока высоковязкой нефти.
6. Оценка эффективности и сравнение различных методов, включающих поэтапное высокочастотное электромагнитное воздействие, закачку маловязкого растворителя и гидравлический разрыв пласта.

Научная новизна работы. В ходе проведенных исследований в диссертационной работе получены следующие новые результаты:

- построены математические модели неизотермической фильтрации высоковязких углеводородов в низкопроницаемых коллекторах при высокочастотном электромагнитном воздействии, в т.ч. при смещающемся вытеснении нефти маловязким растворителем в пласте с трещиной гидроразрыва пласта;

- разработан метод оценки параметров трещины гидроразрыва пласта между скважинами путем численного воспроизведения промысловых данных по гидропрослушиванию скважин, основанный на варьировании проводимости трещины и размеров низкопроницаемой перемычки пласта между трещинами;
- изучены особенности процессов тепло- и массопереноса в продуктивном пласте при добыче сверхвязкой нефти с одновременным электромагнитным воздействием с учетом термического расширения пластовой жидкости в элементах разработки с двумя и более трещинами гидроразрыва;
- оценено влияние объемных тепловых источников на малых и больших расстояний при высокочастотном электромагнитном воздействии в продуктивном низкопроницаемом пласте с трещиной гидроразрыва в процессе добычи высоковязкой нефти в скважине;
- изучены процессы неизотермической нелинейной фильтрации нефьютоновских высоковязких нефтей с учетом предельного градиента давления на распространение полей давления и температурных полей;
- изучены особенности воздействия высокочастотного электромагнитного поля в условиях нелинейной неизотермической фильтрации на параметры системы, включающей низкопроницаемый коллектор с высоковязкой нефтью в элементе разработки с несколькими трещинами гидроразрыва;
- выполнено моделирование процессов смешивающегося вытеснения высоковязкой нефти растворителем при высокочастотном электромагнитном воздействии в низкопроницаемом продуктивном пласте с трещиной гидроразрыва.

Методы исследования и достоверность результатов. Научные результаты, полученные в диссертационной работе, основывались на применении методов и уравнений механики многофазных сред. Численная реализация физико-математических моделей осуществлялась с применением апробированных и известных методов, а полученные численные результаты согласуются с известными теоретическими исследованиями. Достоверность результатов моделирования проверялась тестовыми расчетами и сравнением численных расчетов с частными точными решениями, расчетами в коммерческих симуляторах для отдельных частных

случаев, а также осуществлялась верификация модели путем воспроизведения промысловых данных.

Положения и результаты, выносимые на защиту

1. Обобщенная математическая модель фильтрации высоковязкой нефти в низкопроницаемом пласте с трещиной гидроразрыва пласта при высокочастотном электромагнитном воздействии, в том числе, в сочетании со смешивающимся вытеснением.

2. Результаты численного исследования влияние проводимости трещины и низкопроницаемой перемычки пласта между трещинами гидроразрыва на фильтрацию жидкости и распространение возмущения по давлению при моделировании гидропрослушивания скважин.

3. Результаты численного решения задачи о неизотермической фильтрации высоковязкой нефти в продуктивном пласте с трещинами гидроразрыва пласта с учетом объемных тепловых источников на малых и больших расстояниях при ВЧ ЭМ воздействии.

4. Математическая модель и результаты численной реализации нелинейной неизотермической фильтрации высоковязкой нефти в пласте с предельным градиентом давления при высокочастотном электромагнитном воздействии.

5. Результаты численных исследований добычи высоковязкой нефти в элементе разработки с несколькими добывающими скважинами с трещинами гидроразрыва с учетом нелинейной фильтрации при поэтапном высокочастотном электромагнитном воздействии на продуктивный пласт.

6. Математическая модель вытеснения высоковязкой нефти смешивающимся агентом при комбинированной закачке растворителя в низкопроницаемый пласт с трещиной гидроразрыва и одновременном высокочастотном электромагнитном воздействии.

Теоретическая и практическая значимость. Разработанные математические модели и результаты исследований позволили оценить вклад неизотермической нелинейной фильтрации, адиабатического эффекта, термического расширения нефти, объемных тепловых источников для процессы тепло- и массопереноса высоковязкой нефти в низкопроницаемом пласте с трещиной гидроразрыва при высокочастотном электромагнитном

воздействии. Полученные результаты могут быть применены при проектировании разработки месторождений высоковязкой и сверхвязкой нефти, а также использованы для повышения энергетической и экономической эффективности при комбинированном воздействии высокочастотным электромагнитным полем, закачке растворителя и гидроразрыве пласта.

Апробация работы. Научные положения и выводы, сформулированные в диссертационной работе, прошли широкую апробацию на следующих научных мероприятиях:

- Всероссийский Съезд по теоретической и прикладной механике (Казань, 2015; Уфа, 2019; Санкт-Петербург, 2023);
- Фундаментальная математика и ее приложения в естествознании (Уфа, 2008, 2014, 2015, 2018, 2022, 2023);
- SPE Russian Petroleum Technology Conference (Москва, 2010, 2014, 2016, 2017);
- SPE Heavy Oil Conference and Exhibition (Кувейт, 2016);
- SPE Canadian Unconventional Resources and International Petroleum Conference (Калгари, Канада, 2010);
- AIP Conference Proceedings. Proceedings of the International Conference of Computational Methods in Sciences and Engineering (Афины, 2016; Салоники, 2017);
- Физико-химическая гидродинамика: модели и приложения (Уфа, 2016, 2018, 2023);
- Енисейская теплофизика. I Всероссийская научная конференция с международным участием (Красноярск, 2023);
- Теоретические и экспериментальные исследования нелинейных процессов в конденсированных средах (Уфа, 2022);
- Всероссийская конференция «Актуальные проблемы прикладной математики и механики» (Абрау-Дюрсо, 2018);
- Международная конференция «Нановывления при разработке месторождений углеводородного сырья: от наноминералогии и нанохимии к нанотехнологиям» (Москва, 2008, 2010);
- Международная научно-техническая конференция «Geopetrol: Наука, техника и технология в развитии поисков и добычи углеводородов на суше и море» (Польша, Закопане, 2006, 2008);
- Международная научно-техническая конференция «Китайско-российское научно-техническое сотрудничество. Наука-образование-инновации» (КНР, Харбин-Санья, 2008г.)

- Международная конференция «Наноявления при разработке месторождений углеводородного сырья: от наноминералогии и нанохимии к нанотехнологиям» (Москва, 2008, 2010, 2012);
- Всероссийская конференция с международным участием «Фундаментальные проблемы разработки месторождений нефти и газа» (Москва, 2011);
- VI Российская конференция «Многофазные системы: модели, эксперимент, приложения» (Уфа, 2017);
- Fifth International Conference of Applied Mathematics and Computing (Plovdiv, Bulgaria, 2008);
- VIII Всероссийский симпозиум по прикладной и промышленной математике (Сочи, 2007);
- Всероссийская конференция «Фундаментальный базис новых технологий нефтяной и газовой промышленности (теоретические и прикладные аспекты)» (Москва, 2007);
- XXVIII школа-семинар по проблемам механики сплошных сред в системах добычи, сбора, подготовки, транспорта и переработки нефти и газа под руководством академика АН Азербайджана Мирзаджанзаде А.Х. (Уфа, ТРАНСТЭК, 2004);
- VII Всероссийская научная конференция «Теплофизика и физическая гидродинамика» (Сочи, 2022);
- International Conference on Petroleum Phase Behavior and Fouling (Рио-де-Жанейро, Бразилия, 2009; Джерси, США, 2010; Лондон, Великобритания, 2011; Рюэй-Мальмезон, Франция, 2013);
- World Heavy Oil Congress (Aberdeen, Scotland, 2012; Новый Орлеан, Луизиана, 2014; Эдмонтон, Альберта, 2015).

Представленные в диссертации исследования выполнялись при частичной поддержке гранта Российского научного фонда № 22-11-20042.

Личный вклад автора. Автором самостоятельно получены основные научные результаты. Постановки задач по решенным задачам осуществлены диссидентом лично, самостоятельно разработаны алгоритмы и реализованы численные методы решения задач.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 41 работах, из которых 11 в изданиях, входящих в международные базы данных Scopus и Web of Science, 8 в рецензируемых научных изданиях, входящих в научометрические

базы RSCI, 4 – из перечня ВАК РФ, 1 монография. Получено 7 патентов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 234 страниц, в том числе 61 рисунок и 15 таблиц. Список литературы состоит из 213 наименований.

Благодарность. Автор выражает свою глубокую и искреннюю благодарность за консультации и практическую помощь при подготовке диссертационной работы научному консультанту профессору Ковалевой Л.А.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражена актуальность задач, рассмотренных в диссертационной работе, научная новизна, сформулирована цель, поставлены задачи исследования и кратко изложена структура работы.

В первой главе выполнен обзор теоретических, экспериментальных и промысловых исследований, посвященных изучению влияния ЭМ поля на нефтенасыщенные пористые среды, а также математические модели фильтрации жидкости в пласте с трещиной гидроразрыва пласта.

Исследованием процессов тепло- и массопереноса в средах при высокочастотном электромагнитном воздействии занимались такие ученые как: Айрапетян М.А., Ахметов А.Т., Бабалян Г.А., Галимбеков А.Д., Галимов А.Ю., Дыбленко В.П., Зыонг Нгок Хай, Кислицын А.А., Ковалева Л.А., Макогон Ю.Ф., Миннигалимов Р.З., Морозов Г.А., Насыров Н.М., Нигматулин Р.И., Саяхов Ф.Л., Фатыхов М.А., Хабибуллин И.Л., Хисматулина Ф.С., Чистяков С.И., Abernethy E.R., Babadagli T., Bridges J.E., Carrizales M.A., Chakma A., Fanchi J.R., Hiebert A.D., Islam M.R., Kasevich R.S., Koch A., Haagensen A.D., Jeambey C.G., Ovalles C., Sahni A., Spencer H., Ritchey H.W., Wadadar S.S., Wilson R. и др. Лабораторные, теоретические исследования, промысловые испытания за рубежом (Канаде, США, Венесуэле, Казахстане) и под руководством профессора Саяхова Ф.Л. в России (в республиках Башкортостан и Татарстан) свидетельствуют о том, что электромагнитное воздействие оказывает значительное влияние на тепло- и массоперенос в углеводородных средах. В настоящее время известно о опытно-промышленных работах на месторождении битуминозных

(нефтяных) песчаников Атабаска (провинция Альберта, Канада) с применением ВЧ ЭМ воздействия в комбинации с закачкой растворителя.

Наиболее распространенным методом интенсификации добычи высоковязкой нефти в низкопроницаемых коллекторах является гидравлический разрыв пласта (ГРП). Задачами фильтрации жидкости в низкопроницаемом пласте с магистральной трещиной занимались такие известные ученые, как: Байкин А.Н., Байков В.А., Баренблatt Г.И., Башмаков Р.А., Валиуллин Р.А., Гарипов Т.Т., Галиакбарова Э.В., Гималтдинов И.К., Головин С.В., Гордеев Ю.Н., Губайдуллин М.Р., Давлетшин Ф.Ф., Каневская Р.Д., Кац Р.М., Киреев В.Н., Ковалева Л.А., Ильясов А.М., Мурзенко В.В., Рамазанов А.Ш., Савенков Е.Б., Уразов Р.Р., Федоров А.И., Федоров К.М., Филиппов А.И., Хабибуллин И.Л., Хайруллин М.Х., Хасанов М.М., Шагапов В.Ш., Шарафутдинов Р.Ф., Христианович С.А., Blasingame T.A., Cinco-Ley H., Dontsov E.V., Economides M., Horne R.N., Nordgren R.P., Perkins T.K., Prats M., Van den Hoek P. и др.

Высоковязкая нефть в низкопроницаемых продуктивных пластах является одним из наиболее сложных объектов для разработки. Для исследования новых возможностей интенсификации притока высоковязкой нефти требуется изучение комбинированных термических методов воздействия в сочетании с гидроразрывом пласта и закачкой смещающего агента.

Во второй и в третьей главах приведены результаты исследования процессов тепло- и массопереноса, полученные путем численной реализации сформулированной обобщенной физико-математической модели. Изучено влияние адиабатического эффекта, термического расширения, распределенных объемных тепловых источников на малых и больших расстояниях, эффекта нелинейной фильтрации на распределения полей давления, температур в системе «скважина-трещина-пласт», а также в элементе разработки с двумя и более трещинами гидроразрыва пласта.

Обобщенная физико-математическая модель. Распределения давлений и температур в трещинах гидроразрыва (P_f, T_f) и в продуктивном пласте (P_m, T_m) описываются уравнениями пьезопроводности и уравнением конвективной теплопроводности:

$$\varphi_f \beta_{ft} \left(\frac{\partial P_f}{\partial t} - \frac{\delta_o}{\beta_o} \frac{\partial T_f}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k_f}{\mu_o} a(G) \frac{\partial P_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k_f}{\mu_o} a(G) \frac{\partial P_f}{\partial y} \right), \quad (1)$$

$$c'_{ft} \frac{\partial T_f}{\partial t} - \varphi_f \eta_o \rho_o c_o \frac{\partial P_f}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{ft} \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{ft} \frac{\partial T_f}{\partial y} \right) \quad (2)$$

$$- \rho_o c_o \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(v_{fx} T_f \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_{fy} T_f \right) \right) + f^{(E)},$$

$$\varphi_m \beta_{mt} \left(\frac{\partial P_m}{\partial t} - \frac{\delta_o}{\beta_o} \frac{\partial T_m}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k_{mx}}{\mu_o} a(G) \frac{\partial P_m}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k_{my}}{\mu_o} a(G) \frac{\partial P_m}{\partial y} \right), \quad (3)$$

$$c'_{mt} \frac{\partial T_m}{\partial t} - \varphi_m \eta_o \rho_o c_o \frac{\partial P_m}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{mt} \frac{\partial T_m}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{mt} \frac{\partial T_m}{\partial y} \right) \quad (4)$$

где φ_f , φ_m , k_f , k_m – коэффициенты пористости и проницаемости трещины, пласта; β_{ft} , β_{mt} – общая сжимаемость системы в трещине и в пласте; ρ_o – плотность нефти; c_o – удельная теплоемкость нефти; c'_{ft} , c'_{mt} , λ_{ft} , λ_{mt} – объемная теплоемкость и теплопроводность в трещине и в пласте; β_o – сжимаемость нефти; δ_o – коэффициент термического расширения нефти; η_o – адиабатический коэффициент нефти; $a(G)$ – коэффициент, учитывающий неильтоновские свойства пластовой жидкости; индексы: f – трещина, m – низкопроницаемый пласт (матрица), o – нефть, t – общий параметр системы, x, y – оси координат X и Y , w – скважина, i – начальное значение. Тепловые процессы в скелете продуктивного пласта и в трещине гидроразрыва пласта учтены в объемных теплоемкостях, теплопроводностях пористых сред. Данные параметры в трещине и в продуктивном пласте являются аддитивными величинами, соответственно, определяются выражениями:

$$\begin{aligned} c'_{ft} &= (1 - \varphi_f) c'_f + \varphi_f c'_o, \\ c'_{mt} &= (1 - \varphi_m) c'_m + \varphi_m c'_o, \end{aligned} \quad (5)$$

где $c'_f = \rho_f \cdot c_f$ и $c'_m = \rho_m \cdot c_m$ – объемная теплоемкость скелета в трещинах и в продуктивном пласте, ρ_f и ρ_m – плотность скелета в трещинах и в пласте, c_f и c_m – удельная теплоемкость скелета в трещинах и в пласте, $c'_o = \rho_o \cdot c_o$ – объемная теплоемкость нефти.

$$\begin{aligned} \lambda_{ft} &= (1 - \varphi_f) \lambda_f + \varphi_f \lambda_o, \\ \lambda_{mt} &= (1 - \varphi_m) \lambda_m + \varphi_m \lambda_o, \end{aligned} \quad (6)$$

где λ_f , λ_m – теплопроводность скелета в трещинах и в продуктивном пласте, λ_o – теплопроводность нефти. Полагается, что теплопроводность поперек напластования меньше, чем вдоль напластования.

Скорость фильтрации в трещине гидроразрыва и продуктивном пласте описываются модифицированным законом Дарси:

$$\begin{aligned} v_{fx} &= \frac{k_f}{\mu_o} a(G) \frac{\partial P_f}{\partial x}, & v_{fy} &= \frac{k_f}{\mu_o} a(G) \frac{\partial P_f}{\partial y}, \\ v_{mx} &= \frac{k_m}{\mu_o} a(G) \frac{\partial P_m}{\partial x}, & v_{my} &= \frac{k_m}{\mu_o} a(G) \frac{\partial P_m}{\partial y}. \end{aligned} \quad (7)$$

Проявление нелинейной фильтрации жидкости в трещине и пласте учитывается в виде зависимости коэффициента эффективной проницаемости от градиента давления:

$$a(G) = 1 - \frac{G_i}{G} \left(1 - \exp \left(-\frac{G_i}{G} \right) \right), \quad (8)$$

где $G = \left| \frac{\partial P}{\partial x} \right|$ – градиент давления, G_i – начальный (предельный) градиент давления.

Вязкость нефти зависит от температуры и описывается выражением:

$$\mu_o = \mu_{oi} \exp(-\gamma_o(T - T_i)), \quad (9)$$

где μ_{oi} – значение вязкости нефти при начальной температуре $T = T_i$, γ_o – коэффициент, учитывающий зависимость вязкости нефти от температуры.

Вследствие энергетического взаимодействия электромагнитных волн с нефтенасыщенным пластом возникают объемные источники тепла. В работе показано, что в общем случае наиболее корректным является использование кусочно-непрерывной функции, описывающей пространственное распределение плотности объемных тепловых источников на малых (близких к источнику ЭМ излучения) и дальних расстояниях:

$$f^{(E)} = \begin{cases} \frac{\alpha_d \beta_d N_e (1 + 2\varphi/\pi)^2 + 4/\pi^2 (\ln(\rho r) - 0.11593)^2}{2h (1 + 2\varphi/\pi)}, & r_w \leq r \leq r_{cr} \\ 2J\alpha_d \frac{r_d}{r} \exp(-2\alpha_d(r - r_d)), & r > r_{cr} \end{cases} \quad (10)$$

где $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ – цилиндрические координаты; $J = N_e/S_d$ – интенсивность излучателя ЭМ волн; $S_d = 2\pi h r_d$ – площадь излучателя ЭМ волн; N_e – мощность излучателя ЭМ волн; r_d –

радиус излучателя ЭМ волн; $\rho = \sqrt{\alpha_d^2 + \beta_d^2}$ и $\varphi = -\arctg(\alpha_d/\beta_d)$ – модуль и аргумент комплексной величины коэффициента распространения ЭМ волн в пласте, r_{cr} – радиус ближней зоны для ЭМ излучения, которое оценивается путем решения трансцендентного уравнения:

$$\frac{2J\alpha_d \frac{r_d}{r} \exp(-2\alpha_d(r - r_d))}{\frac{\alpha_d \beta_d N_e (1+2\varphi/\pi)^2 + 4/\pi^2 (\ln(\rho r) - 0.11593)^2}{2h}} = \frac{(1+2\varphi/\pi)}{(1+2\varphi/\pi)}, \quad (11)$$

Коэффициенты затухания α_d и фазы β_d ЭМ волн в пласте и трещине определяются из выражений:

$$\begin{aligned} \alpha_d &= \omega \sqrt{\frac{\varepsilon_0 \varepsilon' \eta_0}{2} (\sqrt{1 + tg^2 \delta} - 1)}, \\ \beta_d &= \omega \sqrt{\frac{\varepsilon_0 \varepsilon' \eta_0}{2} (\sqrt{1 + tg^2 \delta} + 1)}, \end{aligned} \quad (12)$$

где $\omega = 2\pi f$ – круговая частота ЭМ поля; ε_0 , η_0 – электрическая и магнитная постоянные, f – циклическая частота ЭМ волн.

Диэлектрические характеристики насыщенной пористой среды в трещинах и в пласте полагаются одинаковыми и определяются выражениями Лихтенеккера-Ротера:

$$\begin{aligned} \varepsilon'_{ft} &= \varepsilon'_f^{(1-\varphi_f)} \cdot \varepsilon'_o^{(\varphi_f)}, \\ \varepsilon'_{mt} &= \varepsilon'_m^{(1-\varphi_m)} \cdot \varepsilon'_o^{(\varphi_m)}, \\ \varepsilon''_{ft} &= \varepsilon''_f^{(1-\varphi_f)} \cdot \varepsilon''_o^{(\varphi_f)}, \\ \varepsilon''_{mt} &= \varepsilon''_m^{(1-\varphi_m)} \cdot \varepsilon''_o^{(\varphi_m)}, \end{aligned} \quad (13)$$

где ε'_m , ε''_m , ε'_f , ε''_f , ε'_o , ε''_o – действительная и мнимая части относительной диэлектрической проницаемости породы пласта, трещин, нефти.

Мощность излучателя ЭМ волн N_e определяется из выражения:

$$N_e = N_g \exp(-2(\alpha_{d2} + \alpha_{d4})Z), \quad (14)$$

где N_g – мощность генератора ЭМ волн; индексы: d – затухание электромагнитных волн, g – генератор электромагнитных волн, e –

излучатель электромагнитных волн; α_{d2} и α_{d4} – коэффициенты затухания на стенках насосно-компрессорных труб (НКТ) и обсадной колонны, которые определяются из выражений:

$$\begin{aligned}\alpha_{d2} &= \frac{R_s}{2Z_s \ln(r_3/r_2) r_2} \frac{1}{}, \\ \alpha_{d4} &= \frac{R_s}{2Z_s \ln(r_3/r_2) r_3} \frac{1}{},\end{aligned}\quad (15)$$

где R_s – активная часть поверхностного сопротивления труб, которая определяется из выражения:

$$R_s^2 = \frac{\pi f \mu_{at}}{\sigma_t}, \quad (16)$$

а Z_c – волновое сопротивление воздуха, заполняющего межтрубное пространство:

$$Z_c^2 = \frac{\chi_0}{\varepsilon_0}, \quad (17)$$

Здесь μ_{at} – абсолютная магнитная проницаемость, σ_t – удельная электропроводность труб, r_2 – внешний радиус труб НКТ, r_3 – внутренний радиус обсадной колонны.

Приток жидкости к скважине с трещиной гидроразрыва рассчитывается из выражения:

$$(w_f/2) \cdot \frac{k_f}{\mu_o} a(G) \frac{\partial P_f}{\partial x} \Big|_{x=x_w} = \frac{q_w \cdot B_o}{4h_f}. \quad (18)$$

где q_w – величины притока жидкости в скважине, $x_w = y_w$ – радиус скважины, B_o – объемный коэффициент, который учитывает отношение объема нефти в пластовых условиях к объему на поверхности после выделения растворенного газа из пластовой жидкости, w_f – раскрытие трещины; h_f – высота продуктивного пласта и трещины гидроразрыва.

В скважине с трещиной гидроразрыва поддерживается постоянное забойное давление, при котором осуществляется отбор пластовой жидкости:

$$P_f \Big|_{\substack{x=x_w \\ y=y_w}} = P_i - \Delta P, \quad (19)$$

где P_i – начальное пластовое давление, ΔP – перепад давления в скважине.

Система уравнений (1)-(4) с дополнительными выражениями (5)-(19) и граничными условиями решалась конечно-разностным методом по итеративной схеме Ньютона. При этом конвективные члены уравнений (2) и (4) аппроксимировались конечно-разностной WENO-схемой пятого порядка. Расчеты проводились на

неравномерной прямоугольной сетке со сгущением около границ трещины с пластом. Достигнуто удовлетворительное соответствие результатов моделирования аналитическому решению для изотермического течения жидкости к трещине конечной проводимости в низкопроницаемом продуктивном пласте. Валидация модели для изотермического случая осуществлялась на промысловом примере по скважинам, которые соединены трещиной гидроразрыва протяженностью около 1 км. Модель для неизотермических условий была проверена путем численного моделирования и сравнения с фактическими промысловыми данными о воздействии высокочастотного электромагнитного поля на продуктивный пласт Юлтимировского месторождения

Во второй главе обсуждаются результаты численного исследования изотермической фильтрации в пласте с трещинами гидроразрыва и неизотермической фильтрации высоковязкой нефти в низкопроницаемом пласте с трещиной гидроразрыва при высокочастотном электромагнитном воздействии. Изучено влияние термического расширения нефти при тепловом воздействии, влияние адиабатического эффекта, исследование влияние поправки для ближней зоны в выражении для плотности тепловых источников на процесс тепло- и массопереноса в системе «трещина-продуктивный пласт».

В пункте 2.1 приведена обобщенная физико-математическая модель (геометрия, основные уравнения, граничные условия), приведены результаты тестовых расчетов изотермической фильтрации в низкопроницаемом пласте с трещиной гидроразрыва.

В пункте 2.2 представлены изотермической фильтрации в пласте с двумя трещинами гидроразрыва, изучено влияние низкопроницаемой перемычки между трещинами. Валидация модели для изотермического случая проводилась на промысловых данных по гидропрослушиванию скважин с трещиной гидроразрыва.

Результаты моделирования (рис. 1-2) показывают распределение давления вдоль двух трещин через 1 и 30 суток при разных размерах низкопроницаемой перемычки между трещинами (d). При $d=500$ м (рис. 1а, 2а) давление повышается только вдоль трещины в возмущающей скважине, тогда как в наблюдательной скважине с трещиной гидроразрыва сохраняется начальное пластовое давление.

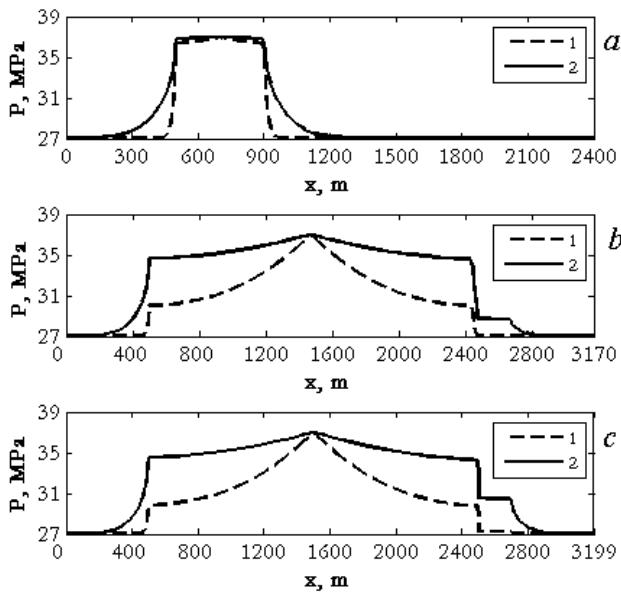


Рис. 1. Распределение давления вдоль трещин при $d=800\text{ m}$ (a), $d=30\text{ m}$ (b), $d=1\text{ m}$ (c) в моменты времени: 1 – $\Delta t=1\text{ cym}$, 2 – $\Delta t=30\text{ cym}$

При уменьшении размеров перемычки до $d=30\text{ m}$ (рис. 1b, 2б) и $d=1\text{ m}$ (рис. 1c, 2в) отмечается рост давления вдоль обеих трещин, причем его величина в наблюдательной скважине обратно пропорциональна размеру перемычки.

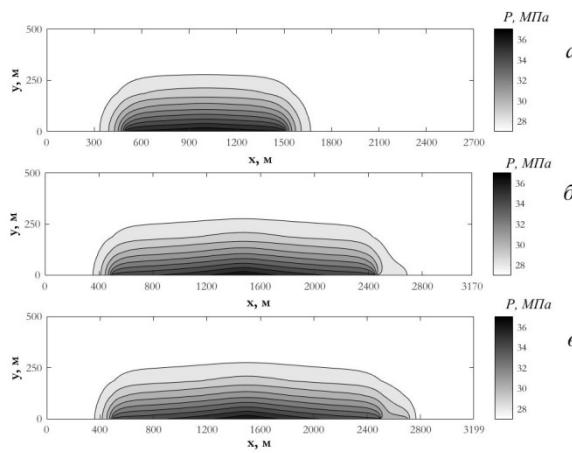


Рис. 2. 2D распределение давления системе с двумя трещинами при $d = 800 \text{ м}$ (а), $d = 30 \text{ м}$ (б), $d = 1 \text{ м}$ (в) в момент времени $\Delta t = 30 \text{ сут}$

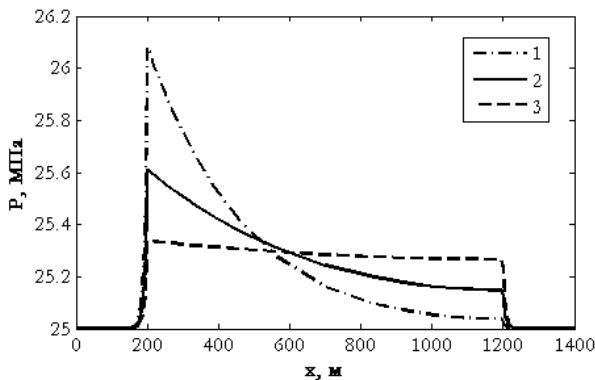


Рис. 3. Распределение давления вдоль магистральной трещины гидроразрыва между двумя скважинами через $\Delta t = 1 \text{ сут}$, при безразмерной проводимости трещины:
 1 – $C_{fD} = 10.4$; 2 – $C_{fD} = 35.2$; 3 – $C_{fD} = 281.3$

При $C_{fD} \geq 281.3$ градиент давления вдоль трещины $x_{f1} + x_{f2} = 1000$ небольшое и составляет $\sim 0.08 \text{ MPa}$ при $\Delta t = 50 \text{ сут}$. При

$C_{fD}=10.4$ градиент давления вдоль трещины более значительный и составляет ~ 1.69 МПа при $\Delta t=50$ сут. При значениях $C_{fD} \gtrsim 281.3$ наличием градиентов давления вдоль трещины можно пренебречь (рис. 3) и полагать, что давление одинаковое вдоль всей длины трещины.

В **пункте 2.3** выполнен анализ притока высоковязкой нефти при ВЧ ЭМ воздействии в вертикальной скважине. Проведена валидация модели путем сопоставления результатов численного моделирования неизотермической фильтрации высоковязкой нефти с промысловыми данными по применению ВЧ ЭМ воздействия на Юлтимировском месторождении.

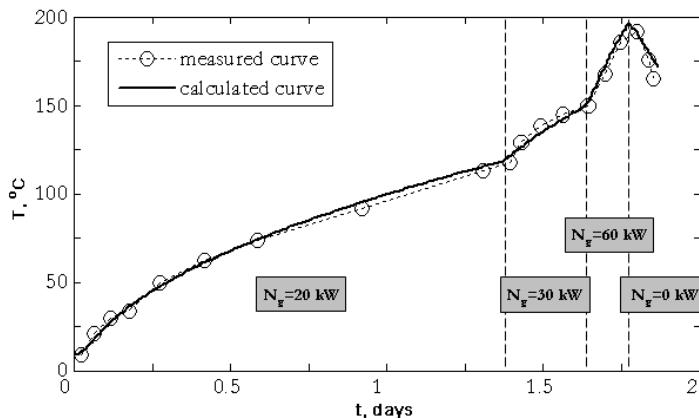


Рис. 4. Валидация обобщенной модели путем воспроизведения изменения температуры в скважине X150 во время ВЧ ЭМ воздействия при мощности генератора $N_g=20$ кВт, 30 кВт, 60 кВт, 0 кВт

В результате наилучшего совмещения измеренных и результатов численного моделирования данных по изменению температуры в скважине (рис. 4) и вдоль ствола скважины X150 и температуре в соседней скважине XXX1 получена оценка коэффициента затухания электромагнитных волн в продуктивном пласте. Путем численного моделирования подтвержден эффект объемного нагрева пласта, что воспроизведено в росте температуры в соседней скважине, не подвергавшейся ВЧ ЭМ воздействию.

В пункте 2.4 приведено описание геометрии задачи, системы уравнений и граничных условий для сопоставления случаев «холодного» отбора высоковязкой нефти в скважине с трещиной гидроразрыва со случаем притока жидкости при поэтапном ВЧ ЭМ воздействии. На рис. 5 приведено сравнение распределений притока жидкости вдоль трещины для случаев с «холодным» отбором ($N_g=0$) и отбора с ВЧ ЭМ воздействием ($N_g=20 \text{ кВт}$) при перепаде давления между скважиной и пластом $\Delta P = 15 \text{ МПа}$, $k_f = 300 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$, $x_f = 10 \text{ м}$, через $\Delta t_1 = 250 \text{ суток}$ «холодного» отбора на первом этапе и на втором этапе отбора с ВЧ ЭМ воздействием с длительностью $\Delta t_2 = 50 \text{ суток}$.

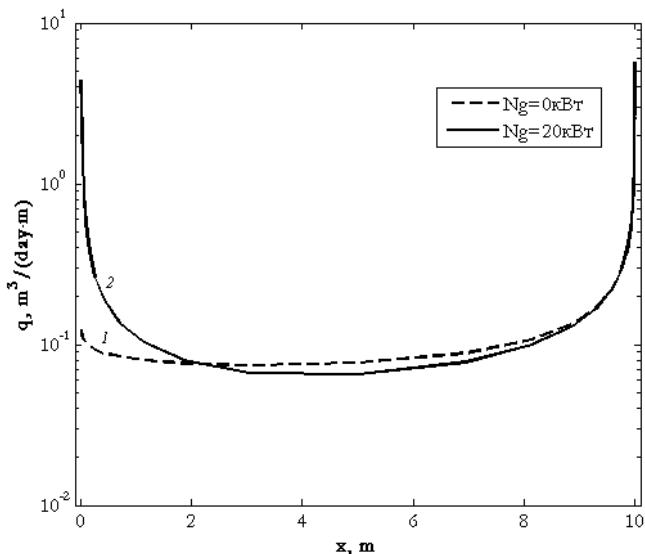


Рис. 5. Распределение притока жидкости вдоль трещины ГРП:
 $\Delta P = 15 \text{ МПа}$, $k_f = 300 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$, $x_f = 10 \text{ м}$, $\Delta t_2 = 50 \text{ сут}$,
1 – $N_g=0 \text{ кВт}$ («холодный» отбор), 2 – $N_g=20 \text{ кВт}$ (отбор при ВЧ ЭМ
воздействии на пласт)

Из рисунка видно, что при отборе высоковязкой нефти с тепловым воздействием качественно изменяется профиль притока жидкости вдоль трещины. Приток к трещине при тепловом воздействии на удалении до 2 метров от скважины с излучателем

существенно выше, чем в случае с «холодным» отбором. С удалением к торцу трещины ($x_f=10\text{ m}$) от околоскважинной зоны с тепловым нагревом профили притока жидкости вдоль трещины отличаются меньше.

На рис. 6 приведена динамика изменения температуры в скважине и притока жидкости в скважину в случае «холодной» добычи и отборе с поэтапным тепловым воздействием (на втором и четвертом этапах) при различных длинах трещины.

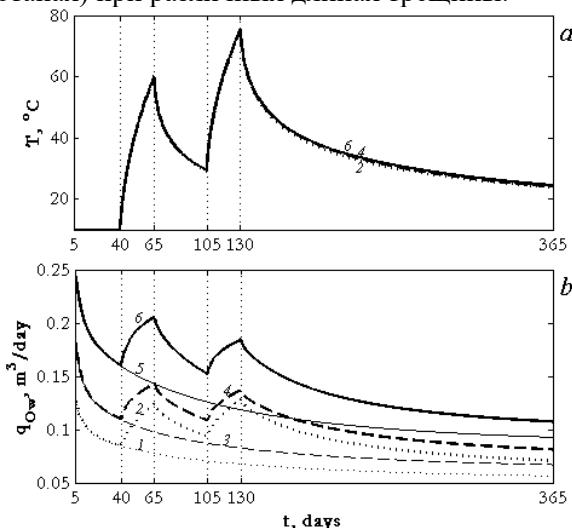


Рис. 6. Динамика температуры (a) и притока (b) в скважине с трещиной ГРП при поэтапном ВЧ ЭМ воздействии на пласт для различных полудлин трещины:

$\Delta P=3\text{ MPa}$, $k_f=100\cdot10^{-12}\text{ m}^2$, $N_g=0\text{ kBm}$ (1, 3, 5), $N_g=60\text{ kBm}$ (2, 4, 6),
 $1, 2 - x_f=5\text{ m}; 3, 4 - x_f=10\text{ m}; 5, 6 - x_f=50\text{ m}$

Из представленных результатов видно, что температура в скважине к концу второго этапа добычи с тепловым воздействием во всех трех случаях достигла $\sim 60^{\circ}\text{C}$, к концу четвертого этапа $\sim 75^{\circ}\text{C}$. Величина притока в скважине при отборе с тепловым воздействием больше по сравнению с «холодной» добычей на $\sim 43\text{-}71\%$ во втором этапе и увеличивается до $\sim 55\text{-}90\%$ в четвертом этапе.

В пункте 2.5 приведены результаты численных экспериментов для оценки вклада эффекта термического расширения нефти и

адиабатического эффекта на процесс неизотермической фильтрации при отборе высоковязкой нефти в системе «трещина гидроразрыва - продуктивный пласт» с высокочастотным электромагнитным воздействием.

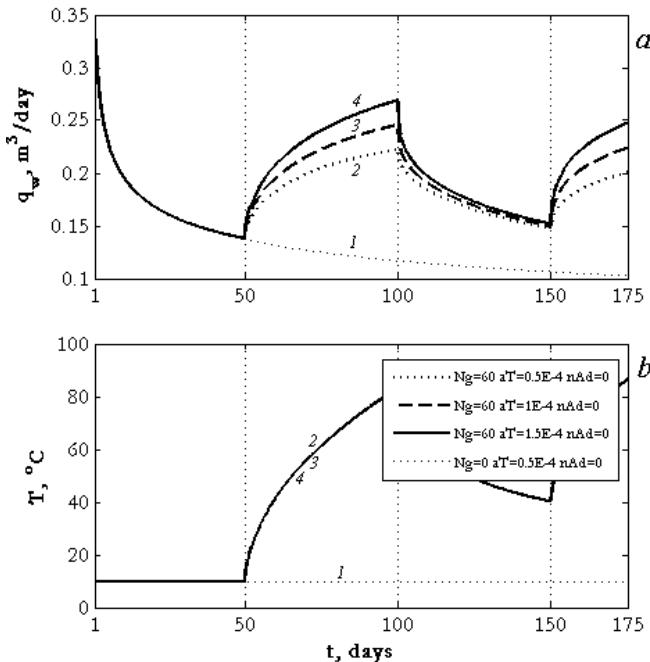


Рис. 7. Динамика изменения величины притока нефти (а), температуры (б) в скважине с трещиной ГРП при ВЧ ЭМ воздействии для различных величин термического расширения нефти:
 $\Delta P=3 \text{ MPa}$, $x_f=50 \text{ m}$, $k_f=100 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$, $\eta_o=0 \text{ K/Pa}$, $\Delta t_2=50 \text{ сут}$,
1 - $N_g=0 \text{ kBm}$, $\eta_o=0 \text{ K/Pa}$; 2 - $N_g=60 \text{ kBm}$, $\delta_o=0.5 \cdot 10^{-4} \text{ 1/K}$;
3 - $N_g=60 \text{ kBm}$, $\delta_o=1.0 \cdot 10^{-4} \text{ 1/K}$; 4 - $N_g=60 \text{ kBm}$, $\delta_o=1.5 \cdot 10^{-4} \text{ 1/K}$

На рис. 7 приведена динамика изменения температуры в скважине и динамика притока к скважине с трещиной гидроразрыва при «холодной» добыче и отборе с тепловым воздействием с различными значениями коэффициента термического расширения нефти. Воздействие высокочастотным электромагнитным генератором осуществляется на втором и четвертом этапах. Вначале в течение 50 суток на первом этапе осуществляется отбор

высоковязкой нефти без теплового воздействия. В дальнейшем в период с 50 до 100 сут на втором этапе осуществляется отбор с одновременным ВЧ ЭМ воздействием с мощностью генератора электромагнитных волн $N_g=60 \text{ кВт}$. На третьем этапе отбор нагретой нефти продолжается с выключенным генератором ВЧ ЭМ волн, на четвертом этапе в период с 150 до 175 суток отбор с повторным включением генератора ЭМ волн. Температура в скважине на втором этапе через 25 сут теплового воздействия достигает $\sim 61^\circ\text{C}$, через 50 сут достигает $\sim 83^\circ\text{C}$.

С увеличением температуры при тепловом воздействии в околоскважинной области отмечается существенное увеличение притока (кривые 2-4) и величина притока в скважине заметно выше по сравнению с «холодным» отбором (кривая 1). При «холодном» отборе через 100 сут величина притока в скважине составляет $q_w \sim 0.117 \text{ м}^3/\text{сут}$. Через этот же период 100 сут (т.е. через $\Delta t_1=50$ сут «холодного» отбора и через $\Delta t_2=50$ сут отбора с тепловым воздействием) для пласта с $\delta_o = 0.5 \cdot 10^{-4} \text{ 1/К}$ величина притока к скважине составляет на $\sim 89.7\%$ ($q_w \sim 0.222 \text{ м}^3/\text{сут}$) больше, чем при «холодном» отборе. Для продуктивного пласта с высоковязкой нефтью и $\delta_o = 1.0 \cdot 10^{-4} \text{ 1/К}$ приток к скважине на $\sim 110.1\%$ ($q_w \sim 0.2458 \text{ м}^3/\text{сут}$) больше, чем при «холодном» отборе, при $\delta_o = 1.5 \cdot 10^{-4} \text{ 1/К}$ – на $\sim 130.1\%$ (приток в скважине возрастает до $q_w \sim 0.2692 \text{ м}^3/\text{сут}$).

В работе также приведены оценки окупаемости стоимости генератора высокочастотных электромагнитных волн. Дополнительный приток нефти за счет ВЧ ЭМ воздействия рассчитывалась как разница накопленного добычи случая с тепловым воздействием и за счет «холодного» отбора в скважине с трещиной ГРП. Наименьший период окупаемости имеет место в пластах с наибольшими величинами коэффициента термического расширения нефти.

В пункте 2.6 рассматривается процесс притока высоковязкой нефти в скважину с двумя перпендикулярными трещинами гидроразрыва пласта для оценки вклада малых и дальних расстояний в выражении для распределенных тепловых источников при распространении электромагнитных волн в продуктивном пласте.

Из рис. 8 видно, что выражение для объемных источников тепла по Абернетти завышает значения плотности тепловых источников в

ближней зоне (т.е. от радиуса излучателя до радиус ближней зоны для ЭМ излучения $r_{cr} \sim 0.7$ м). Для иллюстрации необходимости учета ближней зоны (в ближней зоне $r_{cr} \leq 0.7$ м) в выражении для плотности тепловых источников (10) выполнены численные расчеты динамики изменения температуры в скважине. На рис. 4 приведена динамика изменения температуры в скважине при фильтрации жидкости с периодическим включением/выключением генератора ЭМ волн согласно выражению Абернетти (кривая 1) и с учетом поправки (10) в ближней зоне $r_{cr} \leq 0.7$ м (кривая 2).

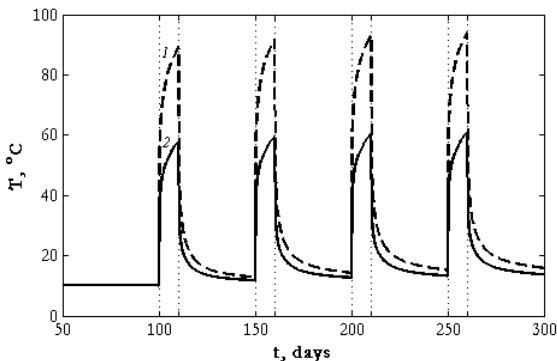


Рис. 8. Динамики изменения температуры в скважине с двумя трещинами ГРП при ВЧ ЭМ воздействии на пласт без поправки в ближней зоне r_{cr} (кривая 1) и с учетом поправки (10) в ближней зоне r_{cr} (кривая 2) при $x_f = y_f = 10$ м, $N_g = 20$ кВт

Видно, что использование выражения Абернетти без поправки в ближней зоне (10) приводит к завышению значений плотности тепловых источников и к завышению абсолютных значений температуры в околоскважинной области.

В качестве иллюстрации на рис. 9 приведены 2D-распределения давления, температуры и вязкости жидкости для случая с максимальными параметрами обеих трещин и случая с короткой первоначальной трещиной. В первом случае профили давления, температуры и вязкости симметричные, заметное повышение температуры и снижение вязкости происходит в околоскважинной области на удалениях менее 5 м от скважины с излучателем электромагнитных волн. Во втором случае отмечается неравномерность в распределении давления, вдоль «новой» трещины

по оси y с лучшими фильтрационными свойствами больше скорость фильтрации, поэтому больше градиент температуры и меньше глубина теплового прогрева из-за того, что по «новой» трещине выносится больше жидкости из пласта и тепла, которое выделяется за счет затухания электромагнитных волн в продуктивном пласте.

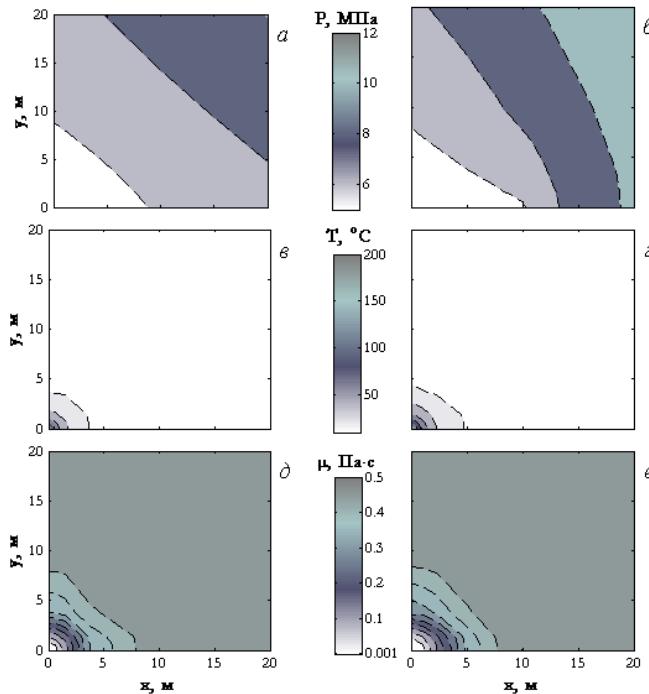


Рис. 9. Распределение давления (а), (б), температуры (в), (г), вязкости жидкости (д), (е) в пласте с двумя трещинами ГРП при ВЧ ЭМ воздействии на пласт: $\Delta t_2=50$ сут, $N_g=20$ кВт, $\Delta P=15$ МПа, $k_{f2}=250 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$; (а), (в), (д) – $y_f=50$ м; (б), (г), (е) – $y_f=10$ м

В третьей главе исследован вклад нелинейной фильтрации сверхвязкой нефти с предельным градиентом давления в вертикальной скважине и в элементе разработки с четырьмя скважинами с трещинами гидроразрыва пласта.

В **пункте 3.1** путем численных исследований оценен вклад процесса нелинейной фильтрации с предельным градиентом

давления на процесс притока высоковязкой нефти к вертикальной скважине при ВЧ ЭМ воздействии. При моделировании учитывается термическое расширение нефти, зависимость вязкости нефти от температуры. Проявление нелинейной фильтрации жидкости в пласте учитывается по зависимости (8), которая аппроксимирует закон Дарси с предельным/начальным градиентом давления.

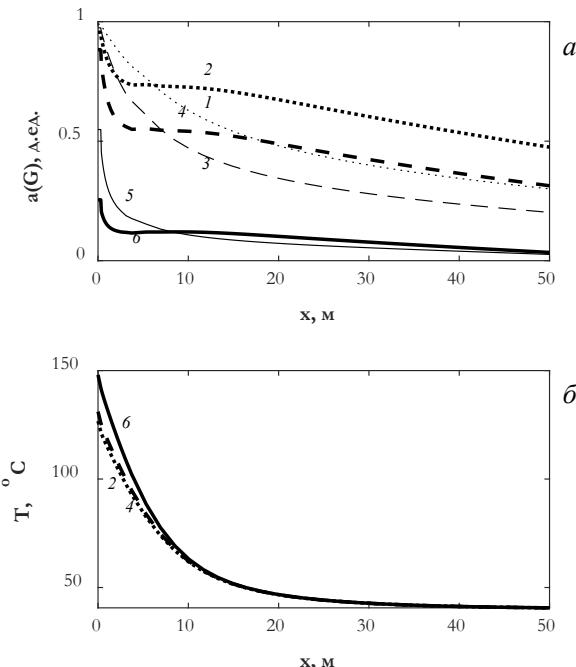


Рис. 10. Распределение коэффициента нелинейной фильтрации (а), температуры в пласте (б) при отборе высоковязкой нефти с ВЧ ЭМ воздействием:

$$k_m = 10 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2, \Delta t_2 = 100 \text{ сут}, \delta_o = 1.0 \cdot 10^{-4} \text{ I/K}, \Delta P = 10 \text{ МПа},$$

$$N_g = 0 \text{ кВт (1, 3, 5) и } N_g = 100 \text{ кВт (2, 4, 6):}$$

$$1, 2 - G_i = 0.05 \text{ МПа/м; } 3, 4 - G_i = 0.1 \text{ МПа/м; } 5, 6 - G_i = 1 \text{ МПа/м}$$

Распределение коэффициента $a(G)$, характеризующее проявление нелинейной фильтрации, и температуры в пласте для различных значений предельного градиента давления приведены на рис. 10. При «холодной» добыче жидкости (кривые 1, 3, 5 на рис. 10а)

отмечается монотонное снижение коэффициента $a(G)$, которое на расстоянии 50 м от скважины для $G_i=0.05 \text{ MPa/m}$ составляет ~ 3.28 раза (кривая 1 на рис. 7а), для $G_i=0.1 \text{ MPa/m}$ – 4.80 раза (кривая 3 на рис. 7а), для $G_i=1.0 \text{ MPa/m}$ – 20.67 раза (кривая 5 на рис. 6а). Коэффициент $a(G)$ по мере удаления от скважины снижается меньше при отборе с одновременным ВЧ ЭМ воздействием. Это обуславливается тем, что при ВЧ ЭМ воздействии прогревается околоскважинная зона (кривые 2, 4, 6 на рис. 10б). Рост температуры в пласте сопровождается снижением вязкости пластовой жидкости и, соответственно, увеличением эффективной подвижности жидкости в пласте $(k_m/\mu_o) \cdot a(G)$.

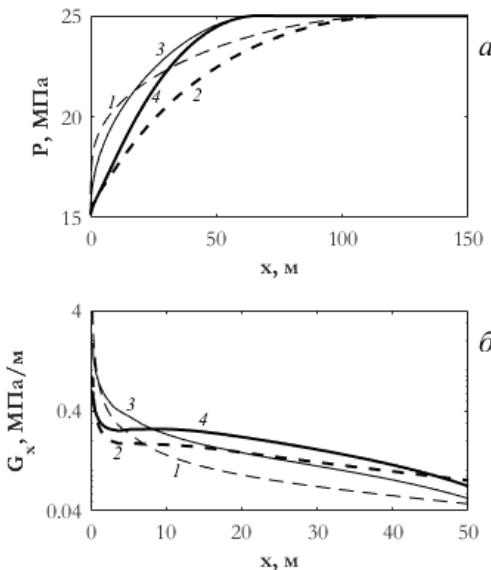


Рис. 11. Распределение давления (а), градиента давления в пласте (б) при отборе высоковязкой нефти с ВЧ ЭМ воздействием:
 $k_m=10 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$, $\Delta t_2=100 \text{ сут}$, $\delta_o=1.0 \cdot 10^{-4} \text{ 1/К}$, $\Delta P=10 \text{ MPa}$,
 $N_g=0 \text{ кВт}$ (1, 3) и $N_g=100 \text{ кВт}$ (2, 4):
1, 2 – $G_i=0.1 \text{ MPa/m}$; 3, 4 – $G_i=1 \text{ MPa/m}$

На кривых распределения давления и градиента давлений видно, что через 200 суток с момента начала отбора область дренирования вокруг скважины составляет $\sim 100 \text{ м}$ при предельном градиенте

давления $G_i=0.1 \text{ МПа/м}$ (кривые 1-2 на рис. 11а), $\sim 60 \text{ м}$ при $G_i=1.0 \text{ МПа/м}$ (кривые 3-4 на рис. 11а). При этом размеры областей дренирования вокруг скважины при «холодном» добыве и отборе с тепловым воздействием практически совпадают. Градиенты давлений в ближней зоне пласта (на расстояниях $\sim 2\text{-}5$ метров от скважины) имеют такой же немонотонный вид, как кривые распределения коэффициента $a(G)$ на рис. 11а. Величина градиентов давления на расстояниях $\sim 6.9\text{-}8.5 \text{ м}$ при тепловом воздействии ниже, чем в случае «холодного» отбора (кривые 1-4 на рис. 11б). В дальней зоне пласта тенденция меняется и градиенты давления выше для случая с тепловым воздействием.

В **пункте 3.2** приведены результаты математического моделирования для оценки вклада неизотермической нелинейной фильтрации жидкости на процессы тепло- и массопереноса в пласте для элемента разработки с четырьмя скважинами с трещинами. В одной из четырех добывающих скважин моделировался отбор высоковязкой нефти с высокочастотным электромагнитным воздействием, в остальных трех скважинах «холодный» отбор пластовой жидкости.

На рис. 12 представлены распределения давления, температуры и коэффициента нелинейной фильтрации при электромагнитном воздействии в элементе системы разработки в различные моменты времени с заданным значением предельного градиента давления $G_i = 0.1 \text{ МПа/м}$. Спустя 30 суток добывчи высоковязкой нефти, снижение давления вдоль трещин заметно больше, чем поперек трещины, т.е. в продуктивном пласте (кривые 1-2, рис. 13а и рис. 12б). При этом в скважине с ЭМ воздействием разница изменения давления относительно первоначального значения заметно выше, чем в соседней скважине с «холодным» отбором пластовой жидкости. Кривые распределения давления (кривые 1-2, рис. 12а и рис. 12б), коэффициента нелинейной фильтрации $a(G)$ вдоль и поперек трещины (кривые 1-2, рис. 12в и рис. 12г) несимметричные относительно половины расстояния между скважинами в элементе разработки из-за влияния температурного поля вокруг скважины с ЭМ воздействием. Причем, чем больше период отбора с тепловым воздействием, тем заметнее отличаются распределения давления и $a(G)$ в прогретой и «холодной» частях пласта.

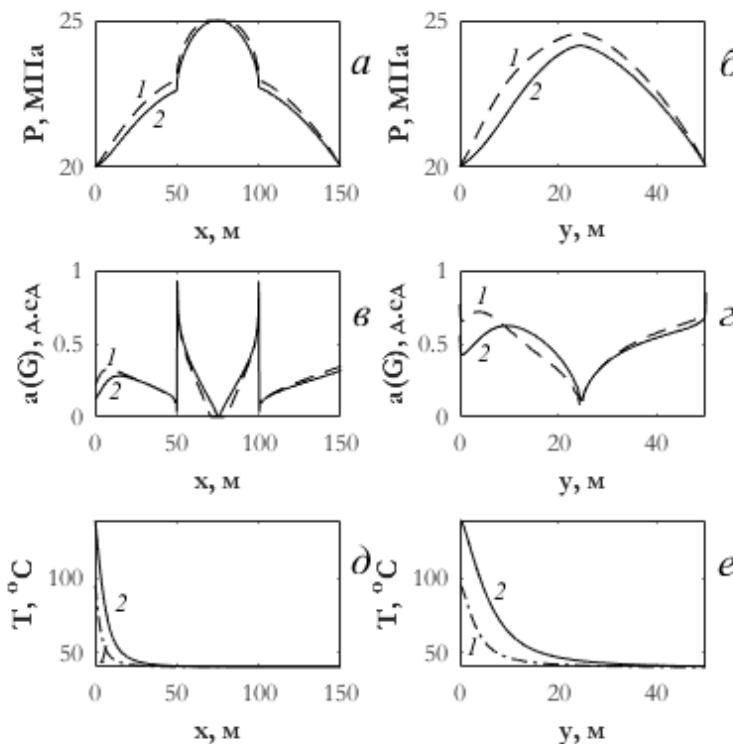


Рис. 12. Распределение давления (a), коэффициента нелинейной фильтрации $a(G)$ (б), температуры (в) вдоль и поперек трещины при отборе с ВЧ ЭМ воздействии на пласт:

$$\Delta P = 5 \text{ MPa}, x_f = 50 \text{ м}, k_f = 500 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2, k_m = 10 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2, \delta_o = 1.5 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}, \mu_{o_i} = 1000 \text{ мПа} \cdot \text{с}, N_g = 100 \text{ кВт}, G_i = 0.1 \text{ МПа/м}:$$

$$1 - \Delta t_2 = 30 \text{ сут}, 2 - \Delta t_2 = 100 \text{ сут}$$

В четвертой главе изучена комбинированная технология, сочетающая высокочастотное электромагнитное воздействие, закачку смешивающегося агента, проведение гидравлического разрыва пласта. Методология исследования заключается в сравнительном анализе «холодного» отбора высоковязкой нефти в вертикальной скважине и в скважине с трещиной гидроразрыва, поэтапного теплового воздействия ВЧ ЭМ полем в скважине с ГРП, «холодной»

закачки маловязкого растворителя, одноэтапной и двухэтапной закачки растворителя с тепловым воздействием ВЧ ЭМ полем. Постановка задачи учитывает зависимость смеси компонентов, высоковязкой нефти и растворителя от температур. Дифференциальные уравнения для распределения давления, температуры, концентрации растворителя в трещине (область $0 \leq x \leq x_f, 0 \leq y \leq w_f/2$) имеют вид:

$$\varphi_f \beta_{ft} \left(\frac{\partial P_f}{\partial t} - \frac{\delta_l}{\beta_l} \frac{\partial T_f}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k_f}{\mu_l} \frac{\partial P_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k_f}{\mu_l} \frac{\partial P_f}{\partial y} \right), \quad (19)$$

$$c'_{ft} \frac{\partial T_f}{\partial t} - \varphi_f \eta_l \rho_l c_l \frac{\partial P_f}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{ft} \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{ft} \frac{\partial T_f}{\partial y} \right) - \rho_l c_l \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(v_{f_x} T_f \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_{f_y} T_f \right) \right) + f^{(E)}, \quad (20)$$

$$\varphi_f \frac{\partial C_{sf}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{f_x} \frac{\partial C_{sf}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{f_y} \frac{\partial C_{sf}}{\partial y} \right) - \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(v_{f_x} C_{sf} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_{f_y} C_{sf} \right) \right), \quad (21)$$

в пласте имеют вид:

$$\varphi_m \beta_{mt} \left(\frac{\partial P_m}{\partial t} - \frac{\delta_l}{\beta_l} \frac{\partial T_m}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k_{m_x}}{\mu_l} \frac{\partial P_m}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k_{m_y}}{\mu_l} \frac{\partial P_m}{\partial y} \right), \quad (22)$$

$$\alpha_{mt} \frac{\partial T_m}{\partial t} - \varphi_m \eta_l \rho_l c_l \frac{\partial P_m}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{mt_x} \frac{\partial T_m}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{mt_y} \frac{\partial T_m}{\partial y} \right) - \rho_l c_l \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(v_{m_x} T_m \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_{m_y} T_m \right) \right) + f^{(E)}, \quad (23)$$

$$\varphi_m \frac{\partial C_{sm}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{m_x} \frac{\partial C_{sm}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{m_y} \frac{\partial C_{sm}}{\partial y} \right) - \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(v_{m_x} C_{sm} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_{m_y} C_{sm} \right) \right), \quad (24)$$

где C_{sf}, C_{sm} – концентрации растворителя в трещине и в пласте, $D_{f_x}, D_{f_y}, D_{m_x}, D_{m_y}$ – коэффициенты диффузии в трещине и в пласте, μ_l – вязкость смеси высоковязкой нефти и растворителя.

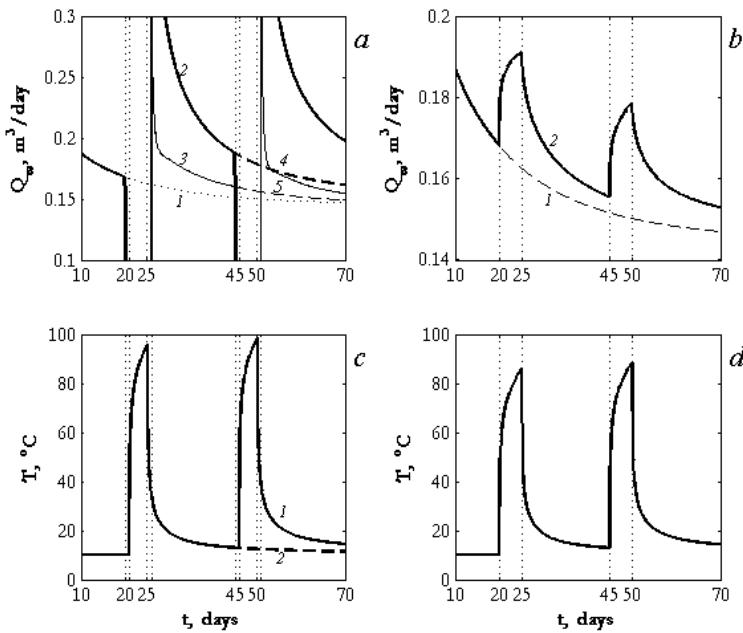


Рис. 13. Динамика притока (*а, б*) нефти (*1, 3, 5*), смеси нефти с растворителем (*2, 4*), и температуры в скважине (*в, г*):

$$\Delta P=1 \text{ MPa}, x_f=10 \text{ м}, k_f=100 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2;$$

1 (а, б) – «холодная» добыча с ГРП, *2 (б)* и *(г)* – добыча в скважине с ГРП с двухэтапным ЭМ воздействием $N_g=20 \text{ кВт}$; *2, 3 (а)* и *1 (в)* – двухэтапная закачка растворителя с тепловым воздействием $N_g=20 \text{ кВт}$ в скважине с ГРП; *4, 5 (а)* и *2 (б)* – одноэтапная закачка растворителя с одновременным тепловым воздействием $N_g=20 \text{ кВт}$ в скважине с ГРП

При одно- и двухэтапном комбинированном воздействии на пласт на этапе отбора жидкости (кривые 2-5 на рис. 13а) в начальный момент времени величина притока жидкости в скважине быстро снижается, затем снижение замедляется и продолжает снижаться в течение всего времени отбора. Расход отбираемой смеси нефти и растворителя в этом случае заметно больше, чем при 2-х этапном многостадийном ЭМ воздействии на пласт. Это связано с отбором смеси маловязкого растворителя и нефти и, следовательно, большей

подвижности жидкости в околоскважинной зоне. Величина притока добываемой нефти, которая определялась соответственно из притока жидкости и текущих массовых концентрации фаз, при одновременном нагреве с закачкой растворителя заметно больше, чем при «холодной» закачке растворителя. Однако, приведенные кривые изменения величины притока нефти при заданных параметрах пласта, трещины, мощности излучателя ЭМ волн и длительностях стадий показали, что при начальной вязкости нефти $1000 \text{ мПа}\cdot\text{с}$ наиболее эффективной технологией является двухэтапное многостадийное ЭМ воздействие на пласт с постоянным непрерывным отбором нефти.

В **заключении** сформулированы основные результаты, полученные в работе:

1. Сформулирована обобщенная математическая модель процессов тепло- и массопереноса при ВЧ ЭМ воздействии на низкопроницаемые горные породы, насыщенные высоковязкой нефтью, с учетом различных физических явлений, численная реализация которой на различных примерах **показала**, что:

- в широком диапазоне проницаемостей коллектора (от 10^{-16} до 10^{-14} м^2) и вязкости нефти ($100 \div 10000 \text{ мПа}\cdot\text{с}$) при моделировании фильтрации с высокочастотным электромагнитным воздействием влиянием адиабатического эффекта можно пренебречь;
- учет температурного расширения нефти оказывает заметное влияние на параметры в системе «трещина-пласт», в частности, с увеличением коэффициента термического расширения в 3 раза градиенты давления и значения чисел Пекле увеличиваются до 10%, а величина притока жидкости в скважине – до 20%;
- внесение поправки в выражение для плотности распределенных источников тепла позволяет более корректно рассчитать их в ближней зоне и избежать завышения абсолютных значений температуры в околоскважинной зоне, в частности, показано, что в околоскважинной области на расстояниях $\sim 0.7 \text{ м}$ от излучателя ЭМ волн завышение температуры может достигать $\sim 65\%$;

- моделирование процесса массопереноса в низкопроницаемых коллекторах с трещиной гидроразрыва требует учета последовательной смены режимов течения – от билинейного к линейному в различные периоды притока к скважине, что определяется безразмерной проводимостью трещины;
- учет влияния окружающих скважин становится значимым при длительности притока, достаточной для распространения возмущения давления на расстояние, сопоставимое с половиной размера низкопроницаемой перемычки между соседними трещинами;
- проведенное численное исследование фильтрации жидкости с предельным градиентом давления при ВЧ ЭМ воздействии свидетельствует о необходимости учета нелинейности фильтрации при прогнозировании величины притока высоковязкой нефти из низкопроницаемого продуктивного пласта в скважине как с трещиной гидроразрыва, так и без нее.

2. При моделировании фильтрации жидкости с одновременным ВЧ ЭМ воздействием в вертикальной скважине **выявлена** немонотонность в распределении градиентов давления на расстояниях до 10 м от добывающей скважины, что приводит к значительному увеличению скорости фильтрации высоковязкой нефти в околоскважинной области и величины притока в скважине до 11 раз при максимальной мощности генератора ЭМ волн по сравнению с «холодным» отбором нефти.

3. В результате моделирования **установлено**, что при отборе высоковязкой нефти с одновременным ВЧ ЭМ воздействием в скважине с трещиной гидроразрыва происходит повышение текущей величины притока жидкости по сравнению с «холодным» отбором до 87%. При этом наибольший эффект увеличения дебита скважины **отмечается** для случаев с «короткими» трещинами и ухудшенными фильтрационными свойствами трещины.

4. **Показано**, что предложенная методика проведения численных экспериментов с варьированием проводимости трещины и параметров перемычки низкопроницаемого пласта между трещинами позволяет воспроизвести промысловые данные, подтвердить наличие

протяженной трещины между скважинами ($\sim 1000\text{ м}$) и оценить ее фильтрационных свойств.

5. **Показано**, что путем численного моделирования воспроизведены промысловые данные в вертикальной скважине с регулированием мощности ВЧ-ЭМ генератора, а также **подтвержден** эффект объемного нагрева сверхвязкой нефти распределенными тепловыми источниками в пласте, что подтверждается численным воспроизведением измеренных данных по температуре в соседней наблюдательной скважине.

6. **Проведен сравнительный анализ** методов высокочастотного электромагнитного воздействия с оценкой энергетической и экономической эффективности, включая комбинированные технологии с закачкой маловязкого растворителя. **Установлено**, что максимальную эффективность демонстрирует технология поэтапного ВЧ ЭМ воздействия в скважинах с трещинами гидроразрыва пласта.

- **Показано**, что по сравнению с «холодной» добычей высоковязкой нефти при предельных градиентах давления от 0.001 до 1 MPa/m тепловое воздействие с мощностью ВЧ ЭМ генератора 100 kWt приводит к повышению величины притока в скважине от 4.6 до 8.6 раз.
- **Показано**, что эффекта от теплового воздействия на втором этапе и продолжении отбора с отключенным ВЧ ЭМ генератором характеризуется сохранением ~ 2.5 кратного прироста притока (по сравнению с «холодным» отбором) в конце третьего этапа даже через ~ 100 суток.
- Численно **установлено**, что при закачке растворителя с одновременным ВЧ ЭМ нагревом в околоскважинной зоне происходит активное накопление тепла, сопровождающееся ростом температуры (до 100°C) и конвективным переносом тепловой энергии вглубь пласта по трещине.
- **Показано**, что повторение этапа закачки растворителя с одновременным ВЧ ЭМ воздействием обеспечивает максимальное использование тепловой энергии, что приводит к

значительному увеличению величины притока смеси нефти и растворителя в скважине.

Список публикаций автора по теме диссертации

Монография:

1. Давлетбаев А.Я., Асалхузина Г.Ф., Уразов Р.Р., Сарапулова В.В. Гидродинамические исследования скважин в низкопроницаемых коллекторах // Новосибирск. ООО «Дом мира». 2023. ISBN: 978-5-6049467-7-0. eLIBRARY ID: 68612780. 176с.

В изданиях, которые входят в международные базы данных и системы цитирования Web of Science, Scopus:

1. Давлетбаев А.Я., Мухаметова З.С. Моделирование закачки жидкости в скважину с развитием трещины гидравлического разрыва пласта // Инженерно-физический журнал. 2019. Т. 92. № 4. С. 1074-1082.

2. Davletbaev A., Kovaleva L., Zainullin A., Babadagli T. Numerical Modeling of Heavy-Oil Recovery Using Electromagnetic Radiation/Hydraulic Fracturing Considering Thermal Expansion Effect // Journal of Heat Transfer. 2018. Т. 140. № 6: 062001. 11 p. DOI: 10.1115/1.4038853

3. Хабибуллин И.Л., Давлетбаев А.Я., Марьин Д.Ф., Хисамов А.А. Моделирование восстановления температурного поля в нефтяном пласте // Инженерно-физический журнал. 2018. Т. 91. № 2. С. 329-337.

4. Давлетбаев А.Я., Мухаметова З.С. Моделирование фильтрации в низкопроницаемом пласте с двумя перпендикулярными техногенными трещинами гидроразрыва // Инженерно-физический журнал. 2017. Т. 90. № 3. С. 632-639.

5. Davletbaev A., Kovaleva L., Babadagli T. Combining solvent injection, electromagnetic heating, and hydraulic fracturing for multistage heavy oil recovery // Journal of Electromagnetic Waves and Applications. 2016. Т. 30. № 2. С. 207-224.

6. Davletbaev A.Y., Kovaleva L.A., Nasyrov N.M., Babadagli T. Multi-Stage Hydraulic Fracturing and Radio-Frequency Electromagnetic Radiation for Heavy-Oil Production // Journal of Unconventional Oil and Gas Resources. 2015. Т. 12. С. 15-22.

7. Давлетбаев А.Я., Ишキン Д.З. Моделирование фильтрационных исследований на неустановившихся режимах при закачке воды в образцы со сверхнизкой проницаемостью // Инженерно-физический журнал. 2014. Т. 87. № 3. С. 531-538.

8. Davletbaev A., Kovaleva L., Babadagli T. Heavy Oil Production by Electromagnetic Heating in Hydraulically Fractured Wells // Energy and Fuels. 2014. Т. 28. № 9. С. 5737-5744.

9. Давлетбаев А.Я., Ишキン Д.З. Моделирование фильтрационных исследований на неустановившихся режимах при закачке воды в образцы со сверхнизкой проницаемостью // Инженерно-физический журнал. 2014. Т. 87. № 3. С. 531-538.

10. Davletbaev A., Kovaleva L., Babadagli T. Mathematical modeling and field application of heavy oil recovery by Radio-Frequency Electromagnetic stimulation // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2011. Т. 78. № 3-4. С. 646-653.

11. Kovaleva L., Davletbaev A., Babadagli T., Stepanova Z. Effects of Electrical and Radio-Frequency Electromagnetic Heating on the Mass-Transfer Process during Miscible Injection for Heavy-Oil Recovery // Energy and Fuels. 2011. Т. 25. № 2. С. 482-486.

В изданиях, включенных в перечень ведущих рецензируемых научных журналов Russian Science Citation Index (RSCI):

1. Давлетбаев А. Я., Ковалева Л. А., Мухаметова З. С. Численное исследование нелинейной фильтрации высоковязкой жидкости в пласте при высокочастотном электромагнитном воздействии в вертикальной скважине // Теплофизика высоких температур. 2024. Т. 62. № 5. С. 731-738.

2. Уразов Р.Р., Ахметова О.В., Галлямитдинов И.И., Давлетбаев А.Я., Сарапулова В.В., Пестриков А.В. Моделирование динамики забойного давления в наклонно направленной скважине // Прикладная механика и техническая физика. 2024. Т. 65. № 6 (388). С. 99-112.

3. Давлетбаев А.Я., Ковалева Л.А., Мухаметова З.С. Математическое моделирование притока высоковязкой жидкости в скважину с трещиной гидроразрыва пласта при высокочастотном электромагнитном воздействии // Сибирский журнал индустриальной математики. 2023. Т. 26. № 1 (93). С. 33-46.

4. Давлетбаев А.Я., Мухаметова З.С. Фильтрация газа в низкопроницаемом коллекторе с трещиной гидроразрыва пласта //

Прикладная механика и техническая физика. 2019. Т. 60. № 1 (353). С. 41-53.

5. Давлетбаев А. Я., Ковалева Л. А. Моделирование добычи высоковязкой нефти с использованием электромагнитного воздействия в сочетании с гидроразрывом пласта // Теплофизика высоких температур. 2014. Т. 52. № 6. С. 927–933.

6. Давлетбаев А.Я., Ковалева Л.А. Фильтрация высоковязкой нефти в пласте с трещиной гидроразрыва при воздействии высокочастотным электромагнитным полем // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2014. № 3. С. 91-97.

7. Давлетбаев А.Я., Ковалева Л.А., Насыров Н.М. Исследование процессов тепломассопереноса в многослойной среде при нагнетании смещающегося агента с одновременным электромагнитным воздействием // Теплофизика высоких температур. 2009. Т. 47. № 4. С. 605-610.

8. Давлетбаев А.Я., Ковалева Л.А., Насыров Н.М. Численное моделирование закачки растворителя в добывающую скважину при электромагнитном воздействии // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2008. № 4. С. 94-101.

В изданиях, включенных в перечень Высшей аттестационной комиссии Российской Федерации (ВАК РФ):

1. Асалхузина Г.Ф., Давлетбаев А.Я., Хабибуллин И.Л., Ахметова Р.Р. К вопросу выбора длительности режимов при гидродинамических исследованиях скважин на установившихся режимах закачки в низкопроницаемых коллекторах // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2020. Т. 6. № 1 (21). С. 135-149.

2. Хабибуллин И.Л., Хасанова Р.З., Асалхузина Г.Ф., Давлетбаев А.Я. Моделирование распределения давления между нагнетательным и эксплуатационным рядами скважин в коллекторах с низкой проницаемостью // Вестник Башкирского университета. 2018. Т. 23. № 3. С. 640-644.

3. Асалхузина Г.Ф., Давлетбаев А.Я., Хабибуллин И.Л. Моделирование дифференциации пластового давления между нагнетательными и добывающими скважинами на месторождениях с низкопроницаемыми коллекторами // Вестник Башкирского университета. 2016. Т. 21. № 3. С. 537-544.

4. Давлетбакова Л.А., Давлетбаев А.Я. Моделирование исследования методом установившихся режимов закачки между нагнетательной и добывающей скважинами с техногенной трещиной гидроразрыва // Вестник Башкирского университета. 2016. Т. 21. № 4. С. 884-892.

В изданиях, входящих в перечень РИНЦ:

1. Рабцевич А.А., Ковалёва Л.А., Давлетбаев А.Я. Электромагнитные технологии при добыче нефти: эффективные решения и возможности коммерциализации // Недропользование. 2025. Т. 25. № 2. С. 65-77.

2. Губайдуллин М.Р., Давлетбаев А.Я., Штинов В.А., Мирошниченко В.П., Щутский Г.А. Численное исследование самопроизвольного развития трещины автогрп в нагнетательной скважине // Вестник Академии наук Республики Башкортостан. 2022. Т. 45. № 4 (108). С. 47-59.

3. Асалхузина Г.Ф., Давлетбаев А.Я., Нуриев Р.И. Гидродинамическое исследование скважин с магистральной трещиной гидроразрыва пласта: численное моделирование и анализ промысловых данных// Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2017. № 6 (126). С. 56-62.

4. Валеева Э.З., Асалхузина Г.Ф., Давлетбаев А.Я. Моделирование исследований методом установившихся режимов закачки в низкопроницаемых коллекторах // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2016. № 6 (120). С. 39-46.

5. Davletbaev A., Kovaleva L., Zainulin A., Kireev V., Babadagli T., Minnigalimov R. Modeling heavy-oil recovery using electromagnetic radiation/hydraulic fracturing considering adiabatic effect and thermal expansion // Society of Petroleum Engineers - SPE Heavy Oil Conference and Exhibition 2016. EID: 2-s2.0-85048058960

6. Давлетбаев А.Я., Нуриев Р.И. Моделирование гидропрослушивания в скважинах с вертикальными техногенными магистральными трещинами гидроразрыва // Труды Института механики им. Р.Р. Мавлютова Уфимского научного центра РАН. 2012. Т. 9. № 2. С. 43-46.

7. Kovaleva L., Davletbaev A., Minnigalimov R. Recoveries of heavy oil and bitumen techniques with the radio frequency electromagnetic irradiation // Society of Petroleum Engineers - SPE

Russian Oil and Gas Technical Conference and Exhibition 2010, RO and G 10. 2010. EID: 2-s2.0-79952395272

8. Davletbaev A., Kovaleva L., Babadagli T., Minnigalimov R. Heavy oil and bitumen recovery using radiofrequency electromagnetic irradiation and electrical heating: Theoretical analysis and field scale observations // Society of Petroleum Engineers - Canadian Unconventional Resources and International Petroleum Conference 2010. 2010. EID: 2-s2.0-79952932862

9. Давлетбаев А.Я. Математическое моделирование закачки растворителя в скважину при одновременном электромагнитном воздействии // Труды Института механики Уфимского научного центра РАН. 2008. Т. 6. С. 45-50.

10. Ковалева Л.А., Давлетбаев А.Я. Влияние перекрестных эффектов тепломассопереноса на движение многокомпонентной системы в пористой среде при электромагнитном воздействии // Обозрение прикладной и промышленной математики. Т. 14, вып. 4, 2007 г. – С. 721-722.

Патенты:

1. Гареев Р.Р., Давлетбаев А.Я., Махота Н.А. и др. Способ исследования пластов // Патент на изобретение RU 2830658 С1, 25.11.2024. Заявка № 2024100907 от 10.01.2024.

2. Ишкина Ш.Х., Питюк Ю.А., Асалхузина Г.Ф., Бухмастова С.В., Фахреева Р.Р., Бикметова А.Р., Давлетбаев А.Я., Гусев Г.П., Мирошниченко В.П. Способ повышения информативности трассерных исследований в нефтегазовых месторождениях // Патент на изобретение RU 2776786 С1, 26.07.2022. Заявка № 2021121707 от 21.07.2021.

3. Уразов Р.Р., Давлетбаев А.Я., Синицкий А.И. и др. Способ исследования горизонтальных скважин с многостадийным гидравлическим разрывом пласта в низкопроницаемых коллекторах // Патент на изобретение RU 2734202 С1, 13.10.2020. Заявка № 2019132251 от 11.10.2019.

4. Питюк Ю.А., Давлетбаев А.Я., Мусин А.А., Ковалева Л.А., Марьин Д.Ф. Способ определения параметров ближней зоны пласта // Патент на изобретение RU 2651647 С1, 23.04.2018. Заявка № 2017100854 от 10.01.2017.

5. Ишкин Д.З., Давлетбаев А.Я., Исламов Р.Р., Нуриев Р.И. Способ исследования низкопроницаемых коллекторов с

минимальными потерями в добыче. Патент на изобретение RU 2652396 С1, 26.04.2018. Заявка № 2017105041 от 15.02.2017.

6. Ковалева Л.А., Насыров Н.М., Зиннатуллин Р.Р., Хайдар А.М., Давлетбаев А.Я. Способ разработки залежи высоковязкой нефти или битума // Патент на изобретение RU 2399753 С2, 20.09.2010. Заявка № 2007128512/03 от 24.07.2007.

7. Давлетбаев А.Я., Ковалева Л.А., Зиннатуллин Р.Р. Способ разработки залежи высоковязкой нефти // Патент на изобретение RU 2454532 С1, 27.06.2012. Заявка № 2010150933/03 от 13.12.2010.