ISSN 2712-8008
Том / Volume 25 №2 2025
Домашняя страница журнала: http://vestnik.pstu.ru/geo/
НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

УДК 622+553.982+537.8: 001.895
Статья / Article
© ПНИПУ / PNRPU, 2025

Электромагнитные технологии при добыче нефти: эффективные решения и возможности коммерциализации

А.А. Рабцевич, Л.А. Ковалёва, А.Я. Давлетбаев

Уфимский университет науки и технологий (Российская Федерация, 450076, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32)

Electromagnetic technologies in oil production: effective solutions and commercialization opportunities

Andrey A. Rabtsevich, Liana A. Kovaleva, Alfred Ia. Davletbaev

Ufa University of Science and Technology (32 Zaki Validi st., Ufa, 450076, Russian Federation)

Получена / Received: 08.11.2024. Принята / Accepted: 05.12.2024. Опубликована / Published: 01.04.2025

Ключевые слова:
нефтедобывающая отрасль, методы увеличения нефтеотдачи, тепловое воздействие, высокочастотный электромагнитный нагрев, рентабельность добычи нефти, энергетический баланс, гидроразрыв пласта.

Российская Федерация как страна, являющаяся одним из крупнейших центров добычи нефти, в настоящее время все чаще озадачивается вопросом угроз снижения объемов нефти. Несмотря на развитость отраслевой инфраструктуры, серьезные проблемы возникают с разработкой новых разведанных (в первую очередь, в нефтематеринских породах и коллекторах вязкой нефти) и довыработкой остаточных запасов, поскольку в них большинство скважин не выходят на уровни дебита, близкие к рентабельным. Это связано, в первую очередь, с многолетним интенсивным исчерпанием легкоизвлекаемой (активной) нефти на всех разведанных площадях. Увеличение доли трудноизвлекаемой нефти в общем балансе ее запасов, что особенно актуально для «старых» регионов добычи, неизбежно делает необходимым поиск и промышленное внедрение новых способов ее извлечения. Между тем геополитические проблемы, возникшие в последние годы в отношении Российской Федерации, актуализируют вопросы ее технологического суверенитета и в этой области знания.
Среди множества методов увеличения нефтеотдачи и интенсификации притока выделяется метод воздействия на призабойную зону пласта высокочастотным электромагнитным полем, который, несмотря на многолетние исследования, до сих пор считается в России экспериментальным и ограничивается оценкой производственно-технических характеристик использования. При этом упускаются из виду финансово-экономические показатели, выявление которых позволит обосновать относительную малозатратность и высокую рентабельность инновационного метода.
Предметом исследования выступают технологические разработки в области воздействия на нефтесодержащие породы источником электромагнитного излучения. Целью является определение степени технико-технологической готовности методов разработки нефтяных месторождений, основанных на использовании электромагнитной энергии, с точки зрения эффективности внедрения технологии и возможности коммерциализации разработок.
Основными методами исследования выступают анализ научной литературы и обзор имеющихся патентов, систематизация и обобщение специализированных данных, методы экономической аналитики.
В работе выявлены коммерческая перспективность электромагнитных технологий и степень разработанности данной тематики в научной среде России и зарубежных стран; описан процесс электромагнитного воздействия на призабойную зону, его термогидродинамические эффекты, направления промышленного использования в нефтедобывающей отрасли, обозначены ключевые проблемы рыночного позиционирования технологии и ограничения возможностей ее коммерциализации. Кроме того, представлен анализ результативности электромагнитной обработки в сравнении с другими видами воздействия на пласт, а также определены дополнительные эффекты и усиление эффективности электромагнитного воздействия при их сочетании с образованием комбинированных методов. На основе расчета энергетического баланса установлена экономическая эффективность внедрения технологии, рассмотрены вопрос разработанности расчетного неизотермического модуля и возможность его включения в состав коммерческих симуляторов.
Результаты работы могут применяться в анализе перспектив довыработки месторождений с запасами нефти, извлечение которых другими методами, помимо электромагнитного нагрева (или комбинированных с ним), являются экономически нерентабельными.

Keywords:
oil producing industry, enhanced oil recovery methods, thermal influence, high frequency electromagnetic heating, oil production profitability, energy balance, hydraulic fracturing.

The Russian Federation, as a country that is one of the largest centers of oil production, is currently increasingly puzzled by the threats of reducing its volumes. Despite the achieved level of the industry infrastructure development, serious problems arise with the development of new explored (primarily in oil source rocks and reservoirs of viscous oil) and the pre-processing of residual reserves, since most wells in them do not reach flow rates close to profitable. This is primarily due to the long-term intensive depletion of easily recoverable (active) oil in all explored areas. The increase in the share of unconventional oil in the total balance of its reserves, which is especially important for the “old” production regions, inevitably makes it necessary to search for and commercially introduce new ways of extracting it. Meanwhile, the geopolitical problems that have arisen in recent years in relation to the Russian Federation, actualize the issues of its technological sovereignty in this area of knowledge.
Among the many methods of increasing oil recovery and inflow intensification, the method of influencing the bottom-hole formation zone with a high-frequency electromagnetic field is distinguished, which, despite many years of research, is still considered experimental in the Russian Federation and is limited to evaluating the production and technical characteristics of use. At the same time, financial and economic indicators are overlooked, the identification of which will make it possible to justify the relative low cost and high profitability of the innovative methods.
The subject of the research is technological developments in the field of exposure of oil-containing rocks to a source of electromagnetic radiation. The purpose of the study is to determine the degree of technical and technological readiness of oil field development methods based on the use of electromagnetic field energy, in terms of the effectiveness of technology implementation and the possibility of commercialization of developments.
The main research methods are the analysis of scientific literature and a review of available patents, systematization and generalization of specialized data, methods of economic analysis.
The paper reveals the prospects of electromagnetic technologies and the degree of development of this topic in the scientific community of the Russian Federation and foreign countries: the process of electromagnetic influence on the bottom-hole zone, its thermohydrodynamic effects, directions of industrial use in the petroleum branch are described, the key problems of the technology's market positioning and limitations of its commercialization opportunities are outlined. In addition, an analysis of the effectiveness of electromagnetic treatment in comparison with other types of impact on the reservoir is presented, and additional effects and increased effectiveness of electromagnetic effects when combined with other types with the formation of combined methods are determined. Based on the calculation of the energy balance, the economic efficiency of technology implementation has been established.
The results of the work can be used in the analysis of prospects for the completion of deposits with oil reserves, the extraction of which by other methods besides electromagnetic heating (or combined with it) is economically unprofitable.

Рабцевич Андрей Александрович (ORCID: 0000-0002-1478-4251) – кандидат экономических наук, MBA, доцент, старший научный сотрудник Физико-технического института, доцент Института экономики, управления и бизнеса (тел.: +007 (903) 366 11 85, e-mail: cruiser333@yandex.ru). Контактное лицо для переписки.
Ковалёва Лиана Ароновна (ORCID: 0000-0001-8953-6490) – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой прикладной физики Физико-технического института (тел.: +007 (917) 756 98 53, e-mail: liana-kovaleva@yandex.ru).
Давлетбаев Альфред Ядгарович (ORCID: 0000-0002-9133-2574) – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной физики Физико-технического института (тел.: +007 (917) 756 98 53, e-mail: liana-kovaleva@yandex.ru).

Andrey A. Rabtsevich (ORCID: 0000-0002-1478-4251) – PhD in Economics, MBA, Associate Professor, Senior Researcher at the Physics and Technology Institute, Associate Professor at the Institute of Economics, Management and Business (tel.: +007 (903) 366 11 85, e-mail: cruiser333@yandex.ru). The contact person for correspondence.
Liana A. Kovaleva (Author ID in Scopus: 7102990107, ORCID: 0000-0001-8953-6490) – Doctor in Engineering, Professor, Head of the Department of Applied Physics, Institute of Physics and Technology (tel.: +007 (917) 756 98 53, e-mail: liana-kovaleva@yandex.ru).
Alfred Ia. Davletbaev (Author ID in Scopus: 25228265400, ORCID: 0000-0002-9133-2574) – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor of the Department of Applied Physics, Institute of Physics and Technology (tel.: +007 (917) 756 98 53, e-mail: liana-kovaleva@yandex.ru).

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:
Рабцевич, А.А. Электромагнитные технологии при добыче нефти: эффективные решения и возможности коммерциализации / А.А. Рабцевич, Л.А. Ковалёва, А.Я. Давлетбаев // Недропользование. – 2025. – Т.25, №2. – С. 123–135. DOI: 10.15593/2712-8008/2025.2.9

Please cite this article in English as:
Rabtsevich A.A., Kovaleva L.A., Davletbaev A.Ia. Electromagnetic technologies in oil production: effective solutions and commercialization opportunities. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2025, vol.25, no.2, pp. 123-135. DOI: 10.15593/2712-8008/2025.2.9

Введение

Истощение месторождений с традиционными запасами нефти актуализирует вопрос перехода к новым технологиям добычи, способным обеспечить приемлемую рентабельность при разработке залежей с аномальными характеристиками нефти – высоковязкими, тяжелыми, парафинистыми и другими, что, в свою очередь, требует переориентирования научно-исследовательских усилий на соответствующие области научного знания [1]. Известно, что электромагнитное (ЭМ) излучение через энергию распространяющихся в нефтенасыщенном коллекторе волн посредством межмолекулярного трения преобразуется в тепло, что ввиду того или иного значения диэлектрических потерь обусловливает объемный характер нагрева флюидов в пористой среде с малым градиентом температуры, уменьшая их вязкость, а также приводит к изменению агрегатного состояния жидких и твердых углеводородов [2]. В случае обработки высоковязкой нефти или пород с низкой проницаемостью высокочастотное (ВЧ) ЭМ-воздействие обеспечивает термоупругий эффект повышения давления в толще пласта, что позволяет влиять на области коллектора вне ограниченной призабойной зоны [3, с. 27]. Прогрев также обеспечивает повышение пластового давления через выделение растворенных в нефти попутных газов и испарение легких фракций.

Особенностью сверхвысокочастотного (СВЧ) ЭМ-воздействия является то, что диэлектрические потери в воде существенно превышают потери в чистой нефти, что способствует эффективному применению данной технологий при добыче из заводненных месторождений, транспортировке сырой нефти и т.д. [4] Кроме того, к нетепловым эффектам ЭМ-обработки относится снижение поверхностного натяжения на границах раздела фаз «нефть – вода» и «нефть – порода», что повышает коэффициент вытеснения в результате доотмыва пленочной и капиллярно-удерживаемой нефти [5].

Несмотря на то, что результаты теплового воздействия на пласт практически не зависят от его коллекторских свойств, в рамках взаимодействия «поле – вещество», помимо собственно нагрева ЭМ-излучением, проявляется «нетепловое» действие поля, определяемое его напряженностью и частотой, а также электрофизическими характеристиками породы, вызывая такие эффекты, как десорбция поверхностно-активных компонентов нефти, изменение поверхностного натяжения полярных жидкостей, эффективная вязкость взаиморастворимых углеводородов и других аспектов реологии дисперсных систем в пористой среде [6, с. 30]. На основе экспериментальных данных реального месторождения определено, что при воздействии ЭМ-излучением на асфальтеновые образования «наблюдается изменение их ориентации в направлении действия поля и их перегруппировка с образованием более крупных скоплений, что приводит к дополнительной десорбции асфальтосмолистых веществ» [7, с. 13–16]. Дисперсионные эффекты при ЭМ-воздействии проявляются в большей степени для глубоко залегающих углеводородов в карбонатных коллекторах [8, с. 14–16]. В целом при применении технологии для карбонатных пород глубина залегания может быть в 1,5 раза больше (до 3 км), чем для терригенных [9].

Направления и проблемы применения электромагнитного воздействия

Существуют различные направления применения ЭМ-воздействия в нефтегазовой отрасли, в первую очередь, непосредственно при добыче углеводородного сырья. Типовой способ реализации такого воздействия заключается в наличии соответствующего генератора ЭМ-волн, устанавливаемого на поверхности вблизи устья скважины или на глубине вблизи забоя, и излучателя, который обеспечивает распространение ЭМ-волн через открытый забой (необсаженную часть скважины или радиопрозрачные стеклопластиковые обсадные трубы) внутрь продуктивного пласта, при этом в техническом воплощении имеется широкий спектр модификаций [10].

Так, рядом авторов предложено устанавливать в основании погружного электродвигателя электроцентробежного насоса излучатель, работающий на резонансной для призабойной зоны пласта частоте, определяемой в процессе систематического тестирования ее оптимальных значений. Данный способ, в первую очередь, позволяет реанимировать простаивающие скважины, защитить от отложений оборудование и зону дренажа, улучшить качество и реологические свойства нефти [11].

Другим подходом является размещение в соседних скважинах, одна из которых является добывающей, ЭМ-излучателей, работающих на резонансных частотах, совпадающих с собственной частотой колебаний молекул углеводородного флюида и направленных встречно друг к другу. Данный способ позволяет интенсифицировать добычу нефти с выбранного участка, увеличить КИН (до 60 %), а также перемещать в принудительном управляемом режиме (вызванным дополнительными градиентами давления) углеводородный флюид к добывающей скважине, например, из неохваченных дренажом ловушек, в вертикальной и горизонтальной плоскостях [12]. Указанные применения касаются работы с низкопродуктивными, недонасыщенными и прерывистыми коллекторами.

Следующее направление применения ЭМ-воздействия в нефтегазовой отрасли – очистка призабойной зоны пласта, скважины и промыслового оборудования от вредных отложений. Данное использование обусловлено разрушением асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО), снижением температуры начала кристаллизации парафина и других плавких веществ как результатом повышения температуры и не в последнюю очередь – улучшением гидрофильности рабочих поверхностей вследствие образования липких глобул из попутной воды.

Для каждого диаметра эксплуатационной колонны, выступающего коаксиальным отрезком, с учетом разницы коэффициента потерь в отложениях и чистой нефти расчетно-аналитическим и экспериментальным путем определяются оптимальные частоты микроволнового диапазона (5–18 ГГц), что позволяет как устранить, так и предупредить образование АСПО на поверхности скважины [13, с. 15–18]. Исследователями предлагаются конструкции ЭМ-аппаратов, применимых на реальных промыслах и способных предотвратить отложения парафина в течение одного года. Наиболее оптимальная напряженность поля для таких устройств – более 700 эрстед [14, с. 34–37].

Коэффициенты поглощения ЭМ-волн в скважине и отражения от пласта позволяют подтвердить

энергетическую эффективность ликвидации парафиновых пробок, демонстрируемую перемещающимся источником излучения. Кроме того, подбор оптимальных параметров применения технологии ввиду нелинейной зависимости поглощения от температуры дает возможность реализовать прогрев с заданной глубиной проплавления в режиме «обратной» тепловой волны, воздействующей на пробку с удаленного конца, одновременно с вытеснением продуктов расплава тяжелой жидкостью, что еще более увеличивает эффективность подхода: уменьшаются время и затраты энергии на устранение отложений [15, с. 7].

Оригинальный подход к профилактике АСПО предложен Inventor Industries Ltd. (Великобритания) при работе депарафинизатора «Энеркэт»: в нем турбулентный поток нефти приводит в движение кристаллы кварца, генерирующие ЭМ-волны необходимой частоты. Данные волны сохраняют мицеллярную структуру парафинов и асфальтенов в потоке добываемой нефти [16]. Рядом авторов предлагается также использовать ЭМ-излучение в целях ингибирования коррозионных процессов скважинного оборудования, в частности, установок с погружными электронасосами, при нефтедобыче в осложненных условиях [17].

Существуют и другие способы применения ЭМ-сил при добыче нефти, например, предложен скважинный электромагнитный импульсный виброисточник, основанный на ударном узле оригинальной конструкции, обеспечивающем техническую реализацию виброволнового метода увеличения нефтеотдачи при разработке углеводородных месторождений [18, с. 20–21].

Таким образом, несмотря на наличие большого спектра технических решений ЭМ-воздействия и положительных эффектов (селективный и объемный нагрев, независимый от теплопроводности нефтенасыщенной породы пласта и других обрабатываемых материалов, его высокая скорость и эффективность преобразования в тепловую энергию, контролируемая геометрия температурных полей, сохранность обсадных колонн, ввиду отсутствия электрохимических эффектов, и др.), в ряде случаев неправильный выбор режима и продолжительности [19] воздействия ЭМ-излучением имеет обратное влияние на характеристики углеводородных жидкостей – оно способно несколько ухудшить их реологические свойства, что особенно актуально для нефти различного состава [20].

Так, при обезвоживании нефти возникающие в процессе облучения конвективные потоки могут способствовать неоднородному нагреву поверхности глобул воды, что приводит к локальному разрыву бронирующей оболочки и образованию мелкодисперсной фазы, то есть еще более устойчивой эмульсации нефти как на забое скважины, так и в продуктивном пласте. Поэтому важно подобрать оптимальный диапазон мощности тепловых источников, при котором происходит выделение и оседание дисперсной фазы [21, с. 17].

Температура нагрева в движущемся потоке достигает максимального значения на расстоянии, равном глубине проникновения ЭМ-поля в диэлектрик, поэтому проблемой становится учет взаимной связи излучателей при наличии их комплекса в эксплуатируемой установке. Кроме того, значительный разброс неконтролируемых в условиях промысловых комплексов электрофизических параметров углеводородсодержащих жидкостей требует согласования генератора с нагрузкой, малочувствительного к таким разбросам.

Использование металлических конструкций скважины, в частности стальных насосно-компрессорных труб, в качестве коаксиальной линии в реальных условиях добычи неизбежно сталкивается со значительно отличающимся от расчетного показателем поглощения и ускоренным затуханием ЭМ-волны, обусловленных наличием ржавчины и шероховатостей на стенках, искажением получаемых результатов измерений, ростом паразитной емкости и соответствующими потерями энергии [22, с. 16–21].

Неучтенные и нецелевые потери ЭМ-энергии, в том числе вследствие обводненности продукции [23], а также ряд представленных выше проблем влекут существенное снижение рентабельности технологии по сравнению с запроектированной, однако даже несмотря на это, согласно расчетным данным, для вертикальных скважин коэффициент энергетического баланса составляет 6:1, а для горизонтальных – 10:1 [24, с. 15–18]. Отдельные исследователи указывают, что энергетический баланс, понимаемый как отношение получаемой в результате дополнительно добытой нефти энергии к потребленной на работу ЭМ-излучателя, в идеальных условиях можно довести до 40:1 [25].

Экономический эффект также может выражаться в продлении межремонтного периода работы скважин в осложненных условиях добычи с 1–2 месяцев до 6–9, их ремонт может осуществляться при одновременной эксплуатации скважин (без их глушения) при определенной модификации технологической схемы излучающей ЭМ-установки [26, с. 8].

Сравнение электромагнитной технологии с другими способами воздействия и возможности их сочетания

Для понимания потенциала внедрения ЭМ-технологии в нефтедобывающую отрасль требуется сопоставление ее экономической эффективности с другими способами воздействия на пласты и флюиды [27]. В первую очередь необходимо произвести ее сравнение со схожим по энергетическому принципу способом нагрева, например, индукционным.

Поскольку ключевое отличие в характере нагрева при ЭМ-воздействии от индукционного заключается в том, что в первом случае происходит объемный нагрев по большой глубине проникновения волн, а во втором нагрев осуществляется в пристеночном слое, соответственно, образуются гораздо более существенная разница температур в толще жидкости и неравномерное распределение ее скорости по сечению потока, возникает экспериментально подтвержденное различие в структуре конвективного течения. Высокочастотное воздействие приводит к трех- и более вихревой структуре течения, а индукционное – к слаборазвитому тепло- и массопереносу углеводородсодержащей жидкости [28, с. 9–12].

Помимо более низкой эффективности индукционного нагрева по сравнению с рассматриваемым в данной статье, его реализация требует использования установок сложной конструкции, подбираемых индивидуально для каждого технологического процесса, проводящих труб, толщины их стенок, материалов их изготовления с различными электрофизическими свойствами, рабочей температуры, скорости движения флюида, характера течения и других производственных параметров [29, с. 11–12]. Кроме того, требуется установление четких режимов работы оборудования, регулируемых автоматической системой управления, что определяет значительные расходы на содержание и ремонт промышленных установок, в частности,

поддержание оптимальной частоты тока индуктора [30, с. 21–22]. Применение индукционного нагрева при плавлении парафиновых пробок также не лишено недостатков: нагрев металла, примыкающего к отложениям, не приводит к разогреву всей пробки вследствие низкой теплопроводности парафина. Таким образом, энергетические затраты данного метода существенно превосходят ЭМ-нагрев [21, с. 38].

Также получены экспериментальные данные по сравнению ключевого рассматриваемого в статье метода с электронагревом углеводородной жидкости [32], в том числе для целей ее дегазации. Выявлено, что скорость выделения газа при электронагреве значительно уступает ей при ЭМ-воздействии, а кроме того, в первом случае существует температурный лаг перед началом процесса газовыделения. В процессе дегазации происходит рост тангенса угла диэлектрических потерь в нефти, что усиливает эффективность ЭМ-воздействия, диэлектрическая же проницаемость находится практически в неизменном значении [33, с. 14]. Электростатический нагрев также опасен возможностью пробоя при достижении порогового напряжения, особенно для добываемой нефти с высокой обводненностью [34].

В условиях эксплуатации промысловых комплексов экспериментально подтверждается целесообразность ЭМ-разрушения добытых водонефтяных эмульсий и обезвоживания нефти, отличающейся приемлемым качеством сепарации при низких энергетических затратах на формирование температурных полей [35]. Данный метод позволяет втрое сократить время достижения установленных значений массовой доли воды, является в 6,6 раза более экономически эффективным по сравнению с паровой обработкой с помощью типовых парогенераторов [36, с. 13–14]. Предложены функциональная схема технологического процесса и соответствующий перечень экологически безопасных устройств (камера электродинамической обработки), позволяющие исключить существенную долю дорогостоящего оборудования (печи нагрева, отстойники, установки очистки воды) и в целом упростить и автоматизировать большую часть производственной линии [37, с. 18].

При соблюдении оптимальных параметров выбора частоты, мощности излучения и размеров излучателя ЭМ-воздействие также быстрее и сильнее уменьшает вязкость нефти по сравнению с прямым ее нагревом [20], который опасен осаждением на поверхности нагрева тяжелых углеводородов, а также малым сроком службы (перегоранием) нагревательных элементов. Поскольку нефть содержит большое количество полярных компонентов (асфальто-смолистых соединений), при добыче с использованием ЭМ-поля изменяется реологическая структура нефти [38], возникает пондеромоторная сила, поэтому время начала фильтрации высоковязкой нефти сокращается не менее чем в два раза по сравнению с обычным нагревом призабойной зоны.

Кроме того, термомеханические, термоэлектрические и другие производные силового действия поля разрушают адсорбционный слой нефти на стенках капилляров, что замедляет процесс адсорбции и улучшает фильтрационные возможности породы [39].

Правильный выбор параметров ЭМ-прогрева нефтяного пласта, битуминозных залежей, как и водонефтенасыщенных песков [40], с учетом их электрофизических параметров и особенностей конвективного теплопереноса делает его более технически реализуемым, управляемым (безынерционным) и высококонкурентоспособным даже в сравнении с внутрипластовым горением [15, с. 21–28], импульсным давлением, паровым гравитационным дренажом, формированием нефтяной оторочки (разбавлением легкими фракциями) и другими инновационными технологиями, обладающими существенными ограничениями в применении и многократно более высокой энергозатратностью [41]. Экономия энергозатрат возрастает также благодаря более высокому КПД по сравнению с другими методами, отсутствием загрязнения окружающей среды [42].

Между тем, несмотря на ряд конкурентных преимуществ использования ЭМ-технологии в нефтедобывающей отрасли, в реальных условиях промысла у ее применения существует ряд достаточно серьезных ограничений, являющихся критическими с экономической точки зрения. В первую очередь, проблемы возникают при учете расстояний между нагнетательными и добывающими скважинами, которые в случае насыщения пласта нефтями с очень высокой вязкостью не перекрываются ЭМ-полем, такие ситуации характеризуются отсутствием фильтрационного течения, безрезультатными затратами энергии. Такие проблемы решаются, как правило, сочетанием рассматриваемой технологии с другими способами воздействия на пласт, образуя комбинированные методы.

Одним из наиболее разработанных методов является одновременная ЭМ-обработка с закачкой растворителя в призабойную зону пласта, что при учете количества вытесняющего агента, длительности циклов, оценки теплопотерь и других параметров позволяет значительно увеличить радиус дренажа и охват пласта нагревом, тем самым преодолевать застойные зоны между скважинами. Оценка энергетической эффективности представленного метода с целью интенсификации добычи нефти показывает ее прямо пропорциональную связь в зависимости от значений вязкости – чем выше вязкость пластовой нефти, тем эффективнее данный комбинированный подход по сравнению с другими методами в конкретных условиях разрабатываемого месторождения [43, с. 14–19].

Влияние ЭМ-поля, сочетаемое закачкой смешивающегося агента, на многокомпонентные углеводородные системы вызывает явление электротермодиффузии – термодиффузионного массопереноса ЭМ-происхождения, который особенно эффективен при разработке залежей высоковязкой нефти [44, с. 3–5]. Исследователями предлагается усилить представленный способ закачкой растворителя через внутреннюю трубу нагнетательной скважины (выступающей в качестве коаксиальной линии), которая разогревается по причине наличия конечной электропроводности металлов, что, в свою очередь, приводит к поступлению агента в пласт уже в горячем виде. Данный подход в зависимости от электро-, физико-химических свойств нефтенасыщенного пласта позволяет увеличить энергетический баланс в эквивалентных единицах выше значения 6 к 1 [44, с. 20–24]. При определенной технической модификации и циклическом воздействии представленный способ пригоден и для добычи сверхвязкой нефти и даже битума [45].

Для нефти с невысокой вязкостью при обычном прогреве с использованием растворителя, как правило, фильтрационный поток движется с большей скоростью, чем при ЭМ-прогреве. Объясняется это тем, что в формирование фронта вытеснения вовлекаются наиболее легкие фракции, при высокочастотном же

воздействии с поверхности породы происходит десорбция полярных компонентов (в первую очередь, асфальтосмолистых соединений), что повышает вязкость и фильтрационное сопротивление. Как итог, коэффициент нефтевытеснения во втором случае выше на 35–40 %, что, безусловно, отражается на рентабельности разработки [46, с. 6–7].

Кроме того, указанное явление позволяет эффективно использовать данный комбинированный метод в отношении низкопроницаемых коллекторов; в работе [46, с. 13] показано, что для достижения того же результата значение проницаемости фильтрующей породы прямо пропорционально необходимой мощности ЭМ-излучателя. На основе экспериментальных исследований фильтрации высоковязкой нефти также утверждается, что ЭМ-воздействие особенно эффективно для карбонатонасыщенных коллекторов: при одинаковых параметрах (длительность и мощность излучения градиент давления и др.) объемный расход нефти в 5–6 раз больше, чем для терригенных. Также имеет большое значение концентрация вспомогательного агента – в случае использования, например, соляной кислоты (как электролита), ее оптимум соотношения с водой обусловлен максимальными диэлектрическим потерями энергии в растворе [47, с. 16–17]. Сочетание химического и ЭМ-воздействий также позволяет использовать комбинированные подходы при удалении вредных тугоплавких отложений на насосном оборудовании, в стволе скважины и призабойной зоне [13, с. 15–18].

В качестве вспомогательного агента (рабочей жидкости) могут выступать не только растворители, но и магнитные жидкости (токопроводящий и поляризующийся молекулярный магнитоактивный раствор или коллоидный раствор ферромагнитных частиц нанофракции), регулирующие глубину распространения и усиливающие воздействие ЭМ-поля в части преодоления критического градиента давления, увеличения коэффициента подвижности нефти (до 9 раз), повышения коэффициента вытеснения [48, с. 11–14], которые отражаются на результативных показателях разработки месторождений нефтеотдачи (до 38 % к обычному заводнению), накопленной добычи нефти (до 85 %) и коэффициента извлечения нефти (до 35 %) [48, с. 20].

В качестве рабочего агента при ЭМ-обработке также применяется углеродный наполнитель (газовый уголь), вводимый в высоковязкую нефть в составе суспензии (для получения низкой температуры застывания) в антифризе или углеводородной жидкости. Для нестабильной (высокое значение индекса нестабильности по асфальтенам) тяжелой нефти более эффективным выступает обычный способ диэлектрического нагрева, а для стабильной – гибридная схема воздействия: указанный наполнитель в сочетании с комплексом распределенных маломощных излучателей [49, с. 21–23]. В указанном качестве также могут использоваться железоиттриевый гранат [50], оксиды алюминия [51] и цинка [52] (в том числе в разных концентрациях [53]), железа [54] и меди [55], никеля [56], феррит висмута [57], титанат бария [58] и другие соединения металлов с кислородом [59].

Одним из наиболее действенных способов усиления ЭМ-воздействия выступает его комбинация с закачкой углекислого газа и азота, разжижающих высоковязкую нефть [60].

Акустическое (ультразвуковое) воздействие на углеводородные жидкости признается менее эффективным, чем ЭМ [61], однако их совместное использование (электромагнитно-акустический нагрев) [62, с. 3] при правильном подборе частоты и мощности полей взаимоусиливает положительные эффекты: данное сочетание позволяет, одновременно отбирая флюид, расширить радиус дренажа, беспрепятственно вводить и использовать в пласте разнообразные усиливающие агенты [63, с. 18].

Введение определенных веществ в углеводородсодержащие жидкости при их добыче имеет особую перспективу развития. Длительное время данный способ активно используется в отрасли нефтехимии и нефтепереработки, например, для эффективизации энергопереноса при эндотермических гетерогенно-каталитических процессах. В данном случае применяется трансформация ЭМ-энергии веществом промышленного катализатора (металлического или оксидного) в тепловую, необходимую для проведения реакции. Внедрение подобного каталитического реактора приводит к упрощению технологической схемы за счет отсутствия воды в качестве теплоносителя; эффективность происходящих под ЭМ-излучением эндотермических гетерогенных реакций вдвое превосходит КПД традиционного реактора [64, с. 12–20].

Комбинация электромагнитных, акустических, термических и гидродинамических способов воздействия в рамках единого технологического пространства предлагается разработчиками опытно-промышленной установки «ЯРУС», предназначенной для импульсно-волновой деструкции высоковязкой нефти и природных битумов непосредственно на месте добычи. Как утверждают авторы, реактор путем смены фазовых состояний сырья (плазма, пар и жидкость) позволяет получать полусинтетическую и синтетическую нефть в одну стадию без предварительной подготовки сырья и без системы оборотного водоснабжения [65].

При использовании системы излучателей, применяемых для создания ЭМ-полей, комбинированные методы могут составляться сами. Одним из них выступает использование волн разной частоты – в зависимости от энергоэффективных диапазонов для конкретных условий. В частности, для разрушения водонефтяной эмульсии в пластовых условиях на фронте вытеснения и в призабойной зоне пласта предлагается применять излучение оптического (поглощаемого поверхностным слоем бронирующей оболочки) и UHF (глубоко проникаемого в толщу эмульсии) диапазонов [66, с. 4–5].

Исследователями также выявлено, что совместное действие высокочастотного и низкочастотного ЭМ-полей позволяет втрое ускорить динамику расслоения эмульсии по сравнению с отдельным высокочастотным и в 12 раз – с отдельным низкочастотным воздействием [67, с. 17]. Помимо возникающих пондеромоторных сил данный метод вызывает неоднородность возникающего теплового поля и сдвиг концентрации воды, способствующих образованию двух фронтов расслоения и ускоренному разрушению эмульсий.

Оригинальный подход комбинации обособленного воздействия электрическим и магнитным полями реализован в конструкции электромагнитного дегидратора, в котором электрическое поле создается системой электродов, а скрещенное с ним пульсирующее магнитное поле – однофазной обмоткой, вследствие чего увеличивается частота столкновений капель, что приводит к ускоренному их слиянию и осаждению. Данный подход позволяет устранить недостатки используемых методов в раздельности, обеспечивает посредством индуцирования вихревых токов высокую производительность электрического поля без достижения критического значения напряженности, приводящей к разрушению водяных капель или пробою эмульсии вдоль их цепочки [68].

Как известно, особо устойчивые эмульсии наблюдаются в шламах, которые являются вредными отходами нефтедобывающей отрасли, накапливаемыми в специализированных амбарах [69]. Исследователями предложена технологическая установка, включающая четвертьволновой резонатор, которая посредством ЭМ-энергии позволяет производить их утилизацию в промышленных масштабах. Ее работа приводит к разрушению бронирующей оболочки, производит диэлектрофорез и обеспечивает электрокоагуляцию, то есть реализует все механизмы электрофизического разделения многокомпонентной гетерогенной среды на отдельные фазы [70, с. 13–17].

Повышение результативности процесса утилизации высокоустойчивых водонефтяных эмульсий и нефтешламовых соединений может производиться как посредством взаимодействия высокочастотных и сверхвысокочастотных полей, так и введением деэмульгатора с применением метода их компаундирования сырой (неподготовленной) или товарной нефтью [71, с. 5–7]. Данный подход позволяет добиться «увеличения в 2,5–3 раза производительности установки и снижения в 2,2 раза содержания хлористых солей в сравнении с базовой технологией при одинаковых количествах остаточной воды и механических примесей [71, с. 31–36], что существенно удешевляет производственный процесс.

Значительная доля неуглеводородных примесей в нефтешламах как многосоставном сырье требует применения подходов по селективному вычленению целевых продуктов через последовательный их нагрев. ЭМ-воздействие обладает возможностью управляемого объемного нагрева, что позволяет обеспечить поэтапную фракционирующую переработку (электромагнитный пиролиз), адаптируемую к широкому спектру химического состава углеводородсодержащих отходов. При этом содержащиеся в шламах и специально введенные диэлектрики (металлооксидные катализаторы различного состава) выступают термотрансформаторами и катализаторами их деструкции, позволяющими выделить до 2/3 массовой доли содержащейся в отходах углеводородной части в разрезе целевых продуктов (этена, ароматических и других фракций) [72, с. 16–20].

Разработанность электромагнитных технологий: зарубежный и отечественный опыт

Несмотря на значительную проработку на теоретическом и прикладном уровне, наличие готовых технических решений, а также проведение ряда опытно-промышленных испытаний, в отечественной нефтедобывающей отрасли массовое применение обработки скважин высокочастотным ЭМ-полем не получило какого-либо серьезного развития. В зарубежной же практике внедрение данного метода в промышленных масштабах получает все большее развитие, что подтверждается динамикой роста патентного ландшафта, последующим трансфером технологии и ее коммерциализацией: за период 1991–2024 гг. в мире отмечается ежегодный рост патентования по рассматриваемой технологии и смежным тематикам. Наибольшей долей патентов в данной сфере обладают компании, аффилированные с крупнейшими нефтедобывающими корпорациями, преимущественно из Соединенных Штатов: Halliburton Energy Services (7 % от всего количества патентов), ExxonMobil Upstream Research Company (4,7 %), Schlumberger Technology Corporation (4,1 %), Harris Corporation (2,3 %), Saudi Arabian Oil Company (1,5 %), Baker Hughes Incorporated (1,2 %), Schlumberger Canada Limited (1,1 %).

В иностранной юрисдикции к наиболее значимым патентам, имеющим наибольшее последующее цитирование за последнее десятилетие, относятся:

– JP-2016525177-A – Electromagnetically assisted ceramic materials for heavy oil recovery and on-site steam generation (Саудовская Аравия, 2013 г.) [73];

– US-9739126-B2 – Effective solvent extraction system incorporating electromagnetic heating (США, 2014 г.) [74];

– US-10626711-B1 – Method of producing hydrocarbon resources using an upper RF heating well and a lower producer/injection well and associated apparatus (Норвегия, 2018 г.) [75];

– US-10954765-B2 – Hydrocarbon resource heating system including internal fluidic choke and related methods (Норвегия, 2019 г.) [76];

– US-11729870-B2 – Multilateral open transmission lines for electromagnetic heating and method of use (Канада, 2020 г.) [77];

– US-11920448-B2 – Apparatus and methods for electromagnetic heating of hydrocarbon formations (Канада, 2022 г.) [78].

Среди российских патентов наиболее актуальными в данной тематике можно считать следующие:

– «RU-2720338-C1 – Способ разработки залежей тяжелой нефти, нефтяных песков и битумов» (Уфа, 2020 г.) [79];

– «RU-2704159-C1 – Способ разработки залежей углеводородов» (Волгоград, 2019 г.) [80];

– «RU-2648411-C1 – Способ повышения коэффициента извлечения нефти на трудноизвлекаемых и истощенных месторождениях» (Волгоград, 2018 г.) [81].

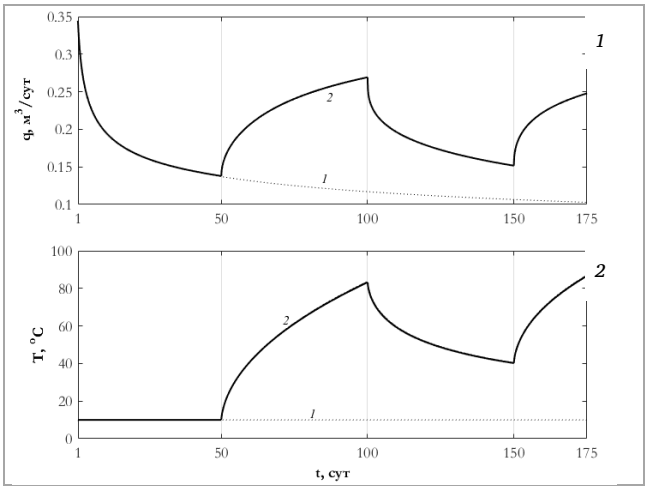
Стоит отметить, что правообладателями данных патентов, как правило, остаются их разработчики – малые инновационные предприятия, университеты или общественные организации.

Применение ЭМ-нагрева в мировой практике нефтедобычи, таким образом, получает все большую актуальность; также установлены критические проблемы, преодоление которых имеет решающее значение для развития технологии и дальнейшей реализации ее потенциала в нефтедобывающей промышленности. Определены основные экономические факторы целесообразности внедрения ЭМ-технологии по сравнению с альтернативными методами, важнейшими из которых являются доступность и приемлемая стоимость источников энергии для создания поля и нагрева пласта. Однако для некоторых стран ключевыми выступают нормативные требования к экологичности добычи, по которым данная технология имеет безусловное преимущество [82].

Из зарубежных государств Канада является страной, в которой методы ЭМ-воздействия на пласт и прискважинную зону за последнее десятилетие получили наибольшее развитие. В первую очередь, это проект ESEIEH (Enhanced Solvent Extraction Incorporating Electromagnetic Heating – электромагнитный нагрев, сопровождаемый воздействием растворителя), где в качестве закачиваемого агента выступает пропан или бутан. Первоначально ключевой проблемой данного подхода являлось то, что использование ЭМ-нагрева до температур, равных, например, температурам, достигаемым с помощью парового дренажа, не являлось энергоэффективным, диапазон применения ЭМ-нагрева ограничен околоскважинной зоной и зависит от количества потребляемой энергии. Кроме того, чтобы воспользоваться преимуществами управляемости процесса ЭМ-облучения (по сравнению с другими тепловыми методами) требуются точные компьютерные

Энергетический баланс ЭМ-обработки скважин

Время работы установки, сут	Дополнительная добыча за год, т	Полученный энергетический эквивалент, Дж	Потребляемая мощность установки, Дж	Балансовый коэффициент
Вертикальная скважина				
30	286	$13{,}1 \cdot 10^{12}$	$2{,}1 \cdot 10^{12}$	6,39: 1
60	585	$27{,}0 \cdot 10^{12}$	$4{,}2 \cdot 10^{12}$	6,51: 1
90	856	$39{,}4 \cdot 10^{12}$	$6{,}2 \cdot 10^{12}$	6,35: 1
Горизонтальная скважина				
10	115	$5{,}28 \cdot 10^{12}$	$0{,}366 \cdot 10^{12}$	14,4: 1
15	156	$7{,}21 \cdot 10^{12}$	$0{,}55 \cdot 10^{12}$	13,1: 1
25	233	$10{,}7 \cdot 10^{12}$	$0{,}917 \cdot 10^{12}$	11,7: 1



Динамика изменения величины притока нефти и температуры в скважине с трещиной гидроразрыва пласта при ЭМ-воздействии

модели для отбора множества возможных комбинаций частот, уровней мощности, вспомогательных агентов (при наличии) и проектов скважин, позволяющих просчитать наиболее рентабельный вариант для конкретной скважины. В итоге только совокупность упорядоченных данных дает возможность реализовать экономические модели способа управления производством с максимальной прибылью [83].

Согласно другим зарубежным источникам высокочастотный ЭМ-нагрев в сравнении с низкочастотным его вариантом, паровым дренажом и прямым нагревом является более энергетически эффективным даже с учетом дополнительных потерь ЭМ-энергии в линиях электропередачи [84]. Отдельные исследования указывают на троекратный и более рост дебита после ЭМ-обработки скважин на промыслах [85]. ЭМ-обработкой также рекомендуется предварять паровой дренаж при разработке битумных песков [86] либо коллекторов со сверхнизкой проницаемостью [87].

Исходя из имеющихся технико-технологических решений, представляется возможным рассчитать данные энергетического баланса при применении ЭМ-обработки скважин. С экономической точки зрения наибольший интерес представляет расчет баланса за определенный (годовой) период времени с учетом времени однократной обработки и различия видов скважин (таблица).

На основе представленной таблицы можно утверждать, что время обработки скважин, особенно вертикальных, практически не влияет на балансовый коэффициент при последующей добыче на достаточно большом отрезке времени. Однако более короткий промежуток работы ЭМ-установки позволяет последовательно обработать большее количество скважин, что приведет достижению более значимых объемов добычи в целом на месторождении. Кроме того, сопоставительный анализ использования ЭМ-воздействия на пласты высоковязкой нефти посредством вертикальных и горизонтальных скважин с учетом технических особенностей их обустройства показывает примерно вдвое больший эффект от горизонтального размещения источника излучения. В среднем с учетом переменных затрат, расходов на эксплуатацию установки и других составляющих себестоимости добываемой нефти период окупаемости ВЧ ЭМ-оборудования составляет около 1,5 года.

Отдельного внимания требует определение экономической эффективности добычи сверхвязкой нефти из низкопроницаемых коллекторов глубокого залегания, поскольку такие пласты неизбежно станут объектами разработки по мере истощения традиционных запасов нефти [88]. Традиционные технологии добычи (заводнение, гидроразрыв, закачка пара и т.д.) на таких объектах не являются в настоящий момент эффективными [89], однако их комбинация с ЭМ-прогревом может приводить к достижению приемлемого уровня рентабельности [90].

Рассмотрим вариант численного моделирования многостадийной технологии добычи тяжелой нефти в скважине с гидроразрывом пласта и поэтапным высокочастотным ЭМ-воздействием [91]. На первом этапе осуществляется «холодная» добыча, на втором – она продолжается с включенным генератором ЭМ-волн, на третьем этапе добыча подогретой нефти осуществляется без воздействия – до снижения дебита скважины до первоначального значения; затем этапы повторяются, начинаясь со второго (рисунок).

Приведенный рисунок демонстрирует существенное увеличение притока нефти с ростом температуры при ЭМ-воздействии *2* в околоскважинной области по сравнению с «холодной» добычей *1* после гидроразрыва. Экономический анализ технологии поэтапного теплового воздействия на скважину в низкопроницаемом пласте со сверхвязкой нефтью с предварительно проведенным гидроразрывом показал, что ЭМ-установка в таком варианте использования окупается через 16 лет. «Холодная» же добыча без дополнительного прогрева из такого коллектора с трещиной не является рентабельной. Дальнейшее развитие данного подхода может осуществляться различными способами: его комбинацией с закачкой смешивающегося агента [92] или строительством горизонтальной скважины с многостадийными гидроразрывом пласта [93], что позволит добиться уменьшения периода окупаемости благодаря увеличению объемов притока флюида к скважине.

Отдельного внимания также заслуживают вопросы разработанности расчетного неизотермического модуля и возможность его включения в состав коммерческих симуляторов. Численные модели по

рассматриваемому вопросу получили в последние десятилетия значительное научное обоснование [94], разработаны программные продукты, позволяющие выявлять зависимость характеристик пласта, насыщающей жидкости и других параметров от температуры. Так, в ряде работ отечественных ученых рассматриваются следующие вопросы:

1. Вопрос численного расчета зависимости температурного поля вязкопластичной нефти от давления и времени в задаче неизотермической фильтрации с учетом сокращения времени расчетов посредством использования неравномерных сеток, который позволил разработать алгоритмы и комплекс компьютерных программ, а также получить применимые на практике результаты вычислительного эксперимента [95, с. 5].

2. Вопрос реализации вычислительных алгоритмов и разработки программного комплекса для численного интегрирования уравнений неизотермической многокомпонентной фильтрации с фазовыми переходами и химическими реакциями. Особенностью представленных программ выступает учет вызванного тепловым воздействием на пласт роста проницаемости и пористости. Автор указывает, что существующие коммерческие симуляторы не позволяют учитывать данный аспект, оригинальный же подход и соответствующая разработка дают возможность осуществлять комплексное моделирование (в сопоставлении со Schlumberger Eclipse) и оценку эффективности тепловых МУН на месторождениях высоковязкой нефти [96, с. 5].

3. Вопрос построения физико-математической модели неизотермической фильтрации двухфазной жидкости в трещиновато-пористых средах с учетом параметров и расположения протяженной одиночной и дискретных трещин, рабочей температуры при добыче, нестационарности режимов работы скважин, выявления совместного влияния перечисленных факторов на процесс фильтрации, а также сравнения результатов расчетов разработанной модели и коммерческих симуляторов (с tNavigator разница не превысила 2 %) [97, с. 3–7].

4. Вопрос проектирования гидродинамической модели процесса теплобарохимического воздействия тепловыделяющими агентами (смесями) на прискважинную зону нефтяного пласта с учетом динамики фазового состояния многокомпонентной углеводородной системы, а также создания соответствующего программного комплекса, позволяющего выявить образование полей давления и объемного нагрева, определить степень очистки скважинной зоны от отложений твердых парафинов и их вовлечения в процесс фильтрации, рассчитать радиус воздействия метода, установить целесообразность воздействия и провести оценку эффекта от обработок скважин через увеличение интенсивности и объемов добычи нефти из нагретого пласта [98, с. 4–5]. Верификация результатов расчетов осуществлялась автором в гидродинамическом симуляторе Schlumberger Eclipse [98, с. 17–18].

5. Вопрос использования численных трехмерных расчетов при формировании новой осредненной неизотермической модели для двухфазной фильтрации, которая может быть использована при геолого-гидродинамическом моделировании оптимальной разработки месторождений в условиях горячего и холодного заводнения нефтяного многослойного пласта. Верификация результатов расчетов и работы программного комплекса проводилась автором в гидродинамическом симуляторе Tempest [99, с. 4–10].

6. Вопрос установления линий тока неизотермической нелинейной фильтрации многофазного многокомпонентного флюида при разработке месторождений с трудноизвлекаемыми запасами, что позволяет использовать разработанный автором программный комплекс для определения эффективности применения тепловых методов увеличения нефтеотдачи при разработке месторождений высоковязкой тяжелой нефти [100, с. 14].

Моделирование процесса разработки месторождения с применением ЭМ-технологии имеет место в отдельных программных комплексах, например, Tempest [41, с. 14]. Однако можно заключить, что в симуляторах, используемых российскими компаниями, соответствующие возможности анализа отсутствуют. Следовательно, говорить о работе полноценного расчетного неизотермического модуля в составе отечественных коммерческих симуляторов на данном этапе представляется преждевременным.

Заключение

Таким образом, дальнейшие перспективы наращивания добычи в Российской Федерации связаны, в первую очередь, с разработкой трудноизвлекаемых запасов, в частности, из коллекторов высоковязкой нефти. Метод воздействия на призабойную зону пласта высокочастотным ЭМ-полем с учетом удельного расхода энергии в сравнении с другими тепловыми методами является экономически рентабельным и позволяет в ближайшей перспективе перевести в разряд извлекаемых большие запасы высоковязкой нефти, разведанных на территории страны [101]. Для регионов, исторически специализирующихся на добыче и переработке нефти, метод также является перспективным на месторождениях с поздней стадией разработки [202]. Стоит также отметить, что в процессе повсеместного внедрения ЭМ-технологии в отечественную нефтедобывающую отрасль может использоваться серийно выпускаемое в России оборудование, что в текущей геополитической обстановке является немаловажным фактором ее поддержки и масштабирования.

Библиографический список

1. Рабцевич, А.А. О научно-исследовательском обеспечении нефтегазового отраслевого профиля Республики Башкортостан / А.А. Рабцевич // Экономика и управление: научно-практический журнал. – 2021. – № 2. – С. 114–122. DOI: 10.34773/EU.2021.2.21
2. Саяхов, Ф.Л. Термодинамика и явления переноса в дисперсных системах в электромагнитном поле / Ф.Л. Саяхов, Л.А. Ковалева. – Уфа, 1998. – 176 с.
3. Хабибуллин, И.Л. Теплофизические и термогидромеханические особенности взаимодействия электромагнитного излучения со слабопоглощающими средами: автореф. дис. … д-ра ф.-м. наук: 01.04.14 / И.Л. Хабибуллин. – Уфа, 2000. – 36 с.
4. Применение электромагнитного излучения микроволнового диапазона большой мощности в нефтедобывающей промышленности / В.Д. Парадеев, А.И. Елецкий, В.А. Майстренко, И.В. Богачков // Территория Нефтегаз. – 2006. – № 4. – С. 48–49.
5. Kovaleva L., Zinnatullin R., Musin A., Kireev V., Karamov T., Spasennykh M. Investigation of Source Rock Heating and Structural Changes in the Electromagnetic Fields Using Experimental and Mathematical Modeling // Minerals. 2021. № 9. P. 991. DOI: 10.3390/min11090991
6. Галимбеков, А.Д. Некоторые аспекты взаимодействия электромагнитных полей с поляризующимися средами: автореф. дис. … д-ра ф.-м. наук: 01.04.14 / А.Д. Галимбеков. – Уфа, 2007. – 37 с.
7. Камалтдинов, И.М. Исследование адсорбционных процессов в пористой среде при воздействии высокочастотным электромагнитным полем: автореф. дис. … канд. техн. наук: 01.02.05 / И.М. Камалтдинов. – Уфа, 2013. – 19 с.
8. Назаров, А.А. Математическое моделирование электромагнитного поля в частотно-дисперсных макроанизотропных горизонтально-слоистых средах: автореф. дис. … канд. ф.-м. наук: 04.00.12 / А.А. Назаров. – Саратов, 1996. – 16 с.

9. Использование электрообработки для увеличения нефтеотдачи / О.В. Смирнов, А.Е. Козярук, К.В. Кусков, А.Л. Портнягин, А.В. Сафонов // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2015. – № 5. – С. 67–73. DOI: 10.31660/0445-0108-2015-5-67-73
10. Kashif, M. Optimum Conditions for EOR Using Nanofluids Subjected to EM Waves / M. Kashif, P. Puspitasari // Journal of Mechanical Engineering Science and Technology. – 2017. – No. 1. – P. 15–23. DOI: 10.17977/um016v1i12017p015
11. Способ электромагнитного воздействия на скважинное пространство при добыче углеводородного сырья: патент RU 2529689-C2 // Бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности № 27 от 27.09.2014.
12. Способ интенсификации добычи нефти и реанимации простаивающих нефтяных скважин путем электромагнитного резонансного воздействия на продуктивный пласт: патент RU 2379489-C1 // Бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам № 2 от 20.01.2010.
13. Гареев, Ф.Р. Разработка комплексной технологии удаления асфальтеносмолистопа-рафинистых отложений: автореф. дис. … канд. техн. наук: 25.00.17 / Ф.Р. Гареев. – Уфа, 2012. – 24 с.
14. Жуйко, П.В. Разработка принципов управления реологическими свойствами аномальных нефтей: автореф. дис. … д-ра техн. наук: 25.00.17 / П.В. Жуйко. – Ухта, 2003. – 44 с.
15. Кислицын, А.А. Тепломассоперенос в многофазных системах под воздействием высокочастотного электромагнитного излучения: автореф. дис. … д-ра ф.-м. наук: 01.04.14 / А.А. Кислицын. – Тюмень, 1997. – 46 с.
16. Нагорный, В. Инструмент «Энеркэт»: эффективное средство для борьбы с отложениями парафинов / В. Нагорный // Территория Нефтегаз. – 2011. – № 12. – С. 72–73.
17. Электромагнитный излучатель, устройство и способ ингибирования образования отложений и коррозии скважинного оборудования: патент RU 2570870-C1 // Бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности № 34 от 10.12.2015.
18. Кордубайло, А.О. Обоснование параметров и разработка скважинного электромагнитного импульсного виброисточника: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.05.06 / А.О. Кордубайло. – Новосибирск, 2021. – 22 с.
19. Влияние СВЧ-воздействия на изменение вязкости высоковязких тяжелых нефтей / А.Ю. Леонтьев, О.Ю. Полетаева, Э.Р. Бабаев, П.Ш. Мамедова // НефтеГазоХимия. – 2018. – № 2. – С. 25–27. DOI: 10.24411/2310-8266-2018-10204
20. Применение СВЧ-воздействия на высоковязкую тяжелую нефть / А.Ю. Леонтьев, О.Ю. Полетаева, Э.Р. Бабаев, П.Ш. Мамедова // НефтеГазоХимия. – 2019. – № 2. – С. 13–17. DOI: 10.24411/2310-8266-2019-10202
21. Фатхуллина, Ю.И. Исследование влияния СВЧ поля на одиночную каплю в водонефтяной эмульсии в поле сил тяжести: автореф. дис. … канд. ф.-м. наук: 01.02.05 / Ю.И. Фатхуллина. – Уфа, 2014. – 20 с.
22. Фадеев, А.М. Исследование поглощения электромагнитного излучения в нефтяных средах: автореф. дис. … канд. ф.-м. наук: 01.04.14 / А.М. Фадеев. – Тюмень, 1998. – 25 с.
23. Multiphysics Field Coupled to a Numerical Simulation Study on Heavy Oil Reservoir Development via Electromagnetic Heating in a SAGD-like Process / J. Yu, W. Liu, Y. Yang, M. Sun, Y. Cao, Z. Meng // Energies. – 2024. – No. 17. – P. 33. DOI: 10.3390/en17205125
24. Хайдар, А.М. Исследование процессов тепло и массопереноса при электромагнитном воздействии на массивные нефтяные залежи: автореф. дис. … канд. ф.-м. наук: 01.02.05 / А.М. Хайдар. – Уфа, 2006. – 44 с.
25. Сысоев, С.М. Численное моделирование нагрева нефтесодержащего пласта сверхвысокочастотным электромагнитным излучением / С.М. Сысоев, М.М. Алексеев // Вестник кибернетики. – 2019. – № 4. – С. 6–16.
26. Герштанский, О.С. Интенсификация добычи высокопарафинистой нефти на поздней стадии разработки многопластовых месторождений Казахстана: автореф. дис. … д-ра техн. наук: 25.00.17 / О.С. Герштанский. – М., 2005. – 52 с.
27. Рабцевич, А.А. Экономические эффекты внедрения электромагнитных технологий в нефтедобывающую отрасль Республики Башкортостан / А.А. Рабцевич // Вестник УГНТУ. Наука, образование, экономика. Серия: Экономика. – 2023. – № 1. – С. 98–107. DOI: 10.17122/2541-8904-2023-1-43-98-107
28. Мусин, А.А. Исследование конвективных течений в углеводородной жидкости при электромагнитном нагреве: автореф. дис. … канд. физ.-мат. наук: 01.02.05 / А.А. Мусин. – Уфа, 2010. – 20 с.
29. Зиннатуллин, Д.А. Исследование и разработка трубчатого индукционного нагревателя жидкости: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.09.10 / Д.А. Зиннатуллин. – Самара, 2007. – 19 с.
30. Данилушкин, В.А. Разработка и исследование индукционных установок косвенного нагрева в технологических комплексах транспортировки нефти: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.09.10 / В.А. Данилушкин. – Самара, 2004. – 24 с.
31. Багаутдинов, Н.Я. Научные основы и технологии воздействия физических полей на гидратопарафиновые отложения в нефтяных скважинах: автореф. дис. … д-ра техн. наук: 25.00.17 / Н.Я. Багаутдинов. – Уфа, 2007. – 43 с.
32. Temperature Analysis of Electric Heating Hollow Sucker Rods and Its Application / L. Wang, Q. Li, J. Lin, Z. Wang // Petroleum Exploration and Development. – 2008. – No. 3. – P. 362–365. DOI: 10.1016/S1876-3804(08)60084-1
33. Идрисов, Р.И. Исследование процессов тепло- и массопереноса при электромагнитном воздействии с учетом дегазации нефти: автореф. дис. … канд. ф.-м. наук: 01.04.14 / Р.И. Идрисов. – Уфа, 2007. – 18 с.
34. Корхова, И.С. Индукционный способ разрушения водонефтяных эмульсий / И.С. Корхова, В.В. Бузаев, Ю.Н. Наумов // Интеллектуальный потенциал XXI века: ступени познания. – 2010. – № 4–2. – С. 35–38.
35. Zinnatullin, R.R. Laboratory Studies on the Separation of Various Oil–Water Emulsions in a High-Frequency Electromagnetic Field / R.R. Zinnatullin, L.A. Kovaleva // High Temperature. – 2023. – No. 5. – P. 734–737. DOI: 10.1134/s0018151x23050218
36. Шакиров, А.С. Повышение эффективности устройств СВЧ-нагрева промысловых комплексов сепарации водонефтяных эмульсий: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.12.07, 05.17.08 / А.С. Шакиров. – Казань, 2007. – 18 с.
37. Гараев, Т.К. Методы и устройства повышения эффективности СВЧ комплексов обработки нефтепродуктов: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.13.05 / Т.К. Гараев. – Казань, 2004. – 24 с.
38. Обоснование применения электромагнитного поля для предотвращения осложнений на нефтесборном трубопроводе Трошкинского месторождения / Р.Ф. Зарипов, Р.А. Хакимов, У.А. Кинзябулатов, Р.М. Маров, Н.И. Шаригин // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2020. – № 5–6. – С. 71–76. DOI: 10.24411/0131-4270-2020-6-71-76
39. Исследование адсорбционных процессов в пористых средах при воздействии различных физических полей: теория и эксперимент / Л.А. Ковалева, З.Ю. Степанова, И.М. Камалтдинов, Ю.С. Замула // Вестник Башкирского университета. – 2012. – № 1. – С. 435–438.
40. A New Technique for Heavy Oil Recovery based on Electromagnetic Heating: System Design and Numerical Modeling / A. Cerutti, M. Bandinelli, M. Bientinesi, L. Petarca, M. DeSimoni, M. Manotti, G. Maddinelli // Chemical Engineering Transactions. – 2013. – No. 32. – P. 1255–1260. DOI: 10.3303/CET1332210
41. Грушников, В.А. Нефтегазодобывающие инновации // Компетентность. – 2019. – № 7. – С. 4–7.
42. Фицнер, А.Ф. Существующие способы применения микроволновой энергии в нефтегазовом деле / А.Ф. Фицнер // Вестник науки и образования. – 2018. – № 11. – С. 13–16.
43. Давлетбаев, А.Я. Неизотермическое вытеснение высоковязкой нефти смешивающимся агентом при одновременном электромагнитном воздействии: автореф. дис. … канд. ф.-м. наук: 01.02.05 / А.Я. Давлетбаев. – Уфа, 2009. – 23 с.
44. Ковалева, Л.А. Тепло- и массоперенос многокомпонентных углеводородных систем в высокочастотном электромагнитном поле: автореф. дис. … д-ра техн. наук: 01.02.05 / Л.А. Ковалева. – М., 1998. – 30 с.
45. Способ разработки залежи высоковязкой нефти: патент RU 2454532-C1 // Бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности № 18 от 27.06.2012.
46. Хисматуллина, Ф.С. Исследование физико-химических эффектов в фильтрационных потоках углеводородных систем в высокочастотном электромагнитном поле: автореф. дис. … канд. ф.-м. наук: 01.02.05 / Ф.С. Хисматуллина. – Уфа, 1997. – 16 с.
47. Худайбердина, А.И. Теплофизические особенности солянокислотного воздействия на пористые среды в электромагнитном поле: автореф. дис. … канд. ф.-м. наук: 01.04.14 / А.И. Худайбердина. – Уфа, 2010. – 20 с.
48. Барышников, А.А. Исследование и разработка технологии увеличения нефтеотдачи применением электромагнитного поля: автореф. дис. … канд. техн. наук: 25.00.17 / А.А. Барышников. – СПб, 2016. – 24 с.
49. Цао, Б. Исследование воздействия микроволнового излучения на свойства высоковязких нефтей с целью повышения эффективности их транспортировки: автореф. дис. … канд. техн. наук: 08.00.05 / Б. Цао. – М., 2017. – 25 с.
50. Experimental Study of Electromagnetic-assisted Rare-Earth Doped Yttrium Iron Garnet (YIG) Nanofluids on Wettability and Interfacial Tension Alteration / Z. Lau, K. Lee, H. Soleimani, H. Beh // Energies. – 2019. – No. 12. – P. 7. DOI: 10.3390/en12203806
51. Role of Phase-Dependent Dielectric Properties of Alumina Nanoparticles in Electromagnetic-assisted Enhanced Oil Recovery / M. Adil, K. Lee, H. Zaid, T. Manaka // Nanomaterials. – 2020. – No. 10. – P. 20. DOI: 10.3390/nano10101975
52. Experimental Study on Electromagnetic-assisted ZnO Nanofluid Flooding for Enhanced Oil Recovery (EOR) / M. Adil, K. Lee, H. Zaid, N. Latiff, M. Alnarabiji // PLoS ONE. – 2018. – No. 2. – P. 15. DOI: 10.1371/journal.pone.0193518
53. Effect of Nanoparticles Concentration on Electromagnetic-assisted Oil Recovery using ZnO Nanofluids / M. Adil, K. Lee, H. Zaid, M. Shukur, T. Manaka // PLoS ONE. – 2020. – No. 12. – P. 12. DOI: 10.1371/journal.pone.0244738
54. Experimental Investigation of Resonant Frequency of Sandstone Saturated with Magnetite Nanofluid / F. Wahaab, L. Adebayo, A. Ali, A. Yusuff // Journal of Taibah University for Science. – 2020. – No. 1. – P. 1243–1250. DOI: 10.1080/16583655.2020.1816370
55. Synergistic Effects of Electric and Magnetic Nanoparticles with Electromagnetic Energy in Enhanced Oil Recovery / I. Afrooz, A. Rostami, Z. Mustaffa, H. Gebretsadik // Alexandria Engineering Journal. – 2024. – No. 98. – P. 177–186. DOI: 10.1016/j.aej.2024.04.055
56. Gharibshahi, R. Sandpack Flooding of Microwave Absorbent Nanofluids under Electromagnetic Radiation: an Experimental Study / R. Gharibshahi, M. Omidkhah, A. Jafari // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2024. – No. 14. – P. 853–865. DOI: 10.1007/s13202-023-01736-w

57. Absorption of Electromagnetic Waves in Sandstone Saturated with Brine and Nanofluids for Application in Enhanced Oil Recovery / H. Ali, H. Soleimani, N. Yahya, S. Lorimer, M. Sabet, B. Demiral, L. Adebayo // Journal of Taibah University for Science. – 2020. – No. 1. – P. 217–226. DOI: 10.1080/16583655.2020.1718467
58. The Architecture of BaTiO3 Nanoparticles Synthesis via Temperature-Responsive for Improved Oil Recovery: A Molecular Dynamics Simulation and Core-Flooding Experimental Study / S. Sikiru, H. Soleimani, A. Rostami, L. Khodapanah // Crystals. – 2025. – No. 8. – P. 30. DOI: 10.3390/cryst15010008
59. Application of Magnetic and Dielectric Nanofluids for Electromagnetic-assistance Enhanced Oil Recovery: a Review / Y. Hassan, B. Guan, H. Zaid, M. Hamza, M. Adil, A. Adam, K. Hastuti // Crystals. – 2021. – No. 11. – P. 18–20. DOI: 10.3390/cryst1102010
60. Technology Progress in High-Frequency Electromagnetic In Situ Thermal Recovery of Heavy Oil and Its Prospects in Low-Carbon Situations / Y. Yang, W. Liu, J. Yu, C. Liu, Y. Cao, M. Sun, M. Li, Z. Meng, X. Yan // Energies. – 2024. – No. 17. DOI: 10.3390/en17184715
61. Shafiai, S. Conventional and Electrical EOR Review: the Development Trend of Ultrasonic Application in EOR / S. Shafiai, A. Gohari // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2020. – No. 10. – P. 2923–2945. DOI: 10.1007/s13202-020-00929-x
62. Борзаев, Х.Х. Каталитическая переработка тяжелого углеводородного сырья с предварительным электромагнитным воздействием: автореф. дис. … канд. техн. наук: 02.00.13 / Х.Х. Борзаев. – М., 2016. – 28 с.
63. Измайлова, Г.Р. Исследование комбинированного воздействия электромагнитного, акустического полей и смешивающегося вытеснения нефти растворителем на пористую среду: автореф. дис. … канд. ф.-м. наук: 01.02.05 / Г.Р. Измайлова. – Уфа, 2017. – 20 с.
64. Даминев, Р.Р. Каталитическое дегидрирование под действием электромагнитного излучения СВЧ-диапазона: автореф. дис. … канд. техн. наук: 02.00.13 / Р.Р. Даминев. – Уфа, 1997. – 23 с.
65. Интенсификация процессов переработки Ашальчинского природного битума с использованием импульсно-волнового реактора «Ярус» / Р.С. Яруллин, С.Е. Угловский, М.З. Зарифянова, С.Д. Вафина // Вестник технологического университета. – 2015. – № 14. – С. 50–53.
66. Пыхов, Д.С. Исследование и разработка волнового метода разрушения водонефтяной эмульсии в пластовых условиях и в призабойной зоне пласта: автореф. дис. … канд. техн. наук: 25.00.17 / Д.С. Пыхов. – Уфа, 2013. – 23 с.
67. Закирьянова, Г.Т. Математическое моделирование процессов тепло и массопереноса при воздействии электрических полей на водонефтяную эмульсию: автореф. дис. … канд. ф.-м. наук: 01.04.14 / Г.Т. Закирьянова. – Уфа, 2010. – 21 с.
68. Разработка электромагнитного дегидратора для промысловой подготовки нефти / Д.В. Максудов, И.Ф. Янгиров, Р.Т. Хазиева, М.И. Хакимьянов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – № 6. – С. 206–215. DOI: 10.18799/24131830/2022/6/3611
69. Kovaleva, L.A. Destruction of Water-In-Oil Emulsions in Radio-Frequency and Microwave Electromagnetic Fields / L.A. Kovaleva, R.R. Zinnatullin, R.Z. Minnigalimov // Energy and Fuels. – 2011. – No. 8. – P. 3731–3738. DOI: 10.1021/ef200249a
70. Суфьянов, Р.Р. Исследование воздействия высокочастотного электромагнитного поля на нефтяные шламы: автореф. дис. … канд. техн. наук: 01.04.14 / Р.Р. Суфьянов. – Уфа, 2005. – 20 с.
71. Миннигалимов, Р.З. Разработка технологии переработки нефтяных шламов с применением энергии ВЧ и СВЧ электромагнитных полей: автореф. дис. … д-ра техн. наук: 25.00.17 / Р.З. Миннигалимов. – Уфа, 2010. – 46 с.
72. Бахонина, Е.И. Разработка адаптивной технологии переработки углеводородсодержащих отходов нефтехимии с использованием электромагнитного излучения СВЧ-диапазона: автореф. дис. … канд. техн. наук: 02.00.13 / Е.И. Бахонина. – Уфа, 2008. – 22 с.
73. Electromagnetically Assisted Ceramic Materials for Heavy Oil Recovery and On-site Steam Generation: patent JP-2016525177-A // Patent base «Unified Patents». – URL: //portal.unifiedpatents.com/patents/patent/JP-2016525177-A (дата обращения: 14.08.2024).
74. Effective Solvent Extraction System Incorporating Electromagnetic Heating: patent US-9739126-B2 // Patent base «Unified Patents». – URL: //portal.unifiedpatents.com/patents/patent/US-9739126-B2 (дата обращения: 14.08.2024).
75. Method of Producing Hydrocarbon Resources Using an Upper RF Heating Well and a Lower Producer/injection Well and Associated Apparatus: patent US-10626711-B1 // Patent base «Unified Patents». – URL: //portal.unifiedpatents.com/patents/patent/US-10626711-B1 (дата обращения: 14.08.2024).
76. Hydrocarbon resource heating system including internal fluidic choke and related methods: patent US-10954765-B2 // Patent base «Google Patents». – URL: //patents.google.com/patent/CA3062672C (дата обращения: 14.08.2024).
77. Multilateral open transmission lines for electromagnetic heating and method of use: patent US-11729870-B2 // Patent base «Google Patents». – URL: //patents.google.com/patent/US11729870B2 (дата обращения: 14.08.2024).
78. Apparatus and methods for electromagnetic heating of hydrocarbon formations: patent US-11920448-B2 // Patent base «Google Patents». – URL: //patents.google.com/patent/US11920448B2 (дата обращения: 14.08.2024).
79. Способ разработки залежей тяжелых нефтей, нефтяных песков и битумов: патент RU2720338-C1// Бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности № 13 от 29.04.2020.
80. Способ разработки залежей углеводородов: патент RU2704159-C1 // Бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности № 30 от 24.10.2019.
81. Способ повышения коэффициента извлечения нефти на трудноизвлекаемых и истощенных месторождениях: патент RU-2648411-C1 // Бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности № 9 от 26.03.2018.
82. Gharibshahi, R. Toward Understanding the Effect of Electromagnetic Radiation on In Situ Heavy Oil Upgrading and Recovery: Background and Advancements / R. Gharibshahi, N. Asadzadeh, A. Jafari // Innovations in Enhanced and Improved Oil Recovery – New Advances. IntechOpen. – 2023. – URL: //www.intechopen.com/chapters/1164534 DOI: 10.5772/intechopen.1002809 (дата обращения: 14.08.2024).
83. Rassenfoss, S. Oil Sands Get Wired – Seeking More Oil, Fewer Emissions / S. Rassenfoss // Journal of petroleum technology. – 2012. – No. 9. – P. 34–45. DOI: 10.2118/0912-0034-JPT
84. Comparative Analysis of Electromagnetic Methods for Heavy Oil Recovery / I. Bogdanov, J. Torres, A. Kamp, B. Corre // SPE Heavy Oil Conference and Exhibition. – Kuwait, 2011. URL: //onepetro.org/SPEHOCE/proceedings-abstract/11HOCE/All-11HOCE/ SPE-150550-MS/ 150809 DOI: 10.2118/150550-MS (дата обращения: 14.08.2024).
85. Kairgeldina, L. Alternative methods of thermal oil recovery: a review / L. Kairgeldina, B. Sarsenbekuly // Kazakhstan journal for oil & gas industry. – 2024. – No. 6. – P. 50–63. DOI: 10.54859/kjogi108692
86. Calculation of Temperature Distribution in Heavy Oil Reservoirs by Electromagnetic Heating / H. Gonzalez-Alvarez, A. Pinzon-Diaz, C. Delgadillo-Aya, E. Munoz-Mazo // CT&F-Ciencia, Tecnologia y Futuro. – 2023. – No. 1. – P. 31–42. DOI: 10.29047/01225383.690
87. Gomaa, S. Enhanced Heavy and Extra Heavy Oil Recovery: Current Status and New Trends / S. Gomaa, K. Salem, A. El-Hoshoudy // Petroleum. – 2024. – No. 10. – P. 399–410. DOI: 10.1016/j.petlm.2023.10.001
88. Рабцевич, А.А. Количественный анализ современных тенденций развития нефтяной отрасли Республики Башкортостан / А.А. Рабцевич, Д.В. Лысенко // Экономика и управление: научно-практический журнал. – 2021. – № 4. – С. 99–107. DOI: 10.34773/EU.2021.4.16
89. Multi-Stage Hydraulic Fracturing and Radio-Frequency Electromagnetic Radiation for Heavy-Oil Production / A.Y. Davletbaev, L.A. Kovaleva, N.M. Nasyrov, T. Babadagli // Journal of Unconventional Oil and Gas Resources. – 2015. – P. 15–22. DOI: 10.1016/j.juogr.2015.08.002
90. Рабцевич, А.А. Электромагнитные технологии в системе инновационных методов добычи нефти на месторождениях Республики Башкортостан / А.А. Рабцевич // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2023. – № 5. – С. 92–106. DOI: 10.31660/0445-0108-2023-5-92-106
91. Numerical Modeling of Heavy-Oil Recovery Using Electromagnetic Radiation / Hydraulic Fracturing Considering Thermal Expansion Effect / A. Davletbaev, L. Kovaleva, A. Zainullin, T. Babadagli // Journal of Heat Transfer. – 2018. – No. 6. DOI: 10.1115/1.4038853
92. Нигматулин, Р.И. Перекрестные явления переноса в дисперсных системах, взаимодействующих с высокочастотным электромагнитным полем / Р.И. Нигматулин, Ф.Л. Саяхов, Л.А. Ковалева // Доклады Академии наук. – 2001. – № 3. – С. 340–343.
93. Davletbaev, A. Combining Solvent Injection, Electromagnetic Heating, and Hydraulic Fracturing for Multistage Heavy Oil Recovery / A. Davletbaev, L. Kovaleva, T. Babadagli // Journal of Electromagnetic Waves and Applications. – 2016. – No. 2. – P. 207–224. DOI: 10.1080/09205071.2015.1102093
94. Fazeli, H. Application of Homotopy Perturbation Method to One-dimensional Transient Single-phase EM Heating Model / H. Fazeli, S. Kord // Iranian Journal of Oil & Gas Science and Technology. – 2013. – No. 2. – P. 20–33. DOI: 10.22050/ijogst.2013.3535
95. Морозкин, Н.Н. Неизотермическая фильтрация вязкопластичной нефти: автореф. дис. … канд. ф.-м. наук: 01.02.05 / Н.Н. Морозкин. – Уфа, 2016. – 23 с.
96. Шевченко, А.В. Разработка и реализация численных методов моделирования многокомпонентной неизотермической фильтрации: автореф. дис. … канд. ф.-м. наук: 05.13.18 / А.В. Шевченко. – М., 2015. – 22 с.
97. Пятков, А.А. Неизотермическая фильтрация двухфазной жидкости в трещиновато-пористых средах: автореф. дис. … канд. ф.-м. наук: 01.04.14 / А.А. Пятков. – Тюмень, 2019. – 20 с.
98. Варавва, А.И. Неизотермическая фильтрация тепловыделяющей химически активной бинарной смеси: автореф. дис. … канд. ф.-м. наук: 01.04.14 / А.И. Варавва. – Тюмень, 2019. – 28 с.
99. Аль-Джабри, А.Я. Осредненные модели двухфазной неизотермической фильтрации в задачах оптимальной разработки месторождений: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.13.18 / А.Я. Аль-Джабри. – Казань, 2019. – 19 с.
100. Невмержицкий, Я.В. Метод линий тока для моделирования фильтрации вязкопластичных нефтей: автореф. дис. … канд. ф.-м. наук: 05.13.18 / Я.В. Невмержицкий. – М., 2019. – 18 с.
101. Рабцевич, А.А. Целесообразность применения электромагнитных технологий в разработке нефтяных месторождений Республики Башкортостан / А.А. Рабцевич // Экономика и управление: научно-практический журнал. – 2023. – № 2. – С. 64–71. DOI: 10.34773/EU.2023.2.12
102. Рабцевич, А.А. Концептуальная модель развития региона с преобладанием нефтегазохимических производств: диверсификация и специализация / А.А. Рабцевич // Искусственные общества. – 2020. – № 3. – С. 12. DOI: 10.18254/S207751800010898-6

References

1. Rabtsevich A.A. O nauchno-issledovatel'skom obespechenii neftegazovogo otraslevogo profilia Respubliki Bashkortostan [About the Scientific and Research Support of the Oil and Gas Industry Profile of the Republic of Bashkortostan]. *Ekonomika i upravlenie: nauchno-prakticheskii zhurnal*, 2021, no. 2, pp. 114-122. DOI: 10.34773/EU.2021.2.21
2. Saiakhov F.L., Kovaleva L.A. Termodinamika i iavleniia perenosa v dispersnykh sistemakh v elektromagnitnom pole [Thermodynamics and transport phenomena in dispersed systems in an electromagnetic field]. Ufa, 1998, 176 p.
3. Khabibullin I.L. Teplofizicheskie i termogidromekhanicheskie osobennosti vzaimodeistviia elektromagnitnogo izlucheniia so slabopogloshchaiushchimi sredami [Thermophysical and thermohydromechanical features of the interaction of electromagnetic radiation with weakly absorbing media]. Abstract of Ph. D. thesis. Ufa, 2000, 36 p.
4. Paradeev V.D., Eletskii A.I., Maistrenko V.A., Bogachkov I.V. Primenenie elektromagnitnogo izlucheniia mikrovolnovogo diapazona bol'shoi moshchnosti v neftedobyvaiushchei promyshlennosti [Application of high power microwave electromagnetic radiation in the oil industry]. *Territoriia Neftegaz*, 2006, no. 4, pp. 48-49.
5. Kovaleva L., Zinnatullin R., Musin A., Kireev V., Karamov T., Spasennykh M. Investigation of Source Rock Heating and Structural Changes in the Electromagnetic Fields Using Experimental and Mathematical Modeling. *Minerals*, 2021, no. 9, 991 p. DOI: 10.3390/min11090991
6. Galimbekov A.D. Nekotorye aspekty vzaimodeistviia elektromagnitnykh polei s poliarizuiushchimisia sredami [Some aspects of the interaction of electromagnetic fields with polarizing media]. Abstract of Doctor's degree dissertation. Ufa, 2007, 37 p.
7. Kamaltdinov I.M. Issledovanie adsorbcionnyh processov v poristoj srede pri vozdejstvii vysokochastotnym jelektromagnitnym polem [Study of adsorption processes in a porous medium under the influence of a high-frequency electromagnetic field]. Abstract of Ph. D. thesis. Ufa, 2013, 19 p.
8. Nazarov A.A. Matematicheskoe modelirovanie elektromagnitnogo polia v chastotno-dispersnykh makroanizotropnykh gorizontal'no-sloistykh sredakh [Mathematical modeling of electromagnetic field in frequency-dispersed macroanisotropic horizontally layered media]. Abstract of Ph. D. thesis. Saratov, 1996, 16 p.
9. Smirnov O.V., Koziaruk A.E., Kuskov K.V., Portniagin A.L., Safonov A.V. Ispol'zovanie elektroobrabotki dlia uvelicheniia nefteotdachi [Use of electrotreatment method for oil recovery enhancement]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Neft' i gaz*, 2015, no. 5, pp. 67-73. DOI: 10.31660/0445-0108-2015-5-67-73
10. Kashif M., Puspitasari P. Optimum Conditions for EOR Using Nanofluids Subjected to EM Waves. *Journal of Mechanical Engineering Science and Technology*, 2017, no. 1, pp. 15-23. DOI: 10.17977/um016v1i12017p015
11. Sposob elektromagnitnogo vozdeistviia na skvazhinnoe prostranstvo pri dobyche uglevodorodnogo syr'ia: patent RU 2529689-C2 [Method of electromagnetic impact on borehole space during hydrocarbon production: patent RU 2529689-C2]. *Biulleten' Federal'noi sluzhby po intellektual'noi sobstvennosti no. 27 ot 27.09.2014.*
12. Sposob intensifikatsii dobychi nefti i reanimatsii prostaivaiushchikh neftianykh skvazhin putem elektromagnitnogo rezonansnogo vozdeistviia na produktivnyi plast: patent RU 2379489-C1 [Method for intensifying oil production and resuscitating idle oil wells by electromagnetic resonance impact on the productive formation: patent RU 2379489-C1]. *Biulleten' Federal'noi sluzhby po intellektual'noi sobstvennosti, patentam i tovarnym znakam no. 2 ot 20.01.2010.*
13. Gareev F.R. Razrabotka kompleksnoi tekhnologii udaleniia asfal'tenosmolistopa-rafinistykh otlozhenii [Разработка комплексной технологии удаления асфальтеносмолистопа-рафинистых отложений]. Abstract of Ph. D. thesis. Ufa, 2012, 24 p.
14. Zhuiko P.V. Razrabotka printsipov upravleniia reologicheskimi svoistvami anomal'nykh neftei [Development of a comprehensive technology for removing asphaltene-resin-paraffin deposits]. Abstract of Doctor's degree dissertation. Uhta, 2003, 44 p.
15. Kislitsyn A.A. Teplomassoperenos v mnogofaznykh sistemakh pod vozdeistviem vysokochastotnogo elektromagnitnogo izlucheniia [Heat and mass transfer in multiphase systems under the influence of high-frequency electromagnetic radiation]. Abstract of Doctor's degree dissertation. Tjumen', 1997, 46 p.
16. Nagornyi V. Instrument "Enerket": effektivnoe sredstvo dlia bor'by s otlozheniiami parafinov [The Enercat Tool: An Effective Tool for Combating Paraffin Deposits]. *Territoriia Neftegaz*, 2011, no. 12, pp. 72-73.
17. Elektromagnitnyi izluchatel', ustroistvo i sposob ingibirovaniia obrazovaniia otlozhenii i korrozii skvazhinnogo oborudovaniia: patent RU 2570870-C1 [Electromagnetic emitter, device and method for inhibiting the formation of deposits and corrosion of downhole equipment: patent RU 2570870-C1]. *Biulleten' Federal'noi sluzhby po intellektual'noi sobstvennosti no. 34 ot 10.12.2015*.
18. Kordubailo A.O. Obosnovanie parametrov i razrabotka skvazhinnogo elektromagnitnogo impul'snogo vibroistochnika [Justification of parameters and development of a borehole electromagnetic pulse vibration source]. Abstract of Ph. D. thesis. Novosibirsk, 2021, 22 p.
19. Leont'ev A.Iu., Poletaeva O.Iu., Babaev E.R., Mamedova P.Sh. Vliianie SVCh-vozdeistviia na izmenenie viazkosti vysokoviazkikh tiazhelykh neftei [Influence of microwave exposure on the change of the viscosity of highly viscous heavy oil]. *NefteGazoKhimiia*, 2018, no. 2, pp. 25-27. DOI: 10.24411/2310-8266-2018-10204
20. Leont'ev A.Iu., Poletaeva O.Iu., Babaev E.R., Mamedova P.Sh. Primenenie SVCh-vozdeistviia na vysokoviazkuiu tiazheluiu neft' [Application of microwave irradiation on extra-heavy crude oil]. *NefteGazoKhimiia*, 2019, no. 2, pp. 13-17. DOI: 10.24411/2310-8266-2019-10202
21. Fatkhullina Iu.I. Issledovanie vliianiia SVCh polia na odinochnuiu kapliu v vodoneftianoi emul'sii v pole sil tiazhesti [Study of the influence of microwave field on a single drop in water-oil emulsion in the field of gravity]. Abstract of Ph. D. thesis. Ufa, 2014, 20 p.
22. Fadeev A.M. Issledovanie pogloshcheniia elektromagnitnogo izlucheniia v neftianykh sredakh [Study of electromagnetic radiation absorption in oil environments]. Abstract of Ph. D. thesis. Tjumen', 1998, 25 p.
23. Yu J., Liu W., Yang Y., Sun M., Cao Y., Meng Z. Multiphysics Field Coupled to a Numerical Simulation Study on Heavy Oil Reservoir Development via Electromagnetic Heating in a SAGD-like Process. *Energies*, 2024, no. 17, 33 p. DOI: 10.3390/en17205125
24. Khaidar A.M. Issledovanie protsessov teplo i massoperenosa pri elektromagnitnom vozdeistvii na massivnye neftianye zalezhi [Study of heat and mass transfer processes during electromagnetic impact on massive oil deposits]. Abstract of Ph. D. thesis. Ufa, 2006, 44 p.
25. Sysoev S.M., Alekseev M.M. Chislennoe modelirovanie nagreva neftesoderzhashchego plasta sverkhvysokochastotnym elektromagnitnym izlucheniem [Numerical simulation of the microwave heating of an oil reservoir]. *Vestnik kibernetiki*, 2019, no. 4, pp. 6-16.
26. Gershtanskii O.S. Intensifikatsiia dobychi vysokoparafinistoi nefti na pozdnei stadii razrabotki mnogoplastovykh mestorozhdenii Kazakhstana [Intensification of high-paraffin oil production at a late stage of development of multi-layer fields in Kazakhstan]. Abstract of Doctor's degree dissertation. Moscow, 2005, 52 p.
27. Rabtsevich A.A. Ekonomicheskie effekty vnedreniia elektromagnitnykh tekhnologii v neftedobyvaiushchuiu otrasl' Respubliki Bashkortostan [Economic effects of electromagnetic technologies introduction in the oil industry of Bashkortostan republic]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo neftianogo tekhnicheskogo universiteta. Nauka, obrazovanie, ekonomika. Ekonomika*, 2023, no. 1, pp. 98-107. DOI: 10.17122/2541-8904-2023-1-43-98-107
28. Musin A.A. Issledovanie konvektivnykh techenii v uglevodorodnoi zhidkosti pri elektromagnitnom nagreve [Study of convective flows in hydrocarbon liquid under electromagnetic heating]. Abstract of Ph. D. thesis. Ufa, 2010, 20 p.
29. Zinnatullin D.A. Issledovanie i razrabotka trubchatogo induktsionnogo nagrevatelia zhidkosti [Research and development of tubular induction liquid heater]. Abstract of Ph. D. thesis. Samara, 2007, 19 p.
30. Danilushkin V.A. Razrabotka i issledovanie indukcionnyh ustanovok kosvennogo nagreva v tehnologicheskih kompleksah transportirovki nefti [Development and research of induction indirect heating units in technological complexes of oil transportation]. Abstract of Ph. D. thesis. Samara, 2004, 24 p.
31. Bagautdinov N.Ja. Nauchnye osnovy i tehnologii vozdejstvija fizicheskih polej na gidratoparafinovye otlozhenija v neftjanyh skvazhinah [Scientific foundations and technologies of the impact of physical fields on hydrate-paraffin deposits in oil wells]. Abstract of Doctor's degree dissertation. Ufa, 2007, 43 p.
32. Wang L., Li Q., Lin J., Wang Z. Temperature Analysis of Electric Heating Hollow Sucker Rods and Its Application. *Petroleum Exploration and Development*, 2008, no. 3, pp. 362-365. DOI: 10.1016/S1876-3804(08)60084-1
33. Idrisov R.I. Issledovanie processov teplo- i massoperenosa pri jelektromagnitnom vozdejstvii s uchetom degazacii nefti [Study of heat and mass transfer processes under electromagnetic influence taking into account oil degassing]. Abstract of Ph. D. thesis. Ufa, 2007, 18 p.
34. Korkhova I.S., Buzaev V.V., Naumov Iu.N. Induktsionnyi sposob razrusheniia vodoneftianykh emul'sii [Induction method for breaking water-oil emulsions]. *Intellektual'nyi potentsial XXI veka: stupeni poznaniia*, 2010, no. 4-2, pp. 35-38.
35. Zinnatullin R.R., Kovaleva L.A. Laboratory Studies on the Separation of Various Oil–Water Emulsions in a High-Frequency Electromagnetic Field. *High Temperature*, 2023, no. 5, pp. 734-737. DOI: 10.1134/s0018151x23050218
36. Shakirov A.S. Povyshenie effektivnosti ustroistv SVCh-nagreva promyslovykh kompleksov separatsii vodoneftianykh emul'sii [Improving the efficiency of microwave heating devices for industrial complexes for separation of water-oil emulsions]. Abstract of Ph. D. thesis. Kazan', 2007, 18 p.
37. Garaev T.K. Metody i ustroistva povysheniia effektivnosti SVCh kompleksov obrabotki nefteproduktov [Methods and devices for increasing the efficiency of microwave complexes for processing petroleum products]. Abstract of Ph. D. thesis. Kazan', 2004, 24 p.
38. Zaripov R.F., Khakimov R.A., Kinziabulatov U.A., Marov R.M., Sharigin N.I. Obosnovanie primeneniia elektromagnitnogo polia dlia predotvrashcheniia oslozhnenii na neftesbornom truboprovode Troshkinskogo mestorozhdeniia [Justification of the use of an electromagnetic field to prevent complications in the

oil gathering pipeline of the Troshkinskoe field]. *Transport i khranenie nefteproduktov i uglevodorodnogo syr'ia*, 2020, no. 5-6, pp. 71-76. DOI: 10.24411/0131-4270-2020-6-71-76
39. Kovaleva L.A., Stepanova Z.Iu., Kamaltdinov I.M., Zamula Iu.S. Issledovanie adsorbtsionnykh protsessov v poristykh sredakh pri vozdeistvii razlichnykh fizicheskikh polei: teoriia i eksperiment [Study of adsorption processes in porous media under the influence of various physical fields: theory and experiment]. *Vestnik Bashkirskogo universiteta*, 2012, no. 1, pp. 435-438.
40. Cerutti A., Bandinelli M., Bientinesi M., Petarca L., DeSimoni M., Manotti M., Maddinelli G. A New Technique for Heavy Oil Recovery based on Electromagnetic Heating: System Design and Numerical Modeling. *Chemical Engineering Transactions*, 2013, no. 32, pp. 1255-1260. DOI: 10.3303/CET1332210
41. Grushnikov V.A. Neftegazodobyvaiushchie innovatsii [Oil & Gas Innovations]. *Kompetentnost'*, 2019, no. 7, pp. 4-7.
42. Fitsner A.F. Sushchestvuiushchie sposoby primeneniia mikrovolnovoi energii v neftegazovom dele [Existing methods of microwave energy application in oil and gas industry]. *Vestnik nauki i obrazovaniia*, 2018, no. 11, pp. 13-16.
43. Davletbaev A.Ia. Neizotermicheskoe vytesnenie vysokoviazkoi nefti smeshivaiushchimsia agentom pri odnovremennom elektromagnitnom vozdeistvii [Non-isothermal displacement of high-viscosity oil by a miscible agent with simultaneous electromagnetic action]. Abstract of Ph. D. thesis. Ufa, 2009, 23 p.
44. Kovaleva L.A. Teplo- i massoperenos mnogokomponentnykh uglevodorodnykh sistem v vysokochastotnom elektromagnitnom pole [Heat and mass transfer of multicomponent hydrocarbon systems in a high-frequency electromagnetic field] Abstract of Doctor's degree dissertation. Moscow, 1998, 30 p.
45. Sposob razrabotki zalezhi vysokoviazkoi nefti: patent RU 2454532-C1 [Method for developing a high-viscosity oil deposit: patent RU 2454532-C1]. *Biulleten' Federal'noi sluzhby po intellektual'noi sobstvennosti no. 18 ot 27.06.2012*.
46. Khismatullina F.S. Issledovanie fiziko-khimicheskikh effektov v fil'tratsionnykh potokakh uglevodorodnykh sistem v vysokochastotnom elektromagnitnom pole [Study of physical and chemical effects in filtration flows of hydrocarbon systems in a high-frequency electromagnetic field] Abstract of Ph. D. thesis. Ufa, 1997, 16 p.
47. Khudaiberdina A.I. Teplofizicheskie osobennosti solianokislotnogo vozdeistviia na poristye sredy v elektromagnitnom pole [Thermophysical features of hydrochloric acid action on porous media in an electromagnetic field]. Abstract of Ph. D. thesis. Ufa, 2010, 20 p.
48. Baryshnikov A.A. Issledovanie i razrabotka tekhnologii uvelicheniia nefteotdachi primeneniem elektromagnitnogo polia [Research and development of technology for enhancing oil recovery using electromagnetic fields]. Abstract of Ph. D. thesis. Saint Petersburg, 2016, 24 p.
49. Tsao B. Issledovanie vozdeistviia mikrovolnovogo izlucheniia na svoistva vysokoviazkikh neftei s tsel'iu povysheniia effektivnosti ikh transportirovki [Study of the effect of microwave radiation on the properties of high-viscosity oils in order to improve the efficiency of their transportation]. Abstract of Ph. D. thesis. Moscow, 2017, 25 p.
50. Lau Z., Lee K., Soleimani H., Beh H. Experimental Study of Electromagnetic-assisted Rare-Earth Doped Yttrium Iron Garnet (YIG) Nanofluids on Wettability and Interfacial Tension Alteration. *Energies*, 2019, no. 12, 7 p. DOI: 10.3390/en12203806
51. Adil M., Lee K., Zaid H., Manaka T. Role of Phase-Dependent Dielectric Properties of Alumina Nanoparticles in Electromagnetic-assisted Enhanced Oil Recovery. *Nanomaterials*, 2020, no. 10, 20 p. DOI: 10.3390/nano10101975
52. Adil M., Lee K., Zaid H., Latiff N., Alnarabiji M. Experimental Study on Electromagnetic-assisted ZnO Nanofluid Flooding for Enhanced Oil Recovery (EOR). *PLoS ONE*, 2018, no. 2, 15 p. DOI: 10.1371/journal.pone.0193518
53. Adil M., Lee K., Zaid H., Shukur M., Manaka T. Effect of Nanoparticles Concentration on Electromagnetic-assisted Oil Recovery using ZnO Nanofluids. *PLoS ONE*, 2020, no. 12, 12 p. DOI: 10.1371/journal.pone.0244738
54. Wahaab F., Adebayo L., Ali A., Yusuff A. Experimental Investigation of Resonant Frequency of Sandstone Saturated with Magnetite Nanofluid. *Journal of Taibah University for Science*, 2020, no. 1, pp. 1243-1250. DOI: 10.1080/16583655.2020.1816370
55. Afrooz I., Rostami A., Mustaffa Z., Gebretsadik H. Synergistic Effects of Electric and Magnetic Nanoparticles with Electromagnetic Energy in Enhanced Oil Recovery. *Alexandria Engineering Journal*, 2024, no. 98, pp. 177-186. DOI: 10.1016/j.aej.2024.04.055
56. Gharibshahi R., Omidkhah M., Jafari A. Sandpack Flooding of Microwave Absorbent Nanofluids under Electromagnetic Radiation: an Experimental Study. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2024, no. 14, pp. 853-865. DOI: 10.1007/s13202-023-01736-w
57. Ali H., Soleimani H., Yahya N., Lorimer S., Sabet M., Demiral B., Adebayo L. Absorption of Electromagnetic Waves in Sandstone Saturated with Brine and Nanofluids for Application in Enhanced Oil Recovery. *Journal of Taibah University for Science*, 2020, no. 1, pp. 217-226. DOI: 10.1080/16583655.2020.1718467
58. Sikiru S., Soleimani H., Rostami A., Khodapanah L. The Architecture of BaTiO3 Nanoparticles Synthesis via Temperature-Responsive for Improved Oil Recovery: A Molecular Dynamics Simulation and Core-Flooding Experimental Study. *Crystals*, 2025, no. 8, 30 p. DOI: 10.3390/cryst15010008
59. Hassan Y., Guan B., Zaid H., Hamza M., Adil M., Adam A., Hastuti K. Application of Magnetic and Dielectric Nanofluids for Electromagnetic-assistance Enhanced Oil Recovery: a Review. *Crystals*, 2021, no. 11, pp. 18-20. DOI: 10.3390/cryst1102010
60. Yang Y., Liu W., Yu J., Liu C., Cao Y., Sun M., Li M., Meng Z., Yan X. Technology Progress in High-Frequency Electromagnetic In Situ Thermal Recovery of Heavy Oil and Its Prospects in Low-Carbon Situations. *Energies*, 2024, no. 17. DOI: 10.3390/en17184715
61. Shafiai S., Gohari A. Conventional and Electrical EOR Review: the Development Trend of Ultrasonic Application in EOR. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2020, no. 10, pp. 2923-2945. DOI: 10.1007/s13202-020-00929-x
62. Borzaev Kh.Kh. Kataliticheskaia pererabotka tiazhelogo uglevodorodnogo syr'ia s predvaritel'nym elektromagnitnym vozdeistviem [Catalytic processing of heavy hydrocarbon feedstock with preliminary electromagnetic action]. Abstract of Ph. D. thesis. Mosow, 2016, 28 p.
63. Izmailova G.R. Issledovanie kombinirovannogo vozdeistviia elektromagnitnogo, akusticheskogo polei i smeshivaiushchegosia vytesneniia nefti rastvoritelem na poristuiu sredu [Study of the combined effects of electromagnetic, acoustic fields and miscible displacement of oil by solvent on a porous medium]. Abstract of Ph. D. thesis. Ufa, 2017, 20 p.
64. Daminev R.R. Kataliticheskoe degidrirovanie pod deistviem elektromagnitnogo izlucheniia SVCh-diapazona [Catalytic dehydrogenation under the action of microwave electromagnetic radiation]. Abstract of Ph. D. thesis. Ufa, 1997, 23 p.
65. Iarullin R.S., Uglovskii S.E., Zarifianova M.Z., Vafina S.D. Intensifikatsiia protsessov pererabotki Ashal'chinskogo prirodnogo bituma s ispol'zovaniem impul'sno-volnovogo reaktora "Iarus" [Intensification of Ashalchinsky natural bitumen processing processes using the YARUS pulse-wave reactor]. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, 2015, no. 14, pp. 50-53.
66. Pykhov D.S. Issledovanie i razrabotka volnovogo metoda razrusheniia vodoneftianoi emul'sii v plastovykh usloviiakh i v prizaboinoi zone plasta [Research and development of a wave method for breaking up water-oil emulsions in reservoir conditions and in the bottomhole zone of a reservoir]. Abstract of Ph. D. thesis. Ufa, 2013, 23 p.
67. Zakir'ianova G.T. Matematicheskoe modelirovanie protsessov teplo i massoperenosa pri vozdeistvii elektricheskikh polei na vodoneftianuiu emul'siiu [Mathematical modeling of heat and mass transfer processes under the influence of electric fields on water-oil emulsion]. Abstract of Ph. D. thesis. Ufa, 2010, 21 p.
68. Maksudov D.V., Iangirov I.F., Khazieva R.T., Khakim'ianov M.I. Razrabotka elektromagnitnogo degidratora dlia promyslovoi podgotovki nefti [Development of electromagnetic dehydrator for field oil treatment]. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 2022, no. 6, pp. 206-215. DOI: 10.18799/24131830/2022/6/3611
69. Kovaleva L.A., Zinnatullin R.R., Minnigalimov R.Z. Destruction of Water-In-Oil Emulsions in Radio-Frequency and Microwave Electromagnetic Fields. *Energy and Fuels*, 2011, no. 8, pp. 3731-3738. DOI: 10.1021/ef200249a
70. Suf'ianov R.R. Issledovanie vozdeistviia vysokochastotnogo elektromagnitnogo polia na neftianye shlamy [Study of the Effect of High-Frequency Electromagnetic Field on Oil Sludge]. Abstract of Ph. D. thesis. Ufa, 2005, 20 p.
71. Minnigalimov R.Z. Razrabotka tekhnologii pererabotki neftianykh shlamov s primeneniem energii VCh i SVCh elektromagnitnykh polei [Development of technology for processing oil sludge using the energy of high-frequency and microwave electromagnetic fields]. Abstract of Doctor's degree dissertation. Ufa, 2010, 46 p.
72. Bakhonina E.I. Razrabotka adaptivnoi tekhnologii pererabotki uglevodorodsoderzhashchikh otkhodov neftekhimii s ispol'zovaniem elektromagnitnogo izlucheniia SVCh-diapazona [Development of an adaptive technology for processing hydrocarbon-containing petrochemical waste using microwave electromagnetic radiation]. Abstract of Ph. D. thesis. Ufa, 2008, 22 p.
73. Electromagnetically Assisted Ceramic Materials for Heavy Oil Recovery and On-site Steam Generation: patent JP-2016525177-A. *Patent base "Unified Patents"*, available at: //portal.unifiedpatents.com/patents/patent/JP-2016525177-A (accessed 14 August 2024).
74. Effective Solvent Extraction System Incorporating Electromagnetic Heating: patent US-9739126-B2. *Patent base "Unified Patents"*, available at: //portal.unifiedpatents.com/patents/patent/US-9739126-B2 (accessed 14 August 2024).
75. Method of Producing Hydrocarbon Resources Using an Upper RF Heating Well and a Lower Producer/injection Well and Associated Apparatus: patent US-10626711-B1. *Patent base "Unified Patents"*, available at: //portal.unifiedpatents.com/patents/patent/US-10626711-B1 (accessed 14 August 2024).
76. Hydrocarbon resource heating system including internal fluidic choke and related methods: patent US-10954765-B2. *Patent base "Google Patents"*, available at: //patents.google.com/patent/CA3062672C (accessed 14 August 2024).
77. Multilateral open transmission lines for electromagnetic heating and method of use: patent US-11729870-B2. *Patent base "Google Patents"*, available at: //patents.google.com/patent/US11729870B2 (accessed 14 August 2024).
78. Apparatus and methods for electromagnetic heating of hydrocarbon formations: patent US-11920448-B2. *Patent base "Google Patents"*, available at: //patents.google.com/patent/US11920448B2 (accessed 14 August 2024).

79. Sposob razrabotki zalezhei tiazhelykh neftei, neftianykh peskov i bitumov: patent RU2720338-C1 [Method for developing deposits of heavy oils, oil sands and bitumen: patent RU2720338-C1]. *Biulleten' Federal'noi sluzhby po intellektual'noi sobstvennosti no. 13 ot 29.04.2020*.
80. Sposob razrabotki zalezhei uglevodorodov: patent RU2704159-C1 [Method for developing hydrocarbon deposits: patent RU2704159-C1]. *Biulleten' Federal'noi sluzhby po intellektual'noi sobstvennosti no. 30 ot 24.10.2019*.
81. Sposob povysheniia koeffitsienta izvlecheniia nefti na trudnoizvlekaemykh i istoshchennykh mestorozhdeniiakh: patent RU-2648411-C1 [Method for increasing the oil recovery factor in hard-to-recover and depleted fields: patent RU-2648411-C1]. *Biulleten' Federal'noi sluzhby po intellektual'noi sobstvennosti no. 9 ot 26.03.2018*.
82. Gharibshahi R., Asadzadeh N., Jafari A. Toward Understanding the Effect of Electromagnetic Radiation on In Situ Heavy Oil Upgrading and Recovery: Background and Advancements. *Innovations in Enhanced and Improved Oil Recovery - New Advances. IntechOpen*, 2023, available at: //www.intechopen.com/chapters/1164534 DOI: 10.5772/intechopen.1002809 (accessed 14 August 2024).
83. Rassenfoss S. Oil Sands Get Wired - Seeking More Oil, Fewer Emissions. *Journal of petroleum technology*, 2012, no. 9, pp. 34-45. DOI: 10.2118/0912-0034-JPT
84. Bogdanov I., Torres J., Kamp A., Corre B. Comparative Analysis of Electromagnetic Methods for Heavy Oil Recovery. *SPE Heavy Oil Conference and Exhibition*. Kuwait, 2011, available at: //onepetro.org/SPEHOCE/proceedings-abstract/11HOCE/All-11HOCE/SPE-150550-MS/150809. DOI: 10.2118/150550-MS (accessed 14 August 2024).
85. Kairgeldina L., Sarsenbekuly B. Alternative methods of thermal oil recovery: a review. *Kazakhstan journal for oil & gas industry,* 2024, no. 6, pp. 50-63. DOI: 10.54859/kjogi108692
86. Gonzalez-Alvarez H., Pinzon-Diaz A., Delgadillo-Aya C., Munoz-Mazo E. Calculation of Temperature Distribution in Heavy Oil Reservoirs by Electromagnetic Heating. *CT&F-Ciencia, Tecnologia y Futuro*, 2023, no. 1, P. 31–42. DOI: 10.29047/01225383.690
87. Gomaa S., Salem K., El-Hoshoudy A. Enhanced Heavy and Extra Heavy Oil Recovery: Current Status and New Trends. *Petroleum*, 2024, no. 10, pp. 399-410. DOI: 10.1016/j.petlm.2023.10.001
88. Rabtsevich A.A., Lysenko D.V. Kolichestvennyi analiz sovremennykh tendentsii razvitiia neftianoi otrasli Respubliki Bashkortostan [Quantitative analysis of current trends in the development of the oil industry of the Republic of Bashkortostan]. *Ekonomika i upravlenie: nauchno-prakticheskii zhurnal*, 2021, no. 4, pp. 99-107. DOI: 10.34773/EU.2021.4.16
89. 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, pp. 15-22. DOI: 10.1016/j.juogr.2015.08.002
90. Rabtsevich A.A. Elektromagnitnye tekhnologii v sisteme innovatsionnykh metodov dobychi nefti na mestorozhdeniiakh Respubliki Bashkortostan [Electromagnetic technologies in the system of oil production innovative methods at the fields of the Republic of Bashkortostan]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Neft' i gaz*, 2023, no. 5, pp. 92-106. DOI: 10.31660/0445-0108-2023-5-92-106
91. 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, no. 6. DOI: 10.1115/1.4038853
92. Nigmatulin R.I., Saiakhov F.L., Kovaleva L.A. Perekrestnye iavleniia perenosa v dispersnykh sistemakh, vzaimodeistvuiushchikh s vysokochastotnym elektromagnitnym polem [Cross-transport phenomena in dispersed systems interacting with a high-frequency electromagnetic field]. *Doklady Akademii nauk*, 2001, no. 3, pp. 340-343.
93. 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, no. 2, pp. 207-224. DOI: 10.1080/09205071.2015.1102093
94. Fazeli H., Kord S. Application of Homotopy Perturbation Method to One-dimensional Transient Single-phase EM Heating Model. *Iranian Journal of Oil & Gas Science and Technology*, 2013, no. 2, pp. 20-33. DOI: 10.22050/ijogst.2013.3535
95. Morozkin N.N. Neizotermicheskaia fil'tratsiia viazkoplastichnoi nefti [Non-isothermal filtration of viscous plastic oil]. Abstract of Ph. D. thesis. Ufa, 2016, 23 p.
96. Shevchenko A.V. Razrabotka i realizatsiia chislennykh metodov modelirovaniia mnogokomponentnoi neizotermicheskoi fil'tratsii [Development and implementation of numerical methods for modeling multicomponent non-isothermal filtration]. Abstract of Ph. D. thesis. Moscow, 2015, 22 p.
97. Piatkov A.A. Neizotermicheskaia fil'tratsiia dvukhfaznoi zhidkosti v treshchinovato-poristykh sredakh [Non-isothermal filtration of two-phase liquid in fractured porous media]. Abstract of Ph. D. thesis. Tiumen', 2019, 20 p.
98. Varavva A.I. Neizotermicheskaia fil'tratsiia teplovydeliaiushchei khimicheski aktivnoi binarnoi smesi [Non-isothermal filtration of heat-generating chemically active binary mixture]. Abstract of Ph. D. thesis. Tiumen', 2019, 28 p.
99. Al'-Dzhabri A.Ia. Osrednennye modeli dvukhfaznoi neizotermicheskoi fil'tratsii v zadachakh optimal'noi razrabotki mestorozhdenii [Averaged models of two-phase non-isothermal filtration in problems of optimal development of deposits]. Abstract of Ph. D. thesis. Kazan', 2019, 19 p.
100. Nevmerzhitskii Ia.V. Metod linii toka dlia modelirovaniia fil'tratsii viazkoplastichnykh neftei [Streamline method for modeling viscoplastic oil filtration]. Abstract of Ph. D. thesis. Moscow, 2019, 18 p.
101. Rabtsevich A.A. Tselesoobraznost' primeneniia elektromagnitnykh tekhnologii v razrabotke neftianykh mestorozhdenii Respubliki Bashkortostan [Feasibility of Using Electromagnetic Technologies in the Development of Oil Fields of the Republic of Bashkortostan]. *Ekonomika i upravlenie: nauchno-prakticheskii zhurnal*, 2023, no. 2, pp. 64-71. DOI: 10.34773/EU.2023.2.12
102. Rabtsevich A.A. Kontseptual'naia model' razvitiia regiona s preobladaniem neftegazokhimicheskikh proizvodstv: diversifikatsiia i spetsializatsiia [Conceptual model for the development of a region dominated by petrochemical industries: diversification and specialization]. *Iskusstvennye obshchestva*, 2020, no. 3, 12 p. DOI: 10.18254/S207751800010898-6

Финансирование. Статья подготовлена за счет гранта Российского научного фонда № 22-11-20042.
Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Вклад авторов равноценен.