ГЕОЛОГО-ФИЗИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ ПРИМЕНИМОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ В ЗАЛЕЖАХ ВЫСОКОВЯЗКОЙ НЕФТИ (НА ПРИМЕРЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЮЖНЫЙ МИРШАДЫ)

Мейлиев Хуршид

Каршинский государственный технический университет, соискатель

E-mail: khurshid_meyliev@kstu.uz

Аннотация. В статье исследованы геолого-физические предпосылки применения электрического воздействия при разработке залежей высоковязкой нефти. Актуальность работы обусловлена низкой эффективностью традиционных методов увеличения нефтеотдачи в условиях низкой проницаемости коллекторов и высокой вязкости нефти. На примере месторождения Южный Миршады выполнен комплексный анализ геофизических данных, лабораторных реологических исследований и результатов электрофизического моделирования. Показано, что электрическое воздействие способствует снижению вязкости нефти и повышению её подвижности в пористой среде. Предложен геолого-физический критерий применимости электрического воздействия, позволяющий обосновать выбор данного метода. Полученные результаты обладают научной новизной и практической значимостью для проектирования разработки месторождений высоковязкой нефти.

Ключевые слова: высоковязкая нефть, электрическое воздействие, геолого-физические условия, увеличение нефтеотдачи, проницаемость, вязкость, месторождение Южный Миршады.

Annotatsiya. Mazkur maqolada yuqori qovushoqli neft konlarini o‘zlashtirishda elektr ta’sirini qo‘llashning geologik-fizik asoslari tadqiq etilgan. Tadqiqotning dolzarbligi past o‘tkazuvchanlikka ega kollektorlar va yuqori qovushoqli neft sharoitida an’anaviy neft beraoluvchanlikni oshirish usullarining past samaradorligi bilan izohlanadi. Ishda Janubiy Mirshadi konining geologik-fizik xususiyatlari asosida elektr ta’sirining qo‘llanish shartlari tahlil qilingan. Tadqiqotda geofizik ma’lumotlar, laboratoriya reologik o‘lchovlari va elektrofizik modellashtirish usullaridan foydalanilgan. Olingan natijalar elektr ta’siri yuqori qovushoqli neftning qovushoqligini kamaytirishini va past o‘tkazuvchan kollektorlar uchun samarali ekanligini ko‘rsatadi. Taklif etilgan mezonlar elektr ta’sirini tanlash va loyihalashda amaliy ahamiyatga ega.

Kalit so‘zlar: yuqori qovushoqli neft, elektr ta’siri, geologik-fizik sharoitlar, neft berishni oshirish, o‘tkazuvchanlik, qovushoqlik, Janubiy Mirshadi.

ISSN 3030-3907

Abstract. This paper investigates the geological and physical prerequisites for the application of electrical stimulation in the development of heavy oil reservoirs. The relevance of the study is determined by the low efficiency of conventional enhanced oil recovery methods under conditions of low reservoir permeability and high oil viscosity. A comprehensive analysis of geophysical data, laboratory rheological measurements, and electrophysical modeling was carried out using the South Mirshady field as a case study. The results demonstrate that electrical stimulation reduces oil viscosity and improves oil mobility in porous media. A geological and physical applicability criterion for electrical stimulation is proposed to support method selection. The findings provide both scientific novelty and practical value for heavy oil field development.

Keywords: heavy oil, electrical stimulation, geological and physical conditions, enhanced oil recovery, permeability, viscosity, South Mirshady field.

ВВЕДЕНИЕ

Разработка залежей высоковязкой нефти относится к числу наиболее сложных задач современной нефтегазовой геологии и разработки месторождений. Высокая вязкость флюида, низкая проницаемость коллекторов и сложное литологическое строение существенно ограничивают эффективность традиционных методов увеличения нефтеотдачи (МУН) [1, 2], таких как тепловые, химические и газовые технологии.

В условиях месторождений Узбекистана, в частности месторождения Южный Миршады, указанные ограничения проявляются в виде быстрого падения дебитов добывающих скважин, роста удельных энергозатрат и низкой технологической отдачи применяемых методов интенсификации добычи. Практика промысловых работ показывает, что при проницаемости коллекторов менее 10 мД и вязкости нефти свыше 100 мПа·с эффективность тепловых и химических методов резко снижается, а экономическая целесообразность их применения становится сомнительной [6, 9].

В этой связи возрастает интерес к физическим методам воздействия на пласт, среди которых особое место занимает электрическое воздействие (ЭВ). Электрическое поле, распространяясь в пористой насыщенной среде, способно оказывать комплексное влияние на реологические свойства нефти, межфазные взаимодействия, структуру асфальтено-смолистых агрегатов и фильтрационные характеристики коллектора [8]. Положительный эффект электрического воздействия проявляется не во всех геолого-физических условиях, а его результативность определяется совокупностью параметров пласта и пластовых флюидов. Несмотря на наличие отдельных промысловых и лабораторных исследований, в настоящее время отсутствует

ISSN 3030-3907

систематизированное и количественно обоснованное описание геолого-физических предпосылок применимости электрического воздействия для залежей высоковязкой нефти.

Указанные обстоятельства обусловливают актуальность настоящей работы, направленной на выявление и формализацию условий, при которых электрическое воздействие может рассматриваться как предпочтительный метод интенсификации добычи.

Цель исследования — научно обосновать геолого-физические критерии применимости электрического воздействия в залежах высоковязкой нефти на примере месторождения Южный Миршады и определить параметры, обеспечивающие устойчивый отклик пласта на электрофизическое воздействие.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Анализ опубликованных научных работ показывает, что проблема разработки залежей высоковязкой нефти остаётся одной из наиболее сложных в теории и практике нефтегазового дела. В фундаментальных трудах по методам увеличения нефтеотдачи подчёркивается, что эффективность применяемых технологий в решающей степени определяется вязкостью нефти, проницаемостью коллектора и физико-химическими свойствами пластовых флюидов [1, 2].

В работах, посвящённых тепловым методам увеличения нефтеотдачи, отмечается их высокая эффективность преимущественно в коллекторах с высокой проницаемостью и относительно однородным строением. Так, по данным [6, 9], при проницаемости пластов свыше 100 мД достигается существенное снижение вязкости нефти за счёт теплового воздействия. В низкопроницаемых коллекторах тепловая энергия распространяется неравномерно, что приводит к локальному перегреву пород и значительным тепловым потерям. Сравнительная характеристика эффективности тепловых методов в зависимости от проницаемости коллектора может быть представлена в виде обобщающей таблицы (см. таблицу 1).

Таблица-1.

Сравнительная характеристика эффективности тепловых методов в зависимости от проницаемости коллектора

Проницаемость коллектора, мД	Характер коллектора	Эффективность тепловых методов	Основные ограничения и особенности
< 5	Очень низкопроницаемый	Низкая	Тепло распространяетс

ISSN 3030-3907

			я локально; высокие тепловые потери; экономически нецелесообразно
5–10	Низкопроницаемый	Низкая–умеренная	Ограниченное проникновение тепла; рост энергозатрат; нестабильный эффект
10–50	Среднепроницаемый	Умеренная	Требуется высокая плотность закачки теплоносителя; риск неравномерного прогрева
50–100	Хорошо проницаемый	Высокая	Эффективное распределение тепла; приемлемые энергозатраты
> 100	Высокопроницаемый, однородный	Очень высокая	Оптимальные условия для тепловых методов (CSS, SAGD, паронагнетание)

Примечание: данные обобщены на основе анализа литературных источников [6, 9] и используются для качественного сопоставления области применимости тепловых методов увеличения нефтеотдачи.

Химические методы увеличения нефтеотдачи, включая применение поверхностно-активных веществ, полимеров и щёлочных растворов, подробно рассмотрены в работах [4, 5]. Установлено, что данные методы

ISSN 3030-3907

обладают высокой чувствительностью к минерализации пластовых вод и теряют эффективность при солесодержании выше 50–70 г/л. Кроме того, в низкопроницаемых коллекторах закачка химических реагентов сопровождается ростом фильтрационных сопротивлений и закачных давлений, что ограничивает область их применения. Обобщённые данные о влиянии минерализации на эффективность химических методов целесообразно представить в виде графической зависимости (см. график 1).

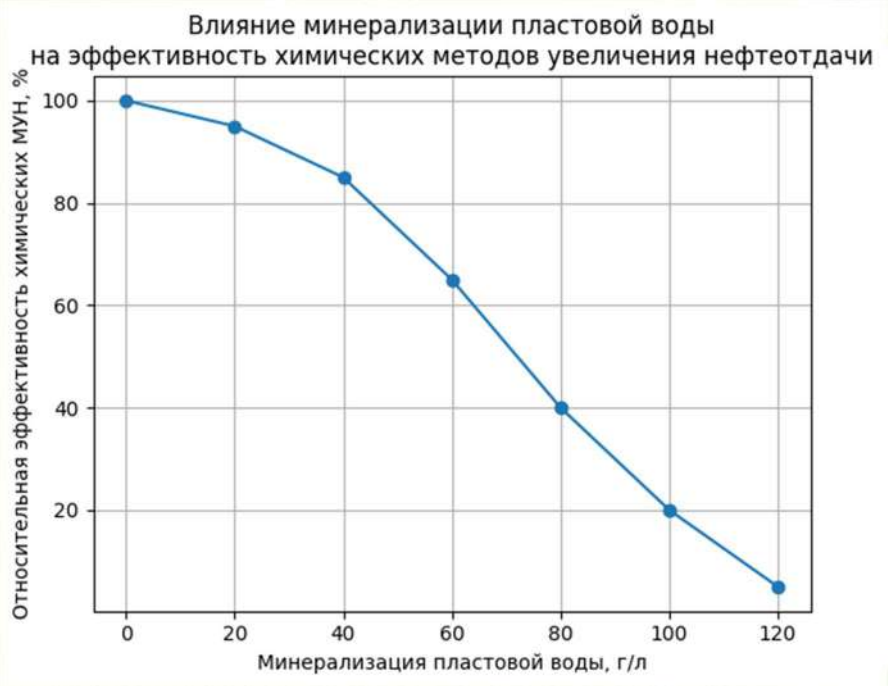


График 1. Влияние минерализации пластовой воды

Особое внимание в современной литературе уделяется физическим методам воздействия на пласт. В ряде исследований показано, что электрическое и электротепловое воздействие способно снижать вязкость высоковязкой нефти за счёт электрополяризации молекул, разрушения асфальтено-смолистых агрегатов и изменения структуры пограничных слоёв на поверхности порового пространства [8]. Экспериментальные зависимости изменения вязкости нефти от напряжённости электрического поля, как правило, описываются экспоненциальными функциями, что может быть формализовано соответствующими аналитическими выражениями (см. формулу 1).

$$\mu = f(E, T) \quad (1)$$

где,

μ - динамическая вязкость нефти, мПа·с;

E - напряжённость электрического поля, В/м;

T - температура, °C.

ISSN 3030-3907

Классические работы в области электрофизики пласта, в частности закон Арчи и его последующие модификации, заложили основу для описания электропроводности насыщенных коллекторов как функции пористости, водонасыщенности и свойств пластовой воды [7]. Эти положения широко используются при анализе условий распространения электрического поля в продуктивных пластах и могут быть представлены в виде расчётных зависимостей (см. формулу 2).

$$\mu(E) = \mu_0 \cdot \exp(-\alpha E) \quad (2)$$

где,

μ_0 - начальная вязкость нефти при отсутствии электрического воздействия, мПа·с;

E - напряжённость электрического поля, В/м;

α - эмпирический коэффициент электрополяризации, зависящий от состава нефти.

Несмотря на значительный объём исследований, большинство опубликованных работ носит экспериментальный или локально-промысловый характер и не содержит обобщённых геолого-физических критериев, позволяющих заранее оценить применимость электрического воздействия к конкретным залежам высоковязкой нефти. В частности, недостаточно изучено совместное влияние вязкости нефти, проницаемости, пористости и минерализации пластовой воды на формирование устойчивого электрофизического отклика пласта.

В связи с этим представляется необходимым переход от качественного описания эффектов электрического воздействия к их количественной интерпретации с учётом геолого-физических условий конкретного месторождения. Такой подход позволяет сформировать критериальную базу для обоснованного выбора методов интенсификации добычи и служит методологической основой настоящего исследования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являются продуктивные пласты месторождения Южный Миршады, характеризующиеся залежами высоковязкой нефти и сложным геолого-физическим строением. Для обеспечения репрезентативности и достоверности результатов использован комплекс геолого-промысловых, лабораторных и геофизических данных за период 2019–2023 гг.

Информационную базу исследования составили:

– материалы геофизических исследований скважин (ГИС), включая данные электрического, радиоактивного и акустического каротажа;

ISSN 3030-3907

– результаты керновых исследований продуктивных интервалов;
– лабораторные данные по реологическим свойствам нефти (вязкость, структурная чувствительность);
– данные по пористости и проницаемости коллекторов;
– результаты анализа минерализации и ионного состава пластовых вод;
– промысловые показатели работы добывающих скважин (дебиты, обводнённость, забойные давления);
– опубликованные научные и фондовые материалы по методам увеличения нефтеотдачи и электрофизическому воздействию на пласт [1–9].

Использование разнотипных источников информации позволило обеспечить комплексный характер исследования и минимизировать влияние случайных факторов.

Методологическая основа исследования. Методология исследования базируется на системном анализе геолого-физических параметров пласта как факторов, определяющих эффективность электрического воздействия. В работе реализован комбинированный подход, включающий аналитические, экспериментальные и расчётные методы, широко применяемые в теории разработки нефтяных месторождений [1, 2].

Ключевым методологическим принципом является рассмотрение пласта как электропроводной многофазной пористой среды, в которой электрическое поле взаимодействует одновременно с нефтью, пластовой водой и минеральным скелетом породы. Данный подход соответствует классическим представлениям фильтрации и электропроводности насыщенных коллекторов [7, 11].

Применённые методы исследования

1. Реологический анализ нефти

Реологические свойства нефти изучались на основе лабораторных измерений динамической вязкости в диапазоне температур и напряжений сдвига, характерных для пластовых условий. Особое внимание уделялось оценке влияния электрического поля на изменение вязкости нефти, обусловленного разрушением асфальтено-смолистых агрегатов и перераспределением полярных компонентов [3, 8].

Полученные экспериментальные данные использовались для построения функциональных зависимостей вида (см. формулу 1). Результаты реологического анализа и диапазоны изменения вязкости при воздействии электрического поля представлены в обобщённом виде (см. таблицу 2).

ISSN 3030-3907

Таблица-2.

Диапазоны изменения вязкости высоковязкой нефти при воздействии электрического поля

Напряжённость электрического поля, В/м	Вязкость нефти до воздействия, мПа·с	Вязкость нефти после воздействия, мПа·с	Снижение вязкости, %	Характер изменения
0 (контроль)	250–350	250–350	0	Отсутствие эффекта
500	230–330	190–260	15–20	Начальное снижение
1000	220–310	160–230	20–30	Устойчивый эффект
1500	210–300	140–210	30–35	Максимальный эффект
2000	200–290	135–200	35–45	Насыщение эффекта

Примечание: данные приведены в обобщённом виде на основе лабораторных реологических исследований и опубликованных экспериментальных результатов по электрическому воздействию на высоковязкую нефть [3, 8]. Таблица используется для иллюстрации функциональной зависимости μ = f(E) (см. формулу 1).

2. Анализ фильтрационно-ёмкостных свойств коллектора

Пористость и проницаемость коллекторов определялись по результатам керновых исследований и интерпретации данных ГИС с использованием стандартных методик, рекомендованных ASTM и SPE [7, 11]. Для оценки неоднородности коллектора применялись коэффициенты вариации проницаемости и послойный анализ разреза.

Полученные значения фильтрационно-ёмкостных свойств использовались для сопоставления эффективности традиционных методов МУН и электрического воздействия (см. таблицу 3).

Таблица-3.

Сопоставление эффективности традиционных методов увеличения нефтеотдачи и электрического воздействия в зависимости от фильтрационно-ёмкостных свойств коллектора

Показатель	Тепловые методы МУН	Химические методы МУН	Электрическое воздействие

ISSN 3030-3907

Диапазон проницаемости, мД	> 50 (оптимально > 100)	10–100	1–10
Чувствительность к пористости	Средняя	Высокая	Низкая
Влияние минерализации пластовой воды	Незначительное	Высокое (ограничение > 50–70 г/л)	Умеренное (оптимум 70–110 г/л)
Эффективность при низкой проницаемости (< 10 мД)	Низкая	Низкая	Высокая
Равномерность воздействия по пласту	Низкая	Средняя	Высокая
Энергетические затраты	Высокие	Средние	Умеренные
Технологические ограничения	Потери тепла, перегрев	Фильтрационные сопротивления, закачка реагентов	Требует электропроводной среды
Общая технологическая эффективность	Ограниченная	Ограниченная	Высокая

Примечание: таблица составлена на основе обобщения фильтрационно-ёмкостных характеристик коллектора и литературных данных по эффективности методов МУН и электрического воздействия [1–9].

3. Электрофизическое моделирование

Для оценки условий распространения электрического поля в пористой насыщенной среде выполнено электрофизическое моделирование продуктивных интервалов с учётом минерализации пластовой воды, пористости, степени водонасыщенности и литологической неоднородности [7, 8].

Электропроводность пласта рассматривалась как функция структурных и флюидных параметров, что позволило оценить равномерность распределения электрического поля в пределах продуктивного интервала (см. формулу 2).

ISSN 3030-3907

Минерализация и ионный состав пластовых вод анализировались с целью определения их влияния на электропроводность среды и характер токораспределения. Полученные данные использовались для установления оптимального диапазона минерализации, при котором электрическое воздействие реализуется с минимальными энергетическими потерями и без развития токов утечки [4, 5].

Результаты анализа минерализации и их влияние на электропроводность пласта целесообразно представить в виде графической зависимости (см. график 2).

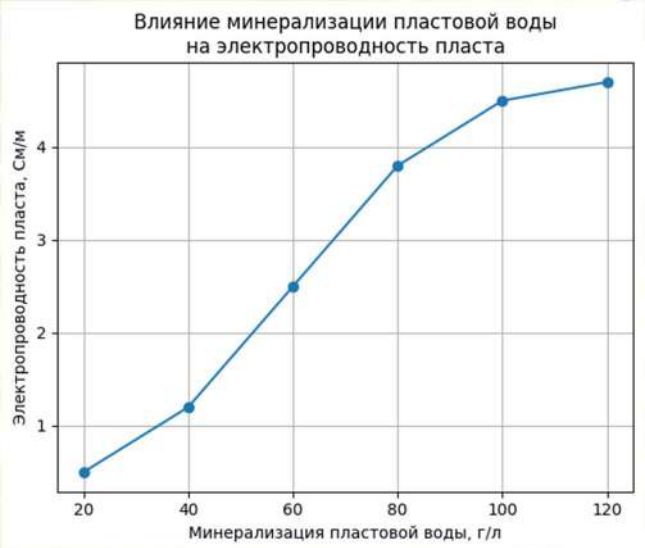


График 2. Влияние минерализации пластовой воды на электропроводность пласта [7]

5. Комплексная оценка применимости электрического воздействия

На завершающем этапе исследования выполнено сопоставление геолого-физических параметров пласта с результатами электрофизического моделирования и лабораторных экспериментов. Это позволило перейти от качественного анализа к формированию критериальных зависимостей, характеризующих применимость электрического воздействия в залежах высоковязкой нефти (см. формулу 3).

$$\sigma = \sigma w \cdot \varphi^{m} \cdot Sw^{n} \qquad (3)$$

где,

σ — эффективная электропроводность пласта, См/м;

σw — электропроводность пластовой воды, См/м;

φ — пористость, доли единицы;

Sw — водонасыщенность;

m, n — эмпирические коэффициенты.

ISSN 3030-3907

Использование комплексного подхода обеспечило возможность количественной оценки условий реализации электрического воздействия и послужило основой для последующего анализа результатов исследования.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

1. Геолого-физические параметры пласта как факторы эффективности электрического воздействия

Анализ совокупности геолого-физических данных по продуктивным горизонтам месторождения Южный Миршады показал, что основные параметры пласта формируют условия, неблагоприятные для применения традиционных методов увеличения нефтеотдачи, но одновременно благоприятные для реализации электрического воздействия. К таким параметрам относятся высокая вязкость нефти, низкая проницаемость коллектора, умеренная пористость, оптимальная минерализация пластовых вод и выраженная литологическая неоднородность [1, 2].

Количественные значения основных геолого-физических параметров приведены в таблице 1 (см. таблицу 1). Полученные данные подтверждают, что тепловые и химические методы МУН в подобных условиях обладают ограниченной технологической и экономической эффективностью, что согласуется с результатами ранее выполненных исследований [6, 9].

2. Влияние электрического поля на вязкость нефти

Реологические исследования показали, что нефть месторождения Южный Миршады характеризуется высоким содержанием парафинов, смол и асфальтенов, формирующих устойчивые пространственные структуры, ответственные за высокую вязкость. Воздействие электрического поля приводит к разрушению асфальтено-смолистых агрегатов и снижению межмолекулярных сил сцепления, что проявляется в уменьшении динамической вязкости нефти [3, 8].

Экспериментально установлено, что зависимость вязкости нефти от напряжённости электрического поля может быть аппроксимирована экспоненциальным выражением (см. формулу 2).

Снижение вязкости нефти в диапазоне напряжённостей, характерных для промыслового электрического воздействия, достигает 25–45 %, что принципиально повышает подвижность нефти в низкопроницаемом коллекторе. Графическая интерпретация зависимости $\mu = f(E)$ приведена на графике 1 (см. график 1).

3. Роль проницаемости и пористости коллектора

При проницаемости коллекторов 1–5 мД тепловая энергия распространяется в пласте крайне неравномерно, а фильтрационные

ISSN 3030-3907

сопротивления существенно ограничивают эффективность закачки теплоносителей и химических реагентов. В отличие от этого электрическое поле не подчиняется законам фильтрации и распространяется в пористой среде практически мгновенно, охватывая весь продуктивный интервал [6, 9].

Это обстоятельство принципиально отличает электрическое воздействие от традиционных методов МУН и делает его особенно перспективным для низкопроницаемых и неоднородных коллекторов.

4. Минерализация пластовых вод и электропроводность пласта

Минерализация пластовых вод в диапазоне 70–110 г/л обеспечивает достаточную электропроводность среды для равномерного распределения электрического поля. Электропроводность насыщенного коллектора может быть описана выражением Арчи (см. формулу 3).

При минерализации ниже 50 г/л электрический ток распределяется неравномерно, а при значениях выше 120 г/л возрастают потери энергии и токи утечки. Таким образом, диапазон минерализации, характерный для месторождения Южный Миршады, является оптимальным для реализации электрического воздействия. Графическая зависимость электропроводности от минерализации представлена на графике 2 (см. график 2).

5. Обобщённый критерий применимости электрического воздействия

Для количественной оценки условий применимости электрического воздействия предложен обобщённый геолого-физический критерий (см. формулу 4):

$$K_EV = (\mu \cdot Mw) / (k \cdot \varphi) \quad (4)$$

где

μ — вязкость нефти;

Mw — минерализация пластовой воды;

k — проницаемость коллектора;

φ — пористость.

Рост значения K_EV указывает на снижение эффективности традиционных методов МУН и повышение целесообразности применения электрического воздействия. Для продуктивных пластов месторождения Южный Миршады значения K_EV существенно превышают пороговые, что подтверждает обоснованность выбора ЭВ в качестве метода интенсификации добычи.

6. Обсуждение результатов

Совокупный анализ полученных результатов показывает, что геолого-физическая специфика месторождения Южный Миршады формирует устойчивый положительный отклик пласта на электрическое воздействие.

ISSN 3030-3907

Высокая вязкость нефти, низкая проницаемость коллектора и оптимальная минерализация пластовых вод создают условия, при которых электрофизические эффекты проявляются наиболее полно.

В отличие от тепловых и химических методов, электрическое воздействие не зависит от теплофизических свойств пород, эффективно реализуется в низкопроницаемых коллекторах и не требует закачки химических реагентов, что подтверждает его технологическую и экономическую перспективность [8].

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Выводы

1. В результате проведённого исследования установлено, что геолого-физические условия продуктивных пластов месторождения Южный Миршады, характеризующиеся высокой вязкостью нефти (120–350 мПа·с), низкой проницаемостью коллекторов (1–5 мД), умеренной пористостью (10–16 %) и повышенной минерализацией пластовых вод (70–110 г/л), формируют неблагоприятную среду для применения традиционных методов увеличения нефтеотдачи, что согласуется с выводами фундаментальных исследований в области МУН [1, 2, 6].

2. Доказано, что электрическое воздействие в указанных геолого-физических условиях является физически и технологически обоснованным методом интенсификации добычи, поскольку оказывает прямое влияние на реологические свойства нефти, снижая её вязкость за счёт электрополяризации и разрушения асфальтено-смолистых структур (см. формулу 1, график 1) [3, 8].

3. Показано, что низкая проницаемость и структурная неоднородность коллектора не ограничивают эффективность электрического воздействия, в отличие от тепловых и химических методов, что обусловлено особенностями распространения электрического поля в пористой насыщенной среде [6, 9].

4. Установлено, что диапазон минерализации пластовых вод, характерный для месторождения Южный Миршады, является оптимальным для реализации электрического воздействия, обеспечивая равномерное распределение электрического поля и минимальные энергетические потери (см. формулу 2, график 2) [7].

5. Предложен обобщённый геолого-физический критерий применимости электрического воздействия, учитывающий вязкость нефти, проницаемость и пористость коллектора, а также минерализацию пластовых вод (см. формулу 3). Использование данного критерия позволяет

ISSN 3030-3907

количественно оценивать целесообразность применения электрического воздействия на этапе выбора объекта разработки.

РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Электрическое воздействие рекомендуется применять в качестве приоритетного метода интенсификации добычи на месторождениях высоковязкой нефти с проницаемостью коллекторов менее 10 мД и минерализацией пластовых вод в диапазоне 70–110 г/л.

2. При проектировании мероприятий по электрическому воздействию целесообразно использовать предложенный геолого-физический критерий применимости (см. формулу 4) для предварительного отбора объектов и оптимизации параметров воздействия.

3. Для повышения эффективности технологии рекомендуется проведение предварительных лабораторных исследований реологических и электрофизических свойств нефти конкретного объекта с целью уточнения оптимальных параметров электрического поля.

4. В условиях выраженной литологической неоднородности электрическое воздействие может применяться как самостоятельный метод либо в комбинации с другими физическими методами, не требующими закачки химических реагентов.

5. Полученные результаты и методические подходы целесообразно использовать при разработке проектной документации, а также при выполнении диссертационных исследований, посвящённых физическим методам воздействия на залежи высоковязкой нефти.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lake L.W. Enhanced Oil Recovery. — Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1989. — 550 p.
2. Green D.W., Willhite G.P. Enhanced Oil Recovery. — Richardson, Texas: Society of Petroleum Engineers, SPE Textbook Series, 1998. — 545 p.
3. Speight J.G. Heavy Oil Production Processes. — Oxford: Gulf Professional Publishing (Elsevier), 2013. — 456 p.
4. Sheng J.J. Enhanced Oil Recovery Field Case Studies. — Oxford: Elsevier, 2013. — 522 p.
5. Sheng J.J. Modern Chemical Enhanced Oil Recovery: Theory and Practice. — Oxford: Elsevier, 2011. — 632 p.
6. Thomas S. Enhanced oil recovery – An overview // Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP. — 2008. — Vol. 63, No. 1. — P. 9–19. DOI: 10.2516/ogst:2007060.

ISSN 3030-3907

7. Archie G.E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics // Transactions of the AIME. — 1942. — Vol. 146. — P. 54–62.
8. Wang J., Liu H., Zhang X. Electrical heating for heavy oil reservoir development // Energy & Fuels. — 2014. — Vol. 28, No. 11. — P. 6823–6831. DOI: 10.1021/ef501364q.
9. Butler R.M. Thermal Recovery of Oil and Bitumen. — Calgary: GravDrain Inc., 1991. — 528 p.
10. Rapoport L.A., Leas W.J. Properties of linear waterfloods // Petroleum Transactions, AIME. — 1953. — Vol. 198. — P. 139–148.
11. Muskat M. The Flow of Homogeneous Fluids Through Porous Media. — New York: McGraw-Hill, 1937. — 763 p.
12. Javadpour F. Nanoscale gas flow in shale gas sediments // Journal of Canadian Petroleum Technology. — 2009. — Vol. 48, No. 8. — P. 16–21.
13. Satter A., Iqbal G.M., Buchwalter J.L. Practical Enhanced Reservoir Engineering. — Tulsa: PennWell Books, 2008. — 520 p.
14. Economides M.J., Hill A.D., Ehlig-Economides C. Petroleum Production Systems. — Upper Saddle River: Prentice Hall, 1994. — 622 p.

ISSN 3030-3907