

УДК 532.685

## ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫТЕСНЕНИЯ ЖИДКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ ИЗ МОДЕЛИ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

© 2024 г. Р. Р. Зиннатуллин\*, Т. Р. Мазитов

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Башкортостан, Россия

\*E-mail: rasulz@yandex.ru

Поступило в редакцию 05.12.2023 г.

После доработки 19.01.2024 г.

Принято к публикации 14.02.2024 г.

В работе исследуется вытеснение из модели пористой среды жидких углеводородов на примере нефтей с различным содержанием асфальтосмолопарафиновых веществ, а также диэлектрическими свойствами при воздействии на насыщенную нефтью модель электромагнитным полем определенной частоты. Приводятся результаты экспериментальных исследований, показывающие корреляцию прироста коэффициента нефтевытеснения от содержания в нефтях асфальтосмолопарафиновых соединений и диэлектрических параметров нефтей. Показано, что высокое содержание полярных компонентов нефти (асфальтенов и смол) приводит к наибольшему приросту коэффициента нефтевытеснения, а с ростом содержания парафинов наблюдается снижение прироста коэффициента нефтевытеснения. Также с увеличением значения тангенса угла диэлектрических потерь происходит увеличение прироста коэффициента вытеснения нефти. Получено, что для всех исследуемых нефтей наблюдается положительный прирост коэффициента нефтевытеснения при наличии электромагнитного поля.

DOI: 10.31857/S0040364424020215

### ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы связана с ухудшением структуры запасов жидких углеводородов, их высокой вязкостью и сложной реологией, а также содержанием в них высокомолекулярных соединений (асфальтенов, смол, парафинов). Одним из термических методов решения проблемы может оказаться использование энергии электромагнитного поля для снижения вязкости углеводородов и улучшения реологических свойств за счет изменения микроструктуры асфальтосмолопарафиновых соединений. Технология электромагнитного нагрева призабойной зоны пласта реализуется с помощью добывающей скважины. В работах [1–4] приводятся результаты успешных лабораторных и опытно-промышленных испытаний системы обогрева высокочастотным электромагнитным полем нефтяных пластов, где описывается возможность нагрева пласта электромагнитной энергией, а также способы, техника и оборудование для его осуществления. Количество энергии для разогрева пласта до нужной температуры зависит от режимов воздействия (мощность и время), которые выбираются исходя из диэлектрических свойств нефтеносных пород. Отличительной особенностью метода является то, что за счет диэлектрических потерь

в насыщенных углеводородами породах происходит преобразование энергии электромагнитных волн в тепловую энергию [5, 6]. При этом электромагнитное поле оказывает не только тепловой, но и силовой эффект за счет взаимодействия диполей полярных компонентов углеводородов с электромагнитным полем [7]. Основными электрофизическими характеристиками, количественно описывающими степень взаимодействия электромагнитных полей со средой, являются диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь, которые отвечают за резонансное взаимодействие поля с веществом на микро- и наноуровнях. Для каждого сорта нефти необходимо индивидуально подбирать параметры воздействия электромагнитного поля, основным из которых является частота. Для этого необходимо предварительное исследование состава и диэлектрических свойств нефти, по которым определяются области эффективных частот электромагнитного поля, воздействующего на нефть.

Целью данной работы является исследование процесса вытеснения водой нефтей с различными диэлектрическими параметрами и составом из насыщенных нефтью моделей пористой среды при воздействии электромагнитного поля определенной частоты.

Научная новизна исследований заключается в том, что при вытеснении нефти из насыпных моделей пористой среды каждый образец нефти вытесняется при воздействии электромагнитным полем определенной частоты, подобранной заранее индивидуально для каждой нефти на основе частотно-температурных зависимостей тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta_{\text{max}}$ . Также исследование проводится на малых мощностях генератора электромагнитного поля. Выбор малых мощностей связан с тем, что при ранее проведенных исследованиях использовались мощные излучатели электромагнитной энергии, которые разогревали исследуемые образцы нефти до температур выше температур начала плавления парафина (40°C) [1, 8]. При таких температурах было невозможно проанализировать электромагнитное воздействие, приводящее к изменению структуры флюида за счет поляризации полярных высокомолекулярных соединений нефти.

#### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В качестве объектов исследования использовались образцы реальных нефтей с различными физико-химическими свойствами (таблица).

Так как степень воздействия электромагнитного поля на нефть зависит от диэлектрических параметров и их дисперсии, были определены частотно-температурные зависимости тангенса угла диэлектрических потерь и резонансные частоты  $f_{\text{rez}}$ , соответствующие максимальному значению тангенса угла диэлектрических потерь для каждой нефти, при которых происходит максимальное поглощение электромагнитной энергии полярными компонентами нефти (таблица).

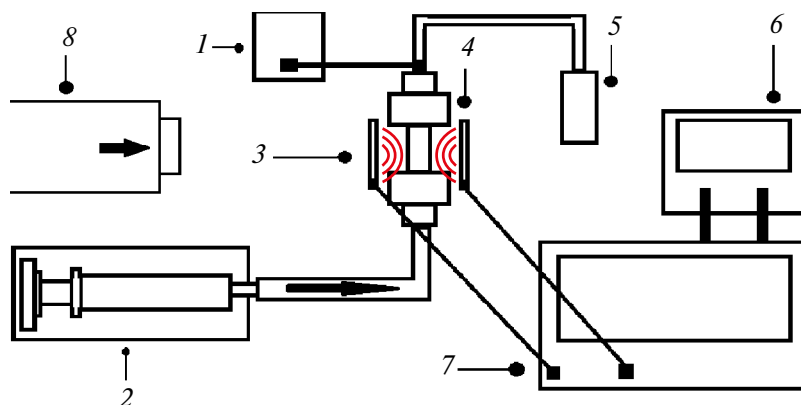
На рис. 1 представлена схема лабораторного стенда для исследования вытеснения нефти пластовой водой из модели пористой среды.

Для изготовления моделей пористой среды использовалась полипропиленовая труба с внутренним диаметром 16.2 мм. Полипропиленовая труба длиной 150 мм спаивалась со штуцером. На внутренние стенки модели тонким слоем приклеивался насыпной материал для устранения пристеночного течения. Затем в модель насыпался кварцевый песок с размерами зерен фракции 0.2–0.1 мм, представляющий собой пористую среду, и труба закрывалась вторым штуцером. Между трубой и штуцером устанавливалась латунная сетка с размером ячейки 0.05 мм для предотвращения высыпания песка. Модели имели одинаковые геометрические размеры и значения пористости. Пористость моделей пористой среды составила 34–36%. Образцы отличались содержанием высокомолекулярных соединений и диэлектрическими параметрами насыщающих пористую среду нефтей (таблица).

Пластовая вода, вытесняющая нефть из модели пористой среды, подавалась через шприцевой насос при постоянном расходе 0.25 мл/мин. Сплошной фронт вытеснения достигался при помощи установки модели в вертикальное положение, при котором вода вытесняла нефть снизу вверх. Модель пористой среды помещалась в электромагнитное поле. Частота электромагнитного поля подбиралась для каждой нефти индивидуально по диэлектрическим параметрам. Расстояние между пластинами генератора составляло 30 мм. Напряженность электрического поля составляла 120 В/м. При таких напряженностях поля происходил незначительный нагрев нефти, при котором вязкость флюида практически не меняется. Эксперименты по вытеснению нефти без электромагнитного воздействия проводились при тех же температурах, до которых нагревалась аналогичная модель при электромагнитном воздействии. На выходе из модели флюид отбирался в мерный цилиндр. В ходе эксперимента для каждой модели определялся коэффициент вытеснения нефти как отношение объема вытесненной из модели

Параметры нефтей при электромагнитной обработке

№ образца нефти	1	2	3	4
Содержание асфальтенов, %	1.19	0.82	3.51	4.92
Содержание смол, %	10.6	8.79	11.6	13.6
Содержание парафинов, %	6.8	5.87	5.52	3.8
Параметр (A + C)/П	1.73	1.64	2.74	4.87
$\text{tg}\delta_{\text{max}}$	0.015	0.014	0.018	0.021
$f_{\text{rez}}$	5	13	6	9
Частота излучения электромагнитного поля, МГц	5	12.5	6	9



**Рис. 1.** Схема лабораторного стенда для вытеснения нефти из модели пористой среды: 1 – датчик температуры, 2 – шприцевой насос, 3 – электроды для создания электромагнитного поля, 4 – модель пористой среды, 5 – мерный цилиндр, 6 – осциллограф, 7 – генератор электромагнитных волн, 8 – источник тепла.

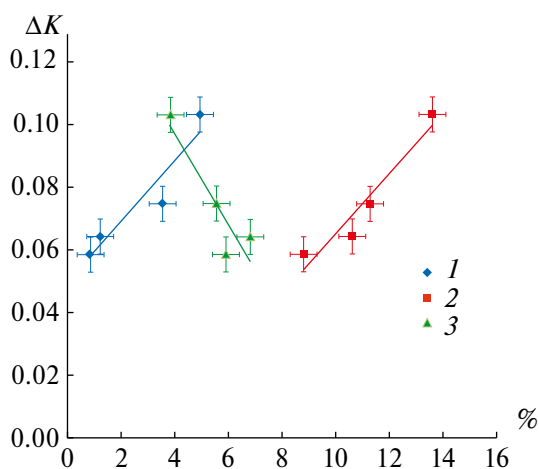
нефти к объему первоначальной нефти в модели:  $K_{\text{выт}} = V_{\text{выт}} / V_{\text{пер}}$ .

По полученным данным для каждого вида нефти определялся дополнительный прирост коэффициента вытеснения нефти  $\Delta K$ . Оказалось, что при воздействии электромагнитным полем определенной частоты в процессе вытеснения нефти водой из модели пористой среды прирост коэффициента вытеснения нефти составил от 0.06 до 0.11. Самый большой  $\Delta K$  был получен для образца нефти № 4 с наибольшим содержанием асфальтенов и смол и наименьшим содержанием парафинов. Кроме того, образец нефти № 4 имел наибольшее значение тангенса угла диэлектрических потерь среди исследуемых нефтей.

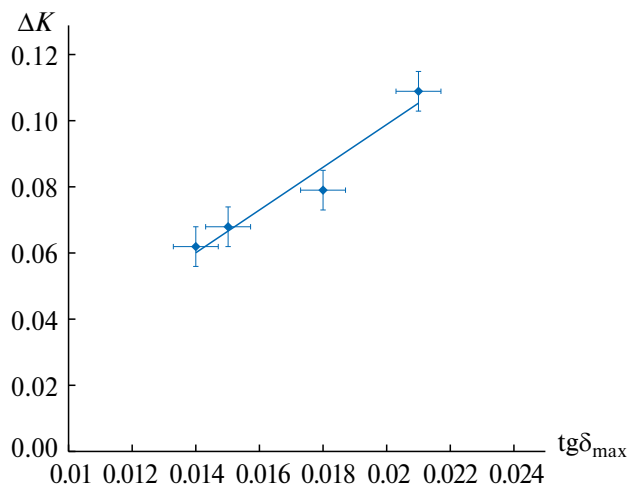
На рис. 2, 3 представлены зависимости прироста коэффициента вытеснения нефти  $\Delta K$  от содержания в нефти асфальтенов, смол и парафина, а также от значения тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta_{\text{max}}$  при соответствующей резонансной частоте  $f_{\text{рез}}$ . Прирост коэффици-

ента вытеснения нефти зависит от состава и диэлектрических свойств нефти. С ростом содержания асфальтенов и смол наблюдается увеличение прироста коэффициента вытеснения нефти. Увеличение количества парафинов в исследуемых нефтях приводит к снижению прироста коэффициента вытеснения нефти. Для определения одновременного влияния на коэффициент вытеснения нефти асфальтенов и смол (компонентов с полярными молекулами) и парафинов при электромагнитном воздействии можно ввести параметр  $(A + C)/\Pi$ , с ростом которого прирост коэффициента нефтевытеснения увеличивается (таблица).

Для нефтей с большим значением тангенса угла диэлектрических потерь при частоте воздействия поля происходит наибольший прирост коэффициента вытеснения нефти. Следует также отметить, что при воздействии электромагнитным полем определенной частоты для каждого образца нефти наблюдается положительный прирост коэффициента нефтевытеснения.



**Рис. 2.** Зависимости  $\Delta K$  от содержания компонентов в нефти: 1 – асфальтенов, 2 – смол, 3 – парафинов.



**Рис. 3.** Зависимость  $\Delta K$  от  $\text{tg}\delta_{\text{max}}$  для исследуемых нефтей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований показано, что влияние электромагнитного поля определенной частоты для каждого вида нефти приводит к повышению коэффициента вытеснения нефти. С увеличением процентного содержания в составе нефти асфальтенов и смол (полярные компоненты) наблюдается увеличение прироста коэффициента вытеснения нефти, а увеличение процентного содержания парафина (неполярный компонент) в нефти приводит к уменьшению прироста коэффициента вытеснения нефти. Но при этом воздействие электромагнитного поля определенной частоты во всех случаях способствует положительному приросту коэффициента нефтевытеснения. Выявлено, что с увеличением тангенса угла диэлектрических потерь, соответствующего резонансной частоте (частоте воздействия), происходит увеличение прироста коэффициента вытеснения нефти, что объясняется более интенсивным воздействием поля на полярные составляющие нефти.

Исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-11-20042).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковалева Л.А., Зиннатуллин Р.Р., Султангузин Р.Ф., Шрубковский И.И., Мясников А.В. Экспериментальные исследования нагрева нефтенасыщенных горных пород электромагнитным полем // ТВТ. 2017. Т. 55. № 5. С. 858.
2. Давлетбаев А.Я., Ковалева Л.А., Зиннатуллин Р.Р. Способ разработки залежи высоковязкой нефти. Патент RU2454532C1. 2012. 9 с.
3. Rassenfoss S. Oil Sands Get Wired-seeking More Oil, Fewer Emissions // J. Petroleum Technol. 2012. V. 64. № 9. P. 34.
4. Despande S.R., Wright B.N., Watt A. Techniques for Installing Effective Solvent Extraction Incorporating Electromagnetic Heating ("ESEIEH") Completions // World Heavy Oil Congress. Edmonton, AB, Canada, 2015. WHOC15-317.
5. Галимов Р.А., Харлампиди Х.Э., Марданишин Р.Н., Кротов В.В., Гандельман Л.Я. Электромагнитная обработка нефтей // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. 2011. № 1. С. 20.
6. Давлетбаев А.Я., Ковалева Л.А., Насыров Н.М. Исследование процессов тепломассопереноса в многослойной среде при нагнетании смешивающего агента с одновременным электромагнитным воздействием // ТВТ. 2009. Т. 47. № 4. С. 605.
7. Kovaleva L., Zinnatullin R., Musin A., Gabdrifkov A., Sultanguzhin R., Kireev V. Influence of Radio-frequency and Microwave Electromagnetic Treatment on Water-in-oil Emulsion Separation // Colloids Surf., A. 2021. V. 614. P. 126081.
8. Зиннатуллин Р.Р., Мусин А.А., Ковалева Л.А. Исследование нагрева нефтематеринских пород в высокочастотном электромагнитном поле методом физико-математического моделирования // ТВТ. 2022. Т. 60. № 1. С. 149.