

Научная статья

УДК 532

doi: 10.17223/19988621/98/8

## Влияние электромагнитного поля на характеристики пористых материалов, заполненных сложными коллоидными системами органических соединений

Вилена Ильшатовна Валиуллина<sup>1</sup>, Рушан Ринатович Галеев<sup>2</sup>,  
Расул Рашитович Зиннатуллин<sup>3</sup>, Айрат Ахматович Мусин<sup>4</sup>,  
Лиана Ароновна Ковалева<sup>5</sup>

*1, 2, 3, 4, 5 Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия*

*<sup>1</sup> valiullina.vilena@mail.ru*

*<sup>2</sup> galeevr93@gmail.com*

*<sup>3</sup> rasulz@yandex.ru*

*<sup>4</sup> mus-airat@yandex.ru*

*<sup>5</sup> liana-kovaleva@yandex.ru*

**Аннотация.** Рассматриваются процессы влияния электромагнитного поля на фильтрационные характеристики пористой среды. Обнаружено, что вязкость нефти после электромагнитного воздействия при малых мощностях поля возрастает из-за структурных преобразований. Замечено, что при поперечном расположении электродов эффективная проницаемость по нефти снижается более чем на 20%, в отличие от продольного расположения электродов, когда проницаемость практически не меняется. Это объясняется возникновением эффекта запирания на локальных участках, наиболее приближенных к электродам, где формируется наибольший градиент напряженности ЭМП.

**Ключевые слова:** фильтрация, эффективная проницаемость, коэффициент динамической вязкости, переменное электромагнитное поле

**Благодарности:** Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-11-20042.

**Для цитирования:** Валиуллина В.И., Галеев Р.Р., Зиннатуллин Р.Р., Мусин А.А., Ковалева Л.А. Влияние электромагнитного поля на характеристики пористых материалов, заполненных сложными коллоидными системами органических соединений // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2025. № 98. С. 84–96. doi: 10.17223/19988621/98/8

Original article

## Impact of the electromagnetic field on the properties of porous materials containing complex colloidal mixtures of organic compounds

Vilena I. Valiullina<sup>1</sup>, Rushan R. Galeev<sup>2</sup>, Rasul R. Zinnatullin<sup>3</sup>,  
Ayrat A. Musin<sup>4</sup>, Liana A. Kovaleva<sup>5</sup>

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russian Federation

<sup>1</sup> valiullina.vilena@mail.ru

<sup>2</sup> galeevr93@gmail.com

<sup>3</sup> rasulz@yandex.ru

<sup>4</sup> mus-airat@yandex.ru

<sup>5</sup> liana-kovaleva@yandex.ru

**Abstract.** A number of studies have examined the influence of electromagnetic fields (EMFs) on petroleum liquids. An interesting problem is to investigate the behavior of these liquids in porous media due to the presence of complex hydrocarbons. This paper investigates the features of the viscous oil flow in porous-medium models under EMF exposure. The main component of the experimental setup was a cell with electrodes positioned both across and along the flow direction. It was found that the maximum value of the dielectric loss tangent was reached at a frequency of 5 MHz. The dynamic viscosity coefficient increased after EMF exposure, indicating structural changes in the oil. The fluid flow rate was measured as a function of temperature at different pressure levels. The application of the field led to a decrease in the flow rate compared to filtration without exposure. Considering the design features of the micromodel and the measured dynamic viscosity coefficient, it was assumed that the effect was caused by the dielectrophoretic forces acting on the polar components of the oil and their structural transformation. Such a reduction of the flow rate can be explained by the increased dynamic viscosity and deterioration of the filtration characteristics of the porous medium, which results in a blocking effect in the local areas closest to the electrodes, where the highest electric-field-strength gradient is formed.

**Keywords:** filtration, permeability, dynamic viscosity coefficient, alternating electromagnetic field

**Acknowledgments:** The reported study was financially supported by the Russian Science Foundation (project No. 22-11-20042).

**For citation:** Valiullina, V.I., Galeev, R.R., Zinnatullin, R.R., Musin, A.A., Kovaleva, L.A. (2025) Impact of the electromagnetic field on the properties of porous materials containing complex colloidal mixtures of organic compounds. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 98. pp. 84–96. doi: 10.17223/19988621/98/8

### Введение

В настоящее время нефть является одним из важнейших источников энергии. Добыча высоковязкой нефти – важная практическая задача, поскольку запасы таких месторождений значительны, а их роль в общих запасах органического сырья постоянно возрастает. Такая нефть представляет собой суспензию асфальтеновых

коллоидов, стабилизированных смолами [1–3], что приводит к необычному поведению тяжелой нефти, протекающей по трубам и пористым средам [4–7], а при изменении внешних условий зачастую демонстрирует аномальное изменение свойств [8]. Как правило, тяжелая нефть представляет собой разновидность ньютоновской жидкости и относится к бингамовской жидкости. Это мнение подтверждено многими экспериментальными данными [9]. Но реологические характеристики тяжелой нефти зависят от температуры окружающей среды, – это может быть ньютоновская жидкость с более высокой температурой [10].

Из-за высокой вязкости нефти, а также из-за частого засорения призабойной зоны скважины отложениями коллоидных поверхностно-активных компонентов добыча нефти становится возможной только после предварительной термической обработки пласта. Так, в статье [11] с помощью экспериментов были изучены характеристики протекания через капиллярную и пористую среду различных видов тяжелой нефти при различных температурах. Показано, что тяжелая нефть, содержащая асфальтеновые коллоиды, обладает реологическими свойствами предела текучести (жидкости Бингама). Но обработка горячим паром или горячей жидкостью не всегда эффективна. Более того, их широкое применение может привести к серьезным экологическим последствиям в виде нарушений гидрогеологической обстановки. Одним из перспективных методов термической обработки является электромагнитный нагрев продуктивных пластов [12]. Благодаря глубокому проникновению и объемному тепловыделению, а также отсутствию теплоносителя электромагнитное излучение может обеспечить по сравнению с традиционными методами высокую скорость и равномерность нагрева, возможность оптимального управления и автоматизации технологических процессов, практически исключить вредное воздействие на окружающую среду [13].

В [14] обнаружено, что основные изменения в микроструктуре эмульсии происходят за доли секунды, независимо от частоты и напряжения приложенного поля. Увеличение напряжения и частоты приложенного электрического поля усиливает эффект коалесценции, а концентрация капель приводит к повышению эффективности соединения капель эмульсии. В работе [15] рассматривается влияние высокочастотных электромагнитных полей и электрического нагрева на процессы массо- и теплопередачи в многокомпонентной углеводородной системе, протекающей в пористых средах. Были выявлены критические параметры, такие как снижение вязкости, которые влияют на извлечение тяжелой нефти под воздействием этих вариантов нагрева. Замечено, что высокочастотное электромагнитное поле воздействует на полярные компоненты нефти, десорбируя их с поверхности породы и увеличивая добычу. Эта важнейшая роль высокочастотного поля в процессе адсорбции при вытеснении высоковязких нефтей в конечном итоге привела к меньшему осаждению асфальтенов и закупориванию пор.

В сырой нефти содержатся различные углеводородные соединения, такие как асфальтены, смолы, ароматические вещества и воски; самым тяжелым компонентом сырой нефти со сложной структурой молекул являются асфальтены, поэтому их молекулярная структура до конца не изучена [16, 17]. Отложение асфальтенов на поверхности пород-коллекторов пагубно сказывается на продуктивности углеводородов. Это объясняется тем, что молекулы асфальтенов имеют тенденцию к образованию огромных скоплений. Асфальтены накапливаются на границах раздела твердое вещество–жидкость или жидкость–жидкость–жидкость в процессе

химического заводнения, в результате чего из-за уменьшения межфазного натяжения и изменения смачиваемости твердой поверхности образуются микроэмульсии [18]. Несмотря на то, что изучение взаимодействия асфальтенов с соевым раствором, который закачивают в пласт для увеличения нефтеотдачи, все еще продолжается, в некоторых исследованиях были высказаны разные мнения, согласно которым одни исследователи утверждали, что присутствие водных микроэмульсий не оказывает существенного влияния на осаждение асфальтенов [19, 20], в то время как другие, наоборот, высказывались о негативном влиянии [21, 22]. В [23] подтвержден механизм адсорбции анионных поверхностно-активных веществ на поверхности слюды в присутствии катионов в растворе. Сравнение изображений адсорбированного вещества, полученных при контакте с микроэмульсией из разных областей фазовой диаграммы, показало корреляцию между морфологическими характеристиками изображений и структурными особенностями микроэмульсий.

Существует ряд исследований, посвященных изучению влияния электромагнитных полей различного диапазона частот на физико-химические свойства нефтяных жидкостей. Так, в работе [24] обнаружено, что электромагнитная обработка демонстрирует свою максимальную эффективность сразу после воздействия электромагнитного поля. То есть после воздействия электромагнитного поля (ЭМП) на нефть ее вязкость снижается, но через определенный промежуток времени свойства нефти возвращаются к изначальным, как до воздействия. В статье [25] повышение вязкости было вызвано образованием цепочечных микроструктур диспергированных капель. Между тем снижение вязкости тесно связано с вращением диспергированных капель, вызванным электрическим полем, что подтверждено электрогидродинамикой отдельной проводящей капли в более проводящей окружающей жидкости. Были рассмотрены реологические характеристики модельных эмульсий при динамическом колебательном сдвиге малой амплитуды в сочетании с эволюцией морфологии под действием электрического поля и поля течения. Результаты показали, что вклад поверхности раздела в реологический отклик проявляется совершенно по-разному в зависимости от соотношения электропроводности двух соприкасающихся жидкостей.

Цель настоящей работы – исследование особенностей фильтрации нефти, вязкость которой зависит от температуры, в модели пористой среды при наличии электромагнитного воздействия для выявления степени изменения эффективной проницаемости по нефти под действием ЭМП.

### **Методика экспериментального исследования фильтрации нефти при воздействии ЭМП**

Объектом исследования являлась модель пористой среды, насыщенная нефтью. В табл. 1 приведено содержание в ней асфальтенов, смол и парафинов (АСП).

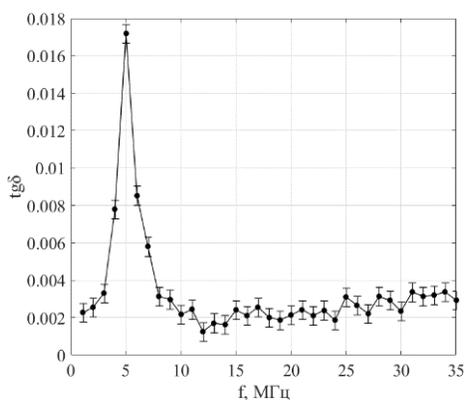
Таблица 1

#### **Содержание АСП в используемой нефти**

Наименование параметра	Содержание, %
Асфальтены	0.67
Смолы	6.2
Парафины	5.1

Предварительно перед началом эксперимента были проведены исследования частотных зависимостей тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$  нефти для определения частоты воздействия из области поляризации полярных компонент нефти (рис. 1).

При воздействии на нефть электромагнитным излучением частотой из области диэлектрической поляризации полярных компонент нефти происходит ориентационная поляризация этих компонент, приводящая к структурным изменениям асфальто-смоло-парафиновых соединений. Область поляризации определяется индивидуально для каждой нефти по частотным зависимостям тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$ . Измерения  $\text{tg}\delta$  нефти проводились на измерителе добротности ВМ-560 в диапазоне частот 50 кГц – 35 МГц и при температуре 22°C. Из рис. 1 видно, что при частоте  $f = 5$  МГц достигается максимум потерь, и при такой частоте электромагнитного поля следует ожидать максимального эффекта от действия поля, поэтому данная частота была использована как рабочая.



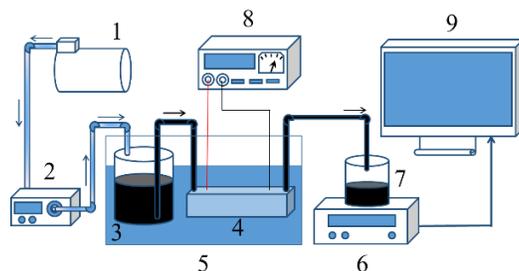
**Рис. 1.** Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь нефти от частоты ЭМП  
**Fig. 1.** Dependence of the dielectric loss tangent of oil on the EMF frequency

Экспериментальная установка состояла из: компрессора Fubag OL231/24, создающего давление воздуха, подключенного к нему контроллера давления Parker для поддержания постоянного давления в емкости с исследуемой жидкостью, экспериментальной ячейки, дренажной емкости, аналитических весов AND GR-200 с выводом информации и графиков на ПК, генератора высокочастотного поля Tabor 9100 amplifier (Tabor Electronics Ltd.) и термостата LIOP LT-117b, в который помещались экспериментальная ячейка и емкость с исследуемой жидкостью для поддержания определенной температуры во время проведения эксперимента (рис. 2).

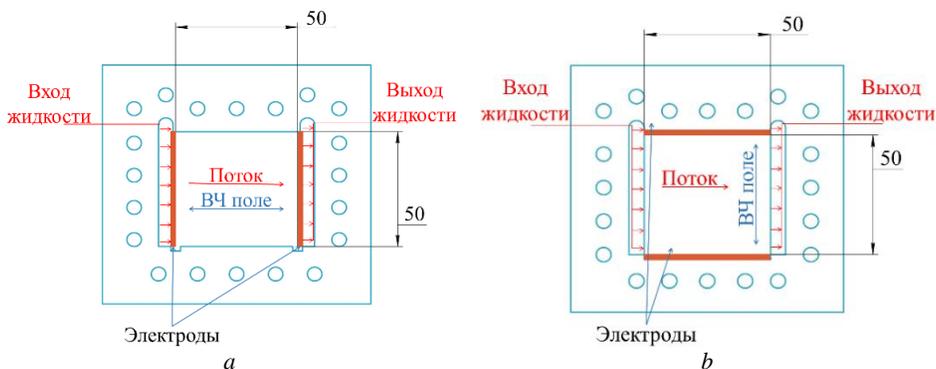
Основным элементом установки была экспериментальная ячейка, которая представляла собой насыпную модель пористой среды (рис. 3). Она была изготовлена из оргстекла. Было изготовлено две ячейки с разным расположением электродов:

- электроды расположены поперек фильтрации жидкости (см. рис. 3, *a*), при этом вектор напряженности электрического поля направлен вдоль вектора скорости фильтрации жидкости;

- электроды расположены вдоль потока фильтрации жидкости (см. рис. 3, *b*), вектор напряженности электрического поля направлен перпендикулярно вектору скорости фильтрации.



**Рис. 2.** Схема экспериментальной установки: 1 – компрессор; 2 – контроллер давления; 3 – емкость для исследуемой жидкости; 4 – экспериментальная ячейка; 5 – термостат; 6 – аналитические весы; 7 – дренажная емкость; 8 – генератор ВЧ-сигналов; 9 – ПК  
**Fig. 2.** Scheme of the experimental installation: 1, compressor; 2, pressure controller; 3, tank for liquid; 4, experimental cell; 5, thermostat; 6, analytical scales; 7, drainage tank; 8, RF signal generator; and 9, PC



**Рис. 3.** Схема расположения электродов в модели пористой среды вдоль (a) и поперек потока (b)  
**Fig. 3.** Arrangement of the electrodes in a porous medium model (a) along and (b) across the flow

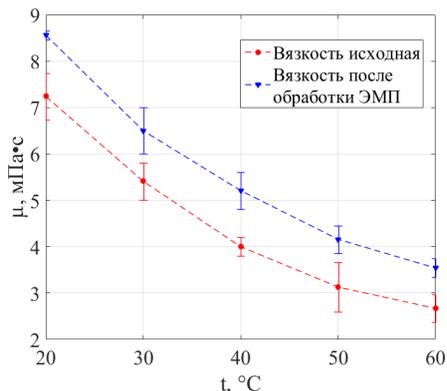
Размер исследуемой области составил  $50 \times 50 \times 5$  мм в обоих случаях. Рассматривается среда, которая моделирует терригенную породу. Для создания насыпной модели были использованы стеклянные сферы. Проведен анализ дисперсности стеклянных сфер посредством цифровой обработки фотографий, снятых через микроскоп Olympus IX71. Разброс размеров стеклянных сфер составил от 55 до 85 мкм, а среднечисленное значение равно 69.8 мкм. Пористость модели (a) составила 20%, модели (b) – 22%. Проницаемости моделей определялись по керосину и равны соответственно для модели (a) 58 Д, для модели (b) – 73 Д.

Методика проведения экспериментов была следующей. В емкость для жидкости 3 (см. рис. 2) заливалась исследуемая нефть, затем емкость 3 погружалась вместе с экспериментальной ячейкой 4 в термостат 5. Эксперимент проводился при температурах  $t = 20 \div 60^\circ\text{C}$  с шагом  $10^\circ\text{C}$ . В емкость 3 от компрессора 1 через регулятор давления 2 подавался воздух. Эксперименты проводились при трех перепадах давления  $\Delta p = 5, 10$  и  $15$  кПа. Воздух вытеснял жидкость из емкости 3, и она фильтровалась через ячейку 4 в дренажный стакан 7, который был установлен на

веса  $\delta$ . В момент начала эксперимента также включался генератор частот  $\delta$  на частоте  $f = 5$  кГц, который был подключен к электродам ячейки. Напряженность электрического поля составила 1 В/мм.

### Результаты

В ходе эксперимента были определены температурные зависимости коэффициента динамической вязкости исходной нефти и проб нефти, полученной после электромагнитного воздействия (рис. 4).



**Рис. 4.** Зависимость коэффициента динамической вязкости нефти от температуры до и после воздействия ЭМП

**Fig. 4.** Dependence of the dynamic viscosity coefficient of oil on temperature before and after EMF exposure

Эксперименты по определению вязкости были проведены на ротационном вискозиметре Brookfield DV II+Pro. Коэффициент динамической вязкости определялся по экспериментальным зависимостям напряжения сдвига от скорости сдвига в диапазоне температур  $20 \div 60^\circ\text{C}$ . В табл. 2 приведены значения изменения коэффициента динамической вязкости при разных температурах.

Таблица 2

#### Изменение коэффициента динамической вязкости после обработки ЭМП

$t, ^\circ\text{C}$	$\mu$ до обработки, мПа·с	$\mu$ после обработки, мПа·с	$\Delta\mu, \%$
20	$7.24 \pm 0.554$	$8.56 \pm 0.356$	18
30	$5.41 \pm 0.627$	$6.5 \pm 0.487$	20
40	$4 \pm 0.5129$	$5.21 \pm 0.5421$	30
50	$3.13 \pm 0.441$	$4.16 \pm 0.4385$	33
60	$2.67 \pm 0.3978$	$3.54 \pm 0.387$	35

Зависимость вязкости нефти от температуры описывается следующей экспоненциальной кривой:

$$\mu = \mu_0 e^{-\gamma(T-T_0)}, \quad (1)$$

где  $\mu$  – динамическая вязкость нефти при температуре  $T$ ;  $\mu_0$  – динамическая вязкость нефти при температуре  $T_0$ ;  $\gamma$  – температурный коэффициент вязкости;  $T, T_0$  – текущая и начальная температуры нефти.

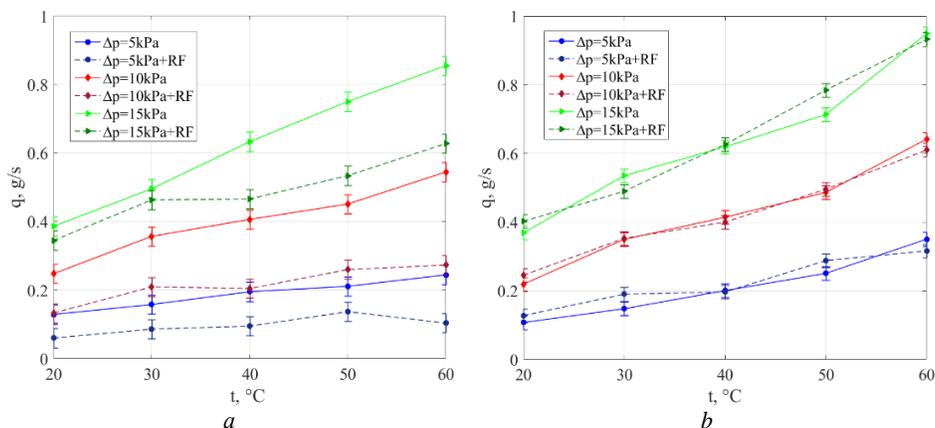
Получено, что до воздействия ЭМП  $\mu_0 = 6.9 \text{ Па}\cdot\text{с}$ ,  $\gamma = 0.025$ , а после воздействия  $\mu_0 = 8.2 \text{ Па}\cdot\text{с}$ ,  $\gamma = 0.022$ , т.е. коэффициент  $\mu_0$  после воздействия увеличился на 18%.

Результаты исследования коэффициента динамической вязкости нефти до и после ЭМ-воздействия малой мощности показали, что вязкость после воздействия повышается. Увеличение вязкости может быть следствием взаимодействия ассоциатов с образованием более крупных структур как было показано в работе [26].

При заданных перепадах давления ( $\Delta p = 5, 10, 15 \text{ кПа}$ ) была проведена фильтрация жидкости через каждую из ячеек. Выбор рабочего диапазона перепадов давлений обоснован техническими параметрами контроллера давления, что обеспечивает необходимые скорости фильтрации и достаточные времена обработки нефти электромагнитным полем для исследования эффектов действия поля на фильтрационные процессы нефтей. В процессе экспериментов замерялся расход жидкости в зависимости от температуры в термостате при различных давлениях нагнетания. Проанализировано также влияние высокочастотного поля (RF; расположение электродов поперек и вдоль фильтрации) на изменение фильтрационных характеристик пористой среды (эффективный коэффициент проницаемости) до и после фильтрации через нее нефти с содержанием асфальтенов. На рис. 5 приведены кривые зависимости расхода жидкости от температуры, полученные при фильтрации жидкости без внешнего воздействия (сплошные линии) и под действием ЭМП (пунктирные линии) при разных конфигурациях электродов. Оценка эффективной проницаемости проводилась согласно закону Дарси по формуле

$$k = \frac{\mu(T)Lq}{\Delta p S \rho} \quad (2)$$

где  $L$  – длина фильтрационной области в модели пористой среды;  $S$  – площадь поперечного сечения фильтрационной области;  $\rho$  – плотность жидкости;  $q$  – массовый расход жидкости. Результаты приведены в табл. 3.



**Рис. 5.** Изменение расхода жидкости от температуры: сплошные линии – без воздействия; пунктирные линии – в присутствии ЭМП при расположении электродов поперек (а) и вдоль фильтрации (б)

**Fig. 5.** Variation of liquid flow rate with temperature: without exposure (solid lines) and in the presence of EMF (dashed lines) when the electrodes are positioned (a) across and (b) along filtration

**Изменение эффективной проницаемости после обработки ЭМП**

$t, ^\circ\text{C}$	$k$ (при $q = 15$ кПа), $10^{-11}$ м <sup>2</sup>	$k$ (при $q = 15$ кПа + RF), $10^{-11}$ м <sup>2</sup>	$\Delta k, \%$
20	$5.04 \pm 0.005$	$3.38 \pm 0.022$	32
30	$4.83 \pm 0.119$	$3.75 \pm 0.117$	22
40	$4.56 \pm 0.040$	$3.19 \pm 0.075$	30
50	$4.23 \pm 0.011$	$2.95 \pm 0.05$	30
60	$4.11 \pm 0.079$	$2.91 \pm 0.076$	29

Из рис. 5, а видно, что воздействие поля привело к снижению расхода жидкости в сравнении с фильтрацией без поля. Принимая во внимание конструктивные особенности микромоделей и результаты измерения коэффициента динамической вязкости (см. рис. 4), можно предположить, что причинами стали действие диэлектростатических сил на полярные компоненты нефти и изменение структуры АСП. Также можно увидеть, что при увеличении перепада давления в диапазоне температур от 40 до 60°C значения расхода под воздействием поля значительно уменьшаются по сравнению с расходом без воздействия поля. Снижение расхода объясняется увеличением динамической вязкости и ухудшением фильтрационных характеристик пористой среды вплоть до возникновения эффекта запираания на локальных участках, наиболее приближенных к электродам, где формируется наибольший градиент напряженности электрического поля. Оценка изменения эффективной проницаемости после обработки ЭМП (см. табл. 3) показала, что при расположении электродов поперек фильтрации эффективная проницаемость снижается более чем на 20%, тогда как при продольном расположении электродов эффективная проницаемость не меняется.

**Заключение**

В ходе эксперимента фильтрации нефти с содержанием АСП через модель пористой среды при наличии электромагнитного поля обнаружено, что при расположении электродов, когда вектор напряженности электрического поля направлен вдоль направления вектора скорости фильтрации, наблюдается снижение расхода относительно фильтрации без ЭМП. Этот факт объясняется увеличением коэффициента динамической вязкости и возникновением диэлектростатических сил, приводящих к снижению эффективной проницаемости по нефти. При этом на локальных участках, наиболее приближенных к электродам, могут проявляться эффекты запираания.

Также при перепадах давления свыше 10 кПа и температурах 40–60°C наблюдается увеличение роста фильтрационного сопротивления, что объясняется изменением структуры АСП под действием ЭМП. Помимо этого, установлено, что при расположении электродов поперек фильтрации эффективная проницаемость снижается более чем на 20%, чего не наблюдается при расположении электродов вдоль фильтрации.

**Список источников**

1. *Asphaltenes and Asphalts* / G.V. Chilingarian, T.F. Yen (eds.). Amsterdam: Elsevier, 1994. V. 1. 451 p.

2. *Yakubov M.R., Abilova G.R., Yakubova S.G., Milordov D.V. Mironov N.A.* Heavy oil resin composition and their influence on asphaltene stability // *The Chemistry of Oil and Petroleum Products*. Berlin: De Gruyter: 2022. P. 177–202. doi: 10.1515/9783110694529-004
3. *Wong G.K., Yen T.F.* An electron spin resonance probe method for the understanding of petroleum asphaltene macrostructure // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2000. V. 28 (1-2). P. 55–64. doi: 10.1016/S0920-4105(00)00067-X
4. *Steinborn R., Flock D.L.* The rheology of heavy crude oils and their emulsions // *Journal of Canadian Petroleum Technology*. 1983. V. 22 (05). doi: 10.2118/83-05-03
5. *Hasan S.W., Ghannam M.T., Esmail N.* Heavy crude oil viscosity reduction and rheology for pipeline transportation // *Fuel*. 2010. V. 89 (5). P. 1095–1100. doi: 10.1016/j.fuel.2009.12.021
6. *Luo P., Gu Y.* Characterization of a heavy oil–propane system in the presence or absence of asphaltene precipitation // *Fluid Phase Equilibria*. 2009. V. 277 (1). P. 1–8 doi: 10.1016/j.fluid.2008.10.019
7. *Рахимов А.А., Валиев А.А.* Особенности экспериментального изучения устойчивого и неустойчивого вытеснения в ячейке Хеле-Шоу, заполненной стеклянными шариками // *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика*. 2022. № 77. С. 140–157. doi: 10.17223/19988621/77/11
8. *Пивоварова Н.А.* Особенности межмолекулярного взаимодействия в нефтяных дисперсных системах // *Нефтегазовые технологии и экологическая безопасность*. 2023. № 2. С. 23–33. doi: 10.24143/1812-9498-2023-2-23-33
9. *Evdokimov I.N., Eliseev N.Y., Eliseev D.Y.* Rheological evidence of structural phase transitions in asphaltene-containing petroleum fluids // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2001. V. 30 (3-4). P. 199–211. doi: 10.1016/S0920-4105(01)00132-2
10. *Wang S., Huang Y., Civan F.* Experimental and theoretical investigation of the Zaoyuan field heavy oil flow through porous media // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2006. V. 50 (2). P. 83–101 doi: 10.1016/j.petrol.2005.06.015
11. *Liu H., Wang J., Xie Y., Ma D., Shi X.* Flow characteristics of heavy oil through porous media // *Energy Sources. Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2011. V. 34 (4). P. 347–359. doi: 10.1080/15567036.2011.609868
12. *Mukhametshina A., Martynova E.* Electromagnetic heating of heavy oil and bitumen: a review of experimental studies and field applications // *Journal of Petroleum Engineering*. 2013. V. 2013 (1). Art. 476519. doi: 10.1155/2013/476519
13. *Sysoev S., Kislitsin A.* Modeling of microwave heating and oil filtration in stratum // *Numerical Simulations – Applications, Examples and Theory / L. Angermann (ed.)*. IntechOpen, 2011. P. 237–250
14. *Mullayanov A.I., Musin A.A., Valiullina V.I., Kovaleva L.A.* The features of the microemulsion structure changes under the nonhomogeneous alternating electric field impact // *Letters on Materials*. 2024. V. 14 (1). P. 57–61. doi: 10.48612/letters/2024-1-57-61
15. *Kovaleva L., Davletbaev A., Babadagli T., Stepanova Z.* Effects of electrical and radio-frequency electromagnetic heating on the mass-transfer process during miscible injection for heavy-oil recovery // *Energy & Fuels*. 2011. V. 25 (2). P. 482–486. doi: 10.1021/ef1009428
16. *Zanganeh P., Ayatollahi S., Alamdari A., Zolghadr A., Dashti H., Kord S.* Asphaltene Deposition during CO<sub>2</sub> Injection and Pressure Depletion: A Visual Study // *Energy Fuels*. 2012. V. 26. P. 1412–1419. doi: 10.1021/ef2012744
17. *Joonaki E., Buckman J., Burgass R., Tohidi B.* Water versus Asphaltenes; Liquid–Liquid and Solid–Liquid Molecular Interactions Unravel the Mechanisms behind an Improved Oil Recovery Methodology // *Sci. Rep.* 2019. V. 9. P. 1–13
18. *Kazemzadeh Y., Parsaei R., Riazi M.* Experimental study of asphaltene precipitation prediction during gas injection to oil reservoirs by interfacial tension measurement. // *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.* 2015. V. 466. P. 138–146. doi: 10.1016/j.colsurfa.2014.10.053
19. *Tharanivasan A.K., Yarranton H.W., Taylor S.D.* Asphaltene Precipitation from Crude Oils in the Presence of Emulsified Water. // *Energy Fuels*. 2012. V. 26. P. 6869–6875 doi: 10.1021/ef301200v

20. Tavakkoli M., Chen A., Sung C.-A., Kidder K.M., Lee J.J., Alhassan S.M., Vargas F.M. Effect of Emulsified Water on Asphaltene Instability in Crude Oils. // *Energy Fuels*. 2016. V. 30. P. 3676–3686. doi: 10.1021/acs.energyfuels.5b02180
21. Aslan S., Firoozabadi A. Effect of Water on Deposition, Aggregate Size, and Viscosity of Asphaltenes // *Langmuir*. 2014. V. 30. P. 3658–3664. doi: 10.1021/la404064t
22. Hu C., Sabio J.C., Yen A., Joshi N., Hartman R.L. Role of Water on the Precipitation and Deposition of Asphaltenes in Packed-Bed Microreactors. // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2015. V. 54. P. 4103–4112. doi: 10.1021/ie5038775
23. Zamula Y.S., Afanasyev M.O., Batirshin E.S. Characterization of microemulsion structure using atomic force microscopy. // *Letters on Materials*. 2023. V. 13 (4). C. 286–291. doi: 10.22226/2410-3535-2023-4-286-291
24. Kovaleva L.A., Mukharyamova G.I. Effects of electromagnetic treatment on rheological properties of oil: experiment and application // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2021. V. 94 (3). P. 714–719. doi: 10.1007/s10891-021-02348-z
25. Ha J.W., Yang S.M. Rheological responses of oil-in-oil emulsions in an electric field // *Journal of Rheology*. 2000. V. 44 (2). P. 235–256. doi: 10.1122/1.551084
26. Лоскутова Ю.В., Юдина Н.В. Влияние магнитного поля на структурно-реологические свойства нефтей // *Известия Томского политехнического университета*. 2006. Т. 309, № 4. С. 104–109

### References

1. Chilingarian G.V., Yen T.F. (Eds.) (1994) *Asphaltenes and Asphalts*. 1. Elsevier.
2. Yakubov M.R., Abilova G.R., Yakubova S.G., Milordov D.V., Mironov N.A. (2022) Heavy oil resin composition and their influence on asphaltene stability. *The Chemistry of Oil and Petroleum Products; De Gruyter: Berlin, Germany*. pp. 177–202. doi: 10.1515/9783110694529-004
3. Wong G.K., Yen T.F. (2000) An electron spin resonance probe method for the understanding of petroleum asphaltene macrostructure. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 28(1-2). pp. 55–64. doi: 10.1016/S0920-4105(00)00067-X
4. Steinborn R., Flock D.L. (1983) The rheology of heavy crude oils and their emulsions. *Journal of Canadian Petroleum Technology*. 22(05). doi: 10.2118/83-05-03
5. Hasan S.W., Ghannam M.T., Esmail N. (2010) Heavy crude oil viscosity reduction and rheology for pipeline transportation. *Fuel*. 89(5). pp. 1095–1100. doi: 10.1016/j.fuel.2009.12.021
6. Luo P., Gu Y. (2009) Characterization of a heavy oil–propane system in the presence or absence of asphaltene precipitation. *Fluid Phase Equilibria*. 277(1). pp. 1–8. doi: 10.1016/j.fluid.2008.10.019
7. Rakhimov A.A., Valiev A.A. (2022) Osobennosti eksperimental'nogo izucheniya ustoychivogo i neustoychivogo vytesneniya v yacheyke Khele-Shou, zapolnennoy steklyannymi sharikami [Features of an experimental study of the stable and unstable displacement in the Hele-Shaw cell filled with glass balls]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 77. pp. 140–157. doi: 10.17223/19988621/77/11
8. Pivovarova N.A. (2023) Osobennosti mezhmolekulyarnogo vzaimodeystviya v neftyanykh dispersnykh sistemakh [Features of intermolecular interaction in petroleum dispersed systems]. *Neftgazovye tekhnologii i ekologicheskaya bezopasnost' Oil and Gas Technologies and Environmental Safety*. 2. pp. 23–33. doi: 10.24143/1812-9498-2023-2-23-33
9. Evdokimov I.N., Eliseev N.Y., Eliseev D.Y. (2001) Rheological evidence of structural phase transitions in asphaltene-containing petroleum fluids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 30(3-4). pp. 199–211. doi: 10.1016/S0920-4105(01)00132-2
10. Wang S., Huang Y., Civan F. (2006) Experimental and theoretical investigation of the Zaoyuan field heavy oil flow through porous media. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 50(2). pp. 83–101. doi: 10.1016/j.petrol.2005.06.015

11. Liu H., Wang J., Xie Y., Ma D., Shi X. (2011) Flow characteristics of heavy oil through porous media. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 34(4). pp. 347–359. doi: 10.1080/15567036.2011.609868
12. Mukhametshina A., Martynova E. (2013) Electromagnetic heating of heavy oil and bitumen: a review of experimental studies and field applications. *Journal of Petroleum Engineering*. 2013(1). Article 476519. doi: 10.1155/2013/476519
13. Sysoev S., Kislitsin A. (2011) Modeling of microwave heating and oil filtration in stratum. *Numerical Simulations—Applications, Examples and Theory*. pp. 237–250.
14. Mullayanov A.I., Musin A.A., Valiullina V.I., Kovaleva L.A. (2024) The features of the microemulsion structure changes under the nonhomogeneous alternating electric field impact. *Letters on Materials*. 14(1). pp. 57–61. doi: 10.48612/letters/2024-1-57-61
15. Kovaleva L., Davletbaev A., Babadagli T., Stepanova Z. (2011) Effects of electrical and radio-frequency electromagnetic heating on the mass-transfer process during miscible injection for heavy-oil recovery. *Energy & Fuels*. 25(2). pp. 482–486. doi: 10.1021/ef1009428
16. Zanganeh P., Ayatollahi S., Alamdari A., Zolghadr A., Dashti H., Kord S. (2012) Asphaltene deposition during CO<sub>2</sub> injection and pressure depletion: a visual study. *Energy & Fuels*. 26(2). pp. 1412–1419. doi: 10.1021/ef2012744
17. Joonaki E., Buckman J., Burgass R., Tohidi B. (2019) Water versus asphaltenes; liquid–liquid and solid–liquid molecular interactions unravel the mechanisms behind an improved oil recovery methodology. *Scientific Reports*. 9(1). Article 11369.
18. Kazemzadeh Y., Parsaei R., Riazi M. (2015) Experimental study of asphaltene precipitation prediction during gas injection to oil reservoirs by interfacial tension measurement. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 466. pp. 138–146. doi: 10.1016/j.colsurfa.2014.10.053
19. Tharanivasan A.K., Yarranton H.W., Taylor S.D. (2012) Asphaltene precipitation from crude oils in the presence of emulsified water. *Energy & Fuels*. 26(11). pp. 6869–6875. doi: 10.1021/ef301200v
20. Tavakkoli M., Chen A., Sung C.A., Kidder K.M., Lee J.J., Alhassan S.M., Vargas F.M. (2016) Effect of emulsified water on asphaltene instability in crude oils. *Energy & Fuels*. 30(5). pp. 3676–3686. doi: 10.1021/acs.energyfuels.5b02180
21. Aslan S., Firoozabadi A. (2014) Effect of water on deposition, aggregate size, and viscosity of asphaltenes. *Langmuir*. 30(13). pp. 3658–3664. doi: 10.1021/la404064t
22. Hu C., Sabio J.C., Yen A., Joshi N., Hartman R.L. (2015) Role of water on the precipitation and deposition of asphaltenes in packed-bed microreactors. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 54(16). pp. 4103–4112. doi: 10.1021/ie5038775
23. Zamula Y.S., Afanasyev M.O., Batirshin E.S. (2023) Characterization of microemulsion structure using atomic force microscopy. *Letters on Materials*. 13(4). pp. 286–291. doi: 10.22226/2410-3535-2023-4-286-291
24. Kovaleva L.A., Mukharyamova G.I. (2021) Effects of electromagnetic treatment on rheological properties of oil: experiment and application. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 94(3). pp. 714–719. doi: 10.1007/s10891-021-02348-z
25. Ha J.W., Yang S.M. (2000) Rheological responses of oil-in-oil emulsions in an electric field. *Journal of Rheology*. 44(2). pp. 235–256. doi: 10.1122/1.551084
26. Loskutova Yu.V., Yudina N.V. (2006) Vliyaniye magnitnogo polya na strukturno-reologicheskie svoystva neftey [Influence of the magnetic field on the structural and rheological properties of oils]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 309(4). pp. 104–109.

**Сведения об авторах:**

**Валиуллина Вилена Ильшатовна** – аспирант кафедры прикладной физики физико-технического факультета Уфимского университета науки и технологий (Уфа, Россия). E-mail: valiullina.vilena@mail.ru

**Галеев Рушан Ринатович** – аспирант кафедры прикладной физики физико-технического факультета Уфимского университета науки и технологий (Уфа, Россия). E-mail: galeevr93@gmail.com

**Зиннатуллин Расул Рашитович** – кандидат технических наук, ведущий инженер кафедры прикладной физики физико-технического факультета Уфимского университета науки и технологий (Уфа, Россия). E-mail: rasulz@yandex.ru

**Мусин Айрат Ахматович** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной физики физико-технического факультета Уфимского университета науки и технологий (Уфа, Россия). E-mail: mus-airat@yandex.ru

**Ковалева Лиана Ароновна** – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой прикладной физики физико-технического факультета Уфимского университета науки и технологий (Уфа, Россия). E-mail: liana-kovaleva@yandex.ru

***Information about the authors:***

**Valiullina Vilena I.** (Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russian Federation). E-mail: valiullina.vilena@mail.ru

**Galeev Rushan R.** (Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russian Federation). E-mail: galeevr93@gmail.com

**Zinnatullin Rasul R.** (Candidate of Technical Sciences, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russian Federation). E-mail: rasulz@yandex.ru

**Musin Ayrat A.** (Candidate of Physics and Mathematics, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russian Federation). E-mail: mus-airat@yandex.ru

**Kovaleva Liana A.** (Doctor of Technical Sciences, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russian Federation). E-mail: liana-kovaleva@yandex.ru

*Статья поступила в редакцию 09.12.2024; принята к публикации 08.12.2025*

*The article was submitted 09.12.2024; accepted for publication 08.12.2025*