

УДК 534.286.2

DOI 10.25205/2541-9447-2021-16-1-109-116

## **Имитация электромагнитно-акустического нагрева нефтяного пласта в лабораторных условиях**

**Г. Р. Измайлова**

*Филиал Уфимского государственного нефтяного  
технического университета в г. Октябрьском  
Октябрьский, Россия*

### *Аннотация*

Описывается эксперимент по изучению совместного воздействия на модель нефтяного пласта высокочастотного электромагнитного и акустического полей. Приводится математическая модель, описывающая физические процессы, происходящие при этом в пласте. В уравнении теплопроводности учитывается теплообмен с окружающей средой введением дополнительного члена. Наибольшее расхождение между теоретическими и экспериментальными данными не превышает 28 %. Качественное совпадение теоретических и экспериментальных кривых говорит об адекватности математической модели.

### *Ключевые слова*

высокочастотное электромагнитное поле, тепловые источники, термоакустический эффект, теплопроводность, модель нефтяного пласта, температурное поле

### *Для цитирования*

*Измайлова Г. Р.* Имитация электромагнитно-акустического нагрева нефтяного пласта в лабораторных условиях // Сибирский физический журнал. 2021. Т. 16, № 1. С. 109–116. DOI 10.25205/2541-9447-2021-16-1-109-116

## **Simulation of Electromagnetic-Acoustic Heating of the Oil Layer in Laboratory Conditions**

**G. R. Izmailova**

*Branch of Ufa State Oil Technical University in Otyabrsky  
Otyabrsky, Russian Federation*

### *Abstract*

This paper describes an experiment to study the combined effects of high-frequency electromagnetic and acoustic fields on a model of an oil reservoir. A mathematical model is described that describes the physical processes that occur in the reservoir. The heat equation takes into account heat transfer with the environment by introducing an additional term. The largest discrepancy between theoretical and experimental data does not exceed 28 %. Qualitative coincidence of theoretical and experimental curves indicates the adequacy of the mathematical model.

### *Keywords*

high-frequency electromagnetic field, heat sources, thermoacoustic effect, thermal conductivity, reservoir model, temperature field

### *For citation*

*Izmailova G. R.* Simulation of Electromagnetic-Acoustic Heating of the Oil Layer in Laboratory Conditions. *Siberian Journal of Physics*, 2021, vol. 16, no. 1, p. 109–116. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2021-16-1-109-116

В последнее время проявляется значительный интерес к поиску и вовлечению в разработку нетрадиционных видов углеводородного сырья – нефтяных битумов, газовых гидратов, горючих сланцев и озокерита. Они имеют значительные запасы и являются энергетической и сырьевой альтернативой нефти и газу. В природных битумах содержится значительное количество ценных металлов и соединений. В пластовых условиях эти вещества, как правило, полностью заполняют поровое пространство и находятся в твердом – кристаллическом или аморфном – состоянии. Поэтому извлечение их известными в практике нефтегазодобычи способами невозможно. Представляет интерес изыскание принципиально новых методов извлечения углеводородов из продуктивных пород в наземных условиях и создание способов их скважинной добычи. Одним из таких методов может быть использование энергии электромагнитного поля в комбинации с акустическим полем. Этот метод имеет ряд принципиальных особенностей. Энергия в пласт вводится через высокочастотные электромагнитные и акустические волны, а не посредством гидродинамических и тепловых методов, как в традиционных способах добычи нефти и газа. Энергетическое и силовое взаимодействие электромагнитных и акустических волн с пластом обуславливают возникновение распределенных по объему пласта источников тепла, пондеромоторных сил, а также физико-химические поверхностные явления, электрокапиллярные и электроповерхностные эффекты, которые могут быть использованы в технологии добычи.

Многочисленные исследования высокочастотных электромагнитных полей показывают, что электромагнитные волны, распространяясь в насыщенных пористых средах, создают объемные тепловые источники, благодаря которым возможно создание условий для нагрева нефтяного пласта [1–3]. Если дополнить электромагнитное воздействие на пласт акустическим полем, то появится ряд интересных эффектов, таких как термоакустический эффект, увеличение теплопроводности, изменение структуры флюида и, как следствие, изменение вязкости и др. Кроме того, акустическое поле также поглощается насыщенной пористой средой и создает в ней объемные тепловые источники.

Механизм воздействия электромагнитного и акустического полей на продуктивный пласт определяется главным образом его электрофизическими характеристиками и основывается на особенностях термо- и гидродинамических процессов, возникающих при взаимодействии мощных ВЧ электромагнитных полей с высокомолекулярными полярными компонентами насыщающей нефти [4; 5]. Следовательно, такой метод более применим при добыче и подготовке тяжелых нефтей, доля которых в общем балансе добываемой нефти с каждым годом все более увеличивается.

Таким образом, изучение совместного воздействия высокочастотного электромагнитного и акустического полей на нефтяной пласт имеет практический и теоретический интерес в будущем.

### Описание лабораторной установки

Для установления основных количественных и качественных особенностей совместного воздействия ВЧ ЭМ и акустического полей на насыщенные пористые среды Ф. Л. Саяховым, В. П. Дыбленко, О. Л. Кузнецовым и др. производились экспериментальные исследования в лабораторных условиях [6; 7]. Для экспериментального исследования была создана установка (рис. 1), которая позволяет изучать особенности тепловых явлений в насыщенной пористой среде при совместном воздействии на нее ВЧ ЭМ и акустического полей.

Установка включала в себя трехслойную модель пласта, скважину с помещенными в нее акустическим и электромагнитным излучателями, а также наземные ультразвуковой генератор ГУЗ-1,5Н (ГЗ-34 с усилителем ГУ-600) и генератор высокочастотных электромагнитных волн ВЧД-2,5. Модель пласта представляет собой блок естественного битуминозного песчаника Шугуровской залежи битумов мощностью 0,7 м и радиусом 0,6 м, расположенный между слоями влажной глины по 0,15 м и заключенный в деревянный кожух с размерами

1,4 × 1,4 × 1,4 м. Между продуктивным пластом и кожухом засыпан кварцевый песок фракций 0,1÷0,4 мм. По оси модели пласта помещена диэлектрическая трубка диаметром 4,2 см.

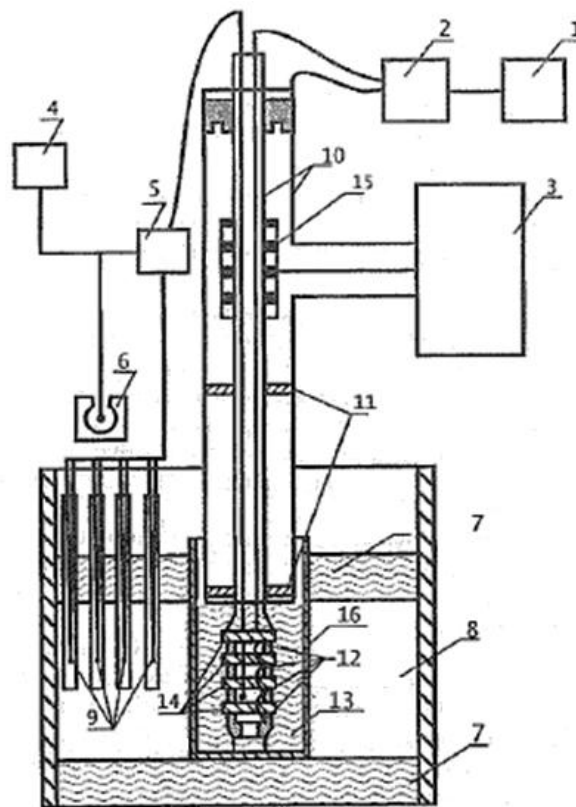


Рис. 1. Экспериментальная установка для исследования ВЧ электромагнитно-акустического воздействия, использованная в работе [8]: 1 – ультразвуковой генератор ГУЗ-1,5Н; 2 – фильтр высокой частоты; 3 – генератор ВЧ ЭМ энергии ВЧД2,5/13; 4 – микровольтметр В2-15; 5 – многоконтактный переключатель; 6 – сосуд Дьюара; 7 – кровля и подошва; 8 – модель продуктивного пласта; 9 – термопары; 10 – алюминиевые трубки; 11 – диэлектрические шайбы; 12, 14 – излучатели ВЧ ЭМ и акустической энергии; 13 – жидкость; 15 – конденсатор связи; 16 – диэлектрические трубки

Fig. 1. The experimental setup for studying high-frequency electromagnetic-acoustic effects used in [8]: 1 – ultrasonic generator GUS-1,5N; 2 – high-pass filter; 3 – generator RF EM energy RFD2.5 / 13; 4 – microvoltmeter B2-15; 5 – multi-contact switch; 6 – Dewar vessel; 7 – roof and sole; 8 – model of the reservoir; 9 – thermocouples; 10 – aluminum tubes; 11 – dielectric washers; 12, 14 – emitters of radiofrequency EM and acoustic energy; 13 – liquid; 15 – coupling capacitor; 16 – dielectric tubes

Одним из основных элементов установки является технологическое устройство совместного ввода энергии электромагнитного и акустического полей в пласт. Для этого используются два излучателя (электромагнитный и акустический), расположенные в модели скважины. Продуктивный пласт имел следующие характеристики: битумонасыщенность – 10 вес. %, водонасыщенность – 0,5 вес. %, пористость – 40 вес. %. Вид насыщающего его битума – мальта с плотностью 1024 кг/м<sup>3</sup>, вязкостью при 298 К – 630 Па·с. Для расчетных оценок были измерены диэлектрические характеристики модели пласта на рабочей частоте  $f = 13,56$  МГц: диэлектрическая проницаемость  $\epsilon' = 7,6$ ; тангенс диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta = 0,1 \div 0,12$ .

Температуру пласта измеряли с помощью медно-константановых термопар, подключенных через многоконтактный переключатель к прибору постоянного тока В2-15. В качестве источника высокочастотной электромагнитной энергии использовалась установка ВЧД-2,5 с максимальной мощностью 2,5 кВт и рабочей частотой 13,56 МГц [7].

Методика проведения эксперимента состояла в следующем:

1) регистрация пространственно-временного распределения температурного поля в модели призабойной зоны пласта при электромагнитном нагреве мощностью 0,5 кВт и частотой 13,56 МГц;

2) проведение аналогичных измерений при одновременном ВЧ нагреве с теми же мощностью и частотой и акустическом воздействии с интенсивностью 0,9 кВт/см<sup>2</sup> для двух значений частоты 6 и 16 кГц;

3) проведение аналогичных измерений только при акустическом воздействии с указанными в предыдущем пункте интенсивностью и частотами.

Всего было проведено 15 экспериментов. Результаты экспериментальных исследований приведены в таблице [7].

Распределение температуры (°C) в образце при акустическом воздействии  
(частота акустических колебаний 6 и 16 кГц)

Temperature distribution (°C) in the sample at an acoustic frequency  
of 6 and 16 kHz

Частота, кГц	Время, ч	Расстояние от излучателя, см			
		4	14	21	37
6	0	25	25	25	25
	3	31	25	25	25
	5	31	25	25	25
	8	31,5	25	25	25
16	0	27	27	27	27
	3	37,5	28	27	27
	5	40	30	27	27
	8	42,5	30,5	27	27

Из приведенных данных следует, что акустическое воздействие вызывает увеличение температуры призабойной зоны битумного пласта на расстояниях, равных 4 см для 6 кГц и 4, 14 см для 16 кГц. Это объясняется тем, что с ростом радиуса энергия акустического поля быстро убывает.

#### Теоретическое обоснование эксперимента

Были проведены сравнительные расчетные исследования нагрева модели пласта энергией электромагнитных и акустических волн с данными экспериментов, приведенными в таблице (см. выше). В экспериментах использовались два значения частоты акустических волн  $f_a$ : 6 и 16 кГц, интенсивность акустического излучателя 900 Вт/м<sup>2</sup>. Мощность электромагнитных волн 0,5 кВт. Мощность модели пласта составляет 0,7 м, в связи с этим целесообразно учесть в уравнении теплопроводности отток тепла в окружающую среду. Кроме того, учитывалось возникновение в среде распределенных тепловых источников вследствие поглощения электромагнитных и акустических волн средой и переходом энергии электромагнитных и акустических волн в тепловую энергию.

Таким образом, уравнение теплопроводности, описывающее изменение температуры во времени и в пространстве в модели пласта при высокочастотном электромагнитно-акустическом нагреве имеет вид

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{C_p r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda_a \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{F}{C_p} + \frac{q_{az}}{C_p},$$

$$F = \gamma \left[ \frac{T - T_n}{\sqrt{t}} + \sqrt{t} \frac{\partial T}{\partial t} \right]; \quad \gamma = -\frac{2c_0 \rho_0}{h} \sqrt{\frac{a_0}{\pi}},$$

где  $\lambda_a$  – коэффициент теплопроводности пласта,  $C_p$  – объемная теплоемкость пород пласта,  $q_{az}$  – суммарные тепловые источники,  $h$  – толщина пласта,  $c_0$  – теплоемкость модели пласта,  $\rho_0$  – плотность модели пласта,  $a_0$  – температуропроводность модели пласта,  $T_n$  – начальная температура пласта.

Суммарные объемные источники тепла в среде, возникающие при воздействии ЭМ и акустического полей, можно представить в виде [8]

$$q_{az} = q_a + q_s,$$

где  $q_s$  и  $q_a$  определяются выражениями

$$q_s = \alpha_s N_{s0} \frac{\exp(-2\alpha_s (r - r_0))}{\pi r h},$$

$$q_a = \alpha_a N_{a0} \frac{\exp(-2\alpha_a (r - r_0))}{\pi r h},$$

где  $\alpha_a$ ,  $\alpha_s$  – коэффициенты затухания ЭМ и акустических волн;  $r_0$  – радиус скважины;  $N_{a0}$  – мощность излучателя акустических волн;  $N_{s0}$  – мощность излучателя ЭМ волн.

Коэффициент затухания акустических волн в модели продуктивного пласта рассчитывался по формулам, представленным в работе [7]. Для частот, используемых в данном эксперименте  $f_a = 6$  и  $16$  кГц, получились значения  $0,1296$  и  $0,3461$  м<sup>-1</sup>. Акустические волны, обладая довольно большим коэффициентом поглощения (у ВЧ ЭМ волн при  $f_s = 13,56$  МГц коэффициент затухания  $\alpha_s = 0,0194$  м<sup>-1</sup> [9]), поглощаются в основном вблизи излучателя.

*Крайевые условия, использованные при проведении расчетов.* В начальный момент времени температура в пласте во всех точках одинакова:

$$T(r, 0) = T_n.$$

Граничные условия на забое скважины и на границе пласта имеют вид

$$\left. \frac{\partial T(r_0, t)}{\partial r} \right|_{r_0 \rightarrow 0}; \quad \frac{\partial T(r_k, t)}{\partial r} = 0.$$

Здесь  $r_k$  – радиус модели пласта,  $T_n$ ,  $T$  – начальная и текущая температура соответственно.

Пространственное распределение температуры, приведенное на рис. 2, показывает увеличение глубины высокочастотного электромагнитного нагрева в акустическом поле. Максимальная относительная погрешность между расчетными кривыми и экспериментальными точками для случая ВЧ ЭМ-акустического нагрева с частотой  $f_a = 16$  кГц равна 20 %, для случая ВЧ ЭМ-акустического нагрева с частотой  $f_a = 6$  кГц – 28 %. Причем относительная погрешность растет с увеличением расстояния от излучателя, что говорит о происходящем теплообмене на стенке модели пласта с окружающей средой.

Сравнивая данные таблицы и рис. 2, замечаем, что темп электромагнитного нагрева в акустическом поле возрастает. Причем глубина прогрева при использовании акустического поля частоты 16 кГц выше, чем частоты 6 кГц при одинаковых интенсивностях акустического воздействия. Изменение пространственно-временного распределения температурного поля в модели призабойной зоны битумного пласта можно объяснить тем, что при акустическом воздействии на битуминозный песчаник увеличивается его эффективный коэффициент теплопроводности. Это приводит к усилению зависимости электромагнитного нагрева от температуропроводности и к увеличению ее вклада в распределение температуры при электромагнитном нагреве.

На рис. 3 приведены кривые динамики температуры в точке  $r = 0,04$  м, полученные расчетным и экспериментальным путем. Максимальная относительная погрешность между расчетными кривыми и экспериментальными точками для случая высокочастотного электромагнитно-акустического нагрева с частотой  $f_a = 16$  кГц составляет 28 %, для случая высокочастотного электромагнитно-акустического нагрева с частотой  $f_a = 6$  кГц – 18 %. Расхождение между кривыми уменьшается с увеличением времени воздействия [7].

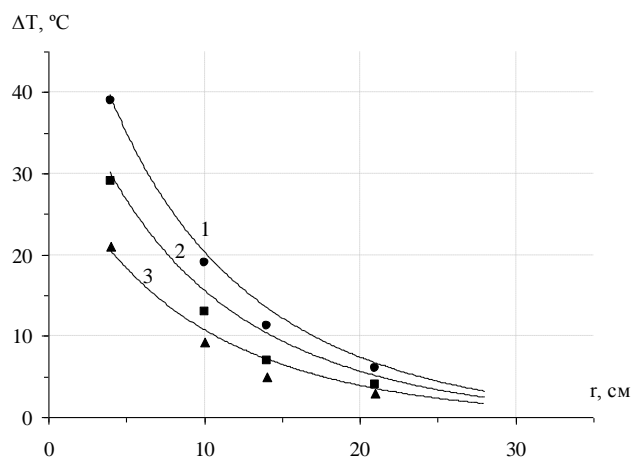


Рис. 2. Распределение температурного поля в модели пласта после высокочастотного электромагнитно-акустического нагрева в течение  $t = 8$  ч: 1 –  $f_a = 16$  кГц; 2 –  $f_a = 6$  кГц; 3 – ВЧ ЭМ нагрев. ● –  $f_a = 16$  кГц (опыт), ■ –  $f_a = 6$  кГц (опыт), ▲ – ВЧ ЭМ нагрев (опыт)

Fig. 2. Temperature field distribution in the reservoir model after high-frequency electromagnetic-acoustic heating for  $t = 8$  hours: 1 –  $f_a = 16$  kHz; 2 –  $f_a = 6$  kHz; 3 – RF EM heating. ● –  $f_a = 16$  kHz (experiment), ■ –  $f_a = 6$  kHz (experiment), ▲ – HF EM heating (experiment)

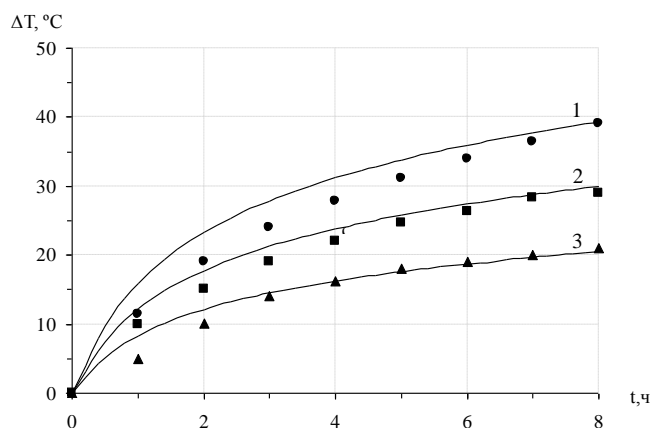


Рис. 3. Зависимость температуры от времени при ВЧ ЭМ-акустическом воздействии в точке  $r = 0,04$  м: 1 –  $f_a = 16$  кГц; 2 –  $f_a = 6$  кГц; 3 – ВЧ ЭМ нагрев. ● –  $f_a = 16$  кГц (опыт), ■ –  $f_a = 6$  кГц (опыт), ▲ – ВЧ ЭМ нагрев (опыт)

Fig. 3. The dependence of temperature on time with RF EM acoustic exposure at a point  $r = 0.04$  m: 1 –  $f_a = 16$  kHz; 2 –  $f_a = 6$  kHz; 3 – RF EM heating. ● –  $f_a = 16$  kHz (experiment), ■ –  $f_a = 6$  kHz (experiment), ▲ – HF EM heating (experiment)

Необходимо отметить возможный вклад в эффект интенсификации высокочастотного электромагнитного нагрева от сочетания уменьшения вязкости нагретого битума в акустическом поле и его фильтрационных движений, вызываемых перепадом акустических импульсов. Возрастание температуры нагрева с увеличением частоты акустического поля можно объяснить следующим образом. Повышение интенсивности нагрева насыщенной пористой среды с ростом частоты связано с увеличением «турбулизации» флюида в порах [1]. Указан-

ные эффекты отражают экспериментальный результат и не учитываются в математической модели эксперимента.

### Результаты

Полученные результаты экспериментальных исследований говорят о том, что вблизи излучателя градиент температуры при электромагнитном нагреве увеличивается, если одновременно действует источник достаточно интенсивных акустических волн. Это обстоятельство приводит к увеличению температуры вблизи скважины и к ее увеличению вдали от скважины. На практике это обуславливает увеличение зоны теплового воздействия.

Разработанная математическая модель может быть использована для прогнозных расчетов совместного воздействия высокочастотного электромагнитного и акустического полей на нефтяной пласт. Для более корректного сопоставления расчетных и экспериментальных результатов требуется рассмотрение двухмерной задачи с учетом распределения тепловых источников и в кровле, и в подошве модели продуктивного пласта.

### Выводы

Таким образом, проведенные исследования показывают реальную возможность применения комбинированных методов воздействия электромагнитным и акустическим полями на пласты высоковязких нефтей и битумов с целью интенсификации притока жидкости к скважине и увеличения нефтеотдачи пласта.

В дальнейшем имеет практический интерес изучение влияния акустического воздействия различных частот в комбинации с электромагнитным полем.

### Список литературы

1. **Volodin S. V., Dmitriev V. L., Khusainov I. G.** The propagation of linear waves in humid, gas-saturated media. *High Temperature*, 2009, vol. 47, no. 5, p. 701–706.
2. **Fatykhov M. A., Bagautdinov N. Ya.** Experimental investigations of decomposition of gas hydrate in a pipe under the impact of a microwave electromagnetic field. *High Temperature*, 2005, vol. 43, no. 4, p. 614–619.
3. **Fatykhov M. A.** Filtration of a high-viscosity oil in an electromagnetic field. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2004, vol. 77, no. 2, p. 260–265.
4. **Дыбленко В. П., Евченко В. С., Солоницин С. Н., Кузнецов О. Л., Габитов Г. Х., Лукьянов Ю. В., Назмиев И. М.** Повышение нефтеотдачи пластов с трудноизвлекаемыми запасами с использованием физических методов в поле нестационарного заводнения // Нефтяное хозяйство. 2005. № 4. С. 76–79.
5. **Хабибуллин И. Л., Коновалова С. И., Садыкова Л. А.** Исследование температурных волн, возникающих при поглощении электромагнитного излучения в слоистых средах // Прикладная механика и техническая физика. 2015. Т. 56, № 3 (331). С. 14–20.
6. **Izmailova G. R.** Research on the high-frequency electromagnetic acoustic heating of an oil reservoir with further pumping of a solvent. *High Temperature*, 2018. vol. 56, no. 6, p. 910–914.
7. **Измайлова Г. Р.** Исследование комбинированного воздействия электромагнитного, акустического полей и смешивающегося вытеснения нефти растворителем на пористую среду: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Уфа, 2017. 132 с.
8. **Измайлова Г. Р., Ковалева Л. А., Насыров Н. М.** Математическое моделирование высокочастотного электромагнитного и акустического воздействия на пласт в сочетании с закачкой растворителя // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2015. Т. 10, № 3. С. 89–96.
9. **Саяхов Ф. Л.** Исследование термо- и гидродинамических процессов в многофазных средах в высокочастотном электромагнитном поле применительно к нефтедобыче: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М.: МГУ, 1985. 449 с.

## References

1. **Volodin S. V., Dmitriev V. L., Khusainov I. G.** The propagation of linear waves in humid, gas-saturated media. *High Temperature*, 2009, vol. 47, no. 5, p. 701–706.
2. **Fatykhov M. A., Bagautdinov N. Ya.** Experimental investigations of decomposition of gas hydrate in a pipe under the impact of a microwave electromagnetic field. *High Temperature*, 2005, vol. 43, no. 4, p. 614–619.
3. **Fatykhov M. A.** Filtration of a high-viscosity oil in an electromagnetic field. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2004, vol. 77, no. 2, p. 260–265.
4. **Dyblenko V. P., Evchenko B. C., Solonitsin S. N., Kuznetsov O. L., G. H. Gabitov, Lukyanov, Yu., Nazmiev I. M.** Enhanced oil recovery with hard to recover reserves with the use of physical methods in the field of non-stationary flooding. *Oil industry*, 2005, no. 4, p. 76–79. (in Russ.)
5. **Khabibullin I. L., Konovalov S. I., Sadykov L. A.** Investigation of the temperature waves generated by absorption of electromagnetic radiation in stratified media. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2015, vol. 56, no. 3 (331), p. 14–20. (in Russ.)
6. **Izmailova G. R.** Research on the high-frequency electromagnetic acoustic heating of an oil reservoir with further pumping of a solvent. *High Temperature*, 2018, vol. 56, no. 6, p. 910–914.
7. **Izmailova G. R.** Investigation of the combined effect of electromagnetic, acoustic fields and the mixing displacement of oil by a solvent on a porous medium: Dissertation of the Candidate of Physical and Mathematical Sciences. Ufa, 2017, 132 p. (in Russ.)
8. **Izmailova G. R., Kovaleva L. A., Nasyrov N. M.** Mathematical modeling of high-frequency electromagnetic and acoustic effects on the reservoir in combination with solvent injection. *Vestnik NSU. Series: Physics*, 2015, vol. 10, no. 3, p. 89–96. (in Russ.)
9. **Sayakhov F. L.** Investigation of thermo - and hydrodynamic processes in multiphase media in a high-frequency electromagnetic field in relation to oil production: Dis. doc. phys.-math. Moscow, MSU Press, 1985, 449 p. (in Russ.)

Материал поступил в редколлегию  
Received  
18.04.2020

## Сведения об авторах / Information about the Authors

**Измайлова Гульнара Ришадовна**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры разведки и разработки нефтяных и газовых месторождений, филиал ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет в г. Октябрьском» (Октябрьский, Россия)

**Gulnara R. Izmailova**, Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor of the Department of Exploration and Development of Oil and Gas Fields, a branch of the FSBEU of HE Ufa State Petroleum Technical University in Oktyabrsky (Oktyabrsky, Russian Federation)

gulena-86@mail.ru