

Научная статья / Original research article
УДК 622.276.656
DOI:10.31660/0445-0108-2025-6-33-42
EDN: YTACAE



Электротермическое воздействие на свойства нефти

П. М. Косьянов

*Филиал Тюменского индустриального университета в г. Нижневартовске,
Нижневартовск, Российская Федерация
kospiter2012@yandex.ru.*

Аннотация. Разработка новых эффективных способов повышения нефтедобычи является одной из актуальнейших задач нефтедобывающей отрасли. В статье представлены результаты экспериментальных исследований свойств нефтей Самотлорского месторождения методами электротермического воздействия. Измерения проведены на экспериментальной установке, разработанной в филиале ТИУ в г. Нижневартовске. Были выполнены измерения поляризационных свойств нефти, измерения плотностей и вязкостей нефти при наложении тепловых, электростатических и электромагнитных полей. Экспериментально показано возрастание снижения плотности и вязкости при одновременном воздействии теплового и электростатического полей и еще большего снижения плотности и вязкости при одновременном воздействии теплового и электромагнитного полей. Даны объяснения полученных результатов возрастания подвижности дипольных молекул, приводящего к снижению межмолекулярных сил. Наблюдалось снижение вязкости на 100 % и более, что позволяет прогнозировать такое же повышение нефтедобычи.

Ключевые слова: электротермическое воздействие, нефть, поляризация, плотность, вязкость, диполи, напряженность поля, вращательный момент, подвижность молекул, нефтедобыча

Для цитирования: Косьянов, П. М. Электротермическое воздействие на свойства нефти / П. М. Косьянов. – DOI 10.31660/0445-0108-2025-6-33-42 // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2025. – № 6. – С. 33–42. – EDN: YTACAE

Electrothermal effects on the properties of oil

Petr M. Kosianov

*The Branch of Industrial University of Tyumen in Nizhnevartovsk, Nizhnevartovsk,
Russian Federation
kospiter2012@yandex.ru*

Abstract. One of the most pressing challenges of the oil and gas industry is the development of new and effective methods to enhance oil production. This study presents the results of experimental research into the properties of crude oils from the Samotlor field, utilizing electrothermal treatment methods. The author of this article conducted measurements using an experimental setup developed at the Branch of Industrial University of Tyumen in Nizhnevartovsk. Specifically, the author assessed the polarization properties, density, and viscosity of the oil while exposing it to thermal, electrostatic, and electromagnetic fields. The experiments revealed a reduction in both the density and viscosity of the oil when subjected to simultaneous thermal and electrostatic fields. An even more pronounced decrease in these properties was observed under the combined effect of thermal and electro-

Keywords: electrothermal effects, oil, polarization, density, viscosity, dipoles, field strength, torque, molecular mobility, oil production

Введение

Рабочая область, в которой создавались тепловые, электростатические и электромагнитные поля, находилась между обкладками разборного конденсатора, разносившимися при помощи диэлектрического каркаса на расстояния от $d_0 = 2$ мм, до $d_m = 280$ мм. На обкладки конденсатора подавалось постоянное или переменное напряжение с блока питания В-24 напряжением до 30 В, или генератора переменного напряжения ГЗМЧ напряже-

нием до 8 В и частотой до 110 КГц. Между обкладок помещалась мензурка с нефтью, в которую погружался ареометр АОН 1 (700/1840) для измерения плотности и вискозиметр (ВНЖТ-2 или ВПЖ-4) для измерения плотности нефти. Тепловое поле в рабочей области создавалось воздушным тепло-вентилятором АД мощностью до 2 кВт, температура в рабочей области контролировалась термометром ртутным ТЛ-2. Время измерялось механическими и электронными секундомерами. Напряжение на обкладках контролировалось двухканальным осциллографом MOS-620. Результаты некоторых исследований приведены в работах [1–5].

Методы и результаты исследования

Измерения плотности и вязкости нефти проводились в соответствии с ГОСТ 33-82¹ и ГОСТ 19928-81². Погрешность измерений не превышала 10 % относительных. При воздействии постоянным электростатическим полем, при постоянной температуре, измерения диэлектрической проницаемости нефти давало значение $\epsilon \approx 2,0 \pm 0,2$, ее величина также оставалась неизменной при изменении напряженности электростатического поля при постоянной температуре ($T = 300$ К). Соответственно диэлектрическая восприимчивость вещества $\kappa = \epsilon - 1 \approx 1$. Поскольку молекулы нефти являются диполями, происходит дипольно-релакционная ориентация диполей по полю, вещество нефти поляризуется. Время релаксации (установления поляризации) $\tau \approx 10^{-6} - 10^{-8}$ с [6].

Время возвращения вещества нефти в исходное состояние (разориентация в результате теплового движения молекул) после выключения поля, так как $P(t) = P_{уст} \exp(-t/\tau)$, то при $P(t) = 0,01 P_{уст}$ (точность 1 % относительный) достигается через время $t = 100 \tau$, то есть в пределах $10^{-4} - 10^{-6}$ с. Поскольку время установления стационарных состояний между сериями измерений $t_{см} \sim 10$ минут, то ориентация и разориентация диполей происходит практически мгновенно.

Степень поляризованности вещества нефти $P = \kappa \epsilon_0 E$, напряженность электростатического поля $E = E_0 / \epsilon = U_0/d_0$, $\epsilon \approx 7500$ В/м, ϵ_0 — электрическая постоянная. Для исследуемой нефти значение вектора поляризованности составило

$$P = 6,64 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/м}^2.$$

С другой стороны, вектор поляризованности

$$P = \frac{\sum \mu}{V} \approx \frac{N \mu}{V} \approx n,$$

где μ — средний дипольный момент молекулы нефти, n — концентрация дипольных молекул. Из последнего выражения можно определить дипольный момент молекулы

¹ ГОСТ 33-82. Нефтепродукты. Метод определения кинематической и расчет динамической вязкости. — Введ. 1983-01-01. Москва: ИПК Издательство стандартов, 1997 — 31 с.

² ГОСТ 10028-81. Вискозиметры капиллярные стеклянные. Технические условия. — Введ. 1983-01-01. — Москва: Стандартинформ, 2005. — 50 с.

$$\mu = \frac{P}{n} = \frac{PM}{\rho Na},$$

где Na — постоянная Авогадро, ρ — плотность нефти, M — молярная масса нефти.

Для исследуемой нефти средний дипольный момент молекул нефти составил $\mu \approx 3,89 \cdot 10^{-30}$ Кл · м. В таблице 1 приведены дипольные моменты молекул различных углеводородов. Видим, что дипольный момент молекулы исследуемой нефти попадает между хлороформом и муравьиной кислотой.

Таблица 1

Дипольные моменты некоторых молекул

Молекула	$\mu_0 \cdot 10^{30}$ Кл · м	Молекула	$\mu_0 \cdot 10^{30}$ Кл · м	Молекула	$\mu_0 \cdot 10^{30}$ Кл · м
H ₂ O	5,52	N ₂ O	0,51	CsF	24,0
H ₂ O ₂	6,77	NO	6,48	CsCl	31,2
HF	5,73	NO ₂	0,87	CsI	36,8
HCl	3,24	HNO ₃	6,47	CH ₃ OH	5,13
HBr	2,97	F ₂ O	0,90	C ₂ H ₅ OH	5,01
HI	1,14	BrF	3,87	CHCl ₃	3,03
NH ₃	4,44	O ₃	1,59	HCOOH	4,05
PH ₃	1,74	H ₂ S	3,30	CH ₃ COOH	5,19
AsH ₃	0,39	NaCl	3,0	CH ₃ CH ₃	1,11

Новые результаты измерений представлены в таблицах 2–4 и на рисунке 2.

Таблица 2

Результаты измерений плотности и вязкости нефти с увеличением температуры, без электромагнитного поля

№ серии измерений	Температура (Т, К)	Плотность (ρ кг/м ³)	Среднее время истечения (t_{cp} , с)	Динамическая вязкость η (мПа·с)
1	303	852	10,19	26,054
2	308	850	7,39	18,850
3	313	849	6,78	17,274
4	318	848	6,21	15,803
5	323	847	5,77	14,666
6	328	846	5,38	13,659
7	333	845	4,82	12,237

Результаты измерений плотностей и вязкостей нефти при одновременном воздействии тепловым и электростатическим ($U = 30$ В, $E \approx 107$ В/м) полями показаны в таблице 3. Результаты при одновременном воздействии тепловым и электромагнитном полями ($U_m = 8$ В, $E_m \approx 30,7$ В/м, $v = 105$ КГц) полями приведены в таблице 4.

Таблица 3

Результаты измерений плотности и вязкости нефти с ростом температуры в электростатическом поле

№ серии измерений	Температура (Т, К)	Плотность (ρ кг/м ³)	Среднее время истечения ($t_{\text{ср}}$, с)	Динамическая вязкость η (мПа*с)
1	303	851	7,11	18,157
2	308	850	5,83	14,871
3	313	849	5,37	13,682
4	318	846	5,19	13,176
5	323	845	4,79	12,146
6	328	843	4,34	10,979
7	333	839	4,21	10,599

Таблица 4

Результаты измерений плотности и вязкости нефти с ростом температуры в электромагнитном поле

№ серии измерений	Температура (Т, К)	Плотность (ρ кг/м ³)	Среднее время истечения ($t_{\text{ср}}$, с)	Динамическая вязкость η (мПа*с)
1	303	850	6,41	16,3505
2	308	849	5,43	13,83444
3	313	848	5,12	13,02926
4	318	847	4,59	11,66676
5	323	845	4,38	11,1067
6	328	841	3,82	9,640808
7	333	837	3,67	9,218189

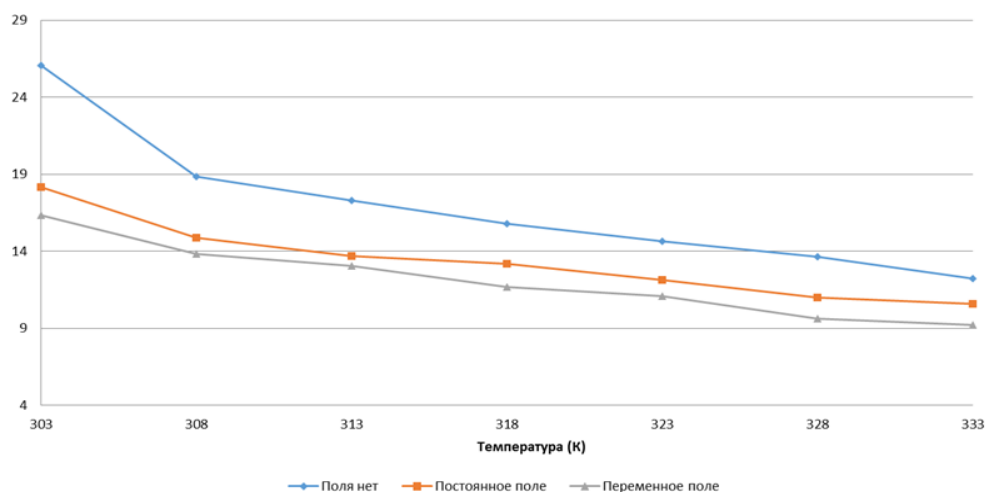


Рис. 2. Температурная зависимость вязкости вне полей (а), в электростатическом (б) и в электромагнитном (в) полях

Обсуждение результатов

Из полученных результатов следует, что наложение электростатического поля на тепловое позволяет дополнительно снижать вязкость на 16–30 %. При наложении же переменного поля наблюдается дополнительное снижение вязкости на 24–37 %.

Погрешности аппроксимации экспоненциальной функцией составили а) $S = 0,17$ б) $S = 0,12$; в) $S = 0,16$. Соответственно относительные погрешности: а) $S(\%) = 1,00$; б) $S(\%) = 0,89$; в) $S(\%) = 1,32$. Как видно из результатов, расхождения экспериментальных кривых намного больше погрешностей измерений и снижение вязкости не может объясняться погрешностью измерений.

Объяснить снижение вязкости при наложении электростатического поля можно следующим образом. В течение малого времени $\tau \approx 10^{-6} - 10^{-8}$ с. молекулярные диполи выстраиваются по линиям напряженности внешнего поля, вещество нефти поляризуется. Но в результате хаотического теплового движения и столкновения молекул происходит хаотическая разориентация диполей, затем под действием поля диполи опять ориентируются по полю, при этом дополнительно выделяется энергия в виде тепла, подвижность молекул возрастает, снижаются межмолекулярные силы и, как следствие, снижается и вязкость нефти. Измерить напрямую изменение температуры нефти при этих процессах невозможно, но косвенно мы можем это утверждать на основании снижения плотности нефти при измерениях с наложенными полями, так как плотность обратно пропорциональна температуре.

При наложении переменного электромагнитного поля складываются два эффекта: синхронные вращательные колебания дипольных молекул под действием переменного поля и хаотические столкновения молекул при их тепловом движении, что и приводит к еще большему снижению вязкости нефти. За поляризацию вещества отвечает вектор электрического поля E , который меняется как $E(t) = E_m \sin \omega t$. Поскольку период колебаний много больше времени релаксации $T \gg \tau$, то и поляризация меняется по такому же закону $P(t) = P_m \sin \omega t$ [6], инерциальность молекул не сказывается на поляризации.

В работе [22] было получено экспериментально и подтверждено теоретически следующее выражение для напряженности электрической составляющей напряженности электромагнитного поля

$$E = 2\pi C \cdot \tilde{U} / (\epsilon_0 \epsilon \cdot S).$$

Выводы

Из последнего уравнения следует, что максимальная напряженность и соответственно максимальный вращательный момент, $M = q \cdot E \cdot l = \mu \cdot E$, действующий на диполи молекул, достигаются при максимальных напряжениях U , подаваемых на обкладки конденсатора в лабораторных условиях или на скважины в полевых условиях.

Снижение вязкости при наложении электростатического поля можно объяснить следующим образом. В течение малого времени $\tau \approx 10^{-6} - 10^{-8}$ с молекулярные диполи выстраиваются по линиям напряженности внешнего поля, вещество нефти поляризуется. Но в результате хаотического теплового движения и столкновения молекул происходит хаотическая разориентация диполей. Затем под действием поля диполи опять ориентируются по полю, при этом выделяется дополнительно энергия в виде тепла, подвижность молекул возрастает, снижаются межмолекулярные силы, и, как следствие, снижается и вязкость нефти. Прямое измерение температурных изменений нефти в ходе этих процессов не представляется возможным. Однако косвенно мы можем утверждать это, основываясь на снижении плотности нефти при измерениях с наложенными полями, поскольку плотность обратно пропорциональна температуре.

Одновременное электротермическое воздействие на нефть приводит к максимальному снижению вязкости нефти [7–11].

С помощью этого способа вязкость нефти может быть снижена до 100 % и более. Снижение вязкости для различных видов нефтей позволяет ожидать соответствующего увеличения добычи нефти при применении данного способа в полевых условиях. Практическая реализация способа снижения вязкости частично рассмотрена в [12–18]. Например, в патенте³ разработан способ паротеплового снижения вязкости нефти.

Список источников

1. Косьянов, П. М. Модель определения и повышения КИН. Проблемы и пути их решения / П. М. Косьянов. – Текст : непосредственный // Инновационные процессы в науке и технике XXI века: материалы XVII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов, ученых, педагогических работников и специалистов-практиков. – Тюмень : Тюменский индустриальный университет, 2019. – С. 8–13.
2. Kosianov, P. M. Ways to improve production efficiency. problems and ways of their solution / P. M. Kosianov. – DOI 10.1088/1757-899X/663/1/012069. – Text : direct // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing. – 2019. – Vol. 663, Issue 1. – P. 012069.
3. Khudaiberdiev, A. T. Integrated physical enhanced recovery method for high-viscosity oil reservoirs / A. T. Hudajberdiev P. M. Kosianov. – DOI 10.1051/e3sconf/202124409012. – Text : direct // E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2021. – Vol. 244. – P. 09012.
4. Kosianov, P. M. Studies of Oil Viscosity Under the Influence of Thermal and Electromagnetic Fields / P. M. Kosianov. – DOI 10.1088/1755-1315/666/2/022021. – Text : direct // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2021. – Vol. 666, Issue 2. – P. 022021.
5. Косьянов, П. М. Исследования воздействия тепловыми и электромагнитными полями на вязкость нефти / П. М. Косьянов. – Текст: непосредственный // Недропользование XXI век. – 2022. – № 4 (96). – С. 80–84.

³ Патент (19)RU(11) 155161(13) U1, (51) МПК, 27.09.2015

6. Томилин, В. И. Физическое материаловедение. В 2 ч. : учебное пособие / В. И. Томилин, Н. П. Томина, В. А. Бахтина. – Красноярск : Сибирский федеральный университет (СФУ), 2012. – Часть 1. Пассивные диэлектрики. – 280 с. – Текст : непосредственный.
7. Косьянов, П. М. Зависимость вязкости нефти от подвижности молекул при воздействии тепловыми и электромагнитными полями / П. М. Косьянов. – Текст : непосредственный // Инновационные процессы в науке и технике XXI века : материалы XIX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов, ученых, педагогических работников и специалистов-практиков. – Тюмень, 2021. – С. 212–218.
8. Косьянов, П. М. Снижение вязкости нефти при воздействии тепловыми и электромагнитными полями / П. М. Косьянов. – Текст : непосредственный // Современная техника и технологии: проблемы и перспективы. – Тюмень, 2021. – С. 173–178.
9. Косьянов, П. М. Исследования вязкости нефти / П. М. Косьянов. – Текст : непосредственный // Инновационные процессы в науке, технике и экономике : материалы Международной научно-практической конференции. – Тюмень : Тюменский индустриальный университет. – 2022. – С. 32–38.
10. Косьянов, П. М. Способ снижения вязкости нефти / П. М. Косьянов, Н. И. Кольцов. – DOI 10.37952/ROI-jbc-01/23-74-5-54. – Текст : непосредственный // Бутлеровские чтения. – 2023. – Т. 74, № 5. – С. 54–59.
11. Косьянов, П. М. Электромагнитные поля экспериментальной установки по снижению вязкости нефтей / П. М. Косьянов. – Текст : непосредственный // Опыт, актуальные проблемы и перспективы развития нефтегазового комплекса: материалы XIII Международной научно-практической конференции обучающихся, аспирантов и ученых. – Тюмень, 2024. – С. 203–208.
12. Косьянов, П. М. Повышение нефтедобычи с использованием термальных пластовых вод / П. М. Косьянов, Н. И. Кольцов. – DOI 10.37952/ROI-jbc-01/24-77-2-68. – Текст : непосредственный // Бутлеровские сообщения. – 2024. – Т. 77, № 2. – С. 68–72.
13. Косьянов, П. М. Оптимизация параметров электромагнитного поля экспериментальной установки по снижению вязкости нефти / П. М. Косьянов. – Текст : непосредственный // Недропользование XXI век. – 2025. – № 2-3 (107). – С. 172–177.
14. Косьянов, П. М. Оптимизация параметров бурового инструмента для повышения его эффективности / П. М. Косьянов, В. Г. Краснов. – Текст : непосредственный // Недропользование XXI век. – 2019. – № 1 (77). – С. 62–65.
15. Худайбердиев, А. Т. Физико-химический метод повышения КИН / А. Т. Худайбердиев, П. М. Косьянов. – Текст : непосредственный // Инновационные процессы в науке и технике XXI века: материалы XIX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов, ученых, педагогических работников и специалистов-практиков. – Тюмень : Тюменский индустриальный университет, 2021. – С. 282–286.
16. Худайбердиев, А. Т. Электрохимический метод увеличения нефтеотдачи пласта / А. Т. Худайбердиев, П. М. Косьянов, А. С. Полищук. – Текст : непосредственный // Деловой журнал Neftegaz.RU. – 2021. – № 1(109). – С. 58–63.
17. Косьянов, П. М. Проектирование компьютерной модели эксплуатации нескольких пластов одной нагнетательной скважины / П. М. Косьянов, Н. В. Манюкова. – DOI 10.24147/2222-8772.2021.4.94-108. – Текст : непосредственный // Математические структуры и моделирование. – 2021. – № 4(60). – С. 94–108.

18. Косьянов, П. М. Повышение нефтедобычи интегрированием физических способов разработки / П. М. Косьянов. – Текст : непосредственный // Опыт, актуальные проблемы и перспективы развития нефтегазового комплекса : материалы IX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов, и ученых. – Тюмень, 2019. – С. 118–123.

References

1. Kosianov, P. M. (2019). A model for determining and increasing KIN. Problems and ways to solve them. Innovative processes in science and technology of the XXI century: materials of the XVII International Scientific and Practical Conference of Students, postgraduates, scientists, teachers and practitioners. Tyumen, Tyumenskiy industrial'nyy universitet Publ., pp. 8-13. (In Russian).
2. Kosianov, P. M. (2019). Ways to improve production efficiency problems and ways of their solution. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 663(1), p. 012069. IOP Publishing. (In English). DOI:10.1088/1757-899X/663/1/012069.
3. Khudaiberdiev, A. T., & Kosianov, P. M. (2021). Integrated physical enhanced recovery method for high-viscosity oil reservoirs. In E3S Web of Conferences, (244), p. 09012. EDP Sciences. (In English). DOI: 10.1051/e3sconf/202124409012
4. Kosianov, P. M. (2021). Studies of Oil Viscosity Under the Influence of Thermal and Electromagnetic Fields. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 666(2), p. 022021. IOP Publishing. (In English). DOI: 10.1088/1755-1315/666/2/022021
5. Kosianov, P. M. (2022). Studies of the effects of thermal and electromagnetic fields on the viscosity of oil. Nedropolzovanie XXI vek, 4 (96), pp. 80-84. (In Russian).
6. Tomilin, V. I., Tomilina, N. P., & Bakhtina V. A. (2012). Physical materials science. Part 1. Krasnoyarsk, Siberian Federal University Publ., 280 p. (In Russian).
7. Kosianov, P. M. (2021). Dependence of oil viscosity on the mobility of molecules when exposed to thermal and electromagnetic fields. Innovative processes in science and technology of the XXI century. Materials of the XIX International Scientific and Practical Conference of students, postgraduates, scientists, teachers and practitioners. Tyumen, pp. 212-218. (In Russian).
8. Kosianov, P. M. (2021). Reduction of oil viscosity when exposed to thermal and electromagnetic fields. Modern Machinery and Technologies: Problems and Prospects. Tyumen, pp. 173-178. (In Russian).
9. Kosianov, P. M. (2022). Studies of oil viscosity. Innovative processes in science, technology and economics. Materials of the International Scientific and Practical Conference. Tyumen, Tyumenskiy industrial'nyy universitet Publ., pp. 32-38. (In Russian).
10. Kosianov, P. M. & Koltsov, N. I. (2023). Method of reducing oil viscosity Butlerov communications, 74(5), pp. 54-59. (In Russian). DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/23-74-5-54
11. Kosianov, P. M. (2024). Electromagnetic fields of an experimental oil viscosity reduction facility. Experience, current problems and prospects for the development of the oil and gas complex: proceedings of the XIII International Scientific and Practical Conference of Students, postgraduates and Scientists. Tyumen, pp. 203-208. (In Russian).
12. Kosianov, P. M. & Koltsov, N. I. (2024). Increasing oil production using thermal formation waters, Butlerov communications, 77(2), pp. 68-72. (In Russian). DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/24-77-2-68

13. Kosianov, P. M. (2025). Optimization of electromagnetic field parameters experimental oil viscosity reduction facility. Subsoil use of the XXI century, 2-3(107), pp. 172-177. (In Russian).
14. Kosyanov, P. M. & Krasnov, V. G. (2019). Optimization of drilling tool parameters to increase its efficiency. Nedropolzovanie XXI vek. No. 1 (77), pp. 62-65. (In Russian).
15. Khudaiberdiev, A. T. & Kosianov, P. M. (2021). Physico-chemical method of increasing KIN/ A.T. Khudaberdiev, P. M. Kosianov. Innovative processes in science and technology of the XXI century: materials of the XIX International Scientific and Practical Conference of Students, postgraduates, Scientists, teachers and practitioners. – Tyumen, Tyumenskiy industrial'nyy universitet Publ., pp. 282-286. (In Russian).
16. Khudaiberdiev, A. T., Kosianov, P. M., & Polishchuk, A. S. (2021). Electrochemical method of increasing oil recovery. Neftegaz.RU, 1(109), pp. 58-63. (In Russian).
17. Kosianov, P. M. & Manyukova, N. V. (2021). Designing a computer model for operating several formations of one injection well. Mathematical structures and modeling, 4(60), pp. 94-108. (In Russian). DOI: 10.24147/2222-8772.2021.4.94-108
18. Kosianov, P. M. (2019). Increasing oil production by integrating physical methods of development. Experience, current problems and prospects for the development of the oil and gas complex: materials of the IX International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates, and Scientists. Tyumen, pp. 118-123. (In Russian).

Информация об авторе/ Information about the author

Косьянов Пётр Михайлович,
доктор физико-математических наук,
кандидат технических наук, доцент,
профессор кафедры гуманитарно-
экономических и естественнонаучных
дисциплин, Филиал ТИУ в г. Нижне-
вартовске, kospiter2012@yandex.ru

Petr M. Kosianov, Doctor of Physical
and Mathematical Sciences, Candidate of
Engineering Sciences, Associate Professor,
Professor at the Department of Humanities,
Economics and Sciences, the Branch of Indus-
trial University of Tyumen in Nizhnevartovsk,
kospiter2012@yandex.ru

Поступила в редакцию / Received 05.11.2025

Поступила после рецензирования / Revised 04.12.2025

Принята к публикации / Accepted 05.12.2025