

К вопросу потенциального применения электропроводности при оценке коррозионной активности кислотных растворов

А. А. Ибраев, И. А. Аленкин, Р. Р. Закиров, Т. Т. Белова
Альметьевский государственный технологический университет
«Высшая школа нефти», Альметьевск, Россия

В статье рассмотрена возможность применения электропроводности в качестве потенциального метода для оценки коррозионной активности кислотных растворов. Основное внимание уделено анализу связи между изменением электропроводности кислотной среды и изменением её коррозионной активности. В экспериментальной части моделировалась дестабилизация ингибитора коррозии путём дозированного введения ионов железа в ингибированные кислотные растворы. Параллельно проводили гравиметрические испытания образцов углеродистой стали и измерения удельной электропроводности и омического сопротивления растворов. Установлено, что увеличение концентрации ионов железа в растворе приводит к росту скорости коррозии стали, что сопровождается снижением электропроводности и повышением омического сопротивления. Полученные данные свидетельствуют о наличии возможной корреляции между ростом коррозионной активности кислотных растворов и его электрическими характеристиками. Предположительно, измерение электропроводности может быть использовано как вспомогательный дополнительный способ оперативного контроля состояния кислотных растворов, например, при их хранении или перед применением. При этом электропроводность и омическое сопротивление не определяют коррозионную активность напрямую, однако потенциально могут фиксировать преобразования, сопровождающие возможные изменения растворов кислот. Поэтому предлагаемый метод может рассматриваться как ориентировочный, требующий дальнейших исследований.

Ключевые слова: электропроводность; омическое сопротивление; коррозионная активность; кислотные растворы; ингибиторы коррозии; скорость коррозии.

Для цитирования: Ибраев А.А., Аленкин И.А., Закиров Р.Р., Белова Т.Т. (2026). К вопросу потенциального применения электропроводности при оценке коррозионной активности кислотных растворов. Трудноизвлекаемые запасы, 1(2), с. 64-69.

On the issue of potential application of electrical conductivity in assessing the corrosive activity of acid solutions

A. A. Ibraev, I. A. Alenkin, R. R. Zakirov, T. T. Belova
Almetyevsk State Technological University «Petroleum higher school»
Almetyevsk, Russian Federation

The article considers the possibility of using electrical conductivity as a potential method for assessing the corrosive activity of acid solutions. The main attention is paid to the analysis of the relationship between changes in the electrical conductivity of the acid medium and changes in its corrosive activity. In the experimental part, destabilization of the corrosion inhibitor was simulated by dosed introduction of iron ions into inhibited acid solutions. Gravimetric tests of carbon steel specimens and measurements of the specific electrical conductivity and ohmic resistance of the solutions were carried out in parallel. It was found that an increase in the concentration of iron ions in the solution leads to an increase in the corrosion rate of steel, accompanied by a decrease in electrical conductivity and an increase in ohmic resistance. The obtained data indicate a possible correlation between an increase in the corrosive activity of acid solutions and their electrical characteristics. Presumably, electrical conductivity measurement can be used as an additional auxiliary method for rapid monitoring of the state of acid solutions, for example, during their storage or before use. At the same time, electrical conductivity and ohmic resistance do not directly determine corrosive activity, but can potentially record transformations accompanying possible changes in acid solutions. Therefore, the proposed method can be considered as indicative, requiring further research.

Keywords: electrical conductivity; ohmic resistance; corrosive activity; acid solutions; corrosion inhibitors; corrosion rate.

Recommended citation: Ibraev A.A., Alenkin I.A., Zakirov R.R., Belova T.T. (2026). On the issue of potential application of electrical conductivity in assessing the corrosive activity of acid solutions. Hard-to-recover reserves, 1(2), pp. 64-69.

Введение

Существенным фактором, влияющим на работоспособность нефтепромыслового оборудования, является коррозия. Коррозионные повреждения часто выступают одной из основных причин выхода из строя оборудования на объектах транспортировки и хранения составов, используемых для проведения кислотных обработок (Давлетшина и др., 2023). Сущность таких обработок заключается в закачке кислотных составов в призабойную зону пласта для растворения карбонатных и терригенных пород, удаления загрязнений и восстановления проницаемости продуктивного пласта (Телков, Ситди-

ков, 2023). Промышленное применение растворов кислот во многом определяется их способностью быстро и эффективно разрушать минеральные образования различной природы, однако при контакте с такими средами металлическое оборудование может подвергаться коррозионному разрушению, если не применяются специальные меры защиты, включая ингибиторы коррозии (Авдеев, Кузнецов, 2023). Поэтому рассмотрение и поиск дополнительных методов оценки кислотных растворов перед их применением является актуальной задачей. Развитие коррозии нередко протекает скрыто, а ущерб проявляется в затратах на ремонт или замену оборудова-

ния, недополученной прибыли из-за простоев скважин и расходах на ликвидацию последствий аварий (Юдин, 2025).

Электропроводность как дополнительный метод оценки

Способность проводить электрический ток является одним из характерных свойств растворов электролитов (Артемкина, 2016). Высокая удельная электропроводность наблюдается в водных растворах сильных неорганических кислот (Артемкина, 2016), в том числе соляной. Предположительно, изменение состава кислотной среды может сопровождаться изменением её электропроводности, что позволяет рассматривать этот параметр как возможный индикатор состояния состава кислотных растворов, в частности для косвенной оценки их коррозионной активности.

Коррозией называется разрушение металлов вследствие химического или электрохимического взаимодействия их с коррозионной средой, при этом при электрохимической коррозии образование продуктов коррозии является результатом протекания анодных и катодных реакций коррозионного процесса (ГОСТ 9.106, 2021). Внешние факторы возникновения коррозии, связанные с составом среды и условиями процесса, оказывают влияние на анодные и катодные реакции, а также на омическое сопротивление коррозионного элемента (Лучкин, 2017).

В зарубежном исследовании А. М. Альтвайка и соавторов (Altwaiq и др., 2020) показано, что изменения электропроводности среды коррелируют с протеканием коррозионных процессов металла в соляной кислоте. Авторами также отмечено, что электропроводность раствора определяется рядом факторов, таких как заряд и подвижность ионов, а также их концентрация. В работе К. В. Рыбалки и соавторов (Рыбалка и др., 2019) показано, что метод измерения омического сопротивления образца может быть использован для оценки скорости коррозии стали в растворах соляной кислоты. Изменение омического сопротивления образца в процессе его экспозиции в HCl отражает изменение массы растворённого металла и позволяет оценить зависимость скорости коррозии от концентрации кислоты.

Для оценки возможности применения электропроводности в качестве индикатора изменения коррозионной активности среды в экспериментальной части работы моделировалась дестабилизация ингибиторов коррозии в ингибированных растворах соляной кислоты путем добавления в растворы различной концентрации ионов Fe^{3+} . В исследовании Я.Г. Авдеева и Ю.И. Кузнецова (Авдеев, Кузнецов, 2023) отмечено, что присутствие в кислой среде окислителей, в частности катионов Fe^{3+} , существенно снижает защитное действие ингибиторов коррозии (ИК), поскольку катионы Fe^{3+} смещают потенциал коррозии в положительную область, затрудняя адсор-

бцию органических ингибиторов. Оценка возможного снижения защитного действия проводилась с использованием гравиметрических испытаний и параллельным измерением электропроводности и омического сопротивления при помощи кондуктометра (Маркин, 2024).

Материалы и методы

Эксперименты начинались с этапа, включающего подготовку металлических образцов и исследуемых ингибированных кислотных растворов. В качестве образцов-свидетелей (рис. 1, 2) использовались пластины из углеродистой стали. Перед проведением экспериментов образцы были зачищены абразивным материалом, обезжирены и высушены при комнатной температуре в эксикаторе.



Рис. 1. Образец № 1



Рис. 2. Образец № 2

Далее каждый образец проходил процедуру начального взвешивания на аналитических весах с точностью до 0,001. В качестве исследуемых сред использовались ингибированные растворы соляной кислоты с разной концентрацией. Моделирование дестабилизации ингибитора коррозии (далее – ИК) осуществлялось путём дозированного введения ионов железа в кислотный раствор (далее – КР) (рис. 3, 4). Диапазон дозирования ионов железа выбран от 0,2 до 1,5%.



Рис. 3. Кислотный раствор с меньшей концентрацией (КР №1)



Рис. 4. Кислотный раствор с большей концентрацией (КР №2)

Выдержка образцов в исследуемых растворах проводилась в течение 24 часов при 20°C. По завершении опыта образцы извлекались, промывались дистиллированной водой и спиртом, затем высушивались и повторно взвешивались. Параллельно с гравиметрическими испытаниями с увеличением концентрации ионов железа проводились измерения электропроводности и омического сопротивления.

Расчет скорости коррозии (скорости растворения стали) рассчитывался следующим образом:

1. Определялась потеря массы каждого образца-свидетеля:

$$\Delta m = m_0 - m_1 \quad (1)$$

где,

Δm – потеря массы пластины;

m_0 – начальная масса пластины;

m_1 – потеря массы пластины после выдержки в кислотном растворе.

2. Вычислялась скорость коррозии:

$$v = \frac{\Delta m}{S * t} \quad (2)$$

Δm – потеря массы пластины;

S – площадь поверхности образца, мм²;

t – время выдержки в кислотном составе.

На основании результатов проведенных экспериментов была составлена таблица 1.

Таблица 1 – Результаты экспериментов скорости коррозии кислотных растворов при моделировании дестабилизации ингибиторов коррозии

№	Наименование	Концентрация ионов железа, %	Масса до, г	Масса после, г	S, площадь	Скорость коррозии, г/(м ² ·ч)
1	КР № 1	0	14,3524	14,3495	0,00222	0,054
2	КР № 1	0,2	22,909	22,887	0,0024	0,28
3	КР № 1	0,5	20,023	20,000	0,0022	0,43
4	КР № 1	1,0	20,000	19,953	0,0022	0,88
5	КР № 1	1,5	19,952	19,895	0,0022	1,07
6	КР № 2	0	14,3740	14,3703	0,0022	0,07
7	КР № 2	0,2	22,991	22,974	0,0024	0,29
8	КР № 2	0,5	22,988	22,956	0,0024	0,57
9	КР № 2	1,0	22,8422	22,7807	0,0022	1,01
10	КР № 2	1,5	22,948	22,887	0,0022	1,15

Для ингибированной соляной кислоты при 20 °C скорость коррозии целесообразно поддерживать на уровне не выше 0,2 г/м²·ч. На основании данных, представленных в таблице 1, был построен график

зависимости скорости коррозии стали от концентрации ионов железа в растворах соляной кислоты с различной концентрацией.

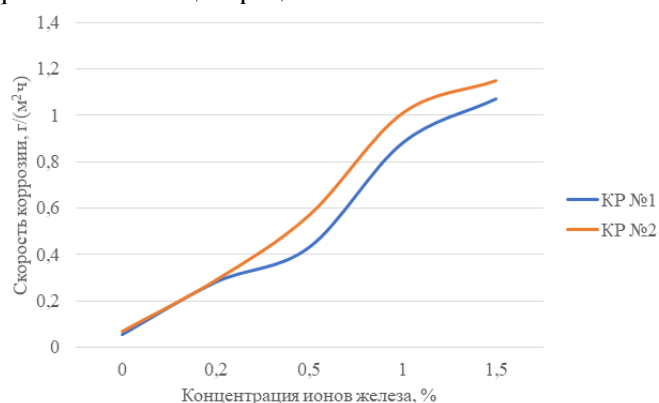


Рис. 5. График влияния увеличения концентрации ионов железа на скорость растворения стали

Анализ данных, представленных в таблице 1 и на рисунке 5, показывает, что при моделировании дестабилизации ИК в растворах соляной кислоты увеличивается скорость коррозии. Для обоих исследуемых кислотных растворов наблюдается тенденция увеличения скорости коррозии при повышении содержания ионов железа в растворе. При минимальной концентрации ионов железа исследуемые растворы характеризуются сравнительно низкой скоростью коррозии. С увеличением концентрации отмечается последовательное возрастание скорости коррозии.

Далее были проведены измерения электропроводности и омического сопротивления кислотного раствора КР №1 и КР №2 при моделировании дестабилизации ингибиторов коррозии. Результаты представлены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2 – Результаты тестирования кислотного раствора № 1 на электропроводность и омическое сопротивление

№	Наименование	Концентрация ионов железа, %	Электропроводность, ms/cm	Омическое сопротивление, Ω*см
1	КР №1	0	904,5	0,40
2	КР №1	0,5	891,5	0,40
3	КР №1	1,0	877,6	0,41
4	КР №1	2,0	864,1	0,41
5	КР №1	3,0	856,8	0,42
6	КР №1	5,0	808,4	0,43
7	КР №1	10,0	788,9	0,46

Таблица 3 – Результаты тестирования кислотного раствора № 2 на электропроводность и омическое сопротивление

№	Наименование	Концентрация ионов железа, %	Электропроводность, мСм/см	Омическое сопротивление, Ом·см
1	КР № 2	0	956,2	0,38
2	КР № 2	0,5	942,1	0,39
3	КР № 2	1,0	927,8	0,39
4	КР № 2	2,0	912,4	0,40
5	КР № 2	3,0	904,8	0,40
6	КР № 2	5,0	881,7	0,41
7	КР № 2	10,0	860,9	0,43

На основе данных, представленных в таблицах 2 и 3, были построены графики зависимостей электропроводности и омического сопротивления кислотных составов от степени дозирования ионов железа.

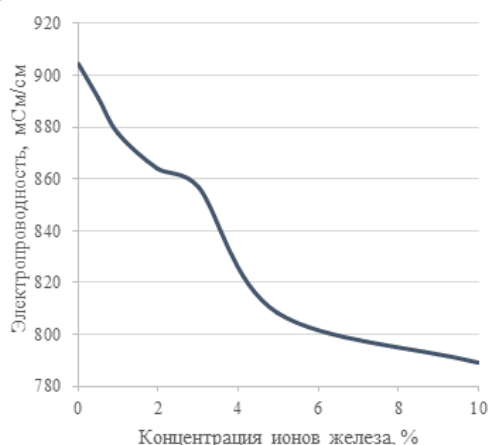


Рис. 6. Зависимость электропроводности КР №1 при моделировании дестабилизации ИК

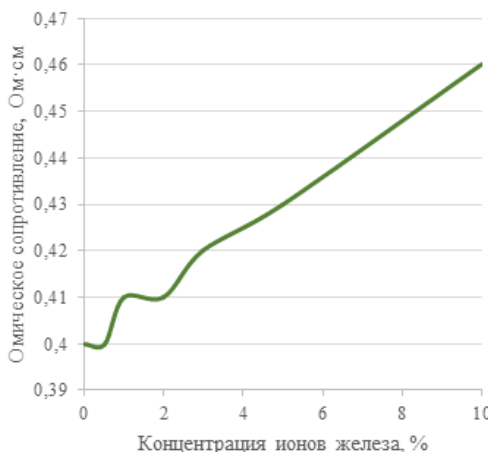


Рис. 7. Зависимость омического сопротивления КР №1 при моделировании дестабилизации ИК

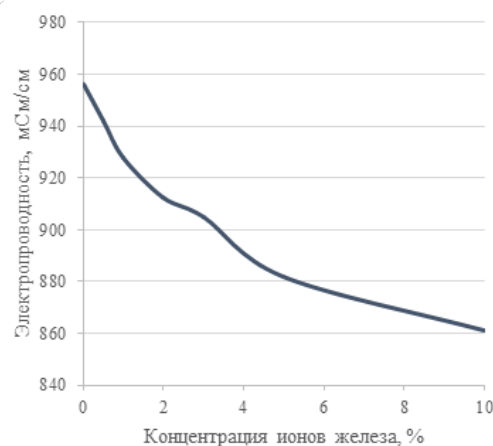


Рис. 8. Зависимость электропроводности КР №2 при моделировании дестабилизации ИК



Рис. 9. Зависимость омического сопротивления КР №2 при моделировании дестабилизации ИК

Результаты экспериментов

При моделировании дестабилизации ингибитора коррозии в растворе КР №1 с меньшей концентрацией соляной кислоты скорость коррозии стали возрастает с 0,054 до 1,07 г/(м²·ч) при увеличении содержания ионов железа от 0 до 1,5% (табл. 1, рис. 5). Электропроводность этого раствора (табл. 2, рис. 6, 7) снижается с 904,5 до 788,9 мСм/см, а омическое сопротивление увеличивается с 0,40 до 0,46 Ом·см при росте концентрации ионов железа. Для раствора КР №2 с большей концентрацией соляной кислоты (табл. 3, рис. 8, 9) наблюдается аналогичная зависимость. Скорость коррозии повышается с 0,07 до 1,15 г/(м²·ч) в диапазоне 0–1,5% ионов железа. Электропроводность падает с 956,2 до 860,9 мСм/см, омическое сопротивление растёт с 0,38 до 0,43 Ом·см.

Выводы

На основе полученных данных можно предположить, что измерение электропроводности можно рассматривать как дополнительный метод оценки коррозионной активности кислотных растворов перед их применением. При этом электропроводность и омическое сопротивление не определяют коррозионную активность напрямую, однако потенциально

могут фиксировать преобразования, сопровождающие возможные изменения растворов кислот.

Список литературы

1. Авдеев, Я.Г., Кузнецов Ю.И. (2023). Органические ингибиторы коррозии металлов в растворах кислот. I. Особенности механизма защитного действия. Журнал физической химии, Т. 97, № 3, с. 305–321. DOI 10.31857/S0044453723030056. – EDN DWCNDM.
2. Артемкина Ю. М., Загоскин Ю. Д., Кузнецов Н. М., Щербаков В. В. (2016). Закономерности в электропроводности водных растворов некоторых неорганических кислот. Химия и химическая технология, Т. 59. № 2, с. 26–29.
3. ГОСТ 9.106–2021 Единая система защиты от коррозии и старения. Коррозия металлов. Термины и определения. – Введ. 2022–01–01. – М.: Российский институт стандартизации, 2021. – 28 с.
4. Давлешина Л. Ф., Толстых Л. И., Потешкина К. А. и др. (2023). Изучение особенностей подбора эффективных ингибиторов коррозии для различных кислот. Практика противокоррозионной защиты, Т. 28. № 2, с. 34–41. DOI: 10.31615/j.corros.prot.2023.28.2.4.
5. Лучкин Р. С. (2017). Коррозия и защита металлических материалов (структурные и химические факторы). Электронное учебное пособие. Тольятти: Изд-во Тольяттинского государственного университета, 269 с. – ISBN 978-5-8259-1160-1.
6. Маркин А. Н. (2024). Оценка локальной коррозии по данным, получаемым с датчиков электрического сопротивления (часть 2). Практика противокоррозионной защиты, Т. 29, № 2, с. 21–26. <https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2024.112.2-2>
7. Рыбалка К. В., Бекетаева Л. А., Давыдов А. Д. (2019). Определение скорости коррозии стали AISI 304 в растворах HCl методом измерения омического сопротивления исследуемого образца. Электрохимия, Т. 55, № 9, с. 1147–1152. – DOI 10.1134/S0424857019080139. – EDN SLQAKY
8. Телков В. П., Ситдилов С. С. (2023). Особенности проведения кислотной обработки скважин в сложных геолого-промысловых условиях: учет свойств скважины и околоскважинной зоны пласта. SOCAR Proceedings, № 4, с. 106–115. DOI: 10.5510/OGP20230400923
9. Юдин П. Е. (2025). Функциональные покрытия погружного нефтепромыслового оборудования для защиты от коррозии, асфальтосмолопарафиновых и солевых отложений.

Обзор: Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия, Т. 19, № 1, с. 58–74. DOI: 10.17073/1997-308X-2025-1-58-74.

10. Altwaiq A., Khouri S., Abdel-Rahem R. and Alkhawaldeh A. (2020). Conductivity method as a new monitoring technique for corrosion and corrosion inhibition processes of zinc metal. American journal of analytical chemistry, pp. 349–361. doi: 10.4236/ajac.2020.1110028.

Сведения об авторах

Ибраев Азат Азаматович – специалист лаборатории «Нефтепромысловая химия», Передовая инженерная нефтяная школа, «Альметьевский государственный технологический университет «Высшая школа нефти»

Россия, 423462, Альметьевск, ул. Советская, д. 186А

e-mail: a.ibraev@agni-rt.ru

Аленькин Илья Алексеевич – и.о. заведующего лабораторией «Нефтепромысловая химия», Передовая инженерная нефтяная школа, «Альметьевский государственный технологический университет «Высшая школа нефти»

Россия, 423462, Альметьевск, ул. Советская, д. 186А

e-mail: i.alenkin@agni-rt.ru

Закиров Ринат Рашитович – научный сотрудник лаборатории «Нефтепромысловая химия», Передовая инженерная нефтяная школа, Альметьевский государственный технологический университет «Высшая школа нефти»

Россия, 423462, Альметьевск, ул. Советская, д. 186А

e-mail: zakirov@agni-rt.ru

Белова Татьяна Тарасовна – научный сотрудник лаборатории «Нефтепромысловая химия», Передовая инженерная нефтяная школа, Альметьевский государственный технологический университет «Высшая школа нефти»

Россия, 423462, Альметьевск, ул. Советская, д. 186А

e-mail: t.belova@agni-rt.ru

References

1. Avdeev Ya. G., Kuznetsov Yu. I. (2023). Organic corrosion inhibitors for metals in acid solutions. I. Features of the protective action mechanism. Russian journal of physical chemistry. Vol. 97. No. 3. P. 305–321. DOI: 10.31857/

S0044453723030056. EDN: DWCNDM.

2. Artemkina Yu. M., Zagoskin Yu. D., Kuznetsov N. M., Shcherbakov V. V. (2016). *Regularities in electrical conductivity of aqueous solutions of some inorganic acids. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya. Vol. 59. No. 2. P. 26–29.*
3. GOST 9.106–2021. *Unified system of corrosion and ageing protection. Corrosion of metals. Terms and definitions. Introduced 2022–01–01. Moscow: Russian institute of standardization, 2021. 28 p.*
4. Davletshina L. F., Tolstykh L. I., Poteshkina K. A. et al. (2023). *Study of features of effective corrosion inhibitors selection for various acids. Practice of anti-corrosion protection. Vol. 28. No. 2. P. 34–41. DOI: 10.31615/j.corros.prot.2023.28.2.4*
5. Luchkin R. S. (2017). *Corrosion and protection of metallic materials (structural and chemical factors): electronic textbook. Togliatti: Togliatti state university publishing house, 269 p. ISBN 978-5-8259-1160-1.*
6. Markin A. N. (2024). *Evaluation of local corrosion based on data obtained from electrical resistance sensors (Part 2). Practice of anti-corrosion protection, Vol. 29. No. 2. P. 21–26. https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2024.112.2-2*
7. Rybalka K. V., Beketaeva L. A., Davydov A. D. (2019). *Determination of corrosion rate of AISI 304 steel in HCl solutions by measuring the ohmic resistance of the test sample. Russian journal of electrochemistry, Vol. 55. No. 9. P. 1147–1152. DOI: 10.1134/S0424857019080139. EDN: SLQAKY.*
8. Telkov V. P., Sitdikov S. S. (2023). *Features of acid treatment of wells in complex geological and field conditions: taking into account well and near-wellbore zone properties. SOCAR Proceedings. No. 4. P. 106–115. DOI: 10.5510/OGP20230400923.*
9. Yudin P. E. (2025). *Functional coatings for submersible oilfield equipment for protection against corrosion, asphaltene–resin–paraffin and salt deposits: A review. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Powder metallurgy and functional coatings. Vol. 19. No. 1. P. 58–74. DOI: 10.17073/1997-308X-2025-1-58-74.*
10. Altwaiq A., Khouri S., Abdel-Rahem R., Alkhawaldeh A. (2020). *Conductivity method as a new monitoring technique for corrosion and corrosion inhibition processes of zinc metal. American journal of analytical chemistry. P. 349–361. DOI: 10.4236/ajac.2020.1110028*

About the authors

Azat A. Ibraev – specialist, laboratory of oilfield chemistry, Higher school of petroleum, Almetьевsk state technological university «Petroleum higher school»

186A Sovetskaya str., Almetьевsk, 423462, Russian Federation

e-mail: a.ibraev@agni-rt.ru

Ilya A. Alenkin – acting head of the laboratory of oilfield chemistry, Higher school of petroleum, Almetьевsk state technological university «Petroleum higher school»

186A Sovetskaya str., Almetьевsk, 423462, Russian Federation

e-mail: i.alenkin@agni-rt.ru

Rinat R. Zakirov – research associate, laboratory of oilfield chemistry, Higher school of petroleum, Almetьевsk state technological university «Petroleum higher school»

186A Sovetskaya str., Almetьевsk, 423462, Russian Federation

e-mail: zakirov@agni-rt.ru

Tatyana T. Belova – research associate, laboratory of oilfield chemistry, Higher school of petroleum, Almetьевsk state technological university «Petroleum higher school»

186A Sovetskaya str., Almetьевsk, 423462, Russian Federation

e-mail: t.belova@agni-rt.ru

Статья поступила в редакцию 26.05.2026;

Принята к публикации 24.06.2026;

Опубликована 30.06.2026