

Научная статья

УДК 541.1, 544.2, 544.7

doi: 10.17223/24135542/39/4

## **Изучение термодинамических особенностей имидазолинового ингибитора адсорбционного принципа действия в сероводородсодержащих средах**

**Даниил Юрьевич Карачевский<sup>1</sup>, Ахат Газизьянович Мустафин<sup>2</sup>**

<sup>1, 2</sup> *Уфимский институт химии Уфимского федерального исследовательского центра  
Российской академии наук, Уфа, Россия*

<sup>1</sup> *DY\_Karachevskii@bnpi.rosneft.ru*

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

**Аннотация.** В продолжение работ с целью повышения эффективности азот-содержащих ингибиторов коррозии изучены ингибирующие способности, а также основные кинетические и термодинамические показатели современного имидазолинового ингибитора в сероводородсодержащих средах. Исследовано влияние ингибирующей активности ингибиторной композиции в процессе защиты от коррозии металлической поверхности в зависимости от концентрации ингибитора (20–400 мг/л), температуры (20–70°C), экспозиции (24–720 ч). Представлены изображения поверхности металла в процессе коррозии, полученные с помощью растрового электронного микроскопа. На основании построения изотерм Ленгмюра, Темкина, Эль-Авади, Фрейндлиха адсорбции различных моделей показан механизм сорбции и предложен механизм действия данного ингибитора. Ингибирование коррозии протекает по смешанному механизму физической и химической адсорбции, что доказано с помощью полученных экспериментально значений энергии активации, энтальпии и энтропии активации, энергии Гиббса, а также зависимости величины сорбции от равновесной концентрации ингибитора на поверхности сорбента.

**Ключевые слова:** ингибитор, коррозия, кинетика, физическая химия, адсорбция, термодинамика

**Благодарности:** Работа выполнена по теме госзадания № 122031400278-2.

**Для цитирования:** Карачевский Д.Ю., Мустафин А.Г. Изучение термодинамических особенностей имидазолинового ингибитора адсорбционного принципа действия в сероводородсодержащих средах // Вестник Томского государственного университета. Химия. 2025. № 39. С. 57–72. doi: 10.17223/24135542/39/4

## Study of thermodynamic features of an imidazoline inhibitor of the adsorption principle of action in hydrogen sulfide-containing environment

Daniil Yu. Karachevsky<sup>1</sup>, Akhat G. Mustafin<sup>2</sup>

<sup>1, 2</sup> Ufa Institute of Chemistry of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russian Federation

<sup>1</sup> DY\_Karachevskii@bnipti.rosneft.ru

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

**Abstract.** In continuation of the work in order to increase the effectiveness of nitrogen-containing corrosion inhibitors, the inhibitory properties, as well as the main kinetic and thermodynamic parameters of a modern imidazoline inhibitor in hydrogen sulfide-containing media, were studied. The effect of the inhibitory activity of the inhibitory composition in the process of corrosion protection of a metal surface was studied, depending on the concentration of the inhibitor (20-400 mg/l), temperature (20-70), exposure (24-720 h). Images of the metal surface in the process of corrosion, obtained using a scanning electron microscope, are presented. Based on the construction of Langmuir, Temkin, El-Awadi, and Freundlich adsorption isotherms of various models, the sorption mechanism is shown and the mechanism of action of this inhibitor is proposed. Corrosion inhibition proceeds by a mixed mechanism of physical and chemical adsorption, which is proved by experimentally obtained values of activation energy, enthalpy and entropy of activation, Gibbs energy, and the dependence of the sorption value on the equilibrium concentration of the inhibitor on the sorbent surface.

**Keywords:** inhibitor, corrosion, kinetics, physical chemistry, adsorption, thermodynamics

**Acknowledgments:** The work was carried out on the topic of state assignment No. 122031400278-2.

**For citation:** Karachevsky, D.Yu., Mustafin, A.G. Study of thermodynamic features of an imidazoline inhibitor of the adsorption principle of action in hydrogen sulfide-containing environment. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Khimiya – Tomsk State University Journal of Chemistry*, 2025, 39, 57–72. doi: 10.17223/24135542/39/4

### Введение

В настоящее время существует достаточно большое количество промышленных марок ингибиторов коррозии на основе различных по строению имидазолинов [1–3]. Данный тип ингибиторов обладает достаточно большим количеством положительных свойств и может применяться в различных по кислотности средах. Среди представителей ингибиторов, применяемых в сероводородсодержащих средах, на рынке представлены следующие: Нефтехим 1М, Нефтехим НС, СНПХ, Нефтехим-15. Эти ингибиторы характеризуются относительно невысокой дозировкой и аналогичной массовой долей активной основы ингибитора. Также следует отметить, что данные

ингибиторы могут работать в различных модельных средах, с большим содержанием соляной и серной кислот, сероводорода, а также в условиях с присутствием сульфат-восстанавливающих бактерий. Состав исследуемого ингибитора представлен в табл. 1.

Таблица 1

**Состав и характеристика ингибитора**

Состав	Массовая доля, мас. %
Активная основа	15
Вода	35
Соляная кислота	5
Уротропин	45
Массовая доля органических хлоридов	0,1

Процесс получения композиции не требует сложного материально-технического исполнения и может производиться в условиях сложной экономической ситуации. Ингибитор является продуктом взаимодействия хлорсодержащих производных предельных углеводов и третичных аминов с образованием соединений имидазолинового ряда.

Состав активной основы изучаемого ингибитора представлен в табл. 2.

Таблица 2

**Состав активной основы ингибитора**

Компонент	C <sub>10</sub>	C <sub>11</sub>	C <sub>12</sub>	C <sub>13</sub>	C <sub>14</sub>	C <sub>15</sub>	C <sub>16</sub>	C <sub>17</sub>	C <sub>18-30</sub>
Массовая доля, мас. %	23	18,3	15,1	9,6	7,9	5,4	4,2	2,6	13,9

Активная основа представляет собой смесь имидазолинов ряда C<sub>10</sub>–C<sub>30</sub> с наибольшим содержанием более легких компонентов. В качестве добавки, повышающей ингибирующую способность, используют уротропин [2]. Соляная кислота в данной композиции выступает в качестве антифриза для использования продукта при низких температурах: до –35°C [3].

Цель данной работы – установление закономерности коррозионного поведения имидазолинового ингибитора коррозии в сероводородсодержащих средах.

Модельная среда представляет собой среду NACE с добавлением H<sub>2</sub>S в дозировке 200 мг/л [1]

### **Изучение кинетических закономерностей растворения железа**

Изучение кинетических закономерностей растворения железа и сталей представляет интерес как для практики защиты металлоконструкций, так и для развития фундаментальных представлений о коррозионных процессах при низких электродных потенциалах. С практической точки зрения исследования процессов такого рода важны и в связи с тем, что в данных условиях на металле протекает реакция катодного выделения водорода, вызывающая наводороживание материала. Общеизвестным фактом является то, что наводороживание – одна из основных причин коррозионного растрескивания сталей, приводящая к снижению надежности в эксплуатации [2, 3].

*Проведение эксперимента.* Для исследования скорости коррозионного разрушения в сероводородсодержащих средах изучен эффект изменения массы образца при температурах 20, 45, 70°C. Для оценки влияния ингибитора на процесс коррозии выбран довольно широкий интервал концентраций: 20–400 мг/л. Образец стали после исследования коррозии опускали в дистиллированную воду и погружали в раствор метанола, который очищали для удаления оставшихся кислот и остаточной концентрации ингибитора. После этого металлическую пластинку тщательно обрабатывали промывочным раствором, ополаскивали дистиллированной водой и затем сушили в ацетоне перед повторным взвешиванием [4].

*Уравнения, использованные для изучения кинетических закономерностей коррозии:*

Уравнение для изучения степени защиты:

$$\Xi, \% = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100\%, \quad (1)$$

где  $m_0$  – масса металлической пластинки исходная, г;  $m_1$  – масса металлической пластинки конечная, г.

Уравнение для изучения изменения массы образца:

$$\Delta W, \text{ г} = m_0 - m_1. \quad (2)$$

Уравнение для измерения скорости коррозии:

$$\text{СК}, (\text{г} \times \text{см}^{-2} \times \text{ч}^{-1}) = \Delta W/St, \quad (3)$$

где  $S$  – площадь поверхности,  $\text{м}^2$ ,  $t$  – время экспозиции, ч.

Указанные уравнения позволяют изучить основные показатели коррозии.

*Гравиметрические измерения.* Потерю веса образца определяли при различных концентрациях ингибитора с использованием уравнения (2). Полученные результаты приведены на рис. 1. В присутствии ингибитора по сравнению с образцами без ингибитора наблюдается уменьшение потери массы металлических образцов.

Во многих работах [5, 6] указано, что механизм ингибирования имидазолинов основан на их способности поглощаться (сорбироваться) поверхностью корродирующих металлов с протекающим одновременно процессом десорбции реагентов с поверхности металла [6]. При этом данный тип взаимодействия осуществляется лишь на доступной для молекул реагентов реакционной металлической поверхности. При этом на поверхности одних веществ может происходить только физическая адсорбция, в других случаях можно наблюдать хемосорбцию с образованием прочной химической связи. Также может наблюдаться одновременное сочетание физической и химической сорбции при взаимодействии реагентов с твердой поверхностью. Тип и прочность поверхностного взаимодействия реагентов (ингибиторов) с твердым веществом обуславливаются химическим строением твердого тела, а также сродством активных центров на поверхности металла по отношению к молекулам реагентов.

Экспериментально было доказано, что эффективность ингибитора увеличивается при повышении концентрации ингибитора, но снижается со временем воздействия.

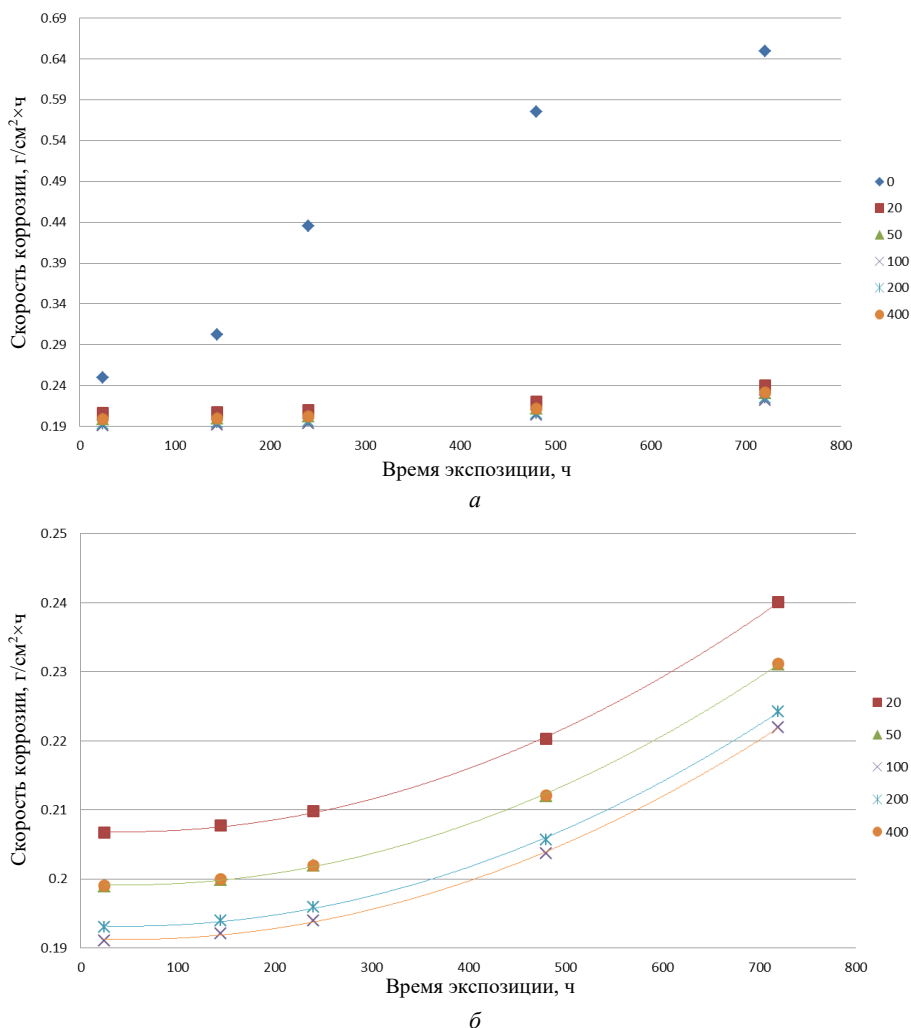


Рис. 1. Изменение массы образцов по времени: *а* – с точками без ингибитора; *б* – значения в присутствии ингибитора

По времени экспозиции можно сделать заключение, что длительное нахождение ингибитора приводит к образованию постоянной пленки, предотвращающей дальнейшую коррозию поверхности металла. При этом следует учесть, что одновременное снижение эффективности ингибитора может быть вызвано десорбцией ингибитора коррозии с поверхности металла.

По итогам исследования была определена наиболее эффективная концентрация ингибитора – 200 мг/л, так как последующее увеличение дозировки не приводило к значительному снижению скорости коррозии. На основании проведенных экспериментов установлено, что увеличение концентрации ингибитора значительно влияет на кинетические параметры скорости коррозии,

при этом в определенный момент скорость коррозии остается практически неизменной, и дальнейшее увеличение концентрации приводит лишь к повышенному расходу ингибитора.

**Кинетика и термодинамика процесса коррозии.** На рис. 2 показана зависимость логарифма потери веса от времени воздействия в часах в присутствии и при отсутствии ингибитора коррозии. В данном случае наблюдается линейная зависимость между наклоном к оси абсцисс и константой скорости  $k$ . Это свидетельствует о протекании реакции первого порядка коррозионного процесса в сероводородсодержащей среде, о чем говорит экспериментально полученный коэффициент корреляции. Константа скорости и параметры периода полураспада приведены в табл. 3.

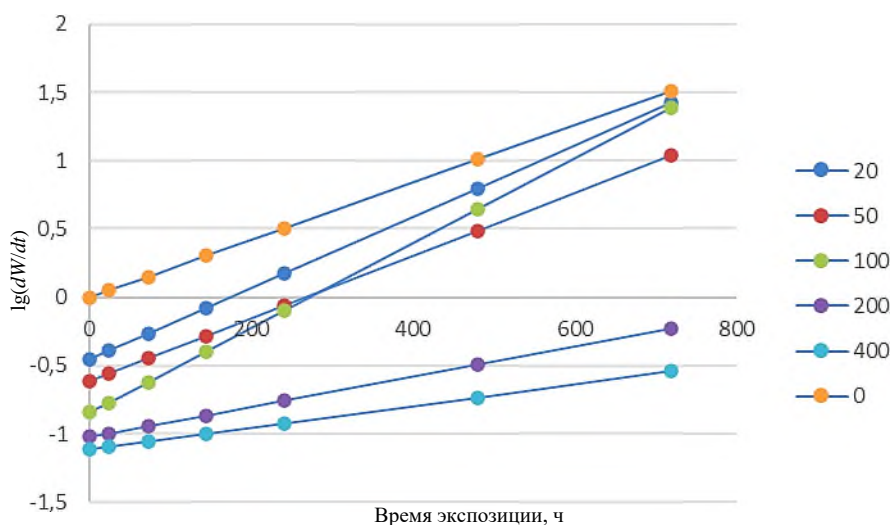


Рис. 2. Кинетические кривые зависимости реакции первого порядка ингибирования стали 10

Таблица 3

**Период полураспада и основные параметры скорости коррозии при различных концентрациях ингибитора коррозии**

Концентрация, мг/л	Скорость коррозии, г/см <sup>2</sup> × ч	Период полураспада, с	Показатель корреляции
Без ингибитора	0,013941	49,71	0,963
20	0,013841	50,07	0,9804
50	0,013573	51,06	0,975
100	0,013466	51,46	0,9762
200	0,013396	51,73	0,9383
300	0,013281	52,18	0,9883
400	0,013082	52,97	0,9863

Энергия активации ( $E_a$ ), энтальпия активации ( $\Delta H^\circ$ ) и энтропия активации ( $\Delta S^\circ$ ) – важные условия для осуществления взаимодействия между

реагентом и активными центрами на поверхности стали, которые позволяют также установить характер взаимодействия ингибитора с металлической поверхностью в процессе коррозии [6].

Положительные значения энтропии и энтальпии активации часто указывают на диссоциативный механизм, в котором неустойчивый активированный комплекс, образованный ингибитором и активными центрами на поверхности стали, слабо связан и может диссоциировать (разложиться). Отрицательные значения энтропии и энтальпии активации указывают, что два партнера по взаимодействию образуют прочный активированный комплекс [7]. В данном случае указанные показатели рассчитывались с учетом следующих условий: без ингибитора, а также при дозировке ингибитора 50, 200, 400 мг/л.

Энергия активации рассчитывалась согласно уравнению

$$\log C_R = \log A - E_a/2,303RT, \quad (4)$$

где  $C_R$  – скорость коррозии, г/см<sup>2</sup>·ч;  $E_a$  – энергия активации, кДж/моль;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T$  – температура среды, °С.

Для расчета энтальпии и энтропии адсорбции процесса коррозии в присутствии и при отсутствии ингибитора в сероводородсодержащей среде использовалось уравнение теории переходного состояния

$$\Delta G_{ads}^0 = -RT \ln(55,5 K), \text{ кДж/моль.} \quad (5)$$

На рис. 3 приведена зависимость  $\log CR/T$  от обратной температуры ( $1/T$ ), по углу наклона которой определена энергия активации процесса коррозии (табл. 4).

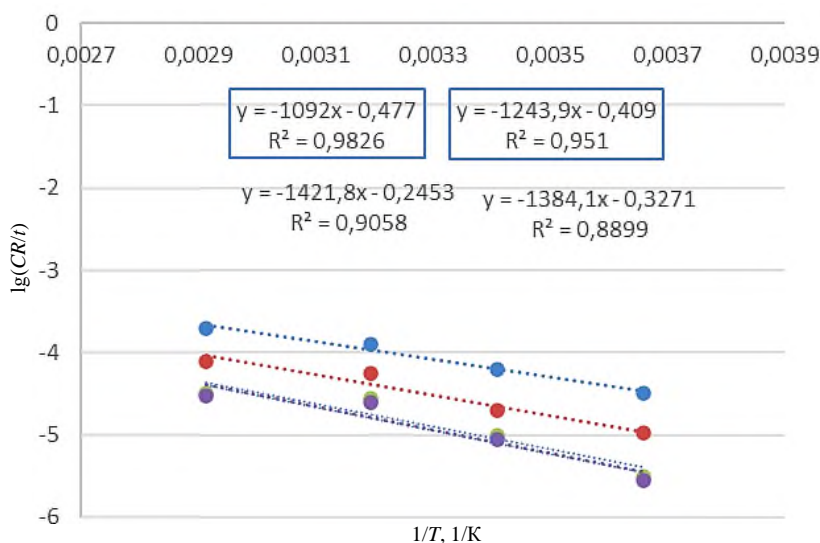


Рис. 3. Зависимость  $\lg CR/T$  от обратной температуры при отсутствии и в присутствии ингибитора

Исходя из приведенных в табл. 4 результатов, можно утверждать, значения энергии активации коррозии увеличивались с повышением концентрации

ингибитора. Эта тенденция сохраняется в зависимости эффективности ингибирования от температуры. Значение энергии активации  $E_a$  в растворе без ингибитора равно 65,87 кДж/моль и повышается при увеличении концентрации ингибиторов с 50 мг/л (77,45 кДж/моль) до 400 мг/л (100,14 кДж/моль). Наблюдаемый эффект можно связать с образованием физического барьера, образованного адсорбированными молекулами на поверхности мягкой стали, что увеличивает расход энергии, необходимой для протекания коррозионной реакции.

Таблица 4

**Кинетические  $E_a$  и термодинамические величины  $\Delta H^\circ$ ,  $\Delta S^\circ$  адсорбции процесса ингибирования**

Концентрация, мг/л	$E_a$ , кДж $\times$ моль <sup>-1</sup>	$\Delta H^\circ$ , кДж $\times$ моль <sup>-1</sup>	$\Delta S^\circ$ , Дж $\times$ моль <sup>-1</sup> $\times$ К <sup>-1</sup>
Без ингибитора	65,87	63,28	297,10
50	77,45	74,77	324,72
200	91,81	89,13	363,66
400	100,14	97,55	388,07

Известно, что низкие значения  $E_a$  (не более 10 кДж  $\times$  моль<sup>-1</sup>) свидетельствуют о протекании физической сорбции за счет электростатических сил между активными сорбционными центрами на поверхности металла и реагентами (ингибиторами) [8]. В свою очередь, более высокие значения  $E_a$ , как правило, свидетельствуют о протекании хемосорбции. В данном случае наблюдаемые значения  $E_a$  в присутствии ингибитора можно объяснить протеканием химической сорбции наряду с одновременно протекающей физической сорбцией. При этом реакция коррозии будет подавляться на поверхности металла и происходить на непокрытых ингибитором металлических поверхностях, что приводит к увеличению  $E_a$ . Таким образом, в процессе взаимодействия имидазолинов с поверхностью стали в серосодержащих средах протекает как физическая, так и химическая сорбция.

Энтропия активации ( $\Delta S^\circ$ ) при отсутствии и в присутствии ингибитора показала положительные значения, что свидетельствует о так называемом диссоциативном механизме, в котором нестабильный активированный комплекс, образованный ингибитором и активными центрами на поверхности стали, слабо связан и может диссоциировать. При этом чем выше концентрация ингибитора, тем большее количество активированного комплекса образуется на металлической поверхности, что также влияет на скорость коррозионного процесса. Следует отметить, что упорядоченность в системе повышается по мере перехода ингибиторов в активированный комплекс при взаимодействии с активными центрами на поверхности металла.

Значения энтальпии активации ( $\Delta H^\circ$ ) в присутствии и при отсутствии ингибитора также показали близкие по значениям положительные величины, что указывает на протекание одновременно хемосорбции и физической сорбции имидазолинов с частью активных центров на поверхности стали, обладающих высоким сродством к молекулам ингибитора.



Таким образом, можно сделать вывод, что скорость коррозии металла в кислых средах зависит от значений энергии активации: чем выше значение энергии активации, тем более высокая температура необходима для снижения эффективности ингибирования [9–15].

*Изотермы адсорбции.* Для оценки сорбционных характеристик и анализа процессов на поверхности границы раздела фаз были построены и протестированы линеаризованные изотермы различных моделей сорбции: Ленгмюра, Фрейндлиха, Темкина и Эль-Авади (рис. 5–7).

Коэффициент детерминации линейной регрессии ( $R^2$ ) использовался для определения модели, которая наилучшим образом соответствовала экспериментальным значениям.

Модель Ленгмюра основана на том, что на поверхности сорбента образуется мономолекулярный слой адсорбата, при этом все активные центры обладают равной энергией. Линейная форма уравнения Ленгмюра имеет следующий вид:

$$\frac{C}{\theta} = \frac{1}{K} + C, \quad (6)$$

где  $K$  – константа адсорбции;  $C$  – концентрация ингибитора, мг/л.

В основе модели адсорбции Фрейндлиха лежит положение, что масса адсорбата, приходящаяся на единицу массы адсорбента, пропорциональна равновесной концентрации адсорбата. Адсорбционные центры по этой модели обладают различными величинами энергии, поэтому в первую очередь происходит заполнение активных сорбционных центров с максимальной энергией.

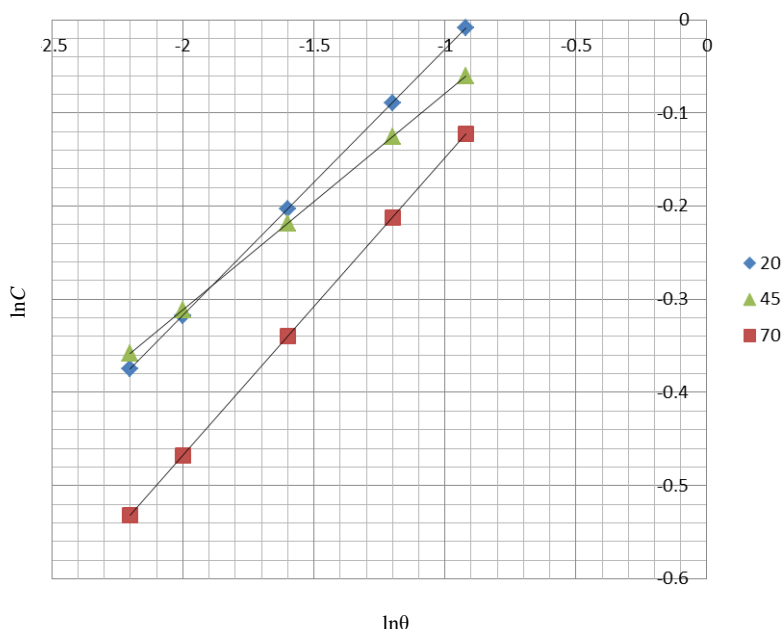


Рис. 5. Линеаризованная изотерма Фрейндлиха для ингибитора на основе имидазолинов в процессе коррозии стали 10 в серосодержащих средах

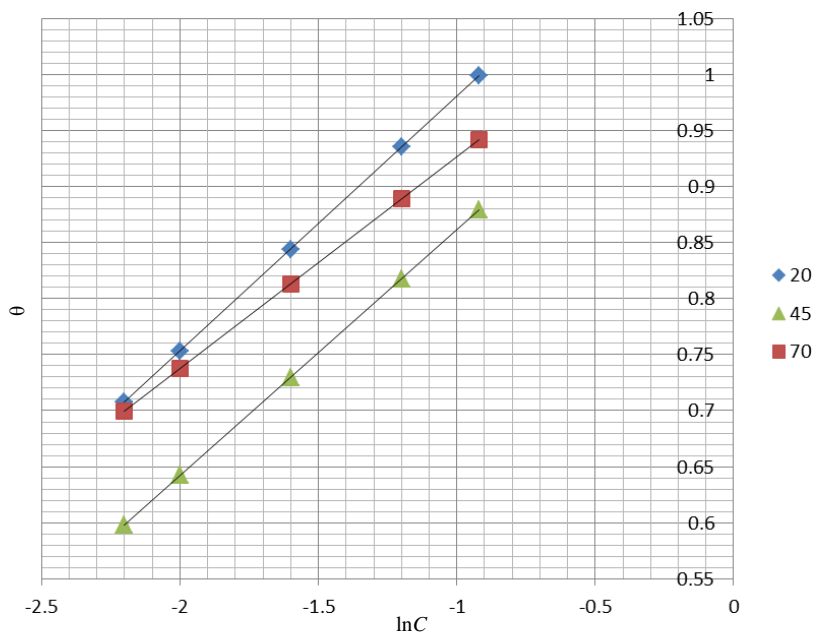


Рис. 6. Линеаризованная изотерма Темкина для ингибитора на основе имидазолинов в процессе коррозии стали 10 в серосодержащих средах

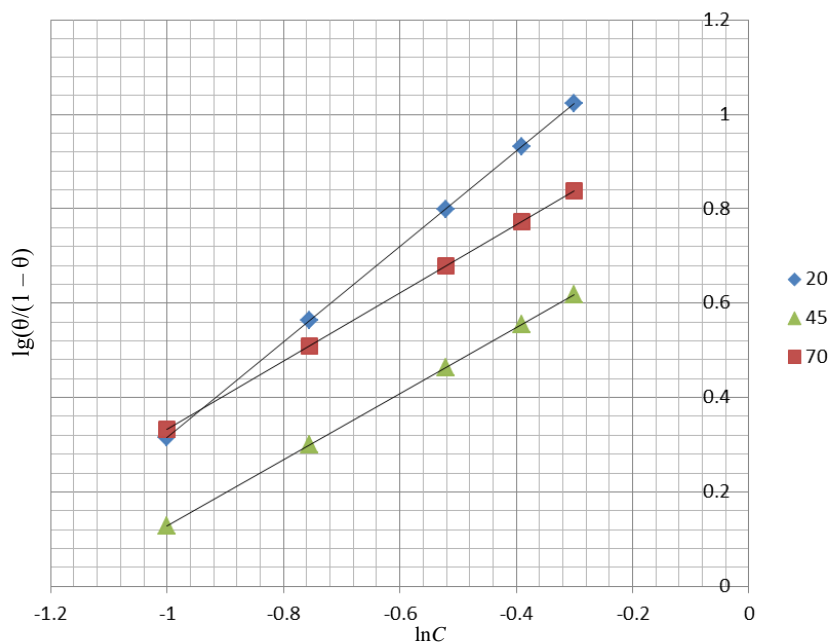


Рис. 7. Линеаризованная изотерма Эль-Авади для ингибитора на основе имидазолинов в процессе коррозии стали 10 в серосодержащих средах

Модель Темкина содержит параметр  $K_{ads}$ , который учитывает взаимодействие между адсорбционными центрами и ионами. Кроме того, данная модель предполагает, что теплота адсорбции молекул в слое линейно уменьшается по мере заполнения слоя из-за отталкивания ионов железа:

$$\Theta = \frac{1}{f} \ln(K_{ads} C), \quad (7)$$

где  $f$  – конфигурационный фактор, который зависит от физической модели и предположения, лежащего в основе вывода изотермы;  $K_{ads}$  – константа адсорбции ингибитора на поверхности, кДж/моль;  $C$  – концентрация ингибитора, мг/л.

Для расчета изотермы Эль-Авади пользовались уравнением

$$\log(\Theta/(1 - \Theta)) = \log k + y \log C. \quad (8)$$

Данная модель отражает адсорбционное поведение ингибитора на поверхности железа [14, 16].

С учетом математических уравнений вышеуказанных моделей сорбции построены линеаризованные изотермы сорбции. Графическим методом рассчитаны константы с учетом угла наклона прямой к оси абсцисс отсечения прямых на оси ординат в соответствующих координатах линейного уравнения.

Значения коэффициентов корреляции ( $R^2$ ), приведенные в табл. 5–8, показывают, что исследованный сорбционный процесс наилучшим образом описывается моделью Ленгмюра.

По данным табл. 5–8 видно, что полученные в соответствии со всеми вышеуказанными моделями сорбции константы имеют довольно большие значения, что свидетельствует о высоком сродстве адсорбата к адсорбенту. Величины параметров сорбции выше 20 при 20°C (табл. 5) и выше 1 при 20°C (табл. 6) свидетельствуют о высокой эффективности сорбции ингибитора на поверхности стали.

Полученные отрицательные значения  $\Delta G_{ads}$  (от –10,93 до –18,64 кДж·моль<sup>–1</sup>) объясняют высокую сорбционную эффективность стали по отношению к ингибитору.

Таблица 5

**Параметры изотермы Ленгмюра**

$T$ , К	$K_{ads}$ , моль/г	$R^2$	$\Delta G^0$ , кДж/моль
20	21,46	0,9996	–18,14
45	10,47	0,9973	–16,83
70	16,78	0,9988	–18,64

Таблица 6

**Параметры изотермы Фрейндлиха**

$T$ , К	$K_{ads}$ , моль/г	$R^2$	$\Delta G^0$ , кДж/моль
20	1,289	0,9925	–10,93
45	1,165	0,9803	–11,02
70	1,187	0,9578	–11,42

Таблица 7

Параметры изотермы Темкина

$T, K$	$K_{ads}, \text{моль/г}$	$R^2$	$\Delta G^0, \text{кДж/моль}$
20	202,42	0,9349	-23,88
45	460,73	0,9465	-26,83
70	137,72	0,9158	-24,38

Таблица 8

Параметры изотермы Эль-Авади

$T, K$	$K_{ads}, \text{моль/г}$	$R^2$	$\Delta G^0, \text{кДж/моль}$
20	21,24	0,9858	-18,11
45	11,34	0,9808	-17,04
70	6,74	0,9625	-16,16

Таким образом, из результатов табл. 5–8 можно сделать вывод, что высокие значения констант адсорбции, коэффициентов регрессии  $R^2$ , отрицательных значений изобарно-изотермического потенциала  $\Delta G^0$  указывают на эффективное ингибирование поверхности и сильное взаимодействие между слоем, существующим на границе раздела фаз, и адсорбированными молекулами ингибитора.

Для уточненного описания явления адсорбции построена экспериментальная изотерма сорбции.

Данные, полученные после построения линеаризованных изотерм, использовались для расчета константы сорбции по модели Фрейндлиха.

Данная изотерма (рис. 8) согласуется с 1-м типом изотермы адсорбции, что характерно для мономолекулярного механизма сорбции [3].

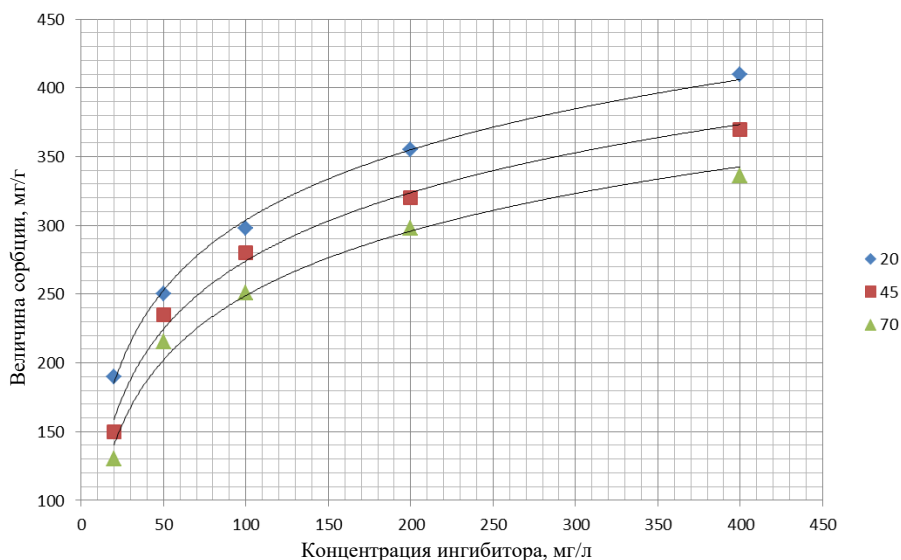


Рис. 8. Изотерма сорбции для исследуемого ингибитора

*Исследование поверхности образцов стали 10.* Для более точной оценки коррозионных процессов, протекавших на поверхности металла, был исследован химический состав продуктов коррозии на поверхности металлического образца методами энергодисперсионного микрорентгеноспектрального анализа. Поверхность стали без и с ингибитором, а также состав отложений, полученный энергодисперсионным микрорентгеноспектральным методом, показаны на рис. 9–11.

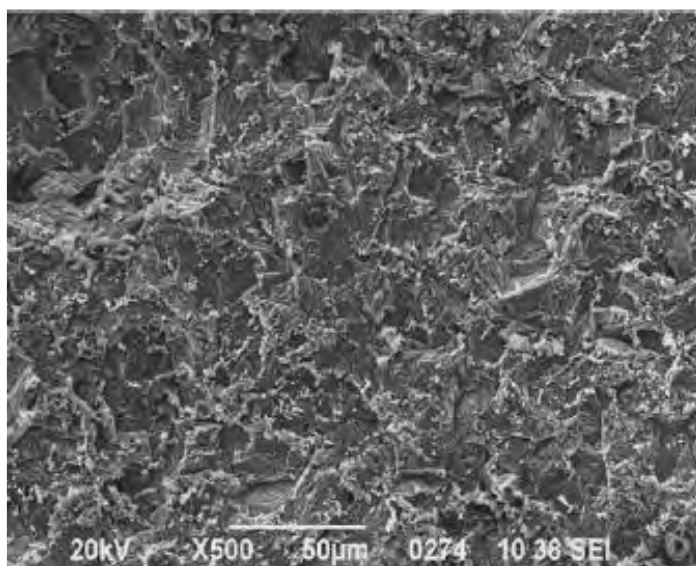


Рис. 9. Поверхность стали без ингибитора

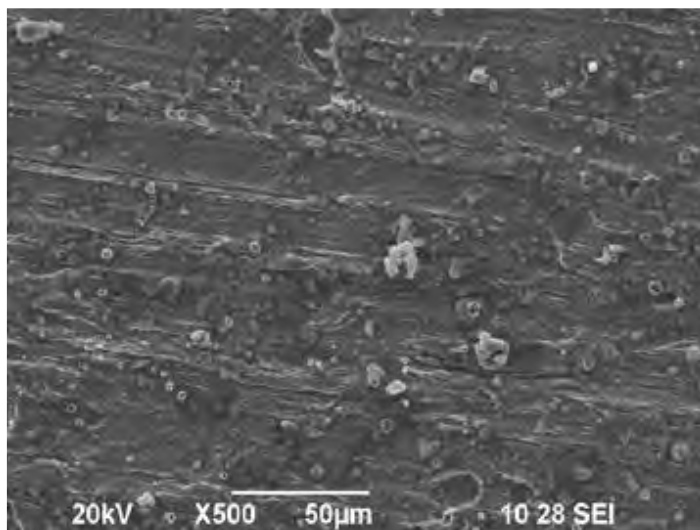


Рис. 10. Поверхность металла в среде ингибитора

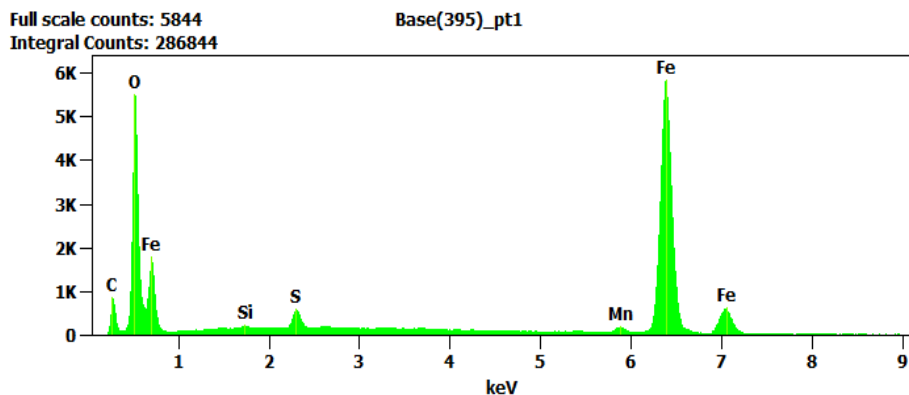


Рис. 11. Состав отложений, полученный энергодисперсионным микрорентгеноспектральным методом

За объект исследования было выбрано два образца, представляющих собой крайние значения скорости коррозии и степени защиты (0 и 200 мг/л ингибитора). Время экспозиции 720 ч.

Как показал анализ, поверхность металла без ингибитора в кислой среде представляет собой большое количество кратеров. Также на одной из поверхностей обнаружен значительный скол, откуда была отобран образец продукта коррозии.

Отложения на поверхности стали 10 состоят из оксидов железа и соединений серы (в основном сульфид железа). После использования имидазолиновой композиции количество серы значительно сократилось, что указывает на хорошее ингибирующее воздействие. Также более гладкая поверхность стали, которая находилась в среде ингибитора, свидетельствует, что имидазолиновая композиция обладает высокими адсорбционными свойствами и хорошо защищает от воздействия среды.

### Заключение

В настоящей работе были изучены кинетические и термодинамические величины процесса ингибирования, получены зависимости ингибирования от температуры и концентрации. Проведена предварительная оценка ингибирующей способности от времени и степени защиты, которые являются основополагающими показателями при выборе ингибитора.

Определены константы сорбции при различных температурах, энергия активации и значения энтропии и энтальпии реакции.

Ингибирование коррозии с использованием композиции на основе имидазолинов на поверхности стали 10 протекает по смешанному механизму физической и химической адсорбции, что доказано с помощью полученных экспериментально значений энергии активации, энтальпии и энтропии активации, энергии Гиббса, а также зависимости величины сорбции от равновесной концентрации ингибитора на поверхности сорбента.

**Список источников**

1. Kharitonov D.S., Kurilo I.I., Wrzesinska A., Zharskii I.M. Electrochemical synthesis and characterization of polyaniline-copper composite coatings // *Mat.-wiss. u. Werkstofftech.* 2017. Vol. 48. P. 646–652. doi: 10.1002/mawe.201700127
2. Kharitonov D.S., Kurilo I.I., Zharskii I.M. Electrochemical deposition of polyaniline-copper composite coatings: kinetics and mechanism // *Russ. J. Appl. Chem.* 2017. V. 90. P. 1089–1096. doi: 10.1134/S1070427217070161
3. Деэмульгаторы, ингибиторы коррозии, бактерициды // ООО «Корундовый завод». URL: <https://korundhim.ru/dejemulgatory-ingibitory-korrozii-bakteritsidy.html> (дата обращения: 29.05.2025).
4. Пат. 2487193 РФ, МПК C23F11/04. Ингибитор коррозии металлов в серной и соляной кислотах / Кравцов Е.Е., Вострикова Д.А., Исмаилова Ф.Г. и др.; патентообладатели: ФГОУ ВПО «Астраханский государственный технический университет», Кравцов Е.Е., Вострикова Д.А. № 2011151252/02; заявл. 14.12.2011; опубл. 10.07.2013.
5. Jones L.W. *Corrosion and Water Technology for Petroleum Producers*. Tulsa: Oil & Gas Consultants International, Inc., 1998. 202 p.
6. Завьялов В.В. Проблемы эксплуатационной надежности трубопроводов на поздней стадии разработки месторождений. М. : ВНИИОЭНГ, 2005. 332 с.
7. Шкодин А.А., Тлехусеж М.А. Коррозия и методы борьбы с ней в нефтепромысловых отраслях // *Наука и образование: новое время*. 2019. № 4 (33). URL: <https://s.science-pedagogy.ru/pdf/2019/4-4/2153.pdf> (дата обращения: 29.05.2025).
8. Гоник А.А. Коррозия нефтепромыслового оборудования и меры ее предупреждения. М. : Недра, 1976. 192 с.
9. Грег С., Синг К. Адсорбция, удельная поверхность, пористость : пер. с англ. 2-е изд. М. : Мир, 1984. 306 с.
10. Abdel-Rehim S.S., Sayyahb S.M., El-Deebb M.M., Kamalb S.M., Azoozb R.E. Synthesis and characterization of novel poly(urethane-urea)s based on dianhydride and aromatic diisocyanates // *Mater. Chem. Phys.* 2010. Vol. 123. P. 20–27.
11. Vargel C., Jacques M., Schmidt D.M.P. *Corrosion of Aluminium*. Amsterdam : Elsevier, 2004. 700 p.
12. Kharitonov D.S., Dobryden I.B., Sefer B. et al. Electrochemical behavior of copper in polyaniline-containing electrolytes: in situ AFM and theoretical study // *Prot. Met. Phys. Chem. Surfaces*. 2018. Vol. 54. P. 291–299. doi: 10.1134/S2070205118020114
13. McCafferty E. Introduction to corrosion theory // *Corros. Sci.* 1995. Vol. 37. P. 481–484.
14. Szklarska-Smialowska Z. Pitting corrosion of aluminum and its alloys // *Corros. Sci.* 1999. V. 41. P.1743–1767.
15. Revilla R.I., De Graeve I. Influence of chloride ions on the passivation and pitting corrosion of carbon steel in alkaline solutions // *J. Electrochem. Soc.* 2018. Vol. 165. P. C926–C935. DOI: 10.1149/2.3514118jes
16. Воды нефтяных и газовых месторождений СССР : справочник / под ред. Л.М. Зорькина. М. : Недра, 1989. 382 с.

**References**

1. Kharitonov D.S., Kurilo I.I., Wrzesinska A., Zharskii I.M. Electrochemical synthesis and characterization of polyaniline-copper composite coatings // *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* [Materials Science and Engineering]. 2017. Vol. 48. P. 646–652. (DOI: 10.1002/mawe.201700127)
2. Kharitonov D.S., Kurilo I.I., Zharskii I.M. Electrochemical deposition of polyaniline-copper composite coatings: kinetics and mechanism // *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2017. Vol. 90, No. 7. P. 1089–1096. (DOI: 10.1134/S1070427217070161)
3. ООО «Korundovyy zavod». *Deemul'gatory, ingibitory korrozii, bakteritsidy* [Demulsifiers, corrosion inhibitors, bactericides] [Electronic resource]. URL: <https://korundhim.ru/dejemulgatory-ingibitory-korrozii-bakteritsidy.html> (accessed: 29.05.2025).

4. Pat. No. 2487193, *Russian Federation, IPC C23F11/04. Inhibitor korrozii metallov v sernoy i solyanoy kislotakh* [Corrosion inhibitor for metals in sulfuric and hydrochloric acids] / Kravtsov E.E., Vostrikova D.A., Ismailova F.G. et al; patent holders: FGOU VPO «Astrakhansky gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet», Kravtsov E.E., Vostrikova D.A. No. 2011151252/02; filed 14.12.2011; publ. 10.07.2013.
5. Jones L.W. *Corrosion and Water Technology for Petroleum Producers*. Tulsa: Oil & Gas Consultants International, Inc. 1998. 202 p.
6. Zav'yalov V.V. *Problemy ekspluatatsionnoy nadezhnosti truboprovodov na pozdney stadii razrabotki mestorozhdeniy* [Problems of operational reliability of pipelines at the late stage of field development]. M.: VNIIOENG, 2005. 332 p.
7. Shkodin A. A., Tlekhushezh M. A. Korroziya i metody bor'by s ney v neftepromyslovyykh otraslyakh [Corrosion and methods of combating it in oilfield industries] // *Nauka i obrazovanie: novoe vremya* [Science and Education: New Time]. 2019. No. 4 (33). URL: <https://s.science-pedagogy.ru/pdf/2019/4-4/2153.pdf> (accessed: 29.05.2025).
8. Gonik A.A. *Korroziya neftepromyslovogo oborudovaniya i mery eye preduprezhdeniya* [Corrosion of oilfield equipment and measures for its prevention]. Moscow: Nedra, 1976. 192 p.
9. Gregg S.J., Sing K.S.W. *Adsorption, Surface Area, and Porosity*. 2nd ed. London: Academic Press, 1982. 303 p.
10. Abdel-Rehim S.S., Sayyah S.M., El-Deeb M.M., Kamal S.M., Azooz R.E. Synthesis and characterization of novel poly(urethane-urea)s based on dianhydride and aromatic diisocyanates // *Materials Chemistry and Physics*. 2010. Vol. 123, No. 1. P. 20–27. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2010.04.057
11. Vargel C., Jacques M., Schmidt D. M. P. *Corrosion of Aluminium*. Amsterdam: Elsevier, 2004. 700 p.
12. Kharitonov D. S., Dobryden I. B., Sefer B. et al. Electrochemical behavior of copper in polyaniline-containing electrolytes: in situ AFM and theoretical study // *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2018. Vol. 54, No. 2. P. 291–299. DOI: 10.1134/S2070205118020114
13. McCafferty E. Introduction to corrosion theory // *Corrosion Science*. 1995. Vol. 37, No. 3. P. 481–494. DOI: 10.1016/0010-938X(95)00002-7
14. Szklarska-Smialowska Z. Pitting corrosion of aluminum and its alloys // *Corrosion Science*. 1999. Vol. 41, No. 9. P. 1743–1767. DOI: 10.1016/S0010-938X(99)00035-8
15. Revilla R. I., De Graeve I. Influence of chloride ions on the passivation and pitting corrosion of carbon steel in alkaline solutions // *Journal of the Electrochemical Society*. 2018. Vol. 165, No. 14. P. C926–C935. DOI: 10.1149/2.3514118jes
16. *Vody neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy SSSR: spravochnik* [Waters of oil and gas fields of the USSR: reference book] / ed. by L. M. Zor'kin. Moscow: Nedra, 1989. 382 p.

**Сведения об авторах:**

**Карачевский Даниил Юрьевич** – аспирант Уфимского институт химии Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (Уфа, Россия). E-mail: DY\_Karachevskii@bnipti.rosneft.ru

**Мустафин Ахат Газизьянович** – доктор химических наук, профессор, заведующий лабораторией Уфимского институт химии Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (Уфа, Россия). E-mail: agmustafuin@gmail.com

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

**Information about the authors:**

**Karachevsky Daniil Yu.** – Postgraduate Student, Ufa Institute of Chemistry of the Russian Academy of Sciences (Ufa, Russian Federation). E-mail: DY\_Karachevskii@bnipti.rosneft.ru

**Mustafin Akhat G.** – Doctor of Chemical Sciences, Professor, Head of the Laboratory, Ufa Institute of Chemistry of the Russian Academy of Sciences (Ufa, Russian Federation). E-mail: agmustafuin@gmail.com

*The authors declare no conflicts of interests.*

*Статья поступила в редакцию 13.05.2024; принята к публикации 07.11.2025*  
*The article was submitted 13.05.2024; accepted for publication 07.11.2025*