УДК 620.197.3

DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2021.2.26

СИНТЕЗ N, N-ДИАЛЛИЛЬНЫХ ПРОИЗВОДНЫХ АЛКОКСИАНИЛИНОВ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ АНТИКОРРОЗИОННОЙ АКТИВНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КВАНТОВО-ХИМИЧЕСКОГО ПРОГНОЗА

© Р. Н. Хуснитдинов¹, С. Л. Хурсан¹, Р. Р. Гатауллин¹, Р. А. Хуснутдинов¹,
А. Г. Мустафин², И. Б. Абдрахманов¹, А. Х. Фаттахов^{2*}

¹Уфимский институт химии УФИЦ РАН

Россия, Республика Башкортостан, 450054 г. Уфа, пр. Октября, 69.

²Башкирский государственный университет

Россия, Республика Башкортостан, 450076 г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32.

*Email: al_fatt@mail.ru

Синтезированные на основе крупнотоннажных отходов и доступных продуктов нефте-химических производств диаллильные производные алкоксианилинов представляют интерес в качестве потенциальных ингибиторов коррозии для защиты нефтепромыслового оборудования и трубопроводов. Проанализирована корреляция между ингибирующими свойствами диаллильных производных алкоксианилинов и их электронным строением с применением таких индексов реакционной способности, как q_N – заряд на атоме азота (анализ по Малликену), а.е., Q_N (NBO анализ), а.е., E_{homo} – энергия высшей занятой молекулярной орбитали, эВ, E_{lumo} – энергия низшей вакантной молекулярной орбитали, эВ, μ – химический потенциал, эВ, $\mu = -(E_{\text{homo}} + E_{\text{lumo}})/2$; π – жесткость по Пирсону, эВ, $\pi = (E_{\text{lumo}} - E_{\text{homo}})/2$; W – глобальный индекс электрофильности, эВ, $W = \mu^2/2\pi$. Установлено, что лучшая корреляционная зависимость наблюдается между эффективностью защиты от коррозии, зарядом на атоме азота и энергией высших занятых молекулярных орбиталей. С использованием найденных уравнений регрессии осуществлен прогноз, на основе которого предсказана структура диаллильных производных алкоксианилинов с высокой ингибирующей активностью. Предсказанные соединения синтезированы, и изучена их антикоррозионная активность. Расчетные значения степени защиты прогнозируемых соединений, полученные с использованием уравнений регрессии для квантово-химических потенциалов, совпадают с экспериментальными степенями защиты в пределах точности эксперимента и стандартных ошибок расчетов.

Ключевые слова: индексы реакционной способности, квантово-химические параметры, коэффициенты корреляции, прогноз антикоррозионной активности, уравнение регрессии.

Известно, что в кислых средах высокой ингибирующей активностью обладают ароматические соединения с несколькими функциональными группами [1–12]. Ароматические амины, содержащие кислородсодержащие функциональные группы, проявили себя как ингибиторы коррозии [13–20]. Однако исследование взаимосвязи ингибирующей активности от структурных параметров в ряду этих соединений проводилось очень мало.

Целью настоящих исследований является изучение взаимосвязи между электронным строением молекул и их ингибирующей активностью в ряду оксиалкильных производных аллиланилинов, прогноз и синтез новых соединений с высокой ингибирующей активностью.

Материалы и методы исследований

Испытуемые соединения **1-8** (схема 1) были синтезированы, согласно методике [13].

Схема 1

1-8

$R^1=R^2=R^3=H$ (1); $R^1=CH_3$, $R^2=R^3=H$ (2); $R^1=R^3=H$, $R^2=CH_3$ (3); $R^1=R^2=H$, $R^3=CH_3$ (4); $R^1=R^2=H$, $R^3=OCH_3$ (5);

$R^1=R^2=H$, $R^3=OC_2H_5$ (6); $R^1=R^2=H$, $R^3=OC_3H_7$ (7);

$R^1=R^2=H$, $R^3=$ (8).

Результаты и их обсуждение

Синтезированные соединения были испытаны в качестве ингибиторов коррозии по методике [21].

Для синтезированных соединений были рассчитаны следующие квантово-химические параметры: q_N – заряд на атоме азота (анализ по Малликену), а.е., Q_N (NBO анализ), а.е., E_{homo} – энергия высшей занятой молекулярной орбитали, эВ, E_{lumo} – энергия низшей вакантной молекулярной орбитали, эВ, μ – химический потенциал, эВ, $\mu = -(E_{\text{homo}} + E_{\text{lumo}})/2$; π – жесткость по Пирсону, эВ, $\pi = (E_{\text{lumo}} - E_{\text{homo}})/2$; W – глобальный индекс электрофильности, эВ, $W = \mu^2/2\pi$. Расчет проводили с помощью программы PCGAMESS (d, p) [22] в приближении B3LYP/6-31G (d, p) +IEFPCM (вода) [23] с полной оптимизацией строения исследуемого соединения. Соответствие найденной структуры минимуму поверхности потенциальной энергии контролировали расчетом набора частот колебаний молекулы. Во всех случаях установлено отсутствие мнимых частот колебаний.

В табл. 1 приведены квантово-химические параметры синтезированных диаллиланилинов и степени защитного действия ингибитора (Z) по данным эксперимента и расчетов.

Таблица 1

№	q _N	Q _N	E _{homo}	E _{lumo}	Z, эксп., %	Z, расч., %
1	-0.450	-0.478	-5.435	-0.245	41.0	38.2
2	-0.451	-0.511	-5.490	-0.236	44.9	-
3	-0.460	-0.474	-5.358	-0.176	50.1	52.1
4	-0.449	-0.485	-5.317	-0.236	59.9	59.5
5	-0.446	-0.491	-5.159	-0.329	86.0	87.9
6	-0.446	-0.491	-5.155	-0.326	86.7	88.7
7	-0.449	-0.489	-5.135	-0.324	90.1	92.3
8	-0.446	-0.490	-5.172	-0.353	87.8	-

Таблица 2

Параметр	Выборка	Коэффициент корреляции	Уравнение регрессии
q _N	1–8	0.39	Нет корреляции
Q _N	1–8	0.1	Нет корреляции
E _{lumo}	1–8	0.78	Нет корреляции
E _{homo}	1–8	0.94	Нет корреляции
E _{homo}	1, 3–8	0.97	$Z = 892.97 \pm 64.75 + (156.88 \pm 7.30) \times E_{homo}$ (1)
E _{homo}	1, 3–7	0.99	$Z = 856.09 \pm 38.40 + (150.09 \pm 12.34) \times E_{homo}$ (2)

Схема 2

Таблица 3

№	q _N	Q _N	E _{homo}	E _{lumo}	Z, эксп., %	Z, расч., %
9	-0.449	-0.489	-5.132	-0.324	95.0	92.84
10	-0.448	-0.489	-5.124	-0.325	96.2	94.28
11	-0.449	-0.487	-5.130	-0.344	95.2	93.24

В табл. 2 приведены результаты корреляционного анализа. Как видно из табл. 2, максимальная корреляционная зависимость в этом ряду соединений наблюдается для энергии высших занятых молекулярных орбиталей E_{homo}. Для всей выборки коэффициент корреляции составляет 0.94. При исключении выпадающих соединений (2, 8) из общей выборки наблюдается повышение коэффициента корреляции, который достигает 0.99.

С использованием уравнения регрессии (2) была спрогнозирована высокая активность N,N-диаллильных производных 9–11 (табл. 3).

Соединения 9–11 были синтезированы по схеме 2 и испытаны на антикоррозионную активность. Результаты испытаний и квантово-химические параметры прогнозируемых соединений приведены в табл. 3.

Полный набор соединений с удовлетворительной степенью точности может быть описан корреляционным уравнением:

$$Z = 1018.35 \pm 29.48 + (180.34 \pm 5.65) \times E_{homo}$$

Как видно из табл. 1, 3, расчетные значения степени защиты прогнозируемых соединений,

полученные с использованием уравнения регрессии, совпадают в пределах точности эксперимента и стандартных ошибок расчетов.

В табл. 4 приведены квантово-химические потенциалы синтезированных соединений: химические потенциалы (μ), жесткость по Пирсону (ñ) и индексы электрофильности (W).

В табл. 5 приведены результаты корреляционного анализа в ряду квантово-химических потенциалов синтезированных соединений.

Результаты корреляционного анализа (табл. 5) свидетельствуют о том, что в ряду квантово-химических потенциалов максимальной корреляционной зависимостью обладают химический потенциал (μ) и жесткость по Пирсону (ñ). При выборке 1–11 коэффициент корреляции для химического потенциала (μ) составляет 0.75. При удалении выпадающих (2, 3, 8) коэффициент корреляции достигает 0.95, а в случае жесткости по Пирсону при выборке 1–11 и 1,3–7, 9–11 коэффициент корреляции составляет 0.95. Для индекса электрофильности корреляция отсутствует.

Таблица 4

№№	μ	$\tilde{n}$	W	Z, эксп., %	Z, рас., μ , %	Z, рас., $\tilde{n}$, %
1	2.840	2.595	1.554	41.0	37.2	45.2
2	2.863	2.627	1.560	44.8	-	-
3	2.767	2.591	1.477	50.1	-	46.1
4	2.777	2.541	1.517	59.9	66.9	57.8
5	2.744	2.415	1.559	79.2	82.5	87.3
6	2.741	2.415	1.555	83.3	83.9	87.3
7	2.730	2.406	1.549	87.0	89.1	89.2
8	2.763	2.410	1.584	87.8	-	-
9	2.728	2.404	1.548	95.0	90.0	90.0
10	2.724	2.399	1.547	96.2	92.0	91.0
11	2.737	2.393	1.565	95.2	-	92.1

Таблица 5

Параметр	Выборка	Коэффициент корреляции	Уравнение регрессии
μ	1–11	0.75	$Z = 1377.27 \pm 133.95 - (471.46 \pm 48.62) \times \mu$
	1; 3–7; 9–11	0.76	
	1, 4–7; 9–11	0.93	
	1, 4–7; 9; 10	0.95	
$\tilde{n}$	1–11	0.952	$Z = 620.64 \pm 40.84 - 220.89 \pm 16.51 \times \tilde{n}$
	1; 3–7; 9–11	0.95	
W	1–11	0.19	Нет корреляции
	1; 3–7; 9–11	0.24	

Полный набор соединений с удовлетворительной степенью точности может быть описан для химического потенциала (μ) следующим уравнением:

$$Z = 1377.06 \pm 133.95 - (471.86 \pm 48.62) \cdot \mu$$

А для квантово-химического потенциала жесткости по Пирсону ($\tilde{n}$) уравнение расчета степени защиты имеет следующий вид:

$$Z = 620.64 \pm 40.84 - (220.89 \pm 16.51) \cdot \tilde{n}$$

Как видно из табл. 4, расчетные значения степени защиты прогнозируемых соединений, полученные использованием уравнений регрессии для квантово-химических потенциалов, совпадают с экспериментальными степенями защиты в пределах точности эксперимента и стандартных ошибок расчетов.

Экспериментальная часть

Спектры ЯМР ^1H и ^{13}C записаны на импульсных спектрометрах «Bruker AM-300», «Bruker AMX-300» с рабочей частотой 300.13 МГц (^1H) и 75.47 МГц (^{13}C) и «Bruker Avance III 500 MHz» с рабочей частотой 500.13 МГц (^1H), и 125.73 МГц (^{13}C) с 5 мм QNP-датчиками при постоянной температуре образца 298 К. Растворитель – CDCl_3 . Химические сдвиги в спектрах ЯМР ^{13}C , ^1H , приведены в миллионных долях (м.д.) относительно сигнала внутреннего стандарта – тетраметилсилана (TMS). Элементный анализ выполнен на приборе C-H-N «Analyzer M-185B». Для качественного анализа ТСХ использованы пластины Sorbfil ПТСХ-АФ-В (ЗАО Сорбполимер, Краснодар) с обнаружением веществ парами иода, раствором нингидрина. Используемые в синтезах реагенты и растворители тщательно высушены и перегнаны непосредственно перед употреблением по известным методикам.

Общая методика получения N,N-диаллилалкоксоанилинов

К раствору 1.09 г (0.01 моль) п-аминофенола в 10 мл изопропанола добавляли 0.56 г (0.01 моль) КОН и 0.0092 моль соответствующего хлорпроизводного. Раствор перемешивали в течение 3–4 ч при комнатной температуре. В полученный раствор добавляли 5.0 мл триэтиламина и 0.0184 моля аллилхлорида. Далее реакционную массу нагревали до 80 °С и выдерживали при этой температуре до полного исчезновения исходного амина. После завершения реакции к смеси добавляли 20–25 мл воды и продукт экстрагировали эфиром (3x10 мл). Органический слой отделяли, промывали водой (3x10 мл) и высушивали над CaCl_2 . После отгонки эфира продукт выделяли вакуумной перегонкой.

N,N-диаллил-4-бутоксоанилин (9). Выход 3.1 г (95.1%). Бурая жидкость. Найдено, %: С 78.30; Н 9.41; N 5.69; $\text{C}_{16}\text{H}_{23}\text{NO}$. Вычислено, %: 78.32; Н 9.45; N 5.71. ИК-спектр (cm^{-1}): 980, 1680. Спектр ЯМР ^1H (CDCl_3 , δ , м.д., J, Гц): 0.90 т (3H, CH_3 , J=3.58); 1.44 м (2H, CH_2), 1.67 м (2H, CH_2); 3.80 д (4H, CH_2 , J = 5.60); 3.91 т (2H, CH_2 J = 3.3 Гц); 5.01 м (2H, 2 CH); 5.09 м (2H, 2 CH), 5.73 м (2H, CH), 6.19 м (2H, Ar), 7.16 м (2H, Ar). Спектр ЯМР ^{13}C (CDCl_3 , δ , м.д.): 13.75 (CH_3), 19.32 (CH_2), 29.10 (CH), 63.30 (2 CH_2), 68.12 (CH_2), 115.70 (2 ArC), 116.97 (2 CH_2), 119.43 (2ArC), 130.81 (2CH), 146.81 (ArC), 154.33 (ArC).

N,N-диаллил-4-[[1-метилбут-2-ен-1-ил]окси]анилин (10). Выход 3.21 г (95.5%). Бурая жидкость. Найдено, %: С 79.30; Н 9.00; N 5.44; $\text{C}_{17}\text{H}_{23}\text{NO}$. Вычислено, %: С 79.33; Н 9.01; N 5.38. $\text{C}_{17}\text{H}_{23}\text{NO}$. ИК-спектр (ν , cm^{-1}): 983, 1683. Спектр

ЯМР ^1H (CDCl_3 , δ , м.д. J, Гц): 1.31 д (3H, CH_3 , J = 1.1), 1.62 д (3H, CH_3 , J = 2.09), 3.75 д (2H, CH_2 , J = 15.6), 4.53 м (1H, OH), 4.95 – 5.09 м (2H, CH_2), 5.51 – 5.56 м (2H, CH), 5.63 – 5.75 м (2H, CH), 6.11 – 6.65 м (4H, ArH). Спектр ЯМР ^{13}C (CDCl_3 , δ , м.д.): 18.20 (CH_3), 20.93 (CH_3), 53.21 (2CH_2), 76.93 (CH), 115.71 (2ArC), 116.69 (2ArC), 117.01 (2CH_2), 126.79 (CH), 130.81 (2CH), 137.75 (CH), 148.94 (ArC), 150.91 (ArC).

N,N-диаллил-4-(циклопент-2-ен-1-илокси)анилин (11). Выход 3.21 г (96.1%). Бурая жидкость. Найдено, %: C 80.58; H 8.22; N 5.50; $\text{C}_{17}\text{H}_{21}\text{NO}$. М 255.35. Вычислено, %: C 79.96; H 8.29; N 5.49 ИК-спектр (ν , cm^{-1}): 985, 1685. Спектр ЯМР ^1H (CDCl_3 , δ , м.д. J, Гц): 1.74–2.36 м (4H, 2CH_2), 3.69 д (2H, CH_2 , J = 15.80), 4.95 м (4H, 2CH_2), 5.21 м (1H, CH), 5.48 м (1H, CH), 5.67 м (2H, CH), 6.05 м (1H, CH), 6.11 м (2H, ArH), 6.62 м (2H, ArH). Спектр ЯМР ^{13}C (CDCl_3 , δ , м.д.): 28.65 (CH_2), 32.33 (CH_2), 53.21 (2CH_2), 85.24 (CH), 115.69 (2ArC), 116.38 (2ArC), 117.01 (2CH_2), 130.79 (2CH), 133.85 (CH), 136.98 (CH), 146.95 (ArC), 151.31 (ArC).

ЛИТЕРАТУРА

1. Розенфельд И. Л. Ингибиторы коррозии. М.: Химия, 1977. 352 с.
2. Решетников С. М. Ингибиторы кислотной коррозии металлов. Л.: Химия, Ленингр. отд-е, 1986. 141 с.
3. Иванов Е. С. Ингибиторы коррозии металлов в кислых средах. М.: Металлургия, 1986. 175 с.
4. Саакиян Л. С., Ефремов А. П. Защита нефтепромышленного оборудования от коррозии. М.: Недра, 1982. 206 с.
5. Легезин Н. Е., Глазов Н. П., Кессельман Г. С., Кутюва А. А. Защита от коррозии промышленных сооружений в газовой и нефтедобывающей промышленности. М.: Недра, 1973. 168 с.
6. Гоник А. А. Сероводородная коррозия и меры ее предупреждения. М.: Недра, 1966. 175 с.
7. Григорьев В. П., Экилик В. В. Химическая структура и защитное действие ингибиторов коррозии. Ростов н/Д: изд-во РГУ, 1978. 184 с.
8. Free M. L. Development and Application of Useful Equations to Predict Corrosion Inhibition by Different Surfactants in Various Aqueous Environments // Corrosion. 2002. Vol. 58. No. 12. Pp. 1025–1030.
9. Durnie W., Demarco R., Jefferson A., Kinsella B. Development of a Structure-Activity Relationship for Oil Field Corrosion Inhibitors // J. Electrochem. Soc. 1999. Vol. 146. No. 5. P. 1751.
10. Awad G. H., Asaad A. N., Abdel Gaber A. M., Massoud S. S. Quantum-mechanically interpreting the role of polyamines in acid corrosion inhibition // Protection of metals. 1997. Vol. 33. No. 6. P. 509–516.
11. Бугай Д. Е., Габитов А. И., Бреслер И. Г. Использование квантовохимических индексов защитной способности ингибиторов коррозии при интерпретации механизма защитного действия // ДАН СССР. 1990. Т. 314. №2. С. 384–386.
12. Бугай Д. Е., Голубев В. М., Лаптев А. Б., Ляпина Н. К., Голубев И. В., Рахманкулов Д. Л. О защитных свойствах некоторых аминов, кетосульфидов, ацеталей и их аналогов при ингибировании коррозии под напряжением строительной стали // Баш. хим. ж-л. 1996. Т. 3. №4. С. 48.
13. Абдрахманов И. Б., Мустафин А. Г., Шарафутдинов В. М. Перегруппировка Кляйзена в ряду ароматических аминов. Уфа: Гилем, Башк. Энцикл., 2014. 168 с.
14. Гатауллин Р. Р., Хазиев Э. В., Хуснитдинов Р. Н., Борисов И. М., Абдрахманов И. Б. // ЖПХ. 2001. Т. 74. №11. С. 1850–1852.
15. Абдрахманов И. Б., Гимадиева А. Р., Мустафин А. Г., Шарафутдинов В. М. Амино-перегруппировка Кляйзена и превращения орто-алкенилариламинов. М.: Наука, 2020. 165 с.
16. Хуснутдинов Р. А., Хурсан С. Л., Хуснитдинов Р. Н., Шарафутдинов В. М., Красько С. А., Мустафин А. Г., Абдрахманов И. Б. Синтез пентенилариламинопиридинийхлоридов и исследование их антикоррозионных свойств // Баш. хим. ж-л. 2019. Т. 26. №2. С. 92–95.
17. Хуснитдинов Р. Н., Хурсан С. Л., Хуснитдинов К. Р., Сапожников Ю. Е., Колбин А. М., Мустафин А. Г., Абдрахманов И. Б. Прогноз антикоррозионной активности в ряду циклопентенилариламинов // Баш. хим. ж-л. 2012. Т. 19. №1. С. 85–90.
18. Хуснитдинов Р. Н., Хурсан С. Л., Хуснитдинов К. Р., Красько С. Л., Мустафин А. Г., Абдрахманов И. Б. Прогноз антикоррозионной активности и синтез потенциально активных соединений с выраженной ингибирующей активностью в ряду производных тетрагидрохинолина // Баш. хим. ж-л. 2019. Т. 26. №3. С. 34–37.
19. Хуснитдинов Р. Н., Нигматуллин Н. Г., Хурсан С. Л., Хуснитдинов К. Р., Колбин А. М., Мустафин А. Г., Абдрахманов И. Б. Прогноз антикоррозионной активности в ряду алкенилариламинов // Вестник Башкирского университета. 2011. Т. 16. №3. С. 676–678.
20. Хуснитдинов Р. Н., Хурсан С. Л., Хуснитдинов К. Р., Хамитов Э. М., Колбин А. М., Мустафин А. Г., Абдрахманов И. Б. // Прогноз антикоррозионной активности в ряду пентенилариламинов и промышленное их внедрение // Журн. прикл. химии. 2012. №8. С. 1243–1246.
21. ОСТ 39-099-79. Ингибиторы коррозии. Метод оценки эффективности защитного действия ингибиторов коррозии в нефтепромышленных сточных водах. Уфа: ВНИИСПТнефть, 1980.
22. Granovsky A. A. URL: <http://assik/chem.msu.ru/gran/amess/index.html>
23. Stephens P. J., Delvin F. J., Chabalovsky C. F., Frisch M. J. Ab initio calculation of vibrational absorption and circular dichroism spectra using density functional force fields // J. Phys. Chem. 1994. Vol. 98. Pp. 11623–11627.

Поступила в редакцию 12.03.2021 г.

После доработки – 11.05.2021 г.

DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2021.2.26

SYNTHESIS OF N,N-DIALLYL DERIVATIVES OF ALKOXYANILINES AND STUDY OF THEIR ANTICORROSIVE ACTIVITY USING QUANTUM CHEMICAL PREDICTION

© R. N. Khusnitudinov¹, S. L. Khursan¹, R. R. Gataullin¹, R. A. Khusnutdinov¹,
A. G. Mustafin², I. B. Abdrakhmanov¹, A. Kh. Fattakhov^{2*}

¹*Ufa Institute of Chemistry, Russian Academy of Sciences
71 Oktyabrya Avenue, 450054 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia.*

²*Bashkir State University
32 Zaki Validi Street, 450076 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia.*

*Email: al_fatt@mail.ru

Diallyl derivatives of alkoxyanilines synthesized from large-tonnage waste and available products of petrochemical industries are of interest as potential corrosion inhibitors for protecting oilfield equipment and pipelines. The authors analyzed correlation between the inhibitory properties of diallyl derivatives of alkoxyanilines and the electronic structure on the basis of such reactivity indices as q_N – the charge on the nitrogen atom (Mulliken analysis), a.u.; Q_N – the charge on the nitrogen atom (NBO analysis), a.u.; E_{homo} – the energy of the highest occupied molecular orbital, eV; E_{lumo} – the energy of the lowest unoccupied molecular orbital, eV; μ – chemical potential, eV; π – Pearson rigidity, eV; W – global electrophilicity index, eV. It was found that the best correlation dependence is observed between the efficiency of protection against corrosion, the charge on the nitrogen atom, and the energy of the highest occupied molecular orbitals. Using the found regression equations, the structure of diallyl derivatives of alkoxyanilines with high inhibitory activity was predicted. The predicted compounds were synthesized, and their anticorrosive activity were studied. The calculated values of the degree of protection of the predicted compounds, obtained with the use of the regression equations for the quantum-chemical potentials, coincide with the experimental degrees of protection within the experimental accuracy and standard errors of calculations.

Keywords: reactivity indices, quantum-chemical parameters, correlation, correlation coefficients, prediction of anticorrosive activity, regression equation.

Published in Russian. Do not hesitate to contact us at bulletin_bsu@mail.ru if you need translation of the article.

REFERENCES

1. Rosenfield I. L. Inhibitory korrozii [Corrosion inhibitors]. Moscow: Khimiya, 1977.
2. Reshetnikov S. M. Inhibitory kislotoi korrozii metallov [Inhibitors of acid corrosion of metals]. Leningrad: Khimiya, Leningr. otd-e, 1986.
3. Ivanov E. S. Inhibitory korrozii metallov v kislykh sredakh [Inhibitors of corrosion of metals in acidic environments]. Moscow: Metallurgiya, 1986.
4. Saakyan L. S., Efremov A. P. Zashchita neftepromyslovogo oborudovaniya ot korrozii [Protection of oilfield equipment from corrosion]. Moscow: Nedra, 1982.
5. Legezin N. E., Glazov N. P., Kessel'man G. S., Kutovaya A. A. Zashchita ot korrozii promyslovykh sooruzhenii v gazovoi i nefteobrabatovayushchei promyshlennosti [Corrosion protection of field structures in the gas and oil industry]. Moscow: Nedra, 1973.
6. Gonik A. A. Serovodorodnaya korroziya i mery ee pre-duprezhdeniya [Hydrogen sulfide corrosion and measures preventing it]. Moscow: Nedra, 1966.
7. Grigor'ev V. P., Ekilik V. V. Khimicheskaya struktura i zashchitnoe deistvie ingibitorov korrozii [Chemical structure and protective action of corrosion inhibitors]. Rostov n/D: izd-vo RGU, 1978.
8. Free M. L. Corrosion. 2002. Vol. 58. No. 12. Pp. 1025–1030.
9. Durnie W., Demarco R., Jefferson A., Kinsella B. J. Electrochem. Soc. 1999. Vol. 146. No. 5. Pp. 1751.
10. Awad G. H., Asaad A. N., Abdel Gaber A. M., Massoud S. S. Protection of metals. 1997. Vol. 33. No. 6. Pp. 509–516.
11. Bugai D. E., Gabitov A. I., Bresler I. G. DAN SSSR. 1990. Vol. 314. No. 2. Pp. 384–386.
12. Bugai D. E., Golubev V. M., Laptev A. B., Lyapina N. K., Golubev I. V., Rakhmankulov D. L. Bash. khim. zh-l. 1996. Vol. 3. No. 4. Pp. 48.

13. Abdrakhmanov I. B., Mustafin A. G., Sharafutdinov V. M. Peregruppirovka Klyaizena v ryadu aromaticheskikh aminov [Claisen rearrangement in the series of aromatic amines]. Ufa: Gilem, Bashk. Entsik., 2014.
14. Gataullin R. R., Khaziev E. V., Khusnitdinov R. N., Borisov I. M., Abdrakhmanov I. B. ZhPKh. 2001. Vol. 74. No. 11. Pp. 1850–1852.
15. Abdrakhmanov I. B., Gimadieva A. R., Mustafin A. G., Sharafutdinov V. M. Amino-peregruppirovka Klyaizena i prevrashcheniya orto-alkenilarilaminov [Claisen amino-rearrangement and transformations of ortho-alkenylarylamines]. Moscow: Nauka, 2020.
16. Khusnutdinov R. A., Khursan S. L., Khusnitdinov R. N., Sharafutdinov V. M., Kras'ko S. A., Mustafin A. G., Abdrakhmanov I. B. Bash. khim. zh-l. 2019. Vol. 26. No. 2. Pp. 92–95.
17. Khusnitdinov R. N., Khursan S. L., Khusnitdinov K. R., Sapozhnikov Yu. E., Kolbin A. M., Mustafin A. G., Abdrakhmanov I. B. Bash. khim. zh-l. 2012. Vol. 19. No. 1. Pp. 85–90.
18. Khusnitdinov R. N., Khursan S. L., Khusnitdinov K. R., Kras'ko S. L., Mustafin A. G., Abdrakhmanov I. B. Bash. khim. zh-l. 2019. Vol. 26. No. 3. Pp. 34–37.
19. Khusnitdinov R. N., Nigmatullin N. G., Khursan S. L., Khusnitdinov K. R., Kolbin A. M., Mustafin A. G., Abdrakhmanov I. B. Vestnik Bashkirskogo universiteta. 2011. Vol. 16. No. 3. Pp. 676–678.
20. Khusnitdinov R. N., Khursan S. L., Khusnitdinov K. R., Khamitov E. M., Kolbin A. M., Mustafin A. G., Abdrakhmanov I. B. Zhurn. prikl. khimii. 2012. No. 8. Pp. 1243–1246.
21. OST 39-099-79. Ingibitory korrozii. Metod otsenki effektivnosti zashchitnogo deistviya ingibitorov korrozii v neftepromyslovykh stochnykh vodakh. Ufa: VNIISPTneft', 1980.
22. Granovsky A. A. URL: <http://assik/chem.msu.su/gran/amess/ndex.html>
23. Stephens P. J., Delvin F. J., Chabalovsky C. F., Frisch M. J. J. Phys. Chem. 1994. Vol. 98. Pp. 11623–11627.

Received 12.03.2021.

Revised 11.05.2021.