

АЛКОКСИЛИРОВАНИЕ ПИПЕРАЗИНА 1,2-ЭПОКСИПРОПАНОМ И 1,2-ЭПОКСИБУТАНОМ**М.Е. Леонтьева, Ю.В. Демидова, П.А. Демидов, С.В. Дронов**

Мария Евгеньевна Леонтьева (ORCID 0000-0002-6149-1320), Юлия Валерьевна Демидова (ORCID 0000-0003-2608-0259)*, Павел Александрович Демидов (ORCID 0000-0003-1938-1192), Сергей Вячеславович Дронов (ORCID 0009-0002-8028-9168)

Кафедра технологии нефтехимических и углехимических производств, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Московский пр., 26, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 190013

E-mail: mevgenevna@bk.ru, demidova@spbti.ru*, pa.demidov@spbti.ru, dronov@spbti.ru

Производные пиперазина широко применяются в качестве интермедиатов при получении различных поверхностно-активных веществ и фармацевтических препаратов, а также могут использоваться в качестве компонентов-активаторов аминовых абсорбентов для очистки углеводородных газов от сероводорода и углекислого газа. В настоящей работе приведены кинетические закономерности алкоксилирования пиперазина несимметричными эпоксидами - 1,2-эпоксипропаном и 1,2-эпоксибутаном - в присутствии воды в качестве катализатора в концентрации от 1 до 50% мас., в температурном интервале от 60 до 130 °С и молярном соотношении реагентов (эпоксид/пиперазин) от 0,4 до 0,8. Показано, что алкоксилирование пиперазина указанными несимметричными эпоксидами описывается закономерностями кинетики последовательно-параллельных реакций, а температурный режим не оказывает существенного влияния на соотношение моно- и дизамещенных пиперазинов в реакционной массе. При алкоксилировании наряду с продуктами «нормального» строения (вторичные спирты) образуются также соединения, полученные за счет «аномального» раскрытия оксиранового кольца эпоксида (первичные спирты). Выход продуктов «аномального» строения в пересчете на аминоспирты «нормального» строения не превышает 2% при алкоксилировании пиперазина 1,2-эпоксипропаном и 0,5% - 1,2-эпоксибутаном. Посредством лабораторной ректификации из полученной реакционной массы выделены N-(2-гидроксиалкил)-пиперазины, а трехкратной перекристаллизацией из метанола - N,N'-бис(2-гидроксиалкил)-пиперазины. Состав и структура выделенных индивидуальных соединений охарактеризованы такими физико-химическими методами как ИК, ¹H и ¹³C ЯМР спектроскопии. Полученные в исследовании результаты могут представлять интерес при разработке или оптимизации процесса получения β-аминоспиртов на базе пиперазина.

Ключевые слова: пиперазин, эпоксид, алкоксилирование, гидроксиалкилпиперазин, кинетика

PIPERAZINE ALKOXYLATION BY 1,2-EPOXYPROPANE AND 1,2-EPOXYBUTANE**M.E. Leont'yeva, Y.V. Demidova, P.A. Demidov, S.V. Dronov**

Maria E. Leont'yeva (ORCID 0000-0002-6149-1320), Yuliya V. Demidova (ORCID 0000-0003-2608-0259)*, Pavel A. Demidov (ORCID 0000-0003-1938-1192), Sergey V. Dronov (ORCID 0009-0002-8028-9168)

Department of Petrol and Coal Processing, Saint-Petersburg State Institute of Technology (Technical University), Moskovsky pr. 26, Saint-Petersburg, 190013, Russia

E-mail: mevgenevna@bk.ru, demidova@spbti.ru, pa.demidov@spbti.ru, dronov@spbti.ru

Piperazine derivatives are widely used as intermediates in the production of various surfactants and pharmaceuticals, and can also be used as amine absorbents activator components for the hydrocarbon gases purification from hydrogen sulfide and carbon dioxide. In the present work, piperazine alkoxylation kinetic regularities with unsymmetrical epoxides - 1,2-epoxypropane and

1,2-epoxybutane - in the presence of water as a catalyst in a concentration 1-50% by weight, in the temperature range from 60 to 130 °C and a molar ratio of reagents (epoxide/piperazine) from 0.4 to 0.8 are presented. It is shown that piperazine alkoxylation with the indicated unsymmetrical epoxides is described by the kinetics of series-parallel reactions, and the temperature regime does not have a significant effect on the ratio of mono- and disubstituted piperazines in the reaction mass. During alkoxylation, along with products of the “normal” structure (secondary alcohols), compounds obtained due to the “anomalous” the epoxide oxirane ring opening (primary alcohols) are also formed. The yield of “anomalous” structure products in terms of “normal” structure amino alcohols does not exceed 2% during alkoxylation of piperazine with 1,2-epoxypropane and 0.5% with 1,2-epoxybutane. N-(2-hydroxyalkyl)-piperazines were isolated from the resulting reaction mass by laboratory rectification, and N,N'-bis(2-hydroxyalkyl)-piperazines were isolated by triple recrystallization from methanol. The composition and structure of the isolated individual compounds were characterized by such physicochemical methods as IR, ¹H NMR and ¹³C spectroscopy. The results obtained in the study may be of interest in the development or optimization of the process for obtaining β-amino alcohols based on piperazine.

Keywords: piperazine, epoxide, alkoxylation, hydroxyalkylpiperazine, kinetics

Для цитирования:

Леонтьева М.Е., Демидова Ю.В., Демидов П.А., Дронов С.В. Алкоксилирование пиперазина 1,2-эпоксипропаном и 1,2-эпоксипутаном. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2025. Т. 68. Вып. 10. С. 103–108. DOI: 10.6060/ivkkt.20256810.7214.

For citation:

Leont'yeva M.E., Demidova Y.V., Demidov P.A., Dronov S.V. Piperazine alkoxylation by 1,2-epoxypropane and 1,2-epoxybutane. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2025. V. 68. N 10. P. 103–108. DOI: 10.6060/ivkkt.20256810.7214.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время основным способом получения β-аминоспиртов в промышленности является алкоксилирование аммиака и аминов [1, 2].

Алкоксильные производные пиперазина находят применение в качестве активного компонента в промышленных аминовых абсорбентах [3-7], а также в качестве сырья для получения поверхностно-активных веществ и фармацевтических средств [8-15]. В литературе приводится преимущественно информация по соединениям на основе этоксильных производных пиперазина, при этом продукты на основе других эпоксидов, в частности, 1,2-эпоксипропана и 1,2-эпоксипутана, могут представлять значительный интерес, особенно в качестве гидрофильного компонента в производстве ингибиторов коррозии (например, сероводородной или углекислотной), так как изменяя их структуру можно регулировать адсорбцию на поверхности защищаемого металла.

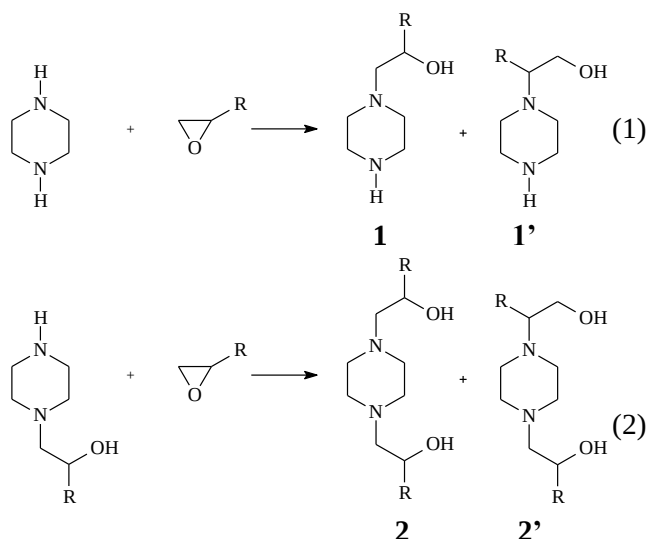
Алкоксилирование аминов проводят как автокаталитически, так и в присутствии других протонодонорных соединений [16-20]. Роль катализатора сводится к активированию молекулы эпоксида и стабилизации промежуточного комплекса, получающегося при раскрытии оксиранового кольца.

Пиперазин характеризуется высокой температурой застывания (112 °C), поэтому для его алкоксилирования требуется применение растворителя. Низкая реакционная способность гидроксильной группы по сравнению с аминной в нуклеофильных реакциях позволяет использовать воду и различные спирты в качестве протонодонорного растворителя при получении аминосспиртов [21].

Алкоксилирование пиперазина описывается двумя последовательно-параллельными реакциями с образованием моно- и дизамещенного пиперазина соответственно (рис. 1). В случае с несимметричными эпоксидами наряду с продуктами «нормального» строения (**1** и **2**) образуются также соединения, полученные за счет «аномального» раскрытия оксиранового кольца (**1'** и **2'**).

Ранее в работе [22] было показано, что алкоксилирование по гидроксильной группе незначительно (выход таких продуктов составляет менее 0,05%), поэтому данными реакциями можно пренебречь.

Целью настоящего исследования являлось установление влияния различных параметров ведения реакции между пиперазином и 1,2-эпоксипропаном и 1,2-эпоксипутаном (температуры, мольного соотношения исходных реагентов) на выход продуктов.



где R = CH₃ (a), CH₂CH₃ (b)

Рис. 1. Реакции образования продуктов при алкоксилировании пиперазина

Fig. 1. Product formation reactions during alkoxylation of piperazine

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для исследований были использованы пиперазин (Merck), 1,2-эпоксипропан (окись пропилена, ГОСТ 7568-88), 1,2-эпоксибутан (Merck), вода дистиллированная (ГОСТ Р 58144-2018), метанол (ГОСТ 2222-95).

Вещества **1a** и **1b** были выделены из реакционной смеси методами лабораторной ректификации. Чистота полученных соединений – более 99,0%. Продукты **2a** и **2b** с содержанием основного вещества более 99,0% мас. получены из кубового продукта после выделения соответственно **1a** и **1b** трехкратной перекристаллизацией из метанола.

Структуру соединений **1** и **2** определяли методами ИК, ЯМР ¹H и ¹³C ЯМР спектроскопии на оборудовании Инжинирингового центра СПбГТИ (ТУ). ИК спектры образцов регистрировали на ИК-Фурье спектрометре Shimadzu IRTracer-100 с приставкой Спесас в диапазоне волновых чисел 4000–400 см⁻¹ при комнатной температуре. Спектры ЯМР снимали на приборе BrukerBioSpin AG Avance III HD 400 при комнатной температуре в дейтерохлороформе.

Состав реакционной смеси определяли методом ГЖХ с использованием хроматографического комплекса «Цвет 800» (колонка НР-1 (длина 30 м, диаметр 0,2 мм, толщина пленки 0,25 мкм), детектор – пламенно-ионизационный). Условия хроматографирования: расход газа-носителя (азот) – 200 мл/мин, температура испарителя и детектора – 270 °С. Анализ проводился программированием

температуры в следующем режиме: изотерма 150 °С в течение 2 мин, нагрев со скоростью 10 °С до температуры 250 °С и изотерма в течение 10 мин.

Калибровочные коэффициенты отдельных компонентов смеси (пиперазин, **1**, **2**) были установлены посредством приготовления искусственных смесей, а изомеров **1'** и **2'** приняты равными как для веществ **1** и **2** соответственно.

Схема установки алкоксилирования приведена на рис. 2. Реакцию проводили в металлическом реакторе (автоклаве) с рубашкой, снабженном карманом для термопары, манометром, сифоном для подачи эпоксилов. Перемешивание реакционной смеси осуществляли посредством магнитной мешалки. Заданную температуру реакции (±0,1 °С) поддерживали с помощью циркулирующей жидкости от термостата.

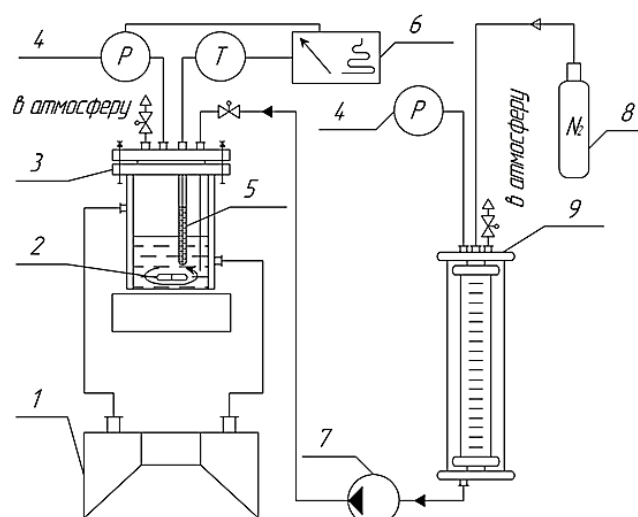


Рис. 2. Схема установки алкоксилирования: 1 – термостат; 2 – магнитная мешалка; 3 – реактор; 4 – манометры; 5 – карман с термопарой; 6 – многоканальный электронный регистратор; 7 – насос-дозатор плунжерный; 8 – баллон с азотом; 9 – мерник для эпоксида

Fig. 2. Scheme for the installation of alkoxylation: 1 - thermostat; 2 - magnetic stirrer; 3 - reactor; 4 - manometers; 5 - thermocouple pocket; 6 - multichannel electronic recorder; 7 - plunger dosing pump; 8 - nitrogen; 9 - measuring device for alkylene oxide

Алкоксилирование пиперазина проводили в изотермических условиях. В реактор загружали расчетное количество пиперазина и воды. Смесь при постоянном перемешивании нагревали до требуемой температуры. После того, как раствор становился гомогенным, в реактор однократно вводили расчетное количество соответствующего эпоксида.

Начальные концентрации веществ задавали так, чтобы можно было отвести выделяющееся тепло химической реакции и обеспечить изотермический режим.

N-(2-гидроксипропил)-пиперазин (**1a**)

Т.кип. 155-158 °С (5 кПа)

¹H δ, м.д.: 4,8-3,8 (шс, 3H, OH, NH), 3,6 (м, 3H, CHOH), 2,6 (д. т, 2H, CH₂CH₂NH), 2,3 (т, 2H, CH₂CH₂N), 2,0 (д. д, 2H, CHCH₂N), 0,9 (д, 3H, CH₃)

¹³C δ, м.д.: 66,1 (NCH₂CH), 62,1 (CHOH), 54,3 (NCH₂CH₂), 46,0 (NHCH₂CH₂), 20,5 (CHCH₃)

ИК, ν, см⁻¹: 3399, 3282, 2935, 2808, 1456, 1371, 1136, 1064, 1016, 943, 840, 792

N,N'-бис-(2-гидроксипропил)-пиперазин (**2a**)

¹H δ, м.д.: 4,8-3,8 (шс, 3H, OH), 3,6 (м, 3H, CHOH), 2,4 (т, 2H, CH₂CH₂N), 2,0 (д. д, 2H, CHCH₂N), 0,9 (д, 3H, CH₃)

¹³C δ, м.д.: 65,6 (CHOH), 62,2 (NCH₂CH), 53,2 (NCH₂CH₂), 20,2 (CHCH₃)

ИК, ν, см⁻¹: 3394, 2968, 2891, 2808, 1458, 1413, 1381, 1328, 1300, 1157, 1130, 1103, 1064, 1012, 960, 923, 840, 815

N-(2-гидроксипропил)-пиперазин (**1b**)

Т.кип. 172-178 °С (5 кПа)

¹H δ, м.д.: 4,8-3,8 (шс, 3H, OH, NH), 3,5 (м, 3H, CHOH), 2,6 (д. т, 2H, CH₂CH₂NH), 2,4 (т, 2H, CH₂CH₂N), 2,2 (д. д, 2H, CHCH₂N), 1,4 (д. кв, 2H, CHCH₂N), 0,9 (т, 3H, CH₃)

¹³C δ, м.д.: 67,1 (CHOH), 64,7 (NCH₂CH), 54,3 (NCH₂CH₂), 45,5 (NHCH₂CH₂), 27,6 (CHCH₂CH₃), 9,5 (CH₂CH₃)

ИК, ν, см⁻¹: 3399, 3282, 2938, 2814, 1456, 1321, 1140, 1064, 1031, 986, 912, 860, 790

N,N'-бис-(2-гидроксипропил)-пиперазин (**2b**)

¹H δ, м.д.: 4,8-3,8 (шс, 3H, OH), 3,5 (м, 3H, CHOH), 2,5 (т, 2H, CH₂CH₂N), 2,2 (д. д, 2H, CHCH₂N), 1,4 (д. кв, 2H, CHCH₂N), 0,9 (т, 3H, CH₃)

¹³C δ, м.д.: 67,4 (CHOH), 63,8 (NCH₂CH), 54,3 (NCH₂CH₂), 27,7 (CHCH₂CH₃), 9,8 (CH₂CH₃)

ИК, ν, см⁻¹: 3399, 3248, 2957, 2924, 2873, 2828, 1456, 1373, 1338, 1306, 1287, 1264, 1144, 1132, 1103, 1078, 1038, 989, 941, 914, 899, 872, 820, 777.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ИК спектрах полученных соединений наблюдаются следующие характеристические полосы. В диапазоне 3400-3200 см⁻¹ поглощение, обусловленное валентными колебаниями связей протоногенных групп (преимущественно О-Н); 1140-1130 см⁻¹ – С-Н; 1080-1060 см⁻¹ – С-О вторичных спиртов.

Кинетические закономерности алкоксилирования

В ходе исследования было установлено, что продукты «аномального» строения образуются

в незначительном количестве – менее 2% (по отношению к продукту «нормального» строения), поэтому реакцией их получения в кинетической модели изучаемого процесса можно пренебречь. Образование продуктов алкоксилирования пиперазина по аминогруппе можно представить схемой из двух последовательно-параллельных реакций (1) и (2) с получением моно- и дизамещенного пиперазина «нормального» строения, соответственно. Такая схема превращений описывается системой из двух дифференциальных кинетических уравнений второго порядка и уравнения материального баланса.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dC_{PIP}}{d\tau} = -k_1 \cdot C_{PIP} \cdot C_{EP} \quad (3) \\ \frac{dC_1}{d\tau} = k_1 \cdot C_{PIP} \cdot C_{EP} - k_2 \cdot C_1 \cdot C_{EP} \quad (4) \\ C_{PIP,0} = C_{PIP} + C_1 + C_2 \quad (5) \end{array} \right.$$

где k_1, k_2 – константы скорости реакций (1) и (2); $C_1, C_2, C_{EP}, C_{PIP}$ – текущие концентрации продукта **1**, **2**, эпоксида и пиперазина, соответственно; $C_{PIP,0}$ – начальная концентрация пиперазина.

В соответствии с теорией кинетики последовательно-параллельных реакций выход продукта **1** (X_1) зависит от мольного соотношения исходных веществ и констант скоростей ($\chi = k_2/k_1$).

Результаты расчетов на основании экспериментальных данных при различных условиях ведения процесса приведены в таблице.

Соотношение реагентов. Математическая обработка полученных результатов в интервале молярных соотношений эпоксидов к пиперазину от 0,2 до 0,9 показала, что отношение констант скоростей в указанном диапазоне остается постоянным и равным $\chi = 0,50 \pm 0,08$. Полученное значение согласуется с результатами [22], которые свидетельствуют об отсутствии взаимного влияния аминогрупп на скорость реакции алкоксилирования.

Влияние температуры. Полученные результаты алкоксилирования пиперазина в температурном интервале 60-130 °С свидетельствуют о том, что отношение констант скоростей χ не зависит от температуры процесса. Таким образом, энергии активации реакций (1) и (2) имеют близкие значения. Следует отметить, что с увеличением температуры выход продуктов «аномального» строения увеличивается (для **1'a/1a** – с 1% при 60 °С до 2% при 130 °С, для **1'b/1b** – с 0,3% при 60 °С до 0,5% при 130 °С), что характерно для реакций алкоксилирования несимметричными эпоксидами [23].

Таблица

Результаты алкоксилирования пиперазина
Table. Results of piperazine alkoxylation

Table. Results of piperazine alkoxylation							
№ п/п	T, °C	β^*	Состав, %мас.**			X_1	χ
			PIP	1	2		
a							
1	60	0,60	35,5	50,3	14,2	0,420	0,48±0,04
2	80	0,40	50,5	42,0	7,5	0,318	0,51±0,04
3	80	0,60	35,6	48,9	15,4	0,409	0,54±0,04
4	80	0,80	24,4	51,5	24,1	0,470	0,52±0,04
5	110	0,60	35,0	51,0	14,0	0,426	0,46±0,04
6	130	0,60	35,5	49,5	15,0	0,414	0,51±0,04
b							
7	60	0,60	31,0	52,0	17,0	0,431	0,50±0,04
8	80	0,40	48,6	44,2	7,2	0,319	0,48±0,04
9	80	0,60	30,9	52,9	16,2	0,438	0,46±0,04
10	80	0,80	22,4	52,5	25,1	0,473	0,51±0,04
11	110	0,60	31,8	50,4	17,8	0,416	0,54±0,04
12	130	0,60	32,1	51,0	16,9	0,419	0,52±0,04

Примечания: * молярное отношение эпоксида к пиперазину

** без учета растворителя и продуктов «аномального» строения

Notes: * molar ratio of epoxide to piperazine ** excluding solvent and products of "anomalous" structure

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены и охарактеризованы методами ЯМР и ИК-спектроскопии продукты взаимодействия пиперазина и 1,2-эпоксипропана и 1,2-эпоксипропана.

Исследованы кинетические закономерности алкоксилирования пиперазина 1,2-эпоксипропаном и 1,2-эпоксипропаном. Установлено, что в интервале температур 60-130 °C парциальные константы скорости – константа скорости отнесенная к числу вторичных аминогрупп – алкоксилирования пиперазина и N-(2-гидроксиалкил)пиперазина по аминогруппе равны друг другу, а сами значения констант скоростей k_1 и k_2 отличаются в два раза. Показано, что с увеличением температуры возрастает выход продуктов, образующихся за счет «аномального» раскрытия оксиранового кольца.

Полученные результаты могут представлять интерес при разработке технологии производства алкоксильных производных пиперазина, а также продуктов на их основе.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors declare the absence of a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА
REFERENCES

- Andreev D.V., Sergeev E.E., Makarshin L.L., Ivanov E.A., Gribovskii A.G., Adonin N.Yu., Pai Z.P., Parmon V.N. // *Catal. Ind.* 2019. V. 11. P. 45–52. DOI: 10.1134/S2070050419010033.
- Dake G. // *Comprehensive heterocyclic chemistry III*. 2008. P. 173-233. DOI: 10.1016/b978-008044992-0.00103-6.
- Tang Z., Fei W., Oli Y. // *Energy Procedia*. 2011. V. 4. P. 307-317. DOI: 10.1016/j.egypro.2011.01.056.
- Guoyi B., Jie D. // *Univ. Natur. Sci. Ed.* 2018. V. 38. N 5. P. 472-479. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1565.2018.05.005.
- Couchaux G., Barth D., Jacquin M., Faraj A., Grandjean J. // *Oil Gas Sci. Technol. – Rev. IFP Energies Nouvelles*. 2014. V. 69. N 5. P. 865-884. DOI: 10.2516/ogst/2013150.
- Wylock C., Dehaeck S., Alonso Quintans D., Colinet P., Haut B. // *Chem. Eng. Sci.* 2013. V. 100. P. 249-258. DOI: 10.1016/j.ces.2013.02.068.
- Chen X., Rochelle G.T. // *Chem. Eng. Res. Des.* 2011. V. 89. N 9. P. 1693-1710. DOI: 10.1016/j.cherd.2011.04.002.
- Khalili F., Henni A., East A.L.L. // *J. Mol. Struct. THEOCHEM*. 2009. V. 916. N 1–3. P. 1-9. DOI: 10.1016/j.theochem.2009.09.022.
- Mishra S., Tyagi V.K. // *J. Surfact Deterg.* 2008. V. 11. N 2. P. 167-173. DOI: 10.1007/s11743-008-1067-5.
- Hussain S., Ali S., Shahzadi S., Shahid M. // *Cogent Chem.* 2015. V. 1. N 1. P. 1-12. DOI: 10.1080-23312009.2015.1029038.
- Singh K., Siddiqui H.H., Shakra P., Bagga P., Kumar A., Khalid M., Arif M., Alok S. // *IJPSR*. 2015. V. 6. P. 4145-4158. DOI: 10.13040/IJPSR.0975-8232.6(10).4145-58.
- Long D.R., Hilliard N.P. Jr., Chhatre S.A., Timofeeva T.V., Yakovenko A.A., Deil D.K., Mensah E.A. // *Belstein J. Org. Chem.* 2010. V. 6. N 31. P. 1-15. DOI: 10.3762/bjoc.6.31.
- Черных В.Н., Патрушева Н.А., Никулина Н.С., Пугачева И.Н., Никулин С.С. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2021. Т. 64. Вып. 3. С. 100-106. Chernykh V.N., Patrusheva N.A., Nikulina N.S., Pugacheva I.N., Nikulin S.S. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2021. V. 64. N 3. P. 100-106. DOI: 10.6060/ivkkt.20216403.6303.
- Алопина Е.В., Новиков И.В., Агеева Т.А., Александриский В.В. // *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва)*. 2023. Т. LXVII. № 3. С. 114-122. Alopina E.B., Novikov I.V., Ageeva T.A.,

- Aleksandriiskii V.V.** // *Ros. Khim. Zh.* 2023. V. 67. N 3. P. 114-122 (in Russian). DOI: 10.6060/RCJ.2023673.16.
15. **Rathi A.K., Syed R., Shin H.S., Patel R.V.** // *Expert Opin. Ther. Pat.* 2016. V. 26(7). P. 777-797. DOI: 10.1080/13543776.2016.1189902.
16. **Kuppusamy R.R.P., Zade A., Neogi S.** // *Chem. Pap.* 2023. V. 77. P. 1887-1906. DOI: 10.1007/s11696-022-02583-5.
17. **Liu D., Lin Z., An W., An R., Bie H.** // *Chem. Eng. Proc. – Proc. Intensif.* 2020. V. 153. P. 1-11. DOI: 10.1016/j.ccep.2020.107930.
18. **Müller P., Krösschell R.D.E., Winkenwerder W., van der Schaaf J.** // *Chem. Eng. J.* 2020. V. 382. N 122939. P. 1-27. DOI: 10.1016/j.cej.2019.122939.
19. **Müller P., Aguirre A., Ljungdahl T., van der Schaaf J.** // *J. Adv. Manufact. Proc.* 2020. V. 2. N 2. P. e10042. DOI: 10.1002/amp2.10042.
20. **Gettys K., Ye Z., Dai M.** // *Synthesis.* 2017. V. 49. N 12. P. 2589-2604. DOI: 10.1055/s-0036-1589491.
21. **Talybov A., Abdullayev Y.** // *Green Sustain. Chem.* 2013. V. 3. N 1. P. 31-35. DOI: 10.4236/gsc.2013.31006.
22. **Демидова Ю.В., Демидов П.А., Потехин В.В.** // *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2020. Т. 63. Вып. 11. С. 77-81. **Demidova Yu.V., Demidov P.A., Potekhin V.V.** // *Chem-ChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2020. V. 63. N 11. P. 77-81. DOI: 10.6060/ivkkt.20206311.6188.
23. **Демидова Ю.В., Демидов П.А., Потехин В.В.** // *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2022. Т. 65. Вып. 3. С. 22-26. **Demidova Yu.V., Demidov P.A., Potekhin V.V.** // *Chem-ChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N 3. P. 22-26. DOI: 10.6060/ivkkt.20226503.6542.

Поступила в редакцию 27.01.2025

Принята к опубликованию 24.03.2025

Received 27.01.2025

Accepted 24.03.2025