

КИНЕТИКА ОКСИПРОПИЛИРОВАНИЯ МОНОЭТАНОЛАМИНА**Ю.В. Демидова, П.А. Демидов, В.В. Потехин**

Юлия Валерьевна Демидова (ORCID 0000-0003-2608-0259)*

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

E-mail: demidova@technolog.edu.ru *

Павел Александрович Демидов (ORCID 0000-0003-1938-1192), Вячеслав Вячеславович Потехин (ORCID 0000-0001-9850-9558)

АО «Химтэк Инжиниринг», ул. Академика Павлова, д.5, лит. В, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 197022

E-mail: pa.demidov@himtek.ru, vv.potekhin@himtek.ru

Третиичные аминосирпы широко применяются в качестве интенсификаторов помола цемента, позволяющих повысить производительность шаровых мельниц, снизить удельные энергозатраты, увеличить эффективность размалывания и получить цемент с высокой текучестью и насыпной плотностью. Основным промышленным способом получения третиичных аминосирпов является оксиалкилирование моно- и диалканоламинов. В настоящей работе исследована кинетика оксипропилирования моноэтанолamina в температурном интервале от 40 до 80 °С при молярных соотношениях реагентов (окись пропиленa/моноэтанолamin) 0,4 - 1,8. Определены параметры аррениусовской зависимости целевых и побочных реакций. Анализ реакционной массы методом хромато-масс-спектрометрии показал, что в процессе оксипропилирования моноэтанолamina в небольшом количестве образуются изомеры целевых продуктов. Изомеры образуются при «аномальном» оксипропилировании, при котором взаимодействие окиси пропиленa с аминогруппой происходит по третиичному атому углерода оксиранового кольца. Продукты оксипропилирования по гидроксильной группе образуются в пренебрежимо малом количестве. Установлено, что энергии активации целевых реакций («нормального» оксипропилирования) равны. Показано, что энергия активации «аномального» оксипропилирования на 17 кДж/моль выше, чем для «нормального». Относительно меньшая реакционная способность вторичного «аномального» аминосирпа по сравнению с «нормальным» может быть обусловлена стерическими затруднениями, связанными с наличием метильной группы в β-положении к реакционному центру. Методом лабораторной ректификации из реакционной массы выделены этанолизопропаноламин и этанолдиизопропаноламин, состав и структура которых охарактеризованы методами ИК, ¹H и ¹³C ЯМР спектроскопии. Полученные в исследовании результаты могут представлять интерес для оптимизации процесса получения этанолизопропаноламинов.

Ключевые слова: этанолдиизопропаноламин, моноэтанолamin, окись пропиленa, кинетика**MONOETHANOLAMINE OXYPROPYLATION KINETICS****Yu.V. Demidova, P.A. Demidov, V.V. Potekhin**

Yulia V. Demidova (ORCID 0000-0003-2608-0259)*

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

E-mail: demidova@technolog.edu.ru *

Pavel A. Demidov (ORCID 0000-0003-1938-1192), Vyacheslav V. Potekhin (ORCID 0000-0001-9850-9558)

JCS "Himtek Engineering", Pavlova st., 5, letter B, Saint-Petersburg, 197022, Russia

E-mail: pa.demidov@himtek.ru, vv.potekhin@himtek.ru

Tertiary amino alcohols are widely used as intensifiers for cement grinding, which make it possible to increase the productivity of ball mills, reduce specific energy consumption, increase grinding efficiency, and obtain cement with high fluidity and bulk density. The main industrial method for producing tertiary amino alcohols is the oxyalkylation of mono- and dialkanolamines. In the present work, the monoethanolamine oxypropylation kinetics in the temperature range from 40 to 80 °C and the molar ratio of the reagents (propylene oxide/monoethanolamine) 0.4 - 1.8 is investigated. The parameters of the Arrhenius dependence of target and side reactions were determined. The reaction mass analysis by gas chromatography-mass spectrometry showed that in the process of oxypropylation of monoethanolamine in a small amount isomer of the target products are formed. Isomers are formed during "abnormal" oxypropylation, in which the propylene oxide interaction with an amino group occurs at the tertiary carbon atom of the oxirane ring. The hydroxypropylation products at the hydroxyl group are formed in negligible amounts. It was found that the activation energies of the target reactions ("normal" oxypropylation) are equal. It is shown that the activation energy of "abnormal" oxypropylation is 17 kJ/mol higher than for "normal". The relatively lower reactivity of the secondary "abnormal" amino alcohol compared to the "normal" one may be due to steric hindrances associated with the presence of a methyl group in the β -position to the reaction center. Ethanolisopropanolamine and ethanoldiisopropanolamine were isolated from the reaction mixture by laboratory rectification, the composition and structure of which were characterized by IR, ^1H and ^{13}C NMR spectroscopy. The results obtained in the study may be of interest for optimizing the process of obtaining ethanolisopropanolamines.

Key words: ethanoldiisopropanolamine, monoethanolamine, propylene oxide, kinetics

Для цитирования:

Демидова Ю.В., Демидов П.А., Потехин В.В. Кинетика оксипропилирования моноэтаноламина. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2022. Т. 65. Вып. 3. С. 22–26

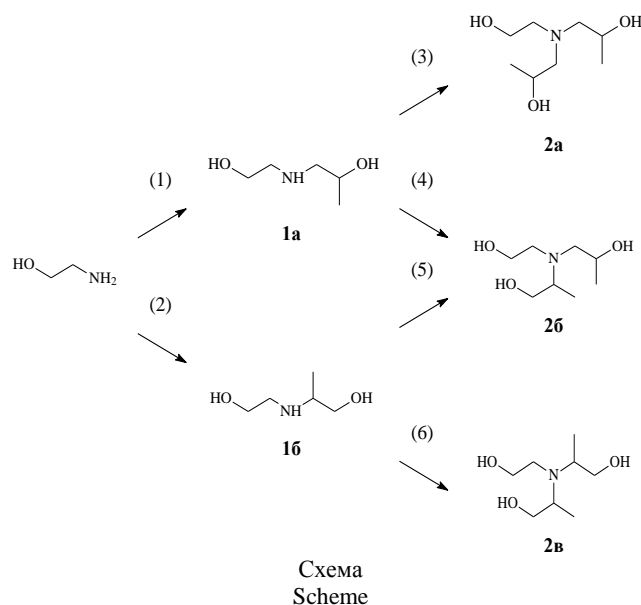
For citation:

Demidova Yu.V., Demidov P.A., Potekhin V.V. Monoethanolamine oxypropylation kinetics. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2022. V. 65. N 3. P. 22–26

Третичные аминоспирты (триэтаноламин, триизопропаноламин) находят широкое применение в качестве интенсификаторов помола цемента, позволяющих не только снизить энергозатраты при производстве, но также и повысить качество получаемого продукта [1-5]. Например, третичные аминоспирты проявляют различное действие на цементные пасты в зависимости от собственной структуры, дозировки и типа цемента. Так, добавка 0,02% триэтаноламина к портландцементу действует как ускоритель схватывания, при 0,25% он действует как замедлитель схватывания, в то же время при 1% он ведет себя как очень сильный ускоритель [6-8]. Аналогичным образом проявляется поведение других третичных аминоспиртов.

В настоящее время интерес представляют также третичные аминоспирты, содержащие как этоксильную, так и изопропоксильную группу [9]. К числу таких веществ относится этанолдиизопропаноламин (ЭДИПА), получаемый оксипропилированием моноэтаноламина (МЭА). Процесс проводится в отсутствие катализаторов. Исходный МЭА и продукты реакции являются хорошими протонодонорами, активирующими раскрытие оксиранового кольца оксида пропилена (ОП) [10, 11].

Оксипропилирование МЭА описывается следующей схемой реакций (1)-(6).



В результате реакции кроме целевого ЭДИПА **2a**, образуются также изомеры – **2б** и **2в**. Получение конечных третичных аминоспиртов

протекает через промежуточную стадию – получение вторичных, «нормального» **1a** и «аномального» **1b**, образующихся при атаке нуклеофила по вторичному и третичному атому углерода оксиранового кольца окиси пропилена, соответственно.

Наряду с реакциями по аминогруппе, ОП может реагировать с МЭА и образовавшимися аминоспиртами по гидроксильной группе [12-14].

Цель настоящего исследования заключалась в определении кинетических параметров реакций оксипропилирования МЭА.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для исследований были использованы мо-ноэтаноламин (ТУ 2423-002-78722668-2010, чистота более 99,3%), окись пропилена (ГОСТ 23001-88, чистота более 99,9%).

Соединения **1a** и **2a** были выделены из реакционной смеси методами лабораторной ректификации. Чистота полученных соединений – более 99%.

Структуру соединений **1a** и **2a** определяли методом ИК, ЯМР ¹H и ¹³C ЯМР спектроскопии на оборудовании Инжинирингового центра СПбГТИ (ТУ). ИК спектры образцов регистрировали на ИК-Фурье спектрометре Shimadzu IRTacer-100 с приставкой Sresac 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 CDCl₃.

Идентификацию продуктов осуществляли с использованием хроматомасс-спектрометра Shimadzu GCMS-QP2010 Ultra (ионизация электронным ударом, колонка Supelco Petrocol (фаза полидиметил-силоксан, диаметр 0,25 мм, длина 100 м). 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. Расшифровка масс-спектров компонентов хроматограммы выполнялась с использованием базы данных NIST.

Состав реакционной смеси определяли методом ГЖХ с использованием хроматографического комплекса «Хромос-1000» (колонка HP-5 (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/мин до температуры 250 °С и изотерма в течение 10 мин.

Калибровочные коэффициенты отдельных компонентов смеси (ОП, МЭА, **1a**, **2a**) были установлены приготовлением искусственных смесей, а изомеров **1b** и **2b** приняты равными как для веществ **1a** и **2a**, соответственно.

Оксипропилирование МЭА проводили в пятигорлой колбе, снабженной мешалкой, термометром, холодильником и сифонами для подачи ОП и отбора проб. Термостатирование (±1 °С) осуществлялось за счет погружения колбы в водяной термостат.

Оксипропилирование МЭА проводили в изотермических условиях. В колбу загружали расчетное количество МЭА и при постоянном перемешивании нагревали до требуемой температуры, после чего в колбу порционно вводили заданное количество ОП. В ходе процесса через определенные дозировки ОП производился отбор проб. По достижении дозировки ОП в количестве 90% от стехиометрической, подачу ее прекращали и производили отбор проб через заданные интервалы времени.

Торможение реакции в отобранных пробах осуществлялось за счет быстрого десятикратного разбавления дистиллированной водой и резкого охлаждения до температуры 0 °С.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты экспериментов при различных условиях приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты оксипропилирования МЭА
Table 1. Results of MEA oxypropylation

№ п/п	Т, °С	β*	Состав, %мас.**				
			МЭА	1a	1b	2a	2b
1	40	0,6	31,5	51,5	1,01	15,7	0,25
2	40	0,9	16,1	51,2	1,05	31,2	0,45
3	40	1,2	7,2	42,6	0,92	48,6	0,68
4	40	1,5	2,8	28,8	0,69	66,7	1,01
5	40	1,8	0,5	13,2	0,35	84,6	1,38
6	60	0,6	31,5	51,9	1,52	14,7	0,32
7	60	0,9	16,5	50,5	1,57	30,7	0,68
8	60	1,2	7,7	43,1	1,38	46,7	1,05
9	60	1,5	2,5	29,9	1,03	65	1,51
10	60	1,8	0,4	12,5	0,51	84,5	2,15
11	80	0,6	31,8	51,3	2,09	14,3	0,50
12	80	0,9	16	50	2,16	30,9	0,89
13	80	1,2	7,2	40,9	1,87	48,5	1,49
14	80	1,5	2	28,7	1,42	65,5	2,25
15	80	1,8	0,4	12,6	0,69	83,1	3,11

Примечания: * молярное отношение ОП к МЭА

** без учета других продуктов оксипропилирования

Notes: * molar ratio of OP to MEA

** excluding other oxypropylation products

Оксипропилирование МЭА по гидроксильной группе, а также образование амина **2в** протекают в незначительной степени, содержание соответствующих продуктов в реакционной смеси составляет менее 0,05% мас. В связи с этим, в кинетической модели изучаемого процесса рассматривались только реакции (1-5). Математическая модель превращений описывается системой из четырех дифференциальных кинетических уравнений второго порядка и уравнения материального баланса.

$$\frac{dC_{\text{МЭА}}}{d\tau} = -k_1 \cdot C_{\text{МЭА}} \cdot C_{\text{ОП}} - k_2 \cdot C_{\text{МЭА}} \cdot C_{\text{ОП}} \quad (1)$$

$$\frac{dC_{1a}}{d\tau} = k_1 \cdot C_{\text{МЭА}} \cdot C_{\text{ОП}} - k_3 \cdot C_{1a} \cdot C_{\text{ОП}} - k_4 \cdot C_{1a} \cdot C_{\text{ОП}} \quad (2)$$

$$\frac{dC_{16}}{d\tau} = k_2 \cdot C_{\text{МЭА}} \cdot C_{\text{ОП}} - k_5 \cdot C_{16} \cdot C_{\text{ОП}} \quad (3)$$

$$\frac{dC_{2a}}{d\tau} = k_3 \cdot C_{1a} \cdot C_{\text{ОП}} \quad (4)$$

где $k_1 - k_5$ - константы скорости реакций (1)-(5); $C_{\text{МЭА}}, C_{\text{ОП}}, C_{1a}, C_{16}, C_{2a}$ - текущие концентрации МЭА, ОП, аминов **1a**, **16** и **2a**, соответственно.

Изменение константы скорости от температуры описывается аррениусовской зависимостью:

$$k_i(T) = k_{i0} \exp\left(-\frac{E_{ai}}{RT}\right) \quad (5)$$

где k_{i0} - предэкспоненциальный множитель, моль/(л·с); E_{ai} - энергия активации, Дж/моль; T - температура, К; R - универсальная газовая постоянная, Дж/моль·К.

Параметры кинетической модели (предэкспоненциальные множители констант скорости и энергии активации) находили путем минимизации целевой функции, которая включала экспериментальные концентрации компонентов в отбираемых пробах [15]. Минимизацию проводили по Гауссу и Марквардту [16]:

$$Q = \sum_i (y_i^{\text{exp}} - y_i^{\text{calc}})^2 \rightarrow \min \quad (6)$$

где y_i^{exp} и y_i^{calc} - экспериментальные и расчетные концентрации компонентов.

Полученные результаты оксипропилирования МЭА в интервале температуры 40-80° свидетельствуют о том, что отношение констант скоростей «нормального» оксипропилирования не зависит от температуры, т.е. энергии активации реакций (1) и (3), а также (5) имеют равные значения. Аналогичное допущение было принято для реакций (2) и (4).

Кинетические кривые расходования ОП при различной температуре приведены на рисунке. На изучаемом участке (после дозирования ОП в количестве 90% от стехиометрической) в реакцию с ОП вступает преимущественно **1a**. Изменением концентрации аминов можно пренебречь (концентрация ОП на порядок меньше концентрации **1a**), т.е. реакции имеют псевдопервый порядок.

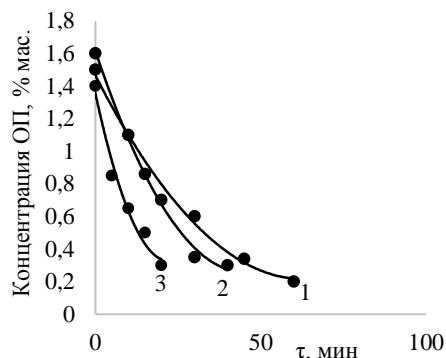


Рис. Кинетические кривые расходования ОП после ее дозирования в количестве 90% от стехиометрической (1 - 40 °С; 2 - 60 °С; 3 - 80 °С)

Fig. Kinetic curves of OP consumption after its dosage in an amount of 90% of stoichiometric (1 - 40 °C; 2 - 60 °C; 3 - 80 °C)

Для определения кинетических параметров реакций, участвующих в схеме 1, необходимо определить пять предэкспоненциальных факторов и два значения энергии активации: для реакций «нормального» и «аномального» оксипропилирования [17].

Результаты расчета кинетических параметров (энергий активации и предэкспоненциальных множителей) для реакций (1)-(5) представлены в табл. 2.

Таблица 2

Кинетические параметры реакции (1)-(5)
Table 2. Kinetic parameters of reaction (1)-(5)

Реакция	k_0 , моль/(л·с)	E_a , кДж/моль
1	$3,7 \cdot 10^4$	$46,5 \pm 4,5$
2	$4,0 \cdot 10^5$	$63,0 \pm 7,0$
3	$1,5 \cdot 10^4$	$46,5 \pm 4,5$
4	$7,7 \cdot 10^4$	$63,0 \pm 7,0$
5	$1,1 \cdot 10^4$	$46,5 \pm 4,5$

Энергии активации стадий «нормального» оксипропилирования составляют 46,5 кДж/моль, что близко к значениям, найденным для процессов оксиалкилирования аминов [18, 19].

Относительно меньшая реакционная способность **16** по сравнению с **1a** может быть обусловлена стерическими затруднениями, связанными с наличием метильной группы в β -положении к реакционному центру [20, 21].

N-(2-гидроксиэтил)-N-(2-гидроксипропил)амин 1a

$T_{\text{кип}}$ 155 °С (22 мм рт. ст.);

^1H δ , м.д.: 4,8-3,8 (шс, 3H, OH, NH), 3,8-3,6 (м, 3H, CHOH), 3,6-3,4 (м, 2H, CH₂OH), 2,6-2,4 (д. т, 2H, CH₂CH₂NH), 2,4-2,2 (д. д, 2H, CHCH₂NH), 0,9 (д, 3H, CH₃);

^{13}C δ , м.д.: 65,5 (CH), 60,3 (CH₂OH), 56,8 (NCH₂CH), 51,2 (NCH₂CH₂), 21,2 (CHCH₃);

ИК, ν , см⁻¹: 3306, 2918, 2833, 1554, 1452, 1371, 1332, 1117, 1051, 928, 839.

N-(2-гидроксиэтил)-N,N-бис-(2-гидроксипропил)амин 2а

Т.кип. 178 °С (5 мм рт. ст.);

¹H δ, м.д.: 5,6-4,6 (шс, 3H, OH), 3,8-3,2 (м, 5H, СНОН, СH₂ОН), 2,6-2,0 (м, 6H, СH₂N), 0,9 (д, 6H, СH₃);

¹³C δ, м.д.: 66,0, 65,6 (СН), 63,8, 63,3 (NCH₂СН), 60,1 (СH₂ОН), 57,4 (NCH₂СH₂), 20,3, 20,0 (СНСH₃);

ИК, ν, см⁻¹: 3335, 2967, 2934, 2880, 2814, 1452, 1371, 1340, 1277, 1132, 1082, 1043, 984, 941, 870, 841, 804.

ВЫВОДЫ

Определены кинетические параметры реакций оксипропилирования моноэтаноламина. Установлено, что энергия активации «нормального» присоединения окиси пропилена составляет 46,5 кДж/моль, «аномального» – 63 кДж/моль.

Получены и охарактеризованы методами ИК-спектроскопии, ¹H и ¹³C ЯМР целевые продукты реакции – N-(2-гидроксиэтил)-N-(2-гидроксипропил)амин и N-(2-гидроксиэтил)-N,N-бис-(2-гидроксипропил)амин.

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

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

**ЛИТЕРАТУРА
REFERENCES**

1. **Shakhova L.D., Luginina I.G., Cherkasov R.A.** Intensification of Cement Grinding with Apply Grinding Aids with Modify Effect. *Modern Appl. Sci.* 2014. V. 8. P. 296-305. DOI: 10.5539/mas.v8n6p296.
2. **Xia-ling Liao, Hong Huang, Fu-qiang He, Chang-hui Yang.** Microstructural characterization of cement in the presence of alkanolamines. *Mater. Today Commun.* 2021. V. 27. 102386. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2021.102386.
3. **Hashem F., Hekal E.** The influence of Triethanol amine and Ethylene glycol on the grindability, setting and hydration characteristics of Portland cement. *Petrol. Chem.* 2019. V. 4. P. 81-88. DOI: 10.15406/pcse.2019.04.00107.
4. **Chipakwe V., Semsari P., Karlkvist T., Rosenkranz J., Chehreh S.** A critical review on the mechanisms of chemical additives used in grinding and their effects on the downstream processes. *J. Mater. Res. Technol.* 2020. V. 9. N 4. P. 8148-8162. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.05.080.
5. **Поляков И.В., Баранников М.В., Степанова Е.А.** Добавки для тяжелого бетона на основе техногенных отходов химических производств. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2021. Т. 64. Вып. 4. С. 104-109. DOI: 10.6060/ivkkt.20216404.6330. **Polyakov I.V., Barannikov M.V., Stepanova E.A.** Additives for Heavy Concrete Based on Industrial Waste from Chemical Industries. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Tekhnol.]*. 2021. V. 64. N 4. P. 104-109. DOI: 10.6060/ivkkt.20216404.6330.
6. **Allahverdi A., Babasafari Z.** Effectiveness of triethanolamine on grindability and properties of portland cement in laboratory ball and vibrating disk mills. *Ceramics Silikaty.* 2014. V. 58. P. 89-94.
7. **Katsioti M., Tsakiridis P.E., Giannatos P., Tsi bouki Z., Marinos J.** Characterization of various cement grinding aids and their impact on grindability and cement performance. *Construct. Build. Mater.* 2009. V. 23. N 5. P. 1954-1959. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2008.09.003.
8. **Ma S., Li W., Zhang S., Hu Y., Shen X.** Study on the hydration and microstructure of Portland cement containing diethanol-isopropanolamine. *Cem. Concr. Res.* 2015. V. 67. P. 122-130. DOI: 10.1016/j.cemconres.2014.09.002.
9. **Cheung J., Jeknavorian A., Roberts L., Silva D.** Impact of admixtures on the hydration kinetics of Portland cement. *Cem. Concr. Res.* 2011. V. 41. P. 1289-1309. DOI: 10.1016/j.cemconres.2011.03.005.
10. **Huerta G., Contreras-Ordoñez G., Alvarez-Toledano C., Santes V., Gómez E., Toscano R.A.** Facile Synthesis of Aminoalcohols by Ring Opening of Epoxides Under Solvent Free Conditions. *Synth. Commun.* 2004. V. 34. N 13. P. 2393-2406. DOI: 10.1081/scc-120039493.
11. **Dake G.** Oxiranes and oxirenes: Monocyclic. Comprehensive heterocyclic chemistry III. 2008. P. 173-233. DOI: 10.1016/b978-008044992-0.00103-6.
12. **Azizi N., Saidi M.R.** Highly Chemoselective Addition of Amines to Epoxides in Water. *Org. Lett.* 2005. V. 7. N 17. P. 3649-3651. DOI: 10.1021/ol051220q.
13. **Talybov A., Abdullayev Y.** Synthesis of Substituted N-Alkylamines in Aqueous Media. *Green Sust. Chem.* 2013. V. 3. N 1. P. 31-35. DOI: 10.4236/gsc.2013.31006.
14. **Tang W., Zhang L., Linninger A., Tranter R., Brezinsky K.** Solving Kinetic Inversion Problems via a Physically Bounded Gauss-Newton (PGN) Method. *Indust. Eng. Chem. Res.* 2005. V. 44. P. 3626-3637. DOI: 10.1021/ie048872n.
15. **Кольцов Н.И.** Решение обратной задачи химической кинетики с применением кубических сплайнов. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2020. Т. 63. Вып. 7. С. 61-66. DOI: 10.6060/ivkkt.20206307.6204. **Kol'tsov N.I.** Solving Inverse Problem of Chemical Kinetics with Use of Cubic Splines. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2020. V. 63. N 7. P. 61-66. DOI: 10.6060/ivkkt.20206307.6204.
16. **Petrov A.I., Dergachev V.D.** Equivalency of Kinetic Schemes: Causes and an Analysis of Some Model Fitting Algorithms. *Int. J. Chem. Kinet.* 2017. V. 49. P. 494-505. DOI: 10.1002/kin.21092.
17. **Zahedi G., Amraei S., Biglari M.** Simulation and optimization of ethanol amine production plant. *Korean J. Chem. Eng.* 2009. V. 26. P. 1504-1511. DOI: 10.1007/s11814-009-0254-z.
18. **Andreev D.V., Sergeev E.E., Makarshin L.L. Ivanov E. A., Gribovskii A. G., Adonin N. Yu., Pai Z. P., Parmon V. N.** Catalytic Synthesis of Triethanolamine in a Microchannel Reactor. *Catal. Ind.* 2019. V. 11 P. 45-52. DOI: 10.1134/S2070050419010033.
19. **Müller P., Krösschell R. D. E., Winkenwerder W., van der Schaaf J.** The butoxylation of dodecylamine: Reaction mechanism and kinetics. *Chem. Eng. J.* 2020. V. 382. N 122939. P. 1-27. DOI: 10.1016/j.cej.2019.122939.
20. **Tiltcher V.H.** Kinetik Und Mechanismus Der Anlagerung von Propylenoxid an Diethylamin Unter Ausschluss. Protonenaktiver Verbindungen. *Angew. Makromol. Chem.* 1972. V. 25. P. 1-14. DOI: 10.1002/apmc.1972.050250101.
21. **Longuet C., Coq B., Durand R., Finiels A., Geneste P., Mauvezin M.J.** Oligomer model to explain the coloration of TEA and discoloration catalytic treatment. *Mol. Catal. A: Chem.* 2005. V. 234. P. 59-62. DOI: 10.1016/j.molcata.2005.02.016.

Поступила в редакцию (Received) 09.11.2021

Принята к опубликованию (Accepted) 28.12.2021