

Т. С. Ситмуратов, А. А. Петухов, А. П. Рахматуллина,
Р. А. Ахмедьянова

ПОЛУЧЕНИЕ СТИРОЛА ЖИДКОФАЗНОЙ ДЕГИДРАТАЦИЕЙ МЕТИЛФЕНИЛКАРБИНОЛА И ВЫСОКОКИПАЮЩИХ КОМПОНЕНТОВ

Ключевые слова: стирол, метилфенилкарбинол, высококипящие компоненты, высококипящие ароматические эфиры, дегидратация, сульфаминовая кислота, жидкофазный процесс, острый пар.

Изучен процесс совместной дегидратации высококипящих компонентов (ВКК), образующихся на различных узлах процесса дегидратации метилфенилкарбинола (МФК) в совместном производстве стирола и оксида пропилена, и фракции МФК в присутствии сульфаминовой кислоты. Показано, что совместная дегидратация ВКК и фракции МФК в присутствии сульфаминовой кислоты приводит к росту содержания стирола в продуктах разложения (60,29%) по сравнению с дегидратацией фракции МФК (52,19%). При этом не достигается полная конверсия МФК и ВКК. Процесс получения стирола с чистотой более 95,55% был успешно реализован путем ввода острого пара в нижнюю часть дегидрататора. Пар взаимодействовал со смесью, содержащей метилфенилкарбинол и высококипящие компоненты, что позволило выделить целевой продукт. Дегидратацию шихты проводили в непрерывном режиме на специально разработанной лабораторной установке с отдельным сбором легкокипящих и высококипящих продуктов реакции. Анализ качественного и количественного состава продуктов дегидратации проводили методом хромато-масс-спектрометрии на комплексе Agilent 5975 Series MSDs. Масс-спектры были получены при энергии ионизирующих ионов, равной 69 эВ. Использование острого пара в реакторе дегидратации доказало свою эффективность. Метод обеспечивает высокую степень превращения метилфенилкарбинола и сопутствующих высококипящих эфиров в стирол, а также избирательность реакции. Это происходит потому, что стирол моментально испаряется и выводится из реакционной среды, не успевая вступать в побочные реакции. Выявлено массовое соотношение водяной пар:шихта=64:100, обеспечивающее максимальное извлечение стирола.

T. S. Sitmuratov, A. A. Petukhov, A. P. Rakhmatullina,
R. A. Akhmedyanova

LIQUID-PHASE DEHYDRATION OF METHYLPHENYL CARBINOL AND HIGH-BOILING COMPONENTS FOR STYRENE PRODUCTION

Keywords: Styrene, methylphenyl carbinol, high-boiling components, high-boiling aromatic ethers, dehydration, sulfamic acid, liquid-phase process.

The process of joint dehydration of high-boiling components (HBC) formed at various units of the dehydration process of methylphenyl carbinol (MPC) in the joint production of styrene and propylene oxide, and the MFC fraction in the presence of sulfamic acid was studied. It was shown that joint dehydration of HBC and the MFC fraction in the presence of sulfamic acid leads to an increase in the styrene content in the decomposition products (60.29 %) compared to the dehydration of the MFC fraction (52.19 %). In this case, complete conversion of MFC and HBC is not achieved. By introducing live steam into the bottom part of the dehydrator, a styrene fraction containing at least 95.55 % by weight of the main substance was obtained from a mixture of the methylphenylcarbinol fraction and high-boiling components. The mixture was dehydrated continuously in a specially designed laboratory unit with separate collection of low-boiling and high-boiling reaction products. Qualitative and quantitative analysis of dehydration products was performed by chromatographic-mass spectrometry on Agilent 5975 Series MSDs. Mass spectra were obtained at an ionizing ion energy of 69 eV. It was found that introducing live steam into the dehydration reactor allows achieving high conversion of methylphenylcarbinol and high-boiling aromatic ethers and selectivity of styrene formation due to its immediate separation from the reaction zone. The mass ratio of water vapor: batch = 64:100 was found, ensuring maximum styrene extraction.

Введение

Стирол наряду с низшими олефинами и винилхлоридом входит в тройку наиболее крупнотоннажных мономеров [1].

В РФ стирол производят путем дегидрирования этилбензола, а также дегидратацией метилфенилкарбинола в совместном производстве стирола и оксида пропилена, основанном на жидкофазном окислении этилбензола.

В промышленном процессе реализована парофазная дегидратация метилфенилкарбинола на гетерогенном катализаторе - гамма-оксиде алюминия [2-5]. В синтезе стирола на основе жидкофазного окисления этилбензола на разных стадиях процесса образуется

значительное количество побочных высококипящих компонентов (ВКК), в частности высококипящие ароматические эфиры [6-11]. Эти продукты являются потенциальными источниками для получения дополнительного количества стирола, однако их переработка путем совместной парофазной дегидратации с основной фракцией метилфенилкарбинола на гетерогенном катализаторе приводит к падению активности катализатора [12-14]. Поэтому ВКК отделяют путем ректификации и перерабатывают отдельно.

Однако описана дегидратация метилфенилкарбинола в жидкой фазе в присутствии гомогенного катализатора [10-14]. Поэтому в настоящей работе изучена возможность использования ВКК для получения дополнительного количества стирола путем совместной

дегидратации ВКК и фракции МФК в условиях жидкофазного процесса в присутствии гомогенного катализатора.

Экспериментальная часть

Характеристика исходных и вспомогательных веществ

1. Промежуточным продуктом на заводе СПС ПАО «Нижекамскнефтехим» является фракция метилфенилкарбинола (МФК), которая используется для производства стирола и оксида пропилена. Как видно из табл. 1, её состав характеризуется высоким содержанием МФК — более 65% мас. [15].

Таблица 1 – Состав исходной фракции МФК [15]

Table 1 – Composition of the initial MPC fraction [15]

Наименование компонента	Содержание компонента во фракции, % мас.
Этилбензол	0,11–0,46
Стирол	0,09–0,13
Бензальдегид	0,05–0,20
Ацетофенон (АЦФ)	15,02–18,63
Метилфенилкарбинол	67,58–82,23
Высококипящие компоненты	2,50–5,00

2. В процессе парофазной дегидратации метилфенилкарбинола (МФК) на стадиях его выделения образуются высококипящие компоненты. Их состав, согласно [16], представлен в табл. 2.

Таблица 2 – Состав фракции высококипящих компонентов, образующихся в процессе получения стирола парофазной дегидратацией МФК [16]

Table 2 – Composition of the high-boiling component fraction formed during styrene production by vapor-phase MPC dehydration [16]

№ п/п	Наименование	Содержание, % мас.
1	1-фенилэтиленгликоль	1,83
2	2-(1- метилбензилокси) - пропанол-1	3,45
3	2,3-дифенилбутан	8,36
4	1-фенилэтилфениловый эфир	1,01
5	транс-1,3-дифенилбутен-1	1,00
6	1,1'-бифенилдиэтиловый эфир	76,00
7	1-фенилэтилбензоат	2,14
8	5-гидрокси-3-трет-бутилфенил-1	6,21
Итого		100,00

3. Сульфаминовая кислота $\text{NH}_2\text{SO}_2\text{OH}$, (ТУ 2121-278-00204197-2001) с массовой долей основного вещества – 99,0 %.

Методика проведения жидкофазной дегидратации МФК на лабораторной установке непрерывного действия

Исходную шихту для дегидратации получали смешением фракций МФК и ВКК в массовом соотношении 9:1, затем растворяли в ней катализатор [15]. Концентрация катализатора составляла 0,05 % мас.

Дегидратация шихты проводилась в непрерывном режиме на специально разработанной лабораторной установке, схема которой представлена на рисунке 1.

Конструкция установки состоит из следующих элементов:

- емкость (1) с исходной шихтой, откуда сырье подается с помощью насоса (2);
- для нагрева используется масляная баня (4) и электрическая плитка (10), оснащенная также магнитной мешалкой;
- реакция протекает в трехгорлой круглодонной колбе (5);
- температура процесса контролируется термометрами (6, 7) и регулируется с помощью термопары (8), соединенной с электрической плиткой (10);
- парогенератор (3) обеспечивает подачу пара в систему;
- холодильник (9) используется для конденсации продуктов – легкокипящих фракций (12);
- высококипящие фракции собираются в приемнике (11) через переливную трубку (13).

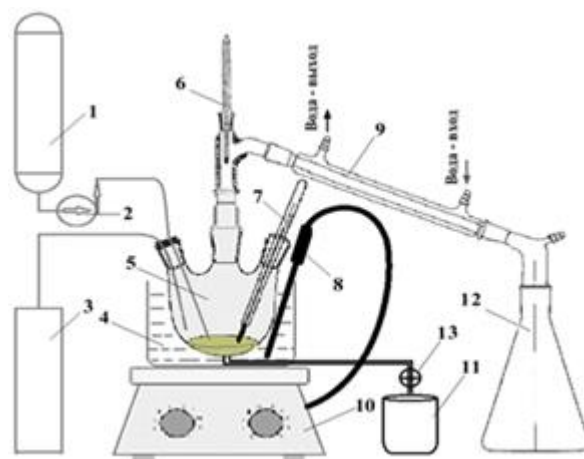


Рис. 1 – Лабораторная установка непрерывного действия для жидкофазной дегидратации МФК

Fig. 1 – Continuous liquid-phase dehydration laboratory unit

Реакция протекала при температуре $190 \pm 0,5$ °С. Подача смеси шихты и катализатора осуществлялась с постоянной объемной скоростью, равной 100 см³/ч. Для получения острого пара был использован лабораторный индукционный парогенератор ИП-10 со встроенным насосом (с ручным управлением) и автоматическим контролем температуры и давления пара.

Подача шихты в реактор осуществлялась непрерывно с использованием шприцевого насоса. Для поддержания постоянного объема реакционной смеси в ходе всех экспериментов, излишки кубовой жидкости отводились через переливную трубку 13 (рис. 1). Использование гидрозатвора на этой трубке исключало попадание газовой фазы в приёмник кубовой жидкости.

Когда была достигнута требуемая температура, из реактора начинала отгоняться азеотропная смесь воды и стирола. Её разделяли в делительной воронке, после чего органическую фазу подвергли анализу с помощью хромато-масс-спектрометрии. Образцы из куба реактора также отбирались через равные промежутки времени для анализа тем же методом.

Хромато-масс-спектрометрия

Хромато-масс-спектрометрический анализ проводился на комплексе Agilent 5975 Series MSDs, оснащённом капиллярной колонкой производства Agilent Technologies. Масс-спектры были получены при энергии ионизирующих ионов, равной 69 эВ. Для ввода образцов использовалась система жидкого ввода в режиме фракционирования. Все параметры анализа соответствовали условиям, указанным в табл. 3.

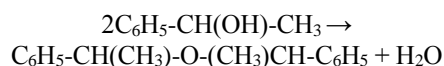
Таблица 3 – Условия хроматографирования

Table 3 – Chromatographic conditions

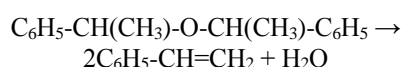
Температура колонки хроматографа, °С	Время удерживания, мин.	Скорость нагрева, °С/мин.
40	4	10
80	2	10
100	2	10
200	10	15
270	5	-

Обсуждение результатов

Как показывают исследования [16-17], высококипящие компоненты, образующиеся на разных стадиях процесса выделения и дегидратации МФК, имеют схожий состав. В их числе — значительное количество простых ароматических эфиров, среди которых преобладает 1,1'-бифенилдиэтиловый эфир, образующийся из МФК.



Разложение подобных эфиров позволяет выделить дополнительное количество стирола, что может быть экономически выгодно для производства.



Термическое разложение ВКК протекает при высоких температурах ≥ 500 °С в течение длительного времени [30], поэтому чтобы снизить температуру процесса его проводят в присутствии катализаторов.

По аналогии с процессом дегидратации МФК в стирол, каталитическое разложение ВКК возможно

парофазным методом в присутствии гетерогенного катализатора и в жидкой фазе в присутствии гомогенного катализатора.

Жидкофазный процесс дегидратации МФК проходит при температурах (160-180 °С), он требует меньшего разбавления водяным паром, а затраты на топливный газ исключаются полностью. Более низкие температуры процесса обуславливают образование меньшего количества высококипящих продуктов, что позволяет снизить количество отходов и исключить несколько узлов из технологической установки получения стирола [18-26].

Известно, что сульфаминовая кислота обладает наилучшей каталитической активностью в процессе получения стирола дегидратацией МФК [15], и она была использована в настоящей работе в качестве катализатора в процессе совместной дегидратации фракции МФК и ВКК.

Проведенные эксперименты показали, что введение дополнительного количества ВКК в исходную шихту для дегидратации приводит к росту содержания стирола в продуктах реакции (табл. 4-5).

Так, увеличение массового содержания ВКК до 12,9% в шихте по сравнению с 2,95% во фракции МФК приводит к повышению содержания стирола в дистилляте до 60,29% по сравнению с 52,15%, при этом содержание ВКК в кубе мало меняется - 50,47% по сравнению с 49,76%.

В обоих случаях в кубе и дистилляте остается значительное количество непревращенных МФК и ВКК, а в кубе – не отогнанного стирола.

Таблица 4 – Состав продуктов, образующихся в процессе жидкофазной дегидратации фракции МФК. T=190 °С, объемная скорость 100 см³/ч., [катализатор]= 0,05 % мас.

Table 4 – Composition of products formed during liquid-phase MPC fraction dehydration. T = 190 °C, volumetric flow rate 100 cm³/h, [catalyst] = 0.05 wt. %

Компонент	Содержание, % мас.		
	Исходная фракция МФК	Дистиллят	Кубовый продукт
Легкие	0,15	0,01	0,00
Бензол	0,09	0,05	0,00
Толуол	0,06	0,03	0,00
Этилбензол	0,14	0,36	0,32
Стирол	2,63	52,15	17,52
Бензальдегид	0,12	0,00	0,09
Ацетофенон	13,59	16,71	19,37
Метилфенилкарбинол	80,11	14,11	12,41
Высокипящие компоненты	2,90	2,99	49,76
Вода	0,21	13,59	0,53
Итого	100	100	100

Вода, образующаяся при дегидратации, удаляется в виде азеотропа со стиролом.

Поскольку воды, выделяющейся при дегидратации МФК и ВКК недостаточно для полного извлечения стирола в виде азеотропа, то для осуществления более полного превращения ВКК и получения максимального количества стирола дегидратация шихты была проведена в присутствии острого водяного пара (рис. 2).

Таблица 5 – Состав продуктов, образующихся в процессе дегидратации смеси фракции МФК и ВКК. T=190 °С, объемная скорость 100 см³/ч., [катализатор]= 0,05 % мас.

Table 5 – Composition of products formed during the dehydration of a mixture of MPC and HBC fractions. T = 190 °C, volumetric flow rate 100 cm³/h, [catalyst] = 0.05 wt. %

Компонент	Содержание, % мас.		
	Исходная шихта	Дистиллят	Кубовый продукт
Низкокипящие компоненты	0,15	0,01	0,00
Бензол	0,09	0,06	0,00
Толуол	0,06	0,03	0,00
Этилбензол	0,07	0,41	0,32
Стирол	0,66	60,26	16,52
Бензальдегид	0,04	0,00	0,09
Ацетофенон	13,59	17,73	19,37
Метилфенил карбинол	72,23	16,30	12,41
Высококипящие компоненты	12,90	4,75	50,47
Вода	0,21	0,45	0,82
Итого	100,00	100,00	100,00

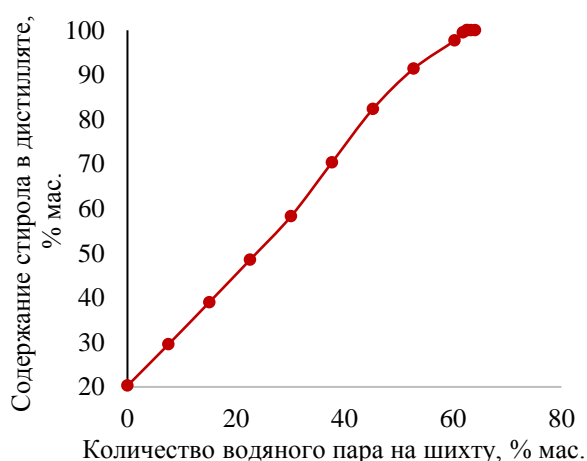


Рис. 2 – Влияние количества подаваемого водяного пара на содержание образующегося стирола в дистилляте

Fig. 2 – Effect of the amount of fed water vapor on the content of styrene formed in the distillate

Увеличение количества острого водяного пара, подаваемого в шихту, приводит также к снижению содержания стирола в кубе (рис. 3).

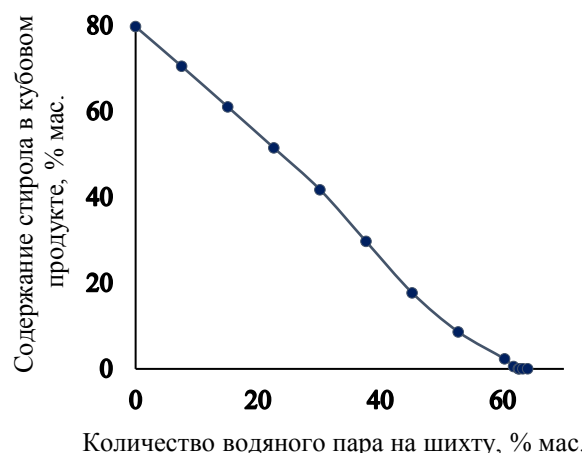


Рис. 3 – Зависимость содержания стирола в кубовом продукте от количества введённого водяного пара

Fig. 3 – Effect of the amount of fed water vapor on the styrene content in the bottom's product

Исследование влияния количества подаваемого пара на выход стирола показало, что максимальный выход стирола достигается при массовом соотношении водяной пар:шихта=64:100 (рис. 2).

Образующийся стирол отгоняется в виде азеотропа с водой, при этом достигается практически полное превращение метилфенилкарбинола в стирол.

Максимальное удаление стирола из кубового продукта способствует снижению вероятности протекания побочных реакций (например, алкилирования) с его участием и исключает образование дополнительного количества высококипящих продуктов.

Образующийся дистиллят содержит 95,55 % мас. стирола. При этом кубовый продукт обогащается ацетофеноном (табл. 6).

Закключение

1. Установлено, что совместная дегидратация ВКК и фракции МФК в присутствии сульфаминовой кислоты приводит к росту содержания стирола в продуктах разложения (60,29%) по сравнению с дегидратацией фракции МФК (52,19%). При этом не достигается полная конверсия МФК и ВКК.

2. Дегидратация смеси ВКК и фракции МФК в присутствии острого водяного пара при катализе сульфаминовой кислотой приводит к увеличению содержания стирола в дистилляте (95,55 % мас.) и снижению его содержания в кубовом продукте за счет более полной дегидратации ВКК и МФК, сопровождающейся удалением стирола в виде азеотропа с водой.

Таблица 6 – Состав продуктов дегидратации смеси фракции МФК и ВКК в присутствии острого водяного пара. T=190 °C, объемная скорость 100 см³/ч., [катализатор]=0,05 % мас., водяной пар:шихта=64:100, % мас.Table 6 – Composition of products from the dehydration of a mixture of MPC and HBC fractions in the presence of live steam. T = 190 °C, volumetric flow rate 100 cm³/h, [catalyst] = 0.05 wt.%, water vapor:feed = 64:100, wt.%

Компоненты	Содержание, % мас.		
	Исходная шихта	Полученные продукты	
		Дистиллят	Кубовый продукт
Низкокипящие компоненты	0,15	0,01	0,00
Бензол	0,09	0,16	0,00
Голуол	0,06	0,09	0,00
Этилбензол	0,07	0,11	0,00
Стирол	0,66	95,55	0,10
Бензальдегид	0,04	0,04	0,06
Ацетофенон	13,59	3,71	68,45
Метилфенил карбинол	72,23	0,00	1,20
Высококипящие компоненты	12,90	0,15	26,59
Вода	0,21	0,18	3,60
Итого	100,00	100,00	100,00

Литература

1. Talanyuk V., Shadrin A., Yurzhenko M. Bull. Taras Shevchenko Natl. Univ. Kyiv Phys. Math. 2, 98-103 (2019). DOI: 10.17721/1812-5409.2019/2.13.
2. Shell Internationale Research Maatschappij BV. Pat. 3365314 B1 EP. (2018).
3. Пат. 2721772 Российская Федерация, МПК В01J 20/08, В01J 21/04, В01J 23/78, С07С 1/24, С07С 15/46. [Название изобретения] / ООО НПО «ЕВРОХИМ»; заявитель и патентообладатель ООО НПО «ЕВРОХИМ». – № 2019139330; заявл. 02.12.2019; опубл. 22.05.2020, Бюл. № 15.
4. Ситмуратов Т.Ш., Петухова Л.А., Петухов А.А. Бутлеровские сообщения. 60(12), 104-109 (2019). DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/19-60-12-104.
5. Сайт ПАО «Нижнекамскнефтехим». URL: <https://www.sibur.ru/nknh.ru> (2026).
6. Лычкин И.П., Петьхин Ю.М., Филимонова О.Н. Нефтепереработка и нефтехимия. 11, 29-31 (1995).
7. Vora B.V. Trans Indian Natl. Acad. Eng. 8, 201-219 (2023). DOI: 10.1007/s41403-023-00401-2.
8. Nabiullin I.R. et al. Catal. Ind. 14(4), 376-384 (2022).
9. Каралин Э.А. и др. Нефтехимия. 6, 455-457 (2001).
10. Lange J.P., Otten V. J. Catal. 238(1), 6-12 (2006).
11. Boretskaya A. et al. Research Square [Preprint]. (2022). DOI: 10.21203/rs.3.rs-1800475/v1.
12. Каралин Э.А., Харлампида Х.Э., Бусыгин В.М., Батыршин Н.Н., Черкасова Е.И. Тез. докл. V Рос. конф. «Научные основы приготовления и технологии катализаторов». 137-139 (2004).
13. Филимонова О.Н. Успехи современного естествознания. 2, 115-117 (2010). URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=7757>.
14. Ситмуратов Т.С. Разработка технологии получения стиrolа на основе метилфенилкарбинола и высококипящих ароматических эфиров: дис. канд. хим. наук. – Казань, 2022. 109 с.
15. Ситмуратов Т.С., Чугунов Ю.В., Петухов А.А. Бутлеровские сообщения. 65(2), 130-136 (2021).

16. Ситмуратов Т.С., Петухова Л.А., Бахтинова И.И., Петухов А.А. Бутлеровские сообщения. 56(10), 118-122 (2018).
17. Петухов А.А., Васильев И.М., Галимзянов Р.М. Пат. 2141933 РФ. (1999).
18. Линькова Т.С., Долганов А.В., Земский Д.Н. Вестник технологического университета. 16(12), 211-213 (2013).
19. Вуйчик Е.И., Дементьев А.И., Подоплелов Е.В. Современные технологии в науке и образовании — СТНО-2022: Сб. тр. конф. 1, 19-20 (2022). DOI: 10.36629/2686-9896-2022-1-19-20.
20. Петухов А.А., Комаров В.А., Сахапов Г.З. Пат. 2120934 РФ. (1998).
21. Ikeda Y., Sugawara H. Appl. 59-67231 Japan. (1984).
22. Ikeda S. et al. Appl. 55-19247 Japan. (1980).
23. Gupta R., Uslu H., Majumder S. Chem. Eng. Technol. 45, 817-823 (2022). DOI: 10.1002/ceat.202100577.
24. Hutajulu F.T.M., Vito A.A., Fakhira F., Izzati D.S. J. Chem. Eng. Res. Prog. 2(1), 61-71 (2025). DOI: 10.9767/jcerp.20312.
25. Wang R., Zhao Z., Gao P., Chen K., Gan Z., Fu Q., Hou G. J. Phys. Chem. C. 126(22), 10073-10084 (2022). DOI: 10.1021/acs.jpcc.2c03303.
26. Половняк В.К., Фридланд С.В. Вестник технологического университета. 4, 17-25 (2009).

References

1. Talanyuk V., Shadrin A., Yurzhenko M. Bull. Taras Shevchenko Natl. Univ. Kyiv Phys. Math. 2, 98-103 (2019). DOI: 10.17721/1812-5409.2019/2.13.
2. Shell Internationale Research Maatschappij BV. Pat. 3365314 B1 EP. (2018).
3. Pat. 2721772 Russian Federation, IPC B01J 20/08, B01J 21/04, B01J 23/78, C07C 1/24, C07C 15/46. [Title of the invention] / NPO "EVROCHIM" LLC; Applicant and patent holder: LLC NPO "EUROCHEM". – No. 2019139330; filed Dec. 2, 2019; published May 22, 2020, Bulletin No. 15.
4. Sitmuratov T.S., Petukhova L.A., Petukhov A.A. Butlerov's messages. 60(12), 104-109 (2019). DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/19-60-12-104.
5. PJSC "Nizhnekamskneftekhim" website. URL: <https://www.sibur.ru/nknh.ru> (2026).

6. Lychkin I.P., Petykhin Y.M., Filimonova O.N. Neftepererabotka i neftekhimiya. 11, 29-31 (1995).
7. Vora B.V. Trans Indian Natl. Acad. Eng. 8, 201-219 (2023). DOI: 10.1007/s41403-023-00401-2.
8. Nabiullin I.R. et al. Catal. Ind. 14(4), 376-384 (2022).
9. Karalin E.A. et al. Neftekhimiya. 6, 455-457 (2001).
10. Lange J.P., Otten V. J. Catal. 238(1), 6-12 (2006).
11. Boretskaya A. et al. Research Square [Preprint]. (2022). DOI: 10.21203/rs.3.rs-1800475/v1.
12. Karalin E.A., Kharlampidi K.E., Busygin V.M., Batyrshin N.N., Cherkasova E.I. Tez. dokl. V Russian Conf. "Scientific foundations of catalyst preparation and technology". 137-139 (2004).
13. Filimonova O.N. Uspekhi sovremennoego estestvoznaniya. 2, 115-117 (2010).
14. Sitmuratov T.S. Razrabotka tekhnologii polucheniya stirola na osnove metilfenilkarbinola i vysokokipyashikh aromatcheskikh efirov: dis. kand. khim. nauk. – Kazan, 2022. 109 s.
15. Sitmuratov T.S., Chugunov Y.V., Petukhov A.A. Butlerov's messages. 65(2), 130-136 (2021).
16. Sitmuratov T.S., Petukhova L.A., Bakhtinova I.I., Petukhov A.A. Butlerov's messages. 56(10), 118-122 (2018).
17. Petukhov A.A., Vasiliev I.M., Galimzyanov R.M. Pat. 2141933 RF. (1999).
18. Linkova T.S., Dolganov A.V., Zemsky D.N. Herald of Kazan Technological University. 16(12), 211-213 (2013).
19. Vuitsik E.I., Dement'ev A.I., Podoplelov E.V. Mod. Technol. Sci. Technol. Progress. 1, 19-20 (2022). DOI: 10.36629/2686-9896-2022-1-19-20.
20. Petukhov A.A., Komarov V.A., Sakhapov G.Z. Pat. 2120934 RF. (1998).
21. Ikeda Y., Sugawara H. Appl. 59-67231 Japan. (1984).
22. Ikeda S. et al. Appl. 55-19247 Japan. (1980).
23. Gupta R., Uslu H., Majumder S. Chem. Eng. Technol. 45, 817-823 (2022). DOI: 10.1002/ceat.202100577.
24. Hutajulu F.T.M., Vito A.A., Fakhira F., Izzati D.S. J. Chem. Eng. Res. Prog. 2(1), 61-71 (2025). DOI: 10.9767/jcerp.20312.
25. Wang R., Zhao Z., Gao P., Chen K., Gan Z., Fu Q., Hou G. J. Phys. Chem. C. 126(22), 10073-10084 (2022). DOI: 10.1021/acs.jpcc.2c03303.
26. Polovnyak V.K., Fridland S.V. Herald of Kazan Technological University. 4, 17-25 (2009).

© **Т. С. Ситмуратов** – к.т.н., доц. каф. химические технологии, Ургенчский государственный университет имени Абу Райхана Беруни, Ургенч, Узбекистан, sitmuratov@bk.ru.; **А. А. Петухов** – д.т.н., проф. кафедры Технологии Синтетического каучука (ТСК), Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ), Казань, Россия, petukhov-a@ya.ru; **А. П. Рахматуллина** – д.т.н., проф. кафедры ТСК КНИТУ, rah-al@yandex.ru, **Р. А. Ахмедьянова** – д.т.н., проф. кафедры ТСК КНИТУ, achra108@rambler.ru.

© **T. S. Sitmuratov** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor, Department of Chemical Technologies, Urgench State University named after Abu Raikhan Beruni, Urgench, Uzbekistan, sitmuratov@bk.ru; **A.A. Petukhov** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor, Department of Technology of Synthetic Rubber (TSR), Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan, Russia, petukhov-a@ya.ru; **A. P. Rakhmatullina** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor of the TSR Department of KNRTU, rah-al@yandex.ru, **R. A. Akhmedyanova** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor of the TSR Department of KNRTU, achra108@rambler.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 03.03.26.

Дата принятия рукописи в печать – 27.03.26.