Химия и технология органических веществ Chemistry and technology of organic substances

УДК 547.53:661.7 https://doi.org/10.32362/2410-6593-2025-20-5-497-515 EDN WUOZIC



ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ

Обзор современных технологий производства этилбензола

Л.А. Хахин, С.Н. Потапова[™], Е.В. Королев, С.М. Масоуд, Д.В. Светиков

OOO «Объединенный центр исследований и разработок», Москва, 119333 Россия ⊠ Автор для переписки, e-mail: PotapovaSN@rdc.rosneft.ru

Аннотация

Цели. Этилбензол (ЭБ) — важный промежуточный продукт для получения стирола. Для производства стирола используется бо́льшая часть производимого в мире ЭБ. Меньшее его количество употребляется в качестве растворителя или для производства других химических веществ. Цель данной работы — провести обзор современных технологий производства ЭБ.

Результаты. Показано, что жидкофазный процесс получения ЭБ с использованием цеолитсодержащих катализаторов для алкилирования и трансалкилирования является наиболее перспективным подходом к производству ЭБ вследствие максимальной простоты и эффективности. Используемые цеолитсодержащие катализаторы по сравнению с жидкофазными катализаторами алкилирования, например, хлористым алюминием, отличаются высокой активностью, селективностью, стабильностью, устойчивостью к примесям; кроме того, они некоррозионноактивны, экологичны, регенерируемы, характеризуются высоким межрегенерационным пробегом. Более половины производимого ЭБ в мире получают по технологии ЕВМах с использованием катализатора на основе цеолита семейства MWW (MCM-22). Технология позволяет использовать низкое соотношение бензола к этилену (от 2.5 до 4), что снижает скорость циркуляции бензола, повышает эффективность и снижает пропускную способность колонны для извлечения бензола. Основная часть современных исследований в области технологии алкилирования бензола этиленом в ЭБ связана с созданием и использованием цеолитсодержащих катализаторов, представляющих собой твердые пористые системы, содержащие активный компонент и связующее вещество. Активным компонентом служат цеолиты USY, Beta, морденит, ZSM-5, ZSM-11, ZSM-12, ZSM-23, ZSM-35, ZSM-48, МСМ-22, МСМ-49. Предпочтительные катализаторы алкилирования включают цеолит Веtа или цеолит семейства МСМ-22. Связующими веществами являются оксид алюминия Al₂O₂, диоксид кремния SiO₂ или аморфный алюмосиликат. Современные исследования также посвящены способам создания цеолитных материалов, имеющих увеличенную площадь мезопористой поверхности, путем различных обработок исходного цеолитного предшественника, включающих комбинации кислотной обработки, обработки поверхностно-активными веществами с последующей обработкой щелочным раствором. Приведены современные разработки в области создания новых российских катализаторов алкилирования и трансалкилирования для получения ЭБ.

Выводы. Производство ЭБ и дальнейшее развитие технологии получения катализаторов для его производства имеют важное значение в России и большой потенциал. Преимуществом обладает технология жидкофазного алкилирования в присутствии современных высокоактивных цеолитсодержащих катализаторов.

Ключевые слова

этилбензол, стирол, алкилирование, трансалкилирование, цеолиты, цеолитные катализаторы

Поступила:13.11.2024Доработана:17.01.2025Принята в печать:03.09.2025

Для цитирования

Xахин Л.А., Потапова С.Н., Королев Е.В., Масоуд С.М., Светиков Д.В. Обзор современных технологий производства этилбензола. *Тонкие химические технологии*. 2025;20(5):497–515. https://doi.org/10.32362/2410-6593-2025-20-5-497-515

REVIEW ARTICLE

Review of contemporary ethylbenzene production technologies

Leonid A. Khakhin, Svetlana N. Potapova[⊠], Evgeniy V. Korolev, Salekh M. Masoud, Dmitry V. Svetikov

United Research and Development Center, Moscow, 119333 Russia

Corresponding author, e-mail: PotapovaSN@rdc.rosneft.ru

Abstract

Objectives. Ethylbenzene is an important intermediate for styrene production. Most of the ethylbenzene synthesized worldwide is used to produce styrene, with smaller amounts used as a solvent or for the production of other chemicals. This article reviews contemporary technologies for the production of ethylbenzene.

Results. The liquid-phase method of ethylbenzene production using zeolite-containing catalysts for alkylation and transalkylation exhibits the highest efficiency and simplicity. In comparison with liquid-phase alkylation catalysts, e.g., aluminum chloride, zeolite-containing catalysts demonstrate high activity, selectivity, stability, and resistance to impurities. In addition, they are non-corrosive, environmentally friendly, regenerable, and have a prolonged cycle length between regenerations. More than half of the ethylbenzene synthesized globally is produced by the *Badger* EBMax process using a catalyst based on zeolite of the MWW family (MCM-22). This technology enables a low benzene to ethylene ratio (from 2.5 to 4), which reduces the benzene circulation rate, increases efficiency, and reduces the column throughput for benzene extraction. The main part of contemporary research in the field of benzene alkylation with ethylene into ethylbenzene is associated with the creation and use of zeolite-containing catalysts, which are solid porous systems containing an active component and a binder. The active component is USY, beta, mordenite, ZSM-5, ZSM-11, ZSM-12, ZSM-23, ZSM-35, ZSM-48, MCM-22, and MCM-49 zeolites. Among the preferred alkylation catalysts are Beta zeolite or zeolite of the MCM-22 family. The binder is Al₂O₃, SiO₂, or amorphous aluminosilicate. Current research also focuses on methods for creating zeolite materials with an increased mesoporous surface area by treating the initial zeolite precursor using various technologies, including combinations of acid treatment and surfactant treatment followed by alkaline solution treatment. Contemporary developments in the field of domestic alkylation and transalkylation catalysts for ethylbenzene production are presented.

Conclusions. The production of ethylbenzene and the further development of technologies for obtaining catalysts for its synthesis are highly promising and important directions in Russia. The technology of liquid-phase alkylation in the presence of contemporary highly active zeolite-containing catalysts offers significant advantages.

Keywords

ethylbenzene, styrene, alkylation, transalkylation, zeolites, zeolite catalysts

Submitted: 13.11.2024 **Revised:** 17.01.2025

Accepted: 03.09.2025

For citation

Khakhin L.A., Potapova S.N., Korolev E.V., Masoud S.M., Svetikov D.V. Review of contemporary ethylbenzene production technologies. *Tonk. Khim. Tekhnol. = Fine Chem. Technol.* 2025;20(5):497–515. https://doi.org/10.32362/2410-6593-2025-20-5-497-515

ВВЕДЕНИЕ

Среди многочисленных процессов нефтехимического синтеза производство этилбензола (ЭБ) занимает одно из ведущих мест, поскольку ЭБ является важным промежуточным продуктом для получения стирола. В 2023 г. общие мировые мощности производства этого химического продукта составили 48 млн. т/год¹ и возрастают быстрыми темпами — на 4–5% в год².

Получением полистирола через ЭБ занимаются фирмы *Chevron Phillips Chemical* (США), *LyondellBasell* (Нидерланды), *Honeywell* (США), *Ineos* (Великобритания), *Dow Chemical* (США), *DuPont* (США), *Shell* (Великобритания), *TotalEnergies* (Франция), *Versalis* (Италия) и другие.

В России производство ЭБ осуществляется АО «Сибур-Химпром», ОАО «Газпром нефтехим Салават», ОАО «Нижнекамскнефтехим» и ОАО «Ангарский завод полимеров», но суммарная

¹ https://www.statista.com/statistics/1063696/global-ethylbenzene-production-capacity/. Дата обращения 28.06.2023. / Accessed June 28, 2023.

² ICB Americans Chemical Profile. 2007. URL: www.icis.com. Дата обращения 16.05.2024. / Accessed May 16, 2024.

мощность производства ЭБ в России составляет лишь порядка 860000 т/год (1.7% от мировой) [1].

В мире существует 70 установок по производству ЭБ, из них 17 до сих пор работают на гомогенном катализаторе — хлориде алюминия, 28 применяют газофазную технологию с использованием гетерогенных цеолитсодержащих катализаторов и 25 — более современную жидкофазную [2].

В настоящее время на некоторых предприятиях в России все еще используется алкилирование бензола этиленом по методу Monsanto—Lummus с использованием гомогенных катализаторов Фриделя—Крафтса на основе хлористого алюминия, например, на *OAO* «Ангарский завод полимеров» (введен в 1977 г., мощность установки 55000 т/год) и на *OAO* «Ниженекамскнефтехим» (введен в 1977 г., Воронежский проектный институт, мощность 345000 т/год)³.

Кроме основной реакции алкилирования, на хлориде алюминия протекает ряд побочных реакций с получением полиалкилбензолов (ди-, три-, тетраэтилбензолов), которые используются для получения целевого продукта за счет совмещения реакции алкилирования с реакцией переалкилирования. Реакция переалкилирования обратима, поэтому полиалкилбензолы после выделения из алкилата рециркулируют с целью получения ЭБ. Однако использование хлорида алюминия создает большое количество технологических, экологических и экономических проблем, связанных с высокой коррозионной активностью хлорида алюминия и его токсичностью, сложностями при его хранении, использовании и утилизации, с недостаточно высокой селективностью процесса на хлориде алюминия (селективность стадии алкилирования обычно составляет до 70%) [3, 4] и большим количеством сточных вод, в том числе кислых, требующих затрат на их очистку.

Решением накопившихся технологических проблем жидкофазной технологии алкилирования с использованием хлорида алюминия является перевод стадий алкилирования и трансалкилирования на гетерогенные цеолитсодержащие катализаторы, при использовании которых упрощается технология синтеза ЭБ, снижаются затраты на подготовку сырья,

промывку реакционной массы и нейтрализацию кислых сточных вод, значительно снижается коррозия оборудования. На данный момент использование цеолитсодержащих катализаторов для алкилирования и трансалкилирования является наиболее перспективным подходом к производству $ЭБ^{4,5}$.

Цеолитсодержащие катализаторы стабильны, устойчивы к примесям, высокоактивны, селективны, экологичны, регенерируемы, характеризуются высоким межрегенерационным пробегом. Преимуществами их использования также является отсутствие отходов и возможность использования углеродистой конструкционной стали.

Именно благодаря тому, что установки на основе гомогенного катализатора используют жидкофазную технологию алкилирования, их перевод на современную жидкофазную технологию с цеолитсодержащим катализатором максимально прост и эффективен. При подобном переводе высвобождается часть оборудования ректификации, которое может быть использовано в другой подобной технологической схеме для ректификации потоков [5].

Переход на цеолитные технологии синтеза ЭБ уже осуществлен как за рубежом, так и на предприятиях России («Газпром нефтехим Салават» в 2003 г. и «Сибур-Химпром» в 2010 г. [5]). За 20 лет работы накоплен существенный опыт работы с цеолитсодержащими катализаторами.

Несколько лет назад на предприятии «Газпром нефтехим Салават» в России внедрен процесс получения ЭБ в процессе газофазного алкилирования бензола этиленом на цеолитсодержащем катализаторе ЕВЕМАХ-1 (Clariant, Швейцария), обеспечивающем селективность образования ЭБ в диапазоне 87.4—91.0% [6]. Технология предусматривает высокие температуры процесса (370—420°С), вследствие чего увеличиваются энергозатраты, выход пропили бутилбензолов (примесей), наблюдается более низкий выход ЭБ и меньший срок службы катализатора по сравнению с жидкофазным процессом.

В январе 2022 г. была выпущена первая промышленная партия российского катализатора КТ-ГА-1 на основе цеолита семейства МГІ (англ. Mobil-type Five) (ZSM-5, англ. Zeolite Socony Mobil-5⁶) для процесса

³ Российский нефтегазохимический форум. Газ. Нефть. Технологии. XXVI международная выставка. 22–25 мая 2018 г. Уфа. [Russian Petrochemical Forum. Gas. Oil. Technologies. The 26th International Exhibition. May 22–25, 2018. Ufa.]

⁴ Этилбензол. Справочник поставщиков. Aboutcompanies.ru. URL: http://b2bpoisk.ru/продукция/этилбензол. Дата обращения 05.05.2024. [Ethylbenzene. Suppliers handbook. Aboutcompanies.ru. URL: http://b2bpoisk.ru/продукция/этилбензол. Accessed May 05, 2024. (In Russ.).]

⁵ Замалиева Р.Р. Реакция Фриделя — Крафтса. Большая Российская энциклопедия. URL: https://bigenc.ru/c/reaktsiia-fridelia-kraftsa-b039a3. Дата обращения: 05.05.2024. [Zamalieva R.R. Friedel-Crafts reaction. Great Russian Encyclopedia. URL: https://bigenc.ru/c/reaktsiia-fridelia-kraftsa-b039a3. Accessed May 05, 2024. (In Russ.).]

⁶ ZSM-5 — тип цеолита в соответствии с атласом цеолитов: Ch. Baerlocher *et al.* Atlas of Zeolite Framework Types. Elsevier; 2007. Это синтетический цеолит, относящийся к семейству пентасилов. [ZSM-5 is a zeolite type according to the atlas of zeolites: Ch. Baerlocher *et al.* Atlas of Zeolite Framework Types. Elsevier; 2007. It is a synthetic zeolite belonging to the pentasil family.]

газофазного алкилирования бензола этиленом в ЭБ. С 19 июля 2022 г. начаты опытно-промышленные испытания катализатора, которые продолжаются по настоящее время. За первый год эксплуатации стало очевидно, что российский катализатор не уступает импортному аналогу по всем показателям. Так, при использовании двух катализаторов — импортного ЕВЕМАХ-1 и российского КТ-ГА-1 — концентрация ЭБ в ЭБ-ректификате составляет 99.76 и 99.85% соответственно. Селективность образования ЭБ на катализаторе КТ-ГА-1 составляет 86.9–90.4% [6].

Высокоселективный жидкофазный процесс получения ЭБ по технологии ЕВМах (более 99%)7 по лицензии фирмы Badger Licensing (США) реализован в России компанией «Сибур-Химпром» (мощность 230000 т/год). В технологии используются цеолитные катализаторы ExxonMobil, содержащие цеолиты семейства MWW (англ. Mobil twenty two)8 (MCM-22, англ. Mobil Composition of Matter No. 22). Компания ExxonMobil (США) продолжает оставаться одним из ведущих поставщиков катализаторов для производства ЭБ в мире. С 2001 г. почти две трети всех новых и заменяемых мощностей ЭБ были лицензированы компанией Badger Licensing и используют катализаторы ExxonMobil. На катализаторы ExxonMobil в процессах Badger EBMax и Badger Vapor Phase⁹ приходится более 56% мирового производства ЭБ и более 20 млн метрических т/год.

На предприятии «Нижнекамскнефтехим» с 2023 г. началась модернизация узла алкилирования бензола с переходом на цеолитсодержащий катализатор с повышением мощности по ЭБ до 350000 т/год по технологии Lummus/UOP EBOne. В 2021 г. «Нижнекамскнефтехим» заключил соглашение с фирмой Lummus (США) на лицензирование технологий получения ЭБ (ЕВОпе) и стироламономера (CLASSIC SM). Были предприняты усилия по уменьшению образования побочных продуктов путем изменения условий реакции, но только с появлением жидкофазных и смешанных технологий,

работающих при температурах ниже 270°С, процессы, катализируемые цеолитом, действительно стали способны производить ЭБ высокой чистоты. Запуск установок ЭБ-350/СМ-400 будет осуществляться одновременно с новой установкой ЭП-600-1 (запланировано на начало 2026 г.)^{10,11,12}.

В статье рассмотрены современные технологии производства ЭБ, главным образом, жидкофазные технологии с использованием цеолитсодержащих катализаторов и представлено сравнение известных технологий получения ЭБ.

1. ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ЭБ

Спецификой использования цеолитсодержащих катализаторов синтеза ЭБ является проведение реакций алкилирования и трансалкилирования в отдельно стоящих ректорах. Цеолитсодержащие катализаторы используются в процессах получения ЭБ, начиная с 1980 гг. в газофазном процессе и с 1990 гг. — в жидкофазном. Разработками цеолитсодержащих катализаторов занимались фирмы UOP (США) и ExxonMobil (США). Компания Mobil-Badger (США) внедрила первый газофазный процесс алкилирования бензола этиленом с использованием катализатора на основе среднепористого цеолита типа ZSM-5, но, в связи с особенной структурой данного цеолита и для преодоления диффузионных ограничений в нем, температура алкилирования составляла более 400°С.

Этот катализатор характеризуется структурой пересекающихся перпендикулярно каналов с пятичленными кольцами в основании. Цеолит ZSM-5 показывал высокую активность и устойчивость к дезактивации коксом в газофазных процессах. Однако с развитием жидкофазных технологий его использование в алкилировании снизилось из-за недостаточной активности и склонности к быстрой дезактивации. Вместе с тем, он продолжает использоваться в газофазных установках, особенно на стадии трансалкилирования.

⁷ Презентация EQUATE Petrochemical Company. https://www.slideserve.com/laith-nunez/eb-plant-equate-petrochemical-company. Дата обращения 10.01.2025. [Presentation of EQUATE Petrochemical Company. https://www.slideserve.com/laith-nunez/eb-plant-equate-petrochemical-company. Accessed January 10, 2025.]

⁸ MWW — тонкослоистый (или пластинчатый) цеолит, имеющий структуру, напоминающую пчелиные соты. [MWW is a thin-layered (or lamellar) zeolite with a honeycomb-like structure.]

⁹ https://www.exxonmobilchemical.com/en/catalysts-and-technology-licensing/benzene-alkylation/ethylbenzene-alkylation. Дата обращения 09.01.2025. / Accessed January 09, 2025.

 $^{^{10}}$ https://smart-lab.ru/blog/859787.php. Дата обращения 17.05.2023. / Accessed May 17, 2023. (In Russ.).

https://www.sibur.com/ru/press-center/news-and-press/sibur-postroit-dva-novykh-proizvodstva-v-nizhnekamske-/. Дата обращения 02.07.2025. / Accessed July 02, 2025. (In Russ.).

¹² https://www.ogj.com/refining-processing/refining/article/14202241/nknk-lets-contract-to-expand-existing-tatarstan-olefins-complex. Дата обращения 17.05.2023. / Accessed May 17, 2023.

В настоящее время в газофазных процессах используются катализаторы EBEMAX-11/EBUF-1 фирмы *Clariant* для алкилирования и EBEMAX-2/EBUF-2 для трансалкилирования, а в патенте [7] предложен способ получения цеолитсодержащего катализатора алкилирования бензола этиленом для газофазного процесса на основе цеолита ZSM-5 без связующего.

Следует отметить, что высокая температура газофазного алкилирования способствует реакциям олигомеризации, крекинга, изомеризации и переноса водорода, что влияет на чистоту продуктового ЭБ. Кроме того, узко- и среднепористые цеолиты в газофазном процессе получения ЭБ характеризуются ускоренной дезактивацией из-за образования кокса в результате отложения на активных центрах цеолита крупных молекул, медленно диффундирующих из пористой структуры цеолита.

Недостатками газофазного процесса также являются низкая селективность и выход ЭБ. Несмотря на предпринятые усилия по уменьшению образования побочных продуктов в газофазном процессе путем изменения условий реакции, эффективно получать ЭБ высокой чистоты (99.9 мас. %, с содержанием толуола — 450 м.д., кумола — 100 м.д., диэтилбензола (ДЭБ) — 5 м.д., ксилолов — 10 м.д.) позволило только появление в 1990-х гг. жидкофазных процессов, работающих при температурах ниже 270°C, предлагаемых сегодня ведущими лицензиарами технологий ЭБ (Badger EBMax, Lummus EBOne, Versalis). Для преодоления диффузионных ограничений в жидкофазном процессе используются цеолитные катализаторы, содержащие широкопористые цеолиты распространенных структурных типов FAU (англ. Faujasite) и BEA [4] или более дорогого MWW.

Эти цеолиты обладают трехмерными структурами с разветвленной системой полостей и каналов, что способствует эффективной каталитической активности и селективности реакций. На поверхности и в порах цеолитов присутствуют кислотные центры Льюиса и Бренстеда, которые играют ключевую роль в катализе алкилирования. Особое внимание уделяется количеству, доступности и силе этих кислотных центров, поскольку они определяют эффективность катализа в целевых реакциях. Так, цеолит МСМ-22 структурного типа MWW характеризуется большим объемом пор, высокой кислотностью, хорошей гидротермальной стабильностью, а также молекулярно-ситовыми свойствами, обеспечивающими высокую селективность в процессах алкилирования и трансалкилирования [8]. Он обладает большей селективностью, чем цеолит Beta, что приводит к меньшему образованию полиалкилбензолов и тяжелых продуктов.

Преимуществами жидкофазного процесса алкилирования бензола этиленом по сравнению с газофазным процессом являются:

- снижение энергозатрат благодаря более низким температурам процесса;
- увеличение выхода ЭБ и селективности его образования;
- уменьшение выхода побочных продуктов;
- увеличение срока службы и межрегенерационного пробега катализатора.

В процессе жидкофазного алкилирования бензола этиленом в присутствии цеолитсодержащих катализаторов, наряду с ЭБ, образуются также следующие побочные продукты: полиэтилбензолы (ПЭБ), в частности ДЭБ и триэтилбензол (ТЭБ), ксилолы и кумол. ДЭБ и ТЭБ на стадии трансалкилирования практически полностью превращаются в ЭБ, в продукте остаются лишь следовые количества ДЭБ, которые нормируются. Содержание неотделимых при ректификации ксилолов и кумола в продукте также нормируется.

Селективность по ЭБ в жидкофазном процессе в присутствии цеолитсодержащих катализаторов (в частности, цеолита Вета в Н-форме), составляет не менее 80% [4] и, благодаря дополнительной стадии жидкофазного трансалкилирования, удается перевести оставшиеся 20% ПЭБ в продуктовый ЭБ.

Разработкой цеолитсодержащих катализаторов и технологий процессов алкилирования бензола этиленом и трансалкилирования бензола ДЭБ в России ранее занимался Грозненский нефтяной научно-исследовательский институт, а сейчас активно ведутся работы в ИНХС РАН и научно-техническом центре ООО «Газпром нефтехим Салават» [9]. Также разработкой новых технологий получения синтетических цеолитов занимается ООО «Цеолитика» (г. Москва). Институт катализа им. Г.К. Борескова Сибирского отделения Российской академии наук (г. Новосибирск) активно проводит исследования в области химического катализа и каталитических процессов.

Основная часть современных исследований в области технологии алкилирования бензола этиленом в ЭБ связана с созданием и использованием цеолитсодержащих катализаторов, представляющих собой твердые пористые системы, содержащие активный компонент и связующее вещество. Активным компонентом служат цеолиты USY (англ. Ultrastable Y), Beta, морденит, ZSM-5, ZSM-11, ZSM-12, ZSM-23, ZSM-35, ZSM-48, MCM-22, MCM-49. Предпочтительные катализаторы алкилирования включают цеолит Beta или цеолит семейства МСМ-22. Связующее вещество — Al_2O_3 , SiO_2 или аморфный алюмосиликат. После смешения активного компонента и связующего вещества из полученной массы формуют гранулы,

которые затем высушивают и прокаливают. Иногда затем катализатор подвергают модифицированию. Обычно содержание цеолита в катализаторах составляет от 60 до 80 мас. % [10, 11].

В работах [12, 13] рассматриваются способы создания цеолитных материалов, имеющих увеличенную площадь мезопористой поверхности по сравнению с цеолитной композицией-предшественником, из которой он изготовлен. Обработанный цеолитный материал демонстрирует более высокую площадь мезопористой поверхности, чем композиция предшественника катализатора. Технология может включать обработку композиции предшественника катализатора, имеющую большую степень кристалличности, поверхностно-активным веществом (ПАВ) в условиях, эффективных для создания или увеличения мезопористости в композиции предшественника катализатора. В качестве предшественника катализатора могут быть использованы молекулярные сита с большими порами, например, цеолит Beta, цеолит Y, USY, ультрагидрофобный Ү (UHP-Y), деалюминированный Y (Deal Y), морденит, ZSM-3, ZSM-4, ZSM-14, ZSM-18, ZSM-20 и их смеси.

Другим классом материалов молекулярных сит, которые могут присутствовать в композиции предшественника катализатора в качестве первого вспомогательного компонента, является группа мезопористых кристаллических материалов, примерами которых являются материалы МСМ-41 и МСМ-48. В [12] раскрыты способы обработки цеолитного материала для увеличения площади его мезопористой поверхности с использованием комбинации кислотной обработки, обработки ПАВ с последующей обработкой щелочным раствором.

Используемое ПАВ может быть катионным, например, содержать одну или несколько солей алкилтриметиламмония и/или одну или несколько солей диалкилдиметиламмония, либо неиногенным. Примеры подходящих коммерчески доступных неионогенных ПАВ включают, например, ПАВ PluronicTM (Pluronic P123TM), производимые *BASF Societas Europaea* (Германия).

Кислоты, используемые для обработки цеолита, могут представлять собой любые органические или неорганические (минеральные) кислоты. Количество кислоты, используемой в обрабатывающей смеси, может находиться в диапазоне от ~3 до ~6 милли-эквивалентов на грамм исходного цеолитного материала. Обычно количество используемой кислоты таково, что рН обрабатывающей смеси находится в диапазоне 3–4. Смесь затем перемешивается в течение примерно 2 ч. Кроме того, обрабатывающая смесь может быть нагрета до температуры от ~40 до ~80°C.

После обработки цеолита кислотой и ПАВ, часть полученного цеолитного материала, обработанного ПАВ, извлекают из обрабатывающей смеси и промывают деионизированной водой один или несколько раз. После выделения цеолитный материал приводится в контакт с основанием. Подходящие основания включают NaOH, NH₄OH, KOH, Na₂CO₃, ТМАОН и их смеси. В некоторых вариантах реализации используемое основание может находиться в форме водного раствора, имеющего концентрацию в диапазоне от 0.2 до 15 мас. %. Количество используемого основания в соотношении с исходным количеством исходного цеолитного материала составляет от 0.1 до 20 ммоль на грамм исходного цеолитного материала. Обработку цеолитного материала, обработанного ПАВ, основанием можно проводить в условиях повышенной температуры, включая температуру от ~50 до ~150°C, в течение 16–18 ч.

После обработки основанием полученный мезопористый цеолитный материал выделяют посредством фильтрования, промывают и сушат. Затем обработанный цеолит формуют с коммерчески доступным связующим на основе оксида алюминия с массовым соотношением цеолит/связующее 65/35, экструдируют смесь в квадролепестки размером 1/20 дюйма, сушат экструдаты в токе N_2 при температуре 482°C и прокаливают высушенные экструдаты при температуре 538°C на воздухе.

Установлено, что обработка цеолитов приводит к созданию каталитических композиций с увеличенной площадью мезопористой поверхности, что позволяет снизить температуры процесса трансалкилирования и увеличить каталитическую активность катализаторов.

Ряд современных разработок, в том числе российских, в области совершенствования процесса жидкофазного трансалкилирования бензола ДЭБ посвящены созданию и использованию цеолитных [14, 15] и цеолитсодержащих [16, 17] катализаторов на основе цеолита Ү. Так, начиная с 2013 г. и по настоящее время на заводе «Мономер» предприятия «Газпром нефтехим Салават» с успехом эксплуатируется катализатор марки КТ-БС-1 — совместная разработка ООО «НТЦ Салаватнефтеоргсинтез» и ИНХС РАН (г. Москва). Катализатор КТ-БС-1 — это глубоко декатионированный цеолит Ү, не содержащий связующих веществ, производство которого в России возможно (исходя из набора необходимого технологического оборудования) только на Ишимбайском катализаторном заводе (г. Ишимбай). Задача обеспечения необходимых условий для производства катализатора трансалкилирования бензола ДЭБ в ЭБ, сопоставимого по качеству с катализатором марки КТ-БС-1, но по принципиально иной технологии, была поставлена и решена в *HTЦ ООО «Газпром нефтехим Салават»* (далее HTЦ).

В качестве альтернативы катализатору трансалкилирования бензола ДЭБ марки КТ-БС-1 в НТЦ был разработан катализатор, гранулированный со связующим веществом [18] (далее КТ-СС). Катализатор содержит 80 мас. % цеолита Ү в кислотной Н⁺-форме и 20 мас. % связующего — оксида алюминия. Преимущество катализатора КТ-СС перед цеолитным КТ-БС-1 состоит в том, что при его изготовлении используется традиционная технология получения цеолитсодержащих катализаторов со связующим веществом. В результате катализатор обладает развитой вторичной пористой структурой, выполняющей транспортную роль при подводе реагирующих веществ к активным центрам катализатора и отводе продуктов реакции. Кроме того, этот катализатор может выпускаться в необходимом тоннаже на любой катализаторной фабрике России. Разработанный катализатор для процесса трансалкилирования бензола ДЭБ обеспечивает конверсию ДЭБ на уровне 82-83% при выходе ЭБ в расчете на пропущенное сырье 21-22 мас. %. Эти показатели сопоставимы с показателями процесса при использовании катализатора марки КТ-БС-1. Выработана партия катализатора, которая загружена на блок трансалкилирования цеха № 46 завода «Мономер» в 2023 г.

Ниже рассмотрены основные современные технологии получения ЭБ.

1.1. Технология Technip Energies/Badger Ethylbenzene EBmax

Параллельно с развитием газофазного процесса получения ЭБ (с 1976 г.) на катализаторе EM-3000 (ZSM-5), компания *Mobil-Badger* (*ExxonMobil-Badger*) разработала процесс алкилирования в жидкой фазе под торговой маркой EBMах. Существенным преимуществом технологии является использование в качестве катализатора нового цеолита типа МСМ-22, разработанного *ExxonMobil*, который превосходит цеолит Веtа и цеолит Y по селективности [19]. На сегодняшний день на долю технологий, разработанных компанией *Mobil-Badger*, приходится около 55% всего производимого ЭБ и более половины из него производится по технологии EBMax [20].

С 1995 г. технология EBMах была лицензирована 40 раз, как для новых заводов, так и для расширения

и реконструкции заводов, основанных на более ранних технологиях 13 .

Компания *ExxonMobil* является одним из ведущих поставщиков катализаторов ЭБ в мире. С 2001 г. почти две трети всех новых и замененных мощностей ЭБ, лицензированных компанией *Badger*, используют катализаторы *ExxonMobil*. По состоянию на 2017 г. катализаторы *ExxonMobil* установлены примерно у 35 клиентов EBMax, что позволило построить новые установки, а также модернизировать старые технологии и расширить мощности по производству ЭБ, в том числе на многих крупнейших в мире установках. На катализаторы *ExxonMobil* приходится более 56% мирового производства ЭБ, превышающее 20 млн метрических т/год, в процессах *Badger* EBMax (высокоселективная жидкофазная) и *Badger* Vapor Phase (газофазная).

Первое промышленное применение процесса началось в 1995 г. в Японии. Первоначально процесс трансалкилирования проводили в газовой фазе, при катализе цеолитом типа ZSM-5 по аналогии с уже работающими установками газофазного алкилирования 14. Позднее, с разработкой катализаторов на основе цеолита МСМ-22, процесс также стал жидкофазным. В табл. 1 приведены основные показатели процесса ЕВМах и используемые катализаторы.

В процессе ЕВМах бензол подают на дно заполненного жидкостью многослойного реактора. Этилен подают вместе с бензолом, а также между слоями катализатора. ПЭБ, которые состоят в основном из ДЭБ, подвергаются трансалкилированию бензолом во втором реакторе для образования дополнительного ЭБ (рис. 1). Особенностью технологии ЕВМах является использование реакционного защитного слоя катализатора в связи с необходимостью применения дорогостоящих цеолитсодержащих катализаторов алкилирования и трансалкилирования ExxonMobil на основе цеолита семейства MWW, чувствительных к примесям каталитических ядов в сырье. Наличие в технологии высокоселективного катализатора на основе МСМ-22 позволяет использовать низкое соотношение бензола к этилену (от 2.5 до 4), что снижает скорость циркуляции бензола, повышает эффективность и снижает пропускную способность колонны для извлечения бензола. Более половины производимого ЭБ в мире получают по технологии ЕВМах.

¹³ https://www.badgerlicensing.com/sites/badger/files/2024-06/flysheet ethylbenzene.pdf. Дата обращения 10.01.2025. / Accessed January 10, 2025.

¹⁴ Кошкин С.А. Анализ и оптимизация промышленной технологии получения этилбензола на цеолитсодержащих катализаторах. Дис. ... канд. тех. наук. Томск. 2017. [Koshkin S.A. Analysis and optimization of industrial technology for producing ethylbenzene on zeolite-containing catalysts. Cand. Sci. Thesis (Eng.). Tomsk. 2017.]

Таблица 1. Основные показатели процесса ЕВМах и используемые катализаторы

Table 1. Key parameters of the EBMax process and the catalysts used

Основные показатели Key parameters	Алкилирование Alkylation	Трансалкилирование Transalkylation		изаторы alysts трансалкилирования Transalkylation
Фаза Phase	Жидкость Liquid	Жидкость Liquid	Aikyiauoii	Transarkylation
Температура реакции, °C Reaction temperature, °C	195–257	_	EM-3300 (1995 г.); EM-3210/EM-3310 (Цеолит МСМ-22) EM-3300 (1995); EM-3210/EM-3310 (MSM-22 Zeolite)	ЕМ-3700 ¹⁵ (Цеолит МСМ-22) ЕМ-3300 ¹⁵ (MSM-22 Zeolite)
Температура сырьевой смеси на входе в реактор трансалкилирования, °C Temperature of the feed mixture at the inlet to the transalkylation reactor, °C	-	200		
Давление реакции, МПа Reaction pressure, MPa	3.4	3.1		
Соотношение бензол/этилен (мол.) Benzene/ethylene ratio (mol)	2.5–4	_		
Соотношение бензол/ПЭБ (мас.) Benzene/PEB ratio (wt)	-	2.0		
Конверсия этилена, % Ethylene conversion, %	100	_		
Конверсия ДЭБ, % DEB conversion, %	-	62		
Выход ЭБ, мас. % EB yield, wt %	99.5			
Чистота ЭБ, об. % EB purity, vol %	min 99.8			
Срок межрегенерационного пробега, лет Cycle length between catalyst regenerations, years	Более 3 More than 3			

Поскольку стоимость получаемого в процессе пара, как правило, покрывает затраты на энергию и вспомогательные материалы, около 95% в себестоимости производства ЭБ составляет стоимость сырья и только оставшиеся 5% приходятся на энергию и остальные затраты [21]. В стоимости сырья основная доля приходится на бензол. Таким образом, себестоимость производства ЭБ в основном зависит от цены на бензол.

1.2. Технология Lummus/UOP EBOne

Технология *Lummus/UOP* EBOne была впервые коммерциализирована в 1990 г. компанией *Nippon Steel*

Сhemical Company, Япония. В жидкофазном процессе ЕВОпе используется цеолитсодержащая каталитическая система UOP с неподвижным слоем, срок службы которой составляет от трех до пяти лет, что устраняет необходимость в оборудовании для регенерации. Процесс требует низких капиталовложений, обеспечивает высокие выходы и является энергоэффективным. Образование примесей ксилола практически исключено, в результате чего получается ЭБ отличного качества. Регенерированный катализатор показывает эффективность, равную свежему катализатору, что коммерчески доказано. По всему миру работает более 45 проектов с мощностью от 100000 до 1250000 т/год по ЭБ.

¹⁵ Ранее использовался газофазный процесс на цеолите ZSM-5. [Previously, a gas-phase process on ZSM-5 zeolite was used.]

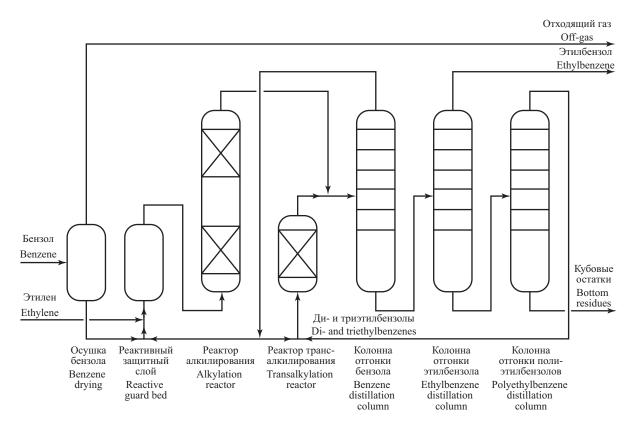


Рис. 1. Принципиальная технологическая схема процесса Badger EBMax [19]

Fig. 1. Process flow diagram of the Badger EBMax process [19]

Катализаторы прошли многократные регенерации без потери механической прочности или технологических характеристик. Катализаторы Q-Мах описаны в патентах [22–24]. Первоначально на стадии алкилирования использовался цеолит типа Y. На стадии трансалкилирования использовался цеолит типа USY [11]. Результатом развития технологии стало использование в 1996 г. новых катализаторов для катализа алкилирования и трансалкилирования

под торговыми марками *UOP* EBZ-500 (на основе цеолита Beta) и EBZ-800 (на основе цеолита USY). Позже в 2000-х гг. фирмой *UOP* был внедрен более современный катализатор алкилирования EBZ-800TL на основе цеолита UZM-8 структурного типа MWW [25].

В табл. 2 представлены существующие в настоящее время установки получения ЭБ по технологии EBOne.

Таблица 2. Существующие установки получения ЭБ по технологии EBOne [26]

Table 2. Existing EB production plants using EBOne technology [26]

Завод	Расположение	Мощность, т/год	Старт
Company	Location	Capacity, t/year	Start
Carbon Holdings	Ain Sokhna, Egypt	424000	2020
Tianjin Bohua Chemical Development Co.	Tianjin, China	530000	2019
PetroChina Jilin (No. 2)	Jilin, China	342000	2012
CNOOC/Shell Nanhai B.V.	Huizhou, China	640000	2006
PetroChina Daqing	Daqing, China	95400	2005
Asahi Kasei Corporation	Mizushima, Japan	360000	2005
		719000	2011
SECCO (BP-SPC)	Shanghai, China	(695500)	2009
		(535000)	2005
Synthos Litvinov (Kaucuk)	Litvinov, Czech Republic	300000	2004

Таблица 2. Продолжение

Table 2. Continued

Завод	Расположение	Мощность, т/год	Старт
Company	Location	Capacity, t/year	Start
LG Chem I and II	Yeosu, Republic of Korea	536472	2003
Asahi Kasei Corporation	Mizushima, Japan	355000	2003
LyondellBasell (ARCO Chemical)	Maasvlakte, The Netherlands	726000	2003
Repsol	Tarragona, Spain	505000 (380000)	2006 2000
SADAF (Styrene II Project)	Al Jubail, Saudi Arabia	530000	2000
Trinseo (Styron, Dow/BSL)	Böhlen, Germany	355000	1999
PT Styrindo Mono Indonesia (SM No. 2)	Merak, Indonesia	212000	1999
IRPC (TPI)	Rayong, Thailand	280000	2013
IKFC (IFI)		(212000)	1999
PetroChina Jilin (JCI) (No. 1)	Jilin, China	160000	2002
TetroChina Suin (SCI) (No. 1)	Jiiii, Ciiiia	(106000)	1998
Tabriz Petrochemical Co.	Tabriz, Iran	106000	1998
BASF-Sinopec YPC Company	Nanjing, China	130000	1998
Sinopec Maoming	Maoming, China	106000	1996
Shell Chemicals Seraya I	Singapore	360000	1996
Denka (Chiba Styrene Monomer)	Chiba, Japan	265000	1994
Taiyo Oil Company (Mitsui Toatsu Chemicals)	Ube, Japan	288000	1993
NS Styrene Monomer (Nippon Steel Chemical Co.) (SM No. 3)	Oita, Japan	212000	1990

Принципиальная схема процесса ЕВОпе представлена на рис. 2.

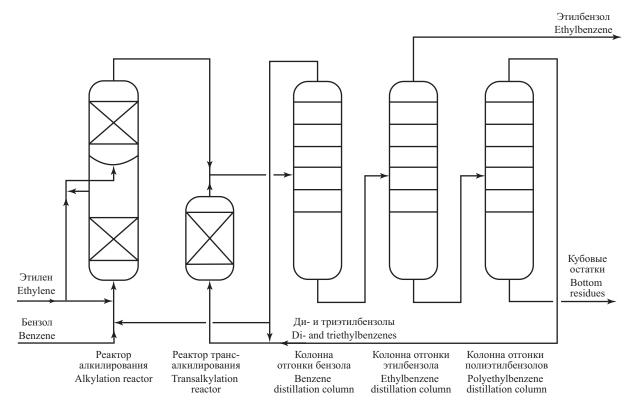


Рис. 2. Технологическая схема процесса *UOP* EBOne [25]

Fig. 2. Process flow diagram of the UOP EBOne process [25]

Аппаратурное оформление процесса EBOne практически идентично с EBMах технологией, где используются два реактора, один для алкилирования бензола, а другой для трансалкилирования ДЭБ. Реакторы работают вблизи критических температур реакционных смесей, чтобы максимизировать выход ЭБ.

Реактор жидкофазного алкилирования состоит из нескольких слоев цеолитного катализатора, работающих адиабатически. Условия процесса выбирают таким образом, чтобы реакционная масса алкилирования оставалась в жидкой фазе. Бензол используется в избытке, а этилен вводится перед каждым слоем, что улучшает селективность и увеличивает срок службы катализатора. В реакторе алкилирования этилен полностью реагирует, оставляя только инертные компоненты (этан и др.). Инерты проходят через реактор и отводятся с установки. Реактор трансалкилирования, по конструкции схожий с реактором алкилирования, также состоит из нескольких слоев цеолитного катализатора. Условия также подбираются таким образом, чтобы проводить жидкофазный процесс. Выходящие потоки алкилирования и трансалкилирования направляются в бензольную колонну, где бензол отбирается в качестве головного продукта для рециркуляции в реакторы. Нижняя часть бензольной колонны подается в колонну ЭБ, в которой сверху получают продуктовый ЭБ, а куб отводится в колонну ПАБ, из которой ДЭБ и ТЭБ отводятся сверху как сырье трансалкилирования, а снизу получается смола ПАБ, используемая на топливные нужды. Ребойлеры дистилляционных колонн могут использовать горячее масло, пар высокого давления или прямой нагрев. Пары верхнего погона конденсируются в котлах-утилизаторах с образованием промышленного пара.

Типичный диапазон рабочих параметров для процесса EBOne и используемые катализаторы приведены в табл. 3.

Технология EBOne является очень гибкой — повышение производительности процесса примерно до 70% может быть достигнуто без экономических потерь. После 70%-го диапазона перегонки некоторые потери в энергоэффективности могут произойти в секции дистилляции; тем не менее, производительность реакционной системы может быть не ниже 50% без каких-либо неблагоприятных технологических или экономических последствий.

Таблица 3. Основные показатели процесса ЕВОпе и используемые катализаторы

Table 3. Key indicators of the EBOne process and the catalysts use

Основные показатели процесса		Катализаторы		
Key indicators of the process		Catalysts		
Фаза	Жидкость	алкилирования	трансалкилирования	
Phase	Liquid	Alkylation	Transalkylation	
Температура реакции, °С	~270			
Reaction temperature, °C	~270			
Разница температур алкилирования на входе и выходе, °C Alkylation temperature difference at the input and output, °C	200–270			
Давление реакции, МПа (изб.)	2.0.4.0			
Reaction pressure, MPa (excess)	3.0–4.0	EBZ-800TL на основе цеолита		
Алкилирование, соотношение бензол/этилен (мол.)	2.0-4.0	UZM-8 ¹⁶ EBZ-800TL based on UZM-8	EBZ-100 на основе цеолита Y EBZ-100 based on Zeolite Y	
Alkylation, benzene/ethylene ratio (mol)		zeolite ¹⁶		
Трансалкилирование, соотн. бензол/ПАБ (мол.) Transalkylation , benzene/PAB ratio (mol)	2.0-4.0			
Выход ЭБ, мас. % EB yield, wt %	99.8			
Чистота ЭБ, об. %	: 00 00/			
EB purity, vol %	min 99.8%			
Срок межрегенерационного пробега, лет	Более 3			
Cycle length between catalyst regenerations, years	More than 3			

¹⁶ UZM — *UOP* zeolite material.

1.3. Технология CDTech EB

Технология CDTech (англ. Catalytic Distillation (CD) Technology) EB — это усовершенствованный способ получения высокочистого ЭБ из этилена и бензола с использованием запатентованного процесса каталитической дистилляции. Схема технологического процесса CDTech EB отличается от технологии EBOne только системой реактора алкилирования (рис. 3).

В основе процесса CDTech EB лежит концепция каталитической дистилляции, которая объединяет каталитическую реакцию и дистилляцию в одной операции. Газообразный этилен вводят в нижние части каждой реакционной зоны (непосредственно или через верхний погон бензольной колонны). Реакция происходит в каталитических зонах реактора, а дистилляция происходит во всей колонне, в результате чего по всему реактору возникает противоток пара и жидкости. Продукты реакции непрерывно удаляются из каталитической зоны в результате дистилляции, тогда как любые непрореагировавшие реагенты и другие легкие вещества удаляются сверху. Тепло реакции сразу отводится за счет испарения бензола, что обеспечивает работу колонны в изотермическом режиме при оптимальной температуре реакции. Когда пары этилена вводят в реактор в нескольких точках, они вступают в контакт с жидким бензолом, поступающим сверху, и поглощаются жидкой фазой. При равновесии большая часть этилена находится в паровой фазе. Когда небольшое количество этилена в жидкости вступает в контакт с катализатором, он немедленно вступает в реакцию с образованием ЭБ. Это отдаляет концентрацию этилена в жидкой фазе от равновесия. Необходимость наличия парожидкостного равновесия приводит «впрыскиванию» этилена из паровой фазы в жидкую фазу, таким образом, равновесие восстанавливается. Алкилатор может быть предназначен для преобразования практически всего этиленового сырья или только его части. В последнем случае, для завершения конверсии этилена предусмотрен дополнительный алкилатор. Непрореагировавшие этилен и бензол в верхнем погоне алкилатора конденсируются и направляются в дополнительный алкилатор для обеспечения полноты конверсии этилена.

В колонне каталитической дистилляции совмещен процесс алкилирования и ректификации в одной стадии. Алкилирование протекает изотермически при пониженной температуре и давлении. В колонне каталитической дистилляции продукты выводятся из зоны реакции. Указанные факторы ограничивают образование побочных продуктов и увеличивают

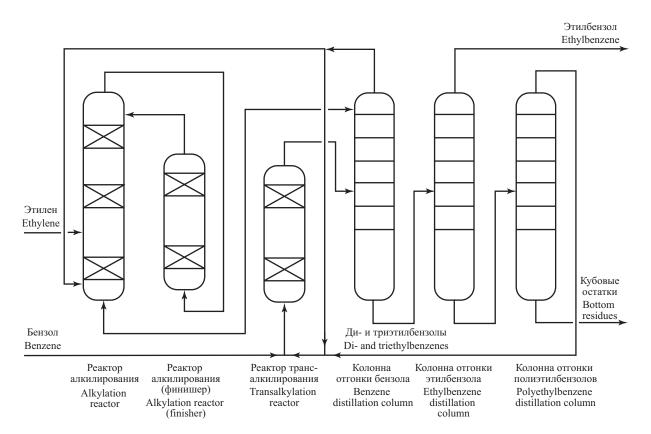


Рис. 3. Технологическая схема процесса CDTech EB [26]

Fig. 3. Process flow diagram of the CDTech EB process [26]

выход целевого продукта и его чистоту. Низкие температура и давление реакции также позволяют понизить капитальные затраты, увеличить безопасность работы установки и минимизировать неорганизованные выбросы. В многофазной среде колонны каталитической дистилляции поддерживается очень низкая концентрация этилена в жидкой фазе (<0.1 мас. %) из-за его высокой летучести по сравнению с бензолом.

Организация узла синтеза ЭБ по типу каталитической дистилляции (вместо отдельных алкилатора и трансалкилатора) не приводит автоматически к большей экономической эффективности процесса, для достижения эффективности нужна тщательная проработка условий реакции и разделения.

С 1990 г. технология CDTech EB была выбрана для шести проектов по всему миру. Как показано в табл. 4, в настоящее время в эксплуатации находятся три завода. Самая большая установка CDTech EB, разработанная на сегодняшний день, использует очень разбавленное этиленовое сырье, содержащее менее 40 мол. % этилена (остальное состоит в основном из водорода, метана и этана). В качестве такого потока могут выступать продукты процесса каталитического крекинга, характеризующиеся, согласно термодинамике процесса, невысоким выходом этилена.

Таблица 4. Существующие установки получения ЭБ по технологии CDTech EB

Table 4. Existing installations for producing EB using CDTech EB technology

Завод Company	Расположение Location	Мощность, т/год Сарасіty, t/year	Старт Start
S-Chem (JCP Company)	Al Jubail, Saudi Arabia	>770000	2008
INEOS Styrolution (Nova Chemicals Corp.)	Sarnia, Canada	477000	1998
Petroquimica Argentina SA. (PASA)	Puerto San Martin, Argentina	140000	1997

В процессе CDTech EB используется специально разработанный цеолитный катализатор алкилирования на основе цеолита Y, загруженный в колонну каталитической дистилляции. Катализатор упакован в специально разработанные пакеты из стальной сетки и стекловолоконной ткани. Уникальная структура пакетов дает им необходимую долю пустот, чтобы пар мог течь вверх через реактор. Набивка

из стекловолокна действует как барьер, предотвращающий прямой контакт пара с катализатором. Пакеты имеют диаметр и высоту около 30 см, с ними легко обращаться во время погрузочных операций. Запатентованные пакеты CDTech, содержащие катализатор алкилирования, уложены друг на друга внутри алкилатора наподобие структурированной насадки (рис. 4), что позволяет одновременно проводить реакцию алкилирования и дистилляцию реагентов и продуктов. Используются несколько слоев сложенных пакетов. Срок службы катализатора на основе пилотных испытаний (6000 ч непрерывной работы) оценивается свыше 2 лет. При этом на всем протяжении пробега сохраняются высокий выход (99.7 мас. %) и качество получаемого ЭБ (99.5 мас. %) [27].

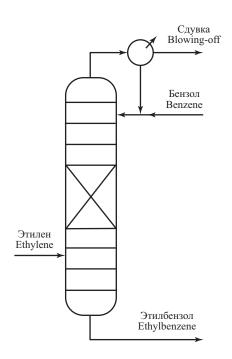


Рис. 4. Колонна каталитической дистилляции для синтеза ЭБ [27]

Fig. 4. Catalytic distillation column for EB synthesis [27]

Типичный диапазон рабочих параметров для процесса CDTech EB показан в табл. 5.

Таким образом, низкое соотношение бензол/ этилен делает процесс привлекательным для реконструкции устаревших установок, в том числе с повышением мощности по выпуску ЭБ. Соотношение низких температур процесса, давления, а также простота и возможность использования оборудования из углеродистой стали сделало данную технологию привлекательной с точки зрения минимума капитальных затрат на строительство по сравнению с конкурентами.

Таблица 5. Диапазон рабочих параметров установки CDTech EB

Table 5. Operating range of the CDTech EB unit

Параметр Parameter	Значение Value	
Алкилирование, соотн. бензол/этилен (мол.) Alkylation, benzene/ethylene ratio (mol)	2.0–4.0	
Трансалкилирование, соотн. бензол/ПАБ (мол.) Transalkylation, benzene/PAB ratio (mol)	2.0–4.0	
Диапазон температур алкилирования, °C Alkylation temperature range, °C	200 верх, 240 низ 200 top, 240 bottom	
Давление в алкилаторе, МПа Alkylator pressure, MPa	2.0–2.5	
Расход этилена, кг/кг ЭБ Ethylene consumption, kg/kg EB	0.264	
Расход бензола, кг/кг ЭБ Benzene consumption, kg/kg EB	0.738	

1.4. Технология Versalis

Компания *Versalis* предлагает современные технологии получения ЭБ на основе цеолитсодержащих катализаторов алкилирования PBE-1 (Polimeri Europa Beta zeolite¹⁷) и трансалкилирования PBE-2 на основе цеолита Beta в Н-форме. Технология надежна и проверена в промышленном масштабе на заводе ЭБ мощностью 650000 т/год, успешно запущенном в 2009 г. Катализаторы *Versalis* описаны в патенте [28].

Особенностью технологии Versalis является наличие блоков первичной очистки бензола от каталитических ядов, предварительное смешение (до реактора алкилирования) бензола и этилена, что способствует повышению выхода целевых продуктов. Используемый катализатор способствует низкому образованию олигомеров этилена и кокса при высокой активности, что позволяет проводить процесс в «мягких условиях» — температуре 170–230°С и при сравнительно низком давлении 1–2 МПа. Соотношение бензола к этилену составляет не менее 2 (мол.) [11].

Преимуществами технологии Versalis являются:

- высокая селективность (не менее 80%) и стабильность катализаторов;
- высокая чистота ЭБ (99.98%);
- 100% конверсия этилена и общий выход ЭБ 99.7% при незначительном содержании побочных примесей ксилолов (менее 10 м.д.);

- простота эксплуатации;
- использование углеродистой стали;
- низкие капиталовложения и затраты на техническое обслуживание установки;
- простота обращения со свежим и отработанным катализатором;
- межрегенерационный пробег катализатора от 2 ло 7 лет:
- увеличенный срок службы катализатора (до 5 регенераций без ухудшения характеристик);
- эффективная и надежная обработка свежего бензола для защиты катализатора от загрязнения азотом;
- низкое воздействие на окружающую среду;
- отсутствие потока кислотных отходов и минимальные газовые выбросы.

Процедуры подготовки катализаторов РВЕ позволяют получить оптимальные значения внецеолитной пористости, что позволяет увеличить стабильность катализатора и понизить скорость его дезактиванции.

В процессе *Versalis* не образуются жидкие отходы или газовые выбросы, за исключением нефтесодержащей воды и вентиляционных выбросов вакуумных насосов. Отработанный катализатор после нескольких регенераций может быть утилизирован.

Принципиальная технологическая схема процесса *Versalis* приведена на рис. 5.

Технология Versalis включает адиабатические реакторы алкилирования и трансалкилирования со стационарными слоями катализаторов, при этом реактор алкилирования содержит несколько слоев катализатора с дробной подачей этилена и оборудован выносными теплообменниками для съема тепла экзотермической реакции. Система выделения товарного ЭБ и побочных продуктов практически идентична технологии EBOne.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ЭБ является многотоннажным и высокомаржинальным продуктом нефтехимического синтеза с устойчивым спросом на внешнем и внутреннем рынках. Более 99% ЭБ используется в производстве стирола — сырья для производства полистирола, АБС-пластиков¹⁸ и синтетических каучуков из ЭБ.

Представленный обзор современных существующих технологий производства ЭБ (*Badger* EBMax, *UOP* EBOne, *Versalis*, CDTech EB) показывает, что в настоящее время наиболее перспективной является жидкофазная технология с использованием современных цеолитсодержащих катализаторов.

¹⁷ Химическое подразделение компании *Eni*, ранее называвшееся *Polimeri Europa*, переименовано в *Versalis*. / The *Eni*'s chemical division, formerly *Polimeri Europa*, rebranded as *Versalis*.

¹⁸ AБС — акрилонитрилбутадиенстирольный пластик. [ABS is an acrylonitrile butadiene styrene plastic.]

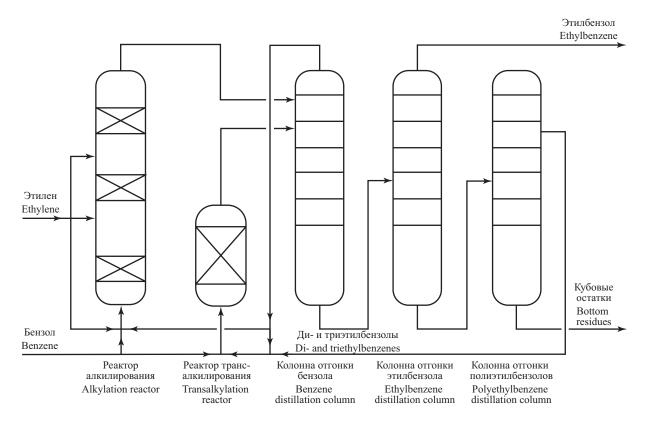


Рис. 5. Принципиальная технологическая схема процесса Versalis [28]

Fig. 5. Process flow diagram of the Versalis process [28]

Преимуществами жидкофазного процесса алкилирования бензола этиленом по сравнению с газофазным процессом являются снижение энергозатрат благодаря относительно низким температурам процесса (ниже 270°С), уменьшение выхода побочных продуктов, увеличение выхода ЭБ, срока службы и межрегенерационного пробега катализатора. Более половины производимого ЭБ в мире получают по технологии ЕВМах с использованием катализатора на основе цеолита семейства МWW (МСМ-22). Технология позволяет использовать низкое соотношение бензола к этилену (от 2.5 до 4), что снижает скорость циркуляции бензола, повышает эффективность и снижает пропускную способность колонны для извлечения бензола.

Цеолитсодержащие катализаторы по сравнению с жидкофазными катализаторами алкилирования (хлористым алюминием) отличаются высокой активностью, стабильностью, экологичностью и регенерируемостью. При использовании таких катализаторов значительно упрощается процесс подготовки сырья и аппаратурное оформление процесса.

Традиционная технология получения ЭБ на основе ${\rm AlCl}_3$ не обеспечивает достаточную эффективность превращения бензола в ЭБ, что выражается в низких коэффициентах использования сырья,

образовании большого количества высокозагрязненных сточных вод и высокой коррозии.

Основная часть современных исследований в области технологии алкилирования бензола этиленом в ЭБ связана с созданием и использованием цеолитсодержащих катализаторов, представляющих собой твердые пористые системы, содержащие активный компонент и связующее вещество.

Активным компонентом служат цеолиты USY, Beta, морденит, ZSM-5, ZSM-11, ZSM-12, ZSM-23, ZSM-35, ZSM-48, МСМ-22, МСМ-49. Предпочтительные катализаторы алкилирования включают цеолит Beta или цеолит семейства МСМ-22. Связующее вещество — Al_2O_3 , SiO_2 или аморфный алюмосиликат. После смещения активного компонента и связующего вещества из полученной массы формуют гранулы, которые затем высушивают и прокаливают. Иногда затем катализатор подвергают модифицированию. Обычно содержание цеолита в катализаторах составляет от 60 до 80 мас. %.

Ряд работ посвящен различным обработкам исходных цеолитов для увеличения площади мезопористой поверхности, что позволяет снизить температуры процесса трансалкилирования и повысить каталитическую активность полученных катализаторов.

В России в 2022 г. выпущена первая промышленная партия катализатора КТ-ГА-1 на основе цеолита семейства МГІ (ZSM-5) для процесса газофазного алкилирования бензола этиленом в ЭБ. С 19 июля 2022 г. начаты опытно-промышленные испытания катализатора, которые продолжаются по настоящее время. За первый год эксплуатации стало очевидно, что российский катализатор не уступает импортному аналогу по всем показателям.

Современные разработки в области катализаторов процесса трансалкилирования бензола ДЭБ, в том числе российские, посвящены созданию и использованию цеолитных и цеолитсодержащих катализаторов на основе цеолита типа FAU (цеолит Y).

В России, начиная с 2013 г. и по настоящее время на заводе «Мономер» ООО «Газпром нефтехим Салават» с успехом эксплуатируется катализатор марки КТ-БС-1 — совместная разработка *ООО* «*НТЦ* Салаватнефтеоргсинтез» и ИНХС РАН (г. Москва) на основе глубоко декатионированного цеолита Ү, не содержащего связующих веществ. Также в качестве альтернативы катализатору трансалкилирования бензола ДЭБ марки КТ-БС-1 в НТЦ был разработан катализатор КТ-СС, гранулированный со связующим веществом — 80 мас. % цеолита Ү в кислотной Н+-форме и 20 мас. % связующего — оксида алюминия. Преимущество катализатора КТ-СС перед цеолитным КТ-БС-1 состоит в том, что при его изготовлении используется традиционная технология получения цеолитсодержащих катализаторов со связующим веществом. В результате катализатор обладает развитой вторичной пористой структурой, выполняющей транспортную роль при подводе реагирующих веществ к активным центрам катализатора и отводе продуктов реакции. Кроме того, этот катализатор

может выпускаться в необходимом тоннаже на любой катализаторной фабрике России.

Таким образом, преимущества технологии жидкофазного алкилирования в присутствии современных высокоактивных цеолитсодержащих катализаторов сделали ее наиболее предпочтительной с точки зрения минимальных капитальных затрат на строительство по сравнению с остальными технологиями получения ЭБ.

Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли свой вклад в подготовку статьи.

- **С.Н. Потапова** анализ собранных данных, систематизация научной литературы, написание статьи.
- **Л.А. Хахин** планирование публикации, написание и рецензирование статьи.
- **Е.В. Королев** сбор данных, составление таблиц, написание статьи.
- **С.М. Масоуд** анализ собранных данных, систематизация статьи, подготовка рисунков.
- **Д.В. Светиков** сбор данных, подготовка таблиц для написания статьи.

Authors' contributions

All authors contributed equally to the preparation of the article.

- **S.N. Potapova** analysis of the collected data, systematization of scientific literature, writing the text of the article.
- **L.A. Khakhin** planning the publication, writing and reviewing the article.
- **E.V. Korolev** data collection, preparing the tables, writing the text of the article.
- **S.M. Masoud** analysis of the collected data, data systematization, and preparing illustrations.
- **D.V. Svetikov** collecting the data, preparing the tables for the article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. The authors declare no conflicts of interest.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Degnan Th.F.Jr., Smith C.M., Venkat Ch.R. Alkylation of aromatics with ethylene and propylene: recent developments in commercial processes. *Appl. Cat. A: Gen.* 2001;221(1-2): 283–294. http://doi.org/10.1016/S0926-860X(01)00807-9
- 2. Павлов М.Л., Басимова Р.А., Алябьев А.С. Алкилирование бензола этиленом на отечественном цеолитсодержащем катализаторе. *Нефтегазовое дело*. 2012;2: 470–478.
- 3. Ивашкина Е.Н., Кошкин С.А., Хлебникова Е.С. Моделирование работы промышленных установок получения этилбензола. *Neftegaz RU*. 2019;9:82–87.
- 4. Косарева А.Е, Куракин М.Е., Травкин М.Е. Современное состояние и перспективы развития процессов получения этилбензола. Обзор рынка и современное состояние процессов получения этилбензола. Вестник молодого ученого УГНТУ. 2024;2:99–106.

REFERENCES

- 1. Degnan Th.F.Jr., Smith C.M., Venkat Ch.R. Alkylation of aromatics with ethylene and propylene: recent developments in commercial processes. *Appl. Cat. A: Gen.* 2001;221(1-2): 283–294. http://doi.org/10.1016/S0926-860X(01)00807-9
- 2. Pavlov M.L., Basimova R.A., Alyabyev A.S. Alkylation of benzene with ethylene on a domestic zeolite-containing catalyst. *Neftegazovoe delo = Oil and Gas Business*. 2012;2:470–478 (in Russ.).
- 3. Ivashkina E.N., Koshkin S.A., Khlebnikova E.S. Modeling the operation of industrial ethylbenzene production plants. *Neftegaz* RU. 2019;9:82–87 (in Russ.).
- 4. Kosareva A.E., Kurakin M.E., Travkin M.E. Current state and prospective developments processes for obtaining ethylbenzene. Market overview and current state of processes obtaining ethylbenzene. *Vestnik Molodogo Uchenogo USNTU*. 2024;2:99–106 (in Russ.).

- 5. Попов С.В., Крымкин Н.Ю., Хабибрахманова О.В., Папуловских Е.Н. Реконструкция аппаратурного оформления производства изопропилбензола с целью выпуска этилбензола. Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2021;83(2): 184—190. https://doi.org/10.20914/2310-1202-2021-2-184-190
- 6. Павлов М.Л., Басимова Р.А., Алябьев А.С., Хабибуллин А.М., Глотов А.П., Зиннуров Р.Р. Производство этилбензола в ООО Газпром Нефтехим Салават. *Нефтепереработка и нефтехимия*. 2023;7-8:28–33.
- 7. Павлов М.Л., Басимова Р.А., Алябьев А.С. *Способ получения катализатора и способ алкилирования бензола этиленом с его использованием*: пат. 2755892С1 РФ. Заявка № 2020138987; заявл. 27.11.2020; опубл. 22.09.2021. Бюл. № 27.
- 8. Пономарева О.А., Князева Е.Е., Шкуропатов А.В., Иванова И.И., Герзелиев И.М., Хаджиев С.Н. Синтез и каталитические свойства цеолитов со структурой МWW в процессах нефтехимии (обзор). *Нефтехимия*. 2017;57(6):769–772.
- 9. Шавалеев Д.А., Павлов М.Л., Басимова Р.А., Садовников А.А., Судьин В.В., Смирнова Е.М., Демихова Н.Р. Синтез модифицированного катализатора для процесса жидкофазного алкилирования бензола этиленом. *Нефтехимия*. 2020;60(5): 686–692. https://doi.org/10.31857/S0028242120050184
- Павлов М.Л., Басимова Р.А., Шавалеев Д.А., Эрштейн А.С. Разработка катализатора и процесса жидкофазного алкилирования бензола этиленом и этан-этиленовой фракцией пиролиза углеводородов. *Нефтехимия*. 2019;59(4): 417–422. https://doi.org/10.1134/S0028242119040129
- 11. Рогов М.Н., Рахимов Х.Х., Ишмияров М.Х., Мячин С.И. Способ приготовления цеолитсодержащего катализатора алкилирования бензола этиленом: пат. 2265482 РФ. Заявка № 2004114845/04; заявл. 13.05.2004; опубл. 10.129.2005. Бюл. № 347.
- Senderov E., Qureshi M.I. Introduction of Mesoporosity into Zeolite Materials with Sequential Acid, Surfactant, and Base Treatment: USA Pat. 9376324 US; Patent Publication Number 2013/0183231 A1. Publ. 18.07.2013.
- Peters A.W., Knaeble W.J., Burton A.W., Johnson I.D., Oliveri C.G., Britto R.J. Production of Alkylaromatic Compounds: USA Pat. 11820723 US. Publ. 30.11.2023.
- 14. Хаджиев С.Н., Павлов М.Л., Басимова Р.А., Герзелиев И.М., Алябьев А.С., Кутепов Б.И. Катализатор, способ его получения и способ трансалкилирования бензола диэтилбензолами с его использованием: пат. 2478429 С1 РФ. Заявка № 2011131506/04; заявл. 28.07.2011; опубл. 10.04.2013. Бюл. № 10.
- 15. Шавалеев Д.А., Павлов М.Л., Басимова Р.А., Шавалеева Н.Н., Эрштейн А.С., Травкина О.С., Кутепов Б.И. Способ получения катализатора и способ трансалкилирования бензола диэтилбензолами с его использованием: пат. 2553256 С1 РФ. Заявка № 2014113800/04; заявл. 08.04.2014; опубл. 10.06.2015. Бюл. № 16.
- Woodle G.B., Cepla A. Ethylbenzene Process Using Stacked Reactor Loading of Beta and Y Zeolites: USA Pat. 5998687. Publ. 12.07.1999.
- 17. Lui G., Sundararaman R., Cao J. Ethylbenzene plant debottleneck with a high-activity transalkylation catalyst. *Hydrocarbon Processing*. 2021;6:51–54.
- 18. Павлов М.Л., Басимова Р.А., Алябьев А.С. *Катализатор, способ его получения и способ трансал-килирования бензола диэтилбензолами с его использованием*: пат. 2751336 С1 РФ. Заявка № 2020132683; заявл. 02.10.2020; опубл. 13.07.2021. Бюл. № 20.

- 5. Popov S.V., Krymkin N.Yu., Khabibrakhmanova O.V., Papulovskikh E.N. Reconstruction of the hardware design for isopropylbenzene production for the production of ethylbenzene. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologii = Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2021;83(2):184–190 (in Russ). https://doi.org/10.20914/2310-1202-2021-2-184-190
- Pavlov M.L., Basimova R.A., Alyab'ev A.S., Khabibullin A.M., Glotov A.P., Zinnurov R.R. Ethylbenzene poduction at Gazprom Neftekhim Salavat. *Neftepererabotka i neftekhimiya = Oil Refining and Petrochemistry*. 2023;7-8:28–33 (in Russ.).
- 7. Pavlov M.L., Basimova R.A., Alyabyev A.S. *Method for Obtaining Catalyst and Method for Alkylating Benzene with Ethylene Using It*: RF Pat. 2755892C1 RU. Publ. 22.09.2021 (in Russ.).
- Ponomareva O.A., Knyazeva E.E., Shkuropatov A.V., et al. Synthesis and catalytic properties of MWW structure zeolite in petrochemical processes. Pet. Chem. 2017;57(12): 1147–1150. https://doi.org/10.1134/S096554411706024X [Original Russian Text: Ponomareva O.A., Knyazeva E.E., Shkuropatov A.V., Ivanova I.I., Gerzeliev I.M., Khadzhiev S.N. Synthesis and catalytic properties of MWW structure zeolite in petrochemical processes. Neftekhimiya. 2017;57(6): 769–772 (in Russ.).]
- Shavaleev D.A., Pavlov M.L., Basimova R.A., et al. Synthesis of modified catalyst for liquid phase alkylation of benzene with ethylene. Pet. Chem. 2020;60(9):1073–1079. https://doi.org/10.1134/S0965544120090182
 [Original Russian Text: Shavaleev D.A., Pavlov M.L., Basimova R.A., Sadovnikov A.A., Sud'in V.V., Smirnova E.M., Demikhova N.R. Synthesis of modified catalyst for liquid phase alkylation of benzene with ethylene. Neftekhimiya. 2020;60(5):686–692 (in Russ.). https://doi.org/10.31857/S0028242120050184]
- Pavlov M.L., Basimova R.A., Shavaleev D.A., et al. Development of a catalyst and a process for liquid-phase benzene alkylation with ethylene and ethane-ethylene hydrocarbon pyrolysis fraction. Pet. Chem. 2019;59(7): 701–705. https://doi.org/10.1134/S0965544119070120 [Original Russian Text: Pavlov M.L., Basimova R.A., Shavaleev D.A., Ershtein A.S. Development of a catalyst and a process for liquid-phase benzene alkylation with ethylene and ethane-ethylene hydrocarbon pyrolysis fraction. Neftekhimiya. 2019;59(4): 417–422 (in Russ.). https://doi.org/10.1134/S0028242119040129]
- Rogov M.N., Rakhimov Kh.Kh., Ishmiarov M.Kh., Myachin S.I. Method of Preparating Zeolite-Containing Benzene-Ethylene Alkylation Catalyst: RF Pat. 2265482 RU. Publ. 10.12.2005 (in Russ.).
- Senderov E., Qureshi M.I. Introduction of Mesoporosity into Zeolite Materials with Sequential Acid, Surfactant, and Base Treatment: USA Pat. 9376324 US; Patent Publication Number 2013/0183231 A1. Publ. 18.07.2013.
- 13. Peters A.W., Knaeble W.J., Burton A.W., Johnson I.D., Oliveri C.G., Britto R.J. *Production of Alkylaromatic Compounds:* USA Pat. 11820723 US. Publ. 30.11.2023.
- 14. Khadzhiev S.N., Pavlov M.L., Basimova R.A., Gerzeliev I.M., Alyab'ev A.S., Kutepov B.I. Catalyst, Method for Production Thereof and Method for Transalkylation of Benzene with Diethylbenzenes using Said Catalyst: RF Pat. 2478429 C1 RU. Publ. 10.04.2013 (in Russ.).
- 15. Shavaleev D.A., Pavlov M.L., Basimova R.A., Shavaleeva N.N., Jershtejn A.S., Travkina O.S., Kutepov B.I. Method of Producting Catalyst and Method for Transalkylation of Benzene with Diethylbenzenes Using Same: RF Pat. 2553256 C1 RU. Publ. 10.06.2015 (in Russ.).

- 19. Degnan T.F., Smith C.M., Venkat C.R. Alkylation of aromatics with ethylene and propylene: recent developments in commercial processes. *Appl. Catal. A: Gen.* 2001;221(1-2): 283–294. https://doi.org/10.1016/S0926-860X(01)00807-9
- Басимова Р.А., Павлов М.Л., Прокопенко А.В., Мячин С.И., Каюмов В.В., Мусин А.Р., Козлова М.Ю., Кутепов Б.И. Основные этапы развития и современное состояние процесса получения этилбензола. *Нефтепереработка и не*фтехимия. 2009;2:24–28.
- 21. Lee S. *Encyclopedia of Chemical Processing*. CRC Press; 2006. 3640 p.
- Abrams M.L., Jeroro E., Moscoso J.G. Process for Making Modified Small-Crystal Mordenite, Transalkilation Process Using Same, and Modified Small-Crystal Mordenite: USA Pat. 11529615 B2. Publ. 20.12.2022.
- Abrams M.L., Jeroro E., Moscoso J.G., Jan D.-Y., Cox P. Process for Making Modified Small-Crystal Mordenite, Transalkilation Process Using Same, and Modified Small-Crystal Mordenite. USA Pat. 2021/0187486 A1. Publ. 24.06.2021.
- Jeroro E., Jan D.-Y., Cox P., Moscoso J.G. USM-54 and Transalkylation Process Using Same: Pat. 2021/141870 A1 WO. Publ. 15.07.2021.
- Yang W., Wang Z., Sun H., Zhang B. Advances in development and industrial applications of ethylbenzene processes. *Chinese J. Catal.* 2016;37(1):16–26. https://doi.org/10.1016/ S1872-2067(15)60965-2
- 26. Meyers R. *Handbook of Petrochemicals Production Processes*. 2nd Ed. McGraw Hill.; 2018. 640 p.
- Weitkamp J., Pupple L. Catalysis and Zeolites: Fundamentals and Applications. Springer Science & Business Media; 1999. 564 p.
- 28. Girotti G., Cappeliazzo O. Catalytic Composition and Process for the Alkylation or Transalkylation of Aromatic Compounds: USA Pat. 6084143. Publ. 04.07.2000.

- Woodle G.B., Cepla A. Ethylbenzene Process Using Stacked Reactor Loading of Beta and Y Zeolites: USA Pat. 5998687. Publ. 12.07.1999.
- 17. Lui G., Sundararaman R., Cao J. Ethylbenzene plant debottleneck with a high-activity transalkylation catalyst. *Hydrocarbon Processing*. 2021;6:51–54.
- Pavlov M.L., Basimova R.A., Alyabyev A.S. Catalyst, Method for its Preparation and Method for Transalkylation of Benzene with Diethylbenzenes Using It: RF Pat. 2751336 C1. Publ. 13.07.2021 (in Russ.).
- Degnan T.F., Smith C.M., Venkat C.R. Alkylation of aromatics with ethylene and propylene: recent developments in commercial processes. *Appl. Catal. A: Gen.* 2001;221(1-2): 283–294. https://doi.org/10.1016/S0926-860X(01)00807-9
- Basimova R.A., Pavlov M.L., Prokopenko A.V., Mjachin S.I., Kajumov V.V., Musin A.R., Kozlova M.Ju., Kutepov B.I. The main stages of development and the current state of the ethylbenzene production process. Neftepererabotka i neftekhimiya = Oil Refining and Petrochemistry. 2009;2:24–28 (in Russ.).
- 21. Lee S. *Encyclopedia of Chemical Processing*. CRC Press; 2006. 3640 p.
- Abrams M.L., Jeroro E., Moscoso J.G. Process for Making Modified Small-Crystal Mordenite, Transalkilation Process Using Same, and Modified Small-Crystal Mordenite: USA Pat. 11529615 B2. Publ. 20.12.2022.
- Abrams M.L., Jeroro E., Moscoso J.G., Jan D.-Y., Cox P. Process for Making Modified Small-Crystal Mordenite, Transalkilation Process Using Same, and Modified Small-Crystal Mordenite. USA Pat. 2021/0187486 A1. Publ. 24.06.2021.
- Jeroro E., Jan D-Y., Cox P., Moscoso J.G. USM-54 and Transalkylation Process Using Same: WO Pat. 2021/141870 A1. Publ. 15.07.2021.
- 25. Yang W., Wang Z., Sun H., Zhang B. Advances in development and industrial applications of ethylbenzene processes. *Chinese J. Catal.* 2016;37(1):16–26. https://doi.org/10.1016/S1872-2067(15)60965-2
- 26. Meyers R. *Handbook of Petrochemicals Production Processes*. 2nd Ed. McGraw Hill.; 2018. 640 p.
- Weitkamp J., Pupple L. Catalysis and Zeolites: Fundamentals and Applications. Springer Science & Business Media; 1999. 564 p.
- 28. Girotti G., Cappeliazzo O. Catalytic Composition and Process for the Alkylation or Transalkylation of Aromatic Compounds: USA Pat. 6084143. Publ. 04.07.2000.

Об авторах

Хахин Леонид Алексеевич, к.т.н., заведующий лабораторией полиальфаолефинов, ООО «Объединенный центр исследований и разработок» (ООО «РН-ЦИР») (119333, Россия, Москва, Ленинский пр-т, 55/1, стр. 2). E-mail: KhakhinLA@rdc.rosneft.ru. SPIN-код РИНЦ 3653-9491, https://orcid.org/0009-0007-1120-8682

Потапова Светлана Николаевна, к.х.н., ведущий научный сотрудник, лаборатория полиальфаолефинов, ООО «Объединенный центр исследований и разработок» (ООО «РН-ЦИР») (119333, Россия, Москва, Ленинский пр-т, 55/1, стр. 2). E-mail: PotapovaSN@rdc.rosneft.ru. SPIN-код РИНЦ 8015-3854, https://orcid.org/0009-0001-4580-0189

Королев Евгений Валерьевич, к.т.н., старший научный сотрудник, лаборатория полиальфаолефинов, ООО «Объединенный центр исследований и разработок» (ООО «РН-ЦИР») (119333, Россия, Москва, Ленинский пр-т, 55/1, стр. 2). E-mail: KorolevEV@rdc.rosneft.ru. https://orcid.org/0009-0001-3512-7736

Масоуд Салех Масоуд, к.х.н., научный сотрудник, лаборатория полиальфаолефинов, ООО «Объединенный центр исследований и разработок» (ООО «РН-ЦИР») (119333, Россия, Москва, Ленинский пр-т, 55/1, стр. 2). E-mail: MasoudSM@rdc.rosneft.ru. Scopus Author ID 55327194000, ResearcherID J-8251-2018, https://orcid.org/0000-0003-2873-3612

Светиков Дмитрий Викторович, старший научный сотрудник, лаборатория полиальфаолефинов, ООО «Объединенный центр исследований и разработок» (ООО «РН-ЦИР») (119333, Россия, Москва, Ленинский пр-т, 55/1, стр. 2). E-mail: SvetikovDV@rdc.rosneft.ru. https://orcid.org/0009-0002-0394-8895

About the Authors

Leonid A. Khakhin, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of Polyalphaolefins, United Research and Development Center (55/1-2, Leninskii pr., Moscow, 119333, Russia). E-mail: KhakhinLA@rdc.rosneft.ru. RSCI SPIN-code 3653-9491, https://orcid.org/0009-0007-1120-8682

Svetlana N. Potapova, Cand. Sci. (Chem.), Leading Researcher, Laboratory of Polyalphaolefins, United Research and Development Center (55/1-2, Leninskii pr., Moscow, 119333, Russia). E-mail: PotapovaSN@rdc.rosneft.ru. RSCI SPIN-code 8015-3854, https://orcid.org/0009-0001-4580-0189

Evgeniy V. Korolev, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Laboratory of Polyalphaolefins, United Research and Development Center (55/1-2, Leninskii pr., Moscow, 119333, Russia). E-mail: KorolevEV@rdc.rosneft.ru. https://orcid.org/0009-0001-3512-7736

Salekh M. Masoud, Cand. Sci. (Chem.), Researcher, Laboratory of Polyalphaolefins, United Research and Development Center (55/1-2, Leninskii pr., Moscow, 119333, Russia). E-mail: MasoudSM@rdc.rosneft.ru. Scopus Author ID 55327194000, ResearcherID J-8251-2018, https://orcid.org/0000-0003-2873-3612

Dmitry V. Svetikov, Senior Researcher, Laboratory of Polyalphaolefins, United Research and Development Center (55/1-2, Leninskii pr., Moscow, 119333, Russia). E-mail: SvetikovDV@rdc.rosneft.ru. https://orcid.org/0009-0002-0394-8895