

УДК 691.175.746

<https://doi.org/10.24412/2310-8266-2023-1-27-32>

Современные тенденции развития рынка и технологии производства полистирола

Жагфаров Ф.Г., Григорьева Н.А., Краюшкин Ф.А.

Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, 119991, Москва, Россия

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7344-015X>, E-mail: firdaus_jak@mail.ruORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2619-2541>, E-mail: ngrig2003@list.ruORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9480-8478>, E-mail: fedorkray@gmail.com

Резюме: В статье рассматриваются вопросы, связанные с развитием рынка полистирола в России и в мире. Рассмотрены основные методы получения полистирола и их сравнительная характеристика. Приведены основные направления повышения эффективности производства полистирола.

Ключевые слова: полистирол, полимеризация, полимеризация в блоке, суспензионная полимеризация, эмульсионная полимеризация.

Для цитирования: Жагфаров Ф.Г., Григорьева Н.А., Краюшкин Ф.А. Современные тенденции развития рынка и технологии производства полистирола // НефтеГазоХимия. 2023. № 1. С. 27–32.

DOI:10.24412/2310-8266-2023-1-27-32

MODERN TRENDS IN THE MARKET DEVELOPMENT AND TECHNOLOGY OF POLYSTYRENE PRODUCTION

Zhagfarov Firdaves G., Grigoryeva Natalya A., Krayushkin Fedor A.

Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), 119991, Moscow, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7344-015X>, E-mail: firdaus_jak@mail.ruORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2619-2541>, E-mail: ngrig2003@list.ruORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9480-8478>, E-mail: fedorkray@gmail.com

Abstract: The article deals with issues related to the development of the polystyrene market in Russia and in the world. The main methods for obtaining polystyrene and their comparative characteristics are considered. The main directions for increasing the efficiency of polystyrene production are given.

Keywords: polystyrene, polymerization, block polymerization, suspension polymerization.

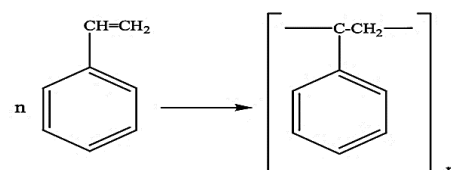
For citation: Zhagfarov F.G., Grigoryeva N.A., Krayushkin F.A. MODERN TRENDS IN THE MARKET DEVELOPMENT AND TECHNOLOGY OF POLYSTYRENE PRODUCTION. Oil & Gas Chemistry. 2023, no. 1, pp. 27–32.

DOI:10.24412/2310-8266-2023-1-27-32

Полимерная промышленность является одной из самых динамично развивающихся отраслей в России и за рубежом, несмотря на кризисные явления последних лет. Негативные факторы, связанные прежде всего с пандемией COVID-19, оказали значительное влияние на глобальные цепочки поставок и структуру потребительского спроса на полимерную продукцию. Стоит отметить, что российский рынок полимеров отличается и высокой зависимостью от импортных поставок. Тем не менее производство пластмасс в России в последние годы сопровождалось запуском новых крупных мощностей, что позволяет наращивать выпуск продукции высоких переделов.

Одним из важнейших продуктов полимерной промышленности является полистирол.

Полистирол – синтетический полимер на основе стирола. Полистирольные пластики – легкие и жесткие, они



широко используются в упаковочных материалах, электро- и теплоизоляции, потребительских товарах. Низкая стоимость производства полистирола, уникальный набор потребительских свойств делают его универсальным материалом с широким спектром применения [1]. В табл. 1 и 2 представлены основные свойства и области применения полимера.

В последние десятилетия индустрия полистирола пережила значительный рост, и, по некоторым оценкам, мировое производство составит более 18 млн т в 2025 году. Рынок полистирола вырастет и достигнет 39,5 млрд долларов США к 2030 году, показывая ежегодный рост в 5,5% начиная с 2022 года [2]. На рис. 1 представлена динамика роста производства полистирола к 2025 году. В настоящее время основные мощности по производству полистирола в мире расположены в Азии, Европе и Северной Америке. Крупнейшие производства находятся в Китае, США, Германии и Южной Корее. На рис. 2 представлена карта развития полистирольных мощностей до 2026 года.

Таблица 1

Основные свойства полистирола

Формула	$(C_8H_8)_n$
Молекулярная масса	13600–17500 г/моль
Температура плавления	210–249 °C
Типичная температура литья под давлением	38–66 °C
Температура изгиба под нагрузкой	95 °C при 0,46 МПа
Предел прочности	53 МПа
Прочность на изгиб	83 МПа

Таблица 2

Основные виды полистирола и область использования

Вид полистирола	Область использования
Полистирол общего назначения	Изготовление методом литья под давлением изделий технического назначения и товаров ежедневного потребления
Вспененный полистирол	Строительные материалы, тепло- и шумоизоляция, декоративные элементы.
Сополимеры стирола	Применяются для синтеза пластмасс с различными свойствами, например ударопрочный стирол (HIPS) или АБС-пластики (акрилонитрил-бутадиен-стирол). Такие пластики устойчивы к механическим повреждениям

Рис. 1

Динамика роста производства полистирола к 2025 году

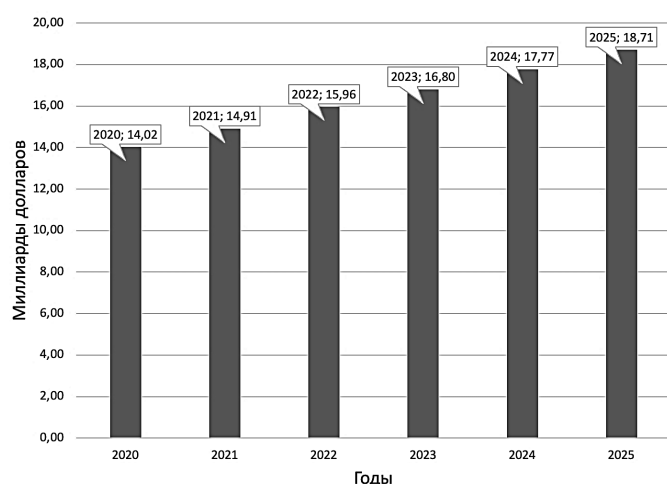


Рис. 2

Уровень развития мощностей производства полистирола в 2022–2026 годах по регионам мира

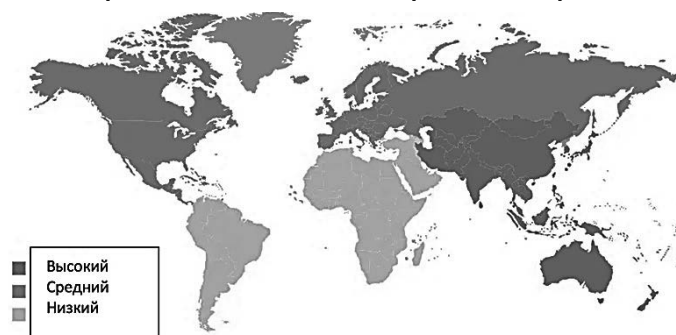


Рис. 3

Рынок полистирола по регионам в мире



Масштабы производства полистирола в разных регионах мира сильно различаются. Азия является крупнейшим производителем полистирола, на долю которого приходится более половины всего мирового производства. В Европе и Северной Америке производится по 15–20% от общего объема. На рис. 3 представлена региональная структура рынка полистирола по состоянию на 2018 год.

Полистирол и стирольные пластики в России производят на шести предприятиях, из которых три выпускают полистирол общего назначения и ударопрочный полистирол (НКНХ, «Пеноплэкс», ООО «Газпром нефтехим Салават»). Вспенивающийся полистирол производится предприятиями ООО «Ангарский завод полимеров», АО «Пластик» (Узловая) и «Сибур-Химпром». АБС-пластики выпускают «Пластик» и НКНХ.

Лидирующие позиции на рынке полистирола общего назначения (ПСОН) и ударопрочного полистирола (УПС) занимает ПАО «Нижнекамскнефтехим» с долей около 75% в общем объеме производства. На втором месте – «Пеноплэкс», на долю которого приходится около 15% производства. Однако стоит отметить, что полистирол общего назначения, выпускаемый компанией, в значительной части используется в собственном производстве теплоизоляционных плит. По этой причине в структуре поставок товарного продукта выше доля ООО «Газпром нефтехим Салават». Доля зарубежных игроков на рынке ПСОН/УПС – менее 20%. Среди поставщиков – Ineos, Versalis, LG Chem.

Лидер на рынке вспененного полистирола (ПСВ) – «Сибур-Химпром», обеспечивающий более 80% производства. Мощности второго производителя – ООО «Ангарский завод полимеров» – изношены, работают на неполной загрузке.

В сумме АО «Пластик» (Узловая) и ООО «Ангарский завод полимеров» обеспечивают менее 20%. По данным RUPEC, основной объем импортных поставок обеспечили финский производитель полистирола Styrochem и китайская компания Loyal. Импорт продукции Styrochem за год вырос на 31%, поставки китайской Loyal увеличились на 45%, до 4,3 тыс. т [3]. На сегодняшний день полистирол остается самым распространенным полимером на основе стирола. На рис. 4 представлен объем производства пластиков на основе стирола за 2020 год [4].

В промышленности реализовано три основных способа получения полистирола: полимеризация в блоке (в массе), суспензионная и эмульсионная полимеризация. Самыми распространенными в настоящее время являются суспензионный и блочный методы получения полистирола [5].

При использовании блочного метода стирол предварительно полимеризуется путем нагревания без инициаторов

Рис. 4

Производство полимеров на основе стиролов за 2020 год

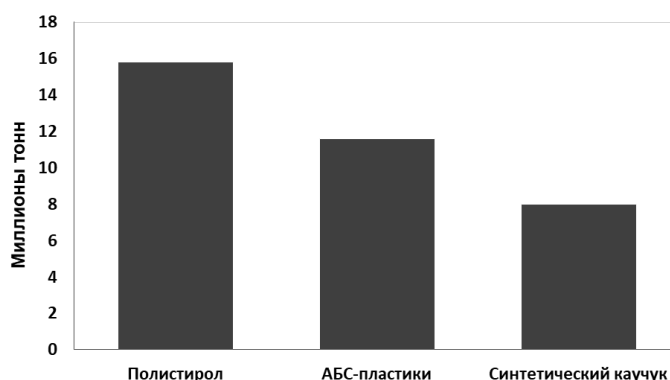
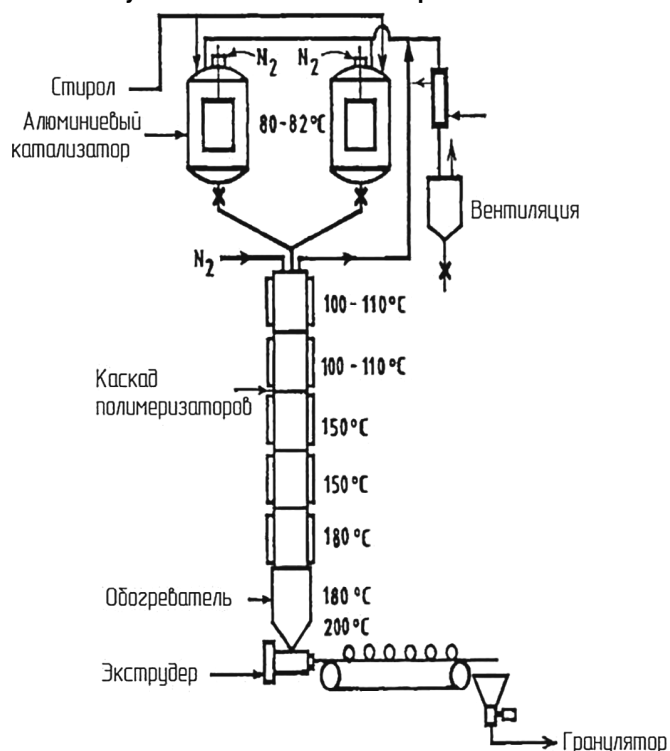


Рис. 5

Схема получения блочного полистирола



в полимеризаторе при 80°C в течение нескольких часов, конверсия стирола при этом составляет 33–35%. Затем смесь мономера и полимера направляется в башню для отвода тепла, а внутри – нагревательными змеевиками [6].

Температурный режим колонны: верх – около 100°C, центр – около 150°C, а низ – около 180°C. Повышенная температура в нижней части колонны не только обеспечивает более высокую конверсию, но и позволяет выпаривать остаточный стирол из полимера. Основание башни образует бункер экструдера, где расплав выходит в виде нитей, которые охлаждаются, распадаются и упаковываются в виде готового продукта. На рис. 5 представлена схема блочной полимеризации стирола.

В табл. 3 представлены основные преимущества и недостатки блочного метода получения полистирола.

В целом полимеризация стирола в массе является достаточно экономичным и эффективным методом.

Суспензионная полимеризация представляет собой метод получения полистирола путем суспендирования капель мономера в водной среде. Процесс суспензионной полимеризации начинается с приготовления водной среды, содержащей инициатор, стабилизатор и капли мономера. Наиболее часто используемыми ингибиторами суспензионной полимеризации стирола являются гидрохинон и трет-бутилкатехин. Реакция начинается на поверхности капель мономера и приводит к образованию растущих полимерных цепей, которые в конечном итоге окружают капли [7].

Размер и распределение образующихся частиц полистирола можно контролировать, регулируя параметры реакции: концентрации мономера, стабилизатора и инициатора,

температуру реакции и скорость перемешивания. На размер частиц полистирола также может влиять выбор стабилизатора и инициатора.

В табл. 4 представлены основные достоинства и недостатки суспензионной полимеризации стирола.

На рис. 6 представлена схема получения полистирола суспензионным методом.

Эмульсионная полимеризация стирола – процесс получения полистирола путем полимеризации мономера в водной среде с помощью эмульгаторов и инициаторов [8].

На стадии иницирования к водной фазе добавляют инициатор (например, персульфат калия), затем мономер и эмульгатор. Инициатор разлагается и образует свободные радикалы, которые затем иницируют полимеризацию мономера в каплях эмульсии.

Температура процесса составляет 50–80°C, при этом небольшое повышение температуры используется для увеличения скорости реакции. Давление обычно поддерживают на уровне атмосферного, чтобы предотвратить образование нежелательных побочных продуктов. На рис. 7 представлена схема эмульсионной полимеризации стирола.

Эмульсионная полимеризация является наиболее сложным из трех процессов полимеризации, так как требует точного контроля размера частиц и их распре-

Таблица 3

Преимущества и недостатки блочной полимеризации стирола

Достоинства	Недостатки
Метод достаточно прост, поскольку включает только смешивание реагентов, что позволяет легко масштабировать его для промышленного производства	Сложность контроля реакции
Отсутствие растворителей или разбавителей делает процесс более рентабельным ввиду отсутствия дополнительных технологических стадий	Чувствителен к резким изменениям температуры. Резкий скачок температур может привести к затвердеванию реакционной массы
Достаточно высокая конверсия стирола, до 95,5%	
Полистирол имеет высокую молекулярную массу относительно других методов производства, что позволяет производить более прочный и жесткий продукт	Высокий риск побочных реакций и изменение свойств целевого продукта

Таблица 4

Основные достоинства и недостатки суспензионной полимеризации стирола

Достоинства	Недостатки
Высокая конверсия стирола, до 99,9%	Сложность процесса. Требуется специальное оборудование
Равномерное распределение частиц по размерам приводит к улучшению качества и консистенции продукта. Содержание мономера в продукте составляет менее 0,2%	Необходимость тщательной очистки готового продукта. Загрязнение микроорганизмами и механическими примесями

Рис. 6

Схема получения полистирола суспензионным методом

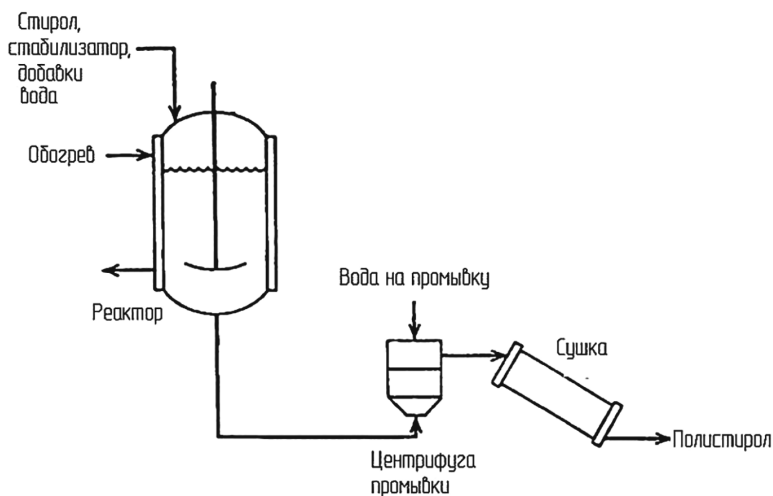


Рис. 7

Схема получения полистирола эмульсионным методом

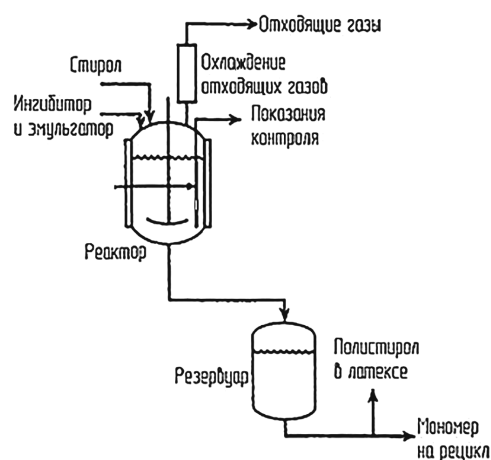


Таблица 5

Основные преимущества и недостатки эмульсионной полимеризации

Достоинства	Недостатки
Считается более безопасным процессом по сравнению с другими методами полимеризации. Водная среда, используемая в эмульсионной полимеризации, снижает риск возгорания и взрыва	Сложность контроля процесса. Любые отклонения от условий проведения процесса могут привести к ухудшению свойств полимера
Позволяет точно контролировать размер получаемых полимерных частиц	Готовый продукт часто имеет широкое массовое распределение и широкий разброс по размерам гранул
	Полимер склонен к коагуляции, приводящей к потере стабильности продукта и снижению механических характеристик

ления в дисперсной фазе. В табл. 5 представлены основные преимущества и недостатки эмульсионной полимеризации.

В последние годы основные направления совершенствования установок полимеризации стирола были сосредоточены на повышении автоматизации процесса, энергоэффективности производства, снижении затрат и минимизации экологических рисков.

Одним из вариантов повышения эффективности производства полистирола является совершенствование методов автоматизации технологического процесса. Эффективная автоматизация позволяет детально контролировать процесс для достижения требуемых показателей качества продукции. Так, например, использование SCADA – системы для автоматизации реактора полимеризации стирола показывает существенный рост управляемости процессом по сравнению с обычными программируемыми логическими контроллерами, которые ранее использовали крупные производители [9].

Другим направлением совершенствования процесса полимеризации стирола является оптимизация условий реакции, в том числе температуры, давления и скорости перемешивания, а также применение новых высокоэффективных инициаторов. Правильно подобранные условия процесса повышают эффективность работы установок производства полистирола, а также позволяют

Рис. 8

Конверсия стирола при использовании моnofункционального и бифункционального инициаторов

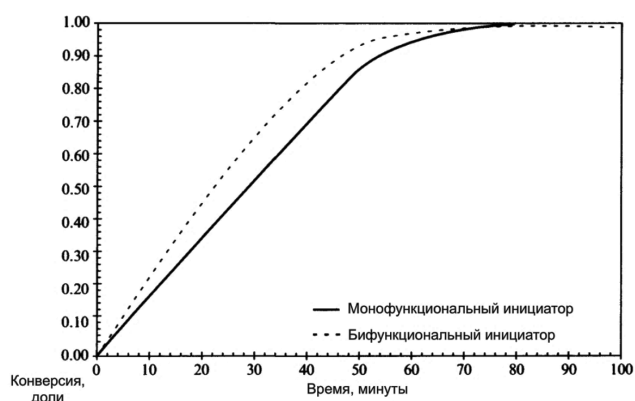


Рис. 9

Средняя молекулярная масса полимера при использовании моnofункционального и бифункционального инициаторов

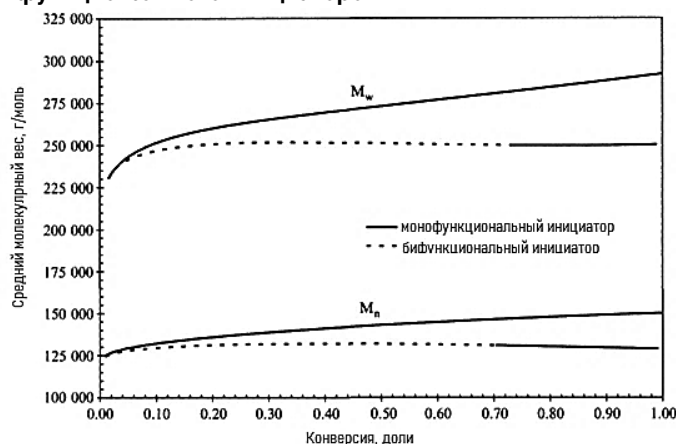


Таблица 6

Основные параметры экологического контроля на производстве полистирола

Контрольная точка	Требование экологического стандарта	Показатель
Сырьевой склад	Выбросы по ПДК, пожарная безопасность	Температурный режим $\leq 25^{\circ}\text{C}$. Влажность на складе $\leq 75\%$ ПДК полистирольной пыли = $5\text{ (мг/м}^3\text{)}$
Первый реактор	Энергоэффективность, контроль технологических параметров, выбросы ПДК	Выбросы загрязняющих веществ: этилбензол, ПДК – $0,42\text{ г/кг}$ продукции; оксид углерода, $20\text{ (мг/м}^3\text{)}$; бензол, $5\text{ (мг/м}^3\text{)}$; формальдегид $0,5\text{ (мг/м}^3\text{)}$; бензальдегид, $5\text{ (мг/м}^3\text{)}$; дибутилфталат, (мг/м^3) ; изопентан, $300\text{ (мг/м}^3\text{)}$; толуол, $50\text{ (мг/м}^3\text{)}$; этилбензол, $50\text{ (мг/м}^3\text{)}$; изопропилбензол, (мг/м^3) ; углекислый газ, $9000\text{ (мг/м}^3\text{)}$
Второй реактор	Энергоэффективность, контроль технологических параметров, выбросы ПДК	

получать полистирол различных марок с заданными свойствами. Так, использование специально разработанного температурного профиля реактора в сочетании с селективными моно- или бифункциональными инициаторами позволяет уменьшить время реакции при сохранении желаемых значений конверсии стирола и небольшого разброса молекулярной массы. На рис. 8 и 9 представлены результаты применения бифункционального инициатора Luperox 101, разработанного компанией Arkema. В качестве инициатора использовали 2,5 диметил-2,5-бис (трет-бутилперокси)-гексан в количестве $0,002\text{ моль/л}$ стирола [10].

Важным направлением модернизации действующих производств является повышение энергоэффективности процесса полимеризации, поскольку реакция сопровождается значительными затратами энергии. Повышение энергоэффективности может снизить эксплуатационные расходы и добиться стабильности при получении продукта определенных марок. Для достижения этих целей перспективным является применение пинч-анализа – методологии, основанной на термодинамическом анализе системы технологических потоков. Такой подход позволяет минимизировать энергопотребление химических процессов и оптимизировать системы рекуперации тепла и энергоснабжения, а также максимально эффективно использовать новое оборудование в условиях эксплуатации действующего объекта. Так, при точном выборе минимальной разности температур и перенаправлении потоков непрореагировавшего стирола на обогрев иных технологических потоков, с помощью пинч-технологии можно снизить затраты на экс-

плуатацию реактора почти на 15%, что может составлять до 89–95 тысяч долларов США [11].

Производство полистирола сопровождается также довольно значительными экологическими проблемами, основными из которых являются выбросы токсичных веществ (стирол, ингибиторы) в атмосферу, загрязнение водоемов сточными водами и почвы частицами микропластика и полистирольной пылью. Необходимо рассматривать экологические риски на всех этапах производства полистирола и учитывать соответствие выпускаемой продукции критериям экологичности. Современный подход к оценке качества производства материала заключается в расчете комплексного критерия экологической безопасности

производства полистирола. Каждый критерий характеризуется набором показателей, среди которых определяется репрезентативный. Разработаны алгоритмы расчета комплексного критерия экологической безопасности при производстве полистирола (табл. 6).

Анализ модели процесса производства полистирола позволил установить операции, на которых выявлены экологические риски и установлены предельные численные значения репрезентативных показателей в соответствии с нормативной документацией. Для каждой ответственной операции разработаны мероприятия по минимизации выброса вредных веществ. В результате модель системы управления была оптимизирована для всех ответственных производственных операций [12].

Заключение

Анализ современного этапа развития рынка полистирола и технологий его получения свидетельствует о влиянии на него огромного количества факторов. Основными направлениями, которые позволяют развивать производства полистирола в России, являются: снижение себестоимости продукции, повышение качества получаемого полистирола, повышение экологической безопасности производства, повышение потребления полистирола на внутреннем рынке, расширение ассортимента выпускаемых марок. Изучение динамики производства полистирола, а также основных тенденций в развитии технологий позволит сформировать оптимальный баланс спроса и предложения для развития рынка полистирола в России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Marianne G. Brydson's Plastics Materials / G. Marianne. – Loughborough : Butterworth-Heinemann, 2016. 892 с.
- Polystyrene Market Overview. GlobeNewswire. URL: <https://www.globenewswire.com/en/news-release/2022/11/02/2546668/0/en/Polystyrene-Market-Worth-USD-39-50-Billion-by-2030-Witnessing-a-CAGR-of-5-50-Report-by-Market-Research-Future-MRFR.html> (дата обращения: 04.01.2023).
- Волкова А.В. Рынок крупнотоннажных полимеров URL: <https://dcenter.hse.ru/data/2020/07/07/1595325171/Рынок%20крупнотоннажных%20полимеров-2020.pdf> (дата обращения: 06.01.2023)
- Polystyrene Market - Growth, Trends, Covid-19 Impact, and Forecasts (2023-2026). URL: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/polystyrene-market> (дата обращения: 1.12.2021)
- Комарова Т.В., Еренков О.Ю. Выбор и обоснование технологии производства полистирола / Сб. науч. тр. 4-й межд. молодеж. науч. конф. «Юность и знания-гарантия успеха-2017». Курск: Университетская книга, 2017. Т. 2. С. 82-84.
- Kocyigit, Finally & Yalcin, Necati. (2019). Batch Reactor Design for Polystyrene Production. Nevsehir Science and Technology Journal. 137-144. 10.17100/nevsehir.556835.
- OKUDAIRA, G., KAMOGAWA, K., SAKAI, T., SAKAI, H., & ABE, M. (2003). Suspension Polymerization of Styrene Monomer without Emulsifier and Initiator. Journal of Oleo Science, 52(3), 167–170.
- Capek, I. (2004). Sterically Stabilized Emulsion Polymerization of Styrene. Polymer Journal, 36(2), 96–107.
- Hosen, M. A., Khosravi, A., Nahavandi, S., & Creighton, D. (2013). Control of Polystyrene Batch Reactor Using Fuzzy Logic Controller. 2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. doi:10.1109/smc.2013.768.
- Gao, J., Hungenberg, K. D., & Penlidis, A. (2004). Process modelling and optimization of styrene polymerization. Macromolecular Symposia, 206(1), 509–522. doi:10.1002/masy.200450239.

11. Rosyad Adrian Febriansyar, Nadya Umami Azizah, and Widayat "Optimization heat integration of preliminary plant design of styrene monomer into polystyrene", AIP Conference Proceedings 2453, 020078 (2022).
12. Lisienkova, Liubov & Nosova, Lyudmila & Shindina, Tatiana & Komarova,

Liudmila & Baranova, Ekaterina & Kozhinov, Dmitry. (2022). Assessing the Compliance of Extrusion Foamed Polystyrene Production with the Environmental Standards Requirements. *Civil Engineering Journal*. 8. 2305-2317. 10.28991/CEJ-2022-08-10-018.

REFERENCES

1. Marianne G. *Brydson's plastics materials*. Loughborough, Butterworth-Heinemann Publ., 2016. 892 p.
2. *Polystyrene market overview*. *GlobeNewswire* Available at: <https://www.globenewswire.com/en/news-release/2022/11/02/2546668/0/en/Polystyrene-Market-Worth-USD-39-50-Billion-by-2030-Witnessing-a-CAGR-of-5-50-Report-by-Market-Research-Future-MRFR.html> (accessed 4 January 2023).
3. Volkova A.V. *Rynok krupnotonnazhnykh polimerov* (Large-tonnage polymers market) Available at: <https://dcenter.hse.ru/data/2020/07/07/1595325171/Rynok%20krupnotonnazhnykh%20polimerov-2020.pdf> (accessed 6 January 2023)
4. *Polystyrene market - growth, trends, covid-19 impact, and forecasts (2023-2026)* Available at: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/polystyrene-market> (accessed 1 December 2021)
5. Komarova T.V., Yerenkov O.YU. Vybora i obosnovaniye tekhnologii proizvodstva polistirola [Selection and justification of polystyrene production technology]. *Trudy 4-y mezhd. molodezh. nauch. konf. «Yunost' i znaniya-garantiya uspekha-2017»* [Proc. of 4th int. youth scientific conf. "Youth and knowledge is a guarantee of success-2017"]. Kursk, 2017, pp. 82-84.
6. Kocyigit, Yalcin N. Batch reactor design for polystyrene production. *Nevsehir Science and Technology Journal*, 2019, pp. 137-144.
7. Okudaira G., Kamogawa K., Sakai T., Sakai H., Abe M. Suspension polymerization of styrene monomer without emulsifier and initiator. *Journal of Oleo Science*, 2003, vol. 52(3), pp. 167-170.
8. Capek I. Sterically stabilized emulsion polymerization of styrene. *Polymer Journal*, 2004, vol. 36(2), pp. 96-107.
9. Hosen M. A., Khosravi A., Nahavandi S., Creighton D. (2013). Control of polystyrene batch reactor using fuzzy logic controller. *Proc. of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*. 2013.
10. Gao J., Hungenberg K. D., Penlidis A. Process modelling and optimization of styrene polymerization. *Proc. of Macromolecular Symposia*. 2004, pp. 509-522.
11. Rosyad Adrian Febriansyar, Nadya Umami Azizah, Widayat. Optimization heat integration of preliminary plant design of styrene monomer into polystyrene. *Proc. of AIP Conference*. 2022.
12. Lisienkova L., Nosova L., Shindina T., Komarova L., Baranova E., Kozhinov D. Assessing the compliance of extrusion foamed polystyrene production with the environmental standards requirements. *Civil Engineering Journal*, 2022.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Жагфаров Фирдавес Гаптелфартович, д.т.н., проф., завкафедрой газохимии, РГУ нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина.

Григорьева Наталья Анатольевна, к.х.н., доцент кафедры газохимии, РГУ нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина.

Краюшкин Федор Андреевич, магистрант кафедры газохимии, РГУ нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина.

Firdaves G. Zhagfarov, Dr. Sci. (Tech.), Prof., Head of the Department of Gas Chemistry, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University).

Natalya A. Grigoryeva, Cand. Sci. (Chem.), Assoc. Prof. of the Department of Gas Chemistry, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University).

Fedor A. Krayushkin, Undergraduate of the Department of Gas Chemistry, Russian State University of Oil and Gas (National Research University).

