

*Кутлиев Р.Р.,*

*студент,*

*факультет «технологии и переработки каучуков и эластомеров»*

*Казанский химико-технологический институт*

*Россия, г. Казань*

## **ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ ЭТИЛЕНА НА ЗАВОДАХ ПОЛИМЕРОВ: СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ**

***Аннотация:** В статье рассмотрены современные технологии полимеризации этилена для производства полиэтилена низкой и высокой плотности на заводах полимеров, включая процессы высокодавления, низкого давления с газофазными и суспензионными методами. Проанализированы каталитические системы на основе хрома, циркония и металлоценов, методы контроля молекулярно-массового распределения и снижения энергозатрат. Особое внимание уделено инновационным подходам к повышению выхода продукта и экологической безопасности.*

***Ключевые слова:** этилен, полимеризация, полиэтилен, каталитические системы, молекулярно-массовое распределение.*

***Annotation:** This article reviews modern ethylene polymerization technologies for producing low- and high-density polyethylene at polymer plants, including high-pressure, low-pressure gas-phase, and slurry processes. Catalytic systems based on chromium, zirconium, and metallocenes are analyzed, along with methods for controlling molecular weight distribution and reducing energy costs. Special focus is on innovative approaches to increase product yield and environmental safety.*

*Key words: ethylene, polymerization, polyethylene, catalytic systems, molecular weight distribution.*

## **Введение**

Полимеризация этилена является основным процессом на заводах полимеров для получения полиэтилена, используемого в производстве пленок, труб и упаковки. Ключевые методы включают высокодавленную полимеризацию радикальным механизмом и низкодавленную координационную полимеризацию с использованием гетерогенных катализаторов. Современные вызовы — это достижение узкого молекулярно-массового распределения (ММР), минимизация примесей и снижение энергопотребления при сохранении высокой производительности.

## **Высокодавленная полимеризация**

Этот метод использует пероксидные инициаторы при 150–300 МПа и 150–300°C, обеспечивая производство ПЭНП с разветвленной структурой. Преимущества — простота аппаратуры, но высокие энергозатраты. Современные улучшения включают трубные реакторы с многозонным подачей инициатора для контроля ММР.

## **Низкодавленная газофазная полимеризация**

Применяются катализаторы Филипса (Cr/SiO<sub>2</sub>) или Ziegler-Natta (TiCl<sub>4</sub>/MgCl<sub>2</sub>) в кипящем слое при 0,1–3 МПа и 80–110°C. Селективность достигает 99%, выход — до 10 т/м<sup>3</sup> катализатора/ч. Metallocеновые катализаторы позволяют синтезировать ПЭ с точным контролем комономеров (бутен-1, гексен-1).

*Таблица 1.*

### **Сравнение параметров низкодавленных процессов**

<b>Параметр</b>	<b>Газофазный (Unipol)</b>	<b>Суспензионный (слурри)</b>
Давление, МПа	1,5–2,5	0,5–1,0

Температура, °С	85–110	80–100
Выход, кг/г кат.	5000–10000	3000–8000
ММР (PDI)	3–5	4–7

### Очистка сырья и контроль примесей

Сырьевой этилен очищается от воды, кислорода и ацетилена гидрированием на Pd-катализаторах и молекулярными ситами. Бутен-1 как комономер требует полимеризационной чистоты (>99,9%), что достигается этерификацией изобутена и олигомеризацией бутадиена, интегрированными в полимерный комплекс. Это снижает дефекты ПЭ и повышает качество.

*Таблица 2.*

### Параметры очистки этилена для полимеризации

Примесь	Исходное содержание, ppm	После очистки, ppm	Метод
Вода	10–50	<1	Мол. сита
Ацетилен	5–20	<0,5	Гидрирование
Изобутен (в С4)	5–10%	≤0,01%	Этерификация

### Современные достижения и перспективы

- Разработка металlosenовых и пост-металlosenовых катализаторов для ПЭ с PDI<2 и высокой ударной вязкостью.
- Интеграция AI для онлайн-мониторинга ММР и оптимизации режимов.
- Переход к энергосберегающим суспензионным процессам с рециклом мономеров.
- Экологичные катализаторы без хлора, снижающие отходы на 20–30%.

- Использование биокомномеров для биоразлагаемого ПЭ.

### **Экологические и экономические аспекты**

Низкодавленные процессы снижают энергозатраты на 50% по сравнению с высокодавленными, а рекуперация тепла — на 15–20%. Экологию улучшают замкнутые циклы и катализаторы с низким содержанием металлов. Экономия достигается за счет выхода >5000 кг/г и снижения брака ПЭ до <0,5%.

### **Заключение**

Технологии полимеризации этилена эволюционируют к высокой селективности, энергоэффективности и экологичности, интегрируясь с очисткой мономеров типа бутена-1. Новые катализаторы и цифровизация обеспечат рост производительности заводов полимеров. Дальнейшие инновации расширят применение ПЭ в устойчивой химии.

### **Использованные источники:**

1. Технология получения бутена-1 полимеризационной чистоты // Dissercat. URL: <https://www.dissercat.com/content/tekhnologiya-polucheniya-butena-1-polimerizatsionnoi-chistoty> (дата обращения: 20.04.2026).
2. Состояние промышленных технологий получения бутена-1 // CyberLeninka. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sostoyanie-promyshlennyh-tehnologiy-polucheniya-butena-1-polimerizatsionnoy-chistoty> (дата обращения: 20.04.2026).
3. Технология получения бутена-1 полимеризационной чистоты // dslib.net. URL: <http://www.dslib.net/nefte-xim/tehnologija-poluchenija-butena-1-polimerizacionnoj-chistoty.html> (дата обращения: 20.04.2026).