

# ХИМИЯ

УДК 541.6

## ИССЛЕДОВАНИЕ СРАВНИТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИЭТИЛЕНА ТРУБНЫХ МАРОК

Алтуева А.М.\*<sup>1</sup>, Алтуев М.Х., Гринева Л.Г., Балаева С.М.,  
Бесланеева З.Л., Хутов А.М., Мирзоева Н.М.

*Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова*

*\*k-a.albina@mail.ru*

**Аннотация.** В статье обсуждается новый класс сополимеров этилена- $\alpha$ -олефина, известного как PERT (полиэтилен с повышенной температурной устойчивостью), который демонстрирует улучшенные физико-химические характеристики. К числу таких характеристик можно отнести высокую термостабильность в условиях гидростатических и гидродинамических нагрузок, а также механические и диффузионные свойства. Особенностью PERT является то, что необходимая прочность при высоких температурах достигается без необходимости в сшивке макромолекул, благодаря уникальной кристаллической структуре этих материалов. С учетом его универсальности полиэтилен PERT рекомендуется при производстве труб, предназначенных для горячего водоснабжения и отопительных систем.

**Ключевые слова:** линейный полиэтилен, сомономер, полиэтилен высокой плотности (ПЭВП), сополимер этилена- $\alpha$ -олефина PERT

## STUDY OF COMPARATIVE CHARACTERISTICS OF POLYETHYLENE PIPE GRADES

Altueva A.M., Altuev M.Kh., Grineva L.G., Balaeva S.M.,  
Beslaneeva Z.L., Khutov A.M., Mirzoeva N.M.

*Kabardino-Balkarian State University*

**Abstract.** This article discusses a new class of ethylene- $\alpha$ -olefin copolymers known as PERT (polyethylene with enhanced temperature stability), which exhibit improved physical and chemical properties. These properties include high thermal stability under hydrostatic and hydrodynamic loads, as well as mechanical and diffusion properties. A special feature of PERT is that the required strength at high temperatures is achieved without the need for cross-linking of macromolecules, due to the unique crystalline structure of these materials. Given its versatility, polyethylene PERT is recommended for the production of pipes intended for hot water supply and heating systems.

**Keywords:** linear polyethylene, co-monomer, high-density polyethylene (HDPE), ethylene- $\alpha$ -olefin copolymer, PERT

Недавние прорывы в катализитической полимеризации и технологиях привели к созданию ряда сополимеров этилен- $\alpha$ -олефина с усовершенствованными свойствами. Новый класс полимеров, полученных из химически модифицированных сомономерных полиэтиленов – PERT, демонстрирует улучшенные физико-химические характеристики, включая прочность на деформацию, теплопроводность и другие техноло-

гические параметры. Значительное улучшение исходных свойств, особенно устойчивости к высоким температурам и термостабильности под воздействием статических, динамических, механических и циклических нагрузок, достигается благодаря оптимальному соотношению длины поперечных ветвей, молекулярной массы и распределения молекулярных масс, что влияет на взаимосвязь «структура – свойства».

Важным отличием этого класса полиэтиленов является то, что новый уровень свойств достигается без структурирования (сшивания) полимера. Прямая модификация свойств полиэтилена путем структурирования (сшивания) в принципе не приводит к долговременному упрочнению материала, а возможность протекания конкурирующих реакций между деструкцией и структурированием усложняет переработку из расплава [3]. Улучшенные свойства PERT, по сути, обусловлены тем, что его можно использовать при гидростатическом давлении до 10 кг/см<sup>2</sup> и 110 °С, что позволяет универсально применять композиционные материалы на основе PERT при изготовлении труб горячего и холодного водоснабжения и отопления, работающих в условиях гидростатического и гидродинамического давления (в том числе циклического). Эти качества PERT позволяют ему успешно конкурировать на рынке с распространенными в настоящее время полиэтиленовыми аналогами и медными трубами; трубы PERT значительно превосходят медные трубы по прочности и стойкости к трещинам, что обуславливает более длительный срок службы, лучшую коррозионную стойкость и простоту монтажа и эксплуатации. Кроме того, по сравнению с другими аналогами полиэтилена, трубы PERT отличаются стабильностью долгосрочных свойств, в том числе при высоких температурах и в агрессивных коррозионных средах, легкостью переработки из расплавленного состояния и экономической эффективностью.

Большое улучшение взаимосвязи между структурой и свойствами в PERT обусловлено преимущественно статически контролируемой формой морфологии в сомономерах этилена- $\alpha$ -олефина, по сравнению с линейными и сшитыми структурами. Это означает, что новый молекулярный дизайн и способ укладки формирующихся монокристаллитов играют важную роль (рис. 1).

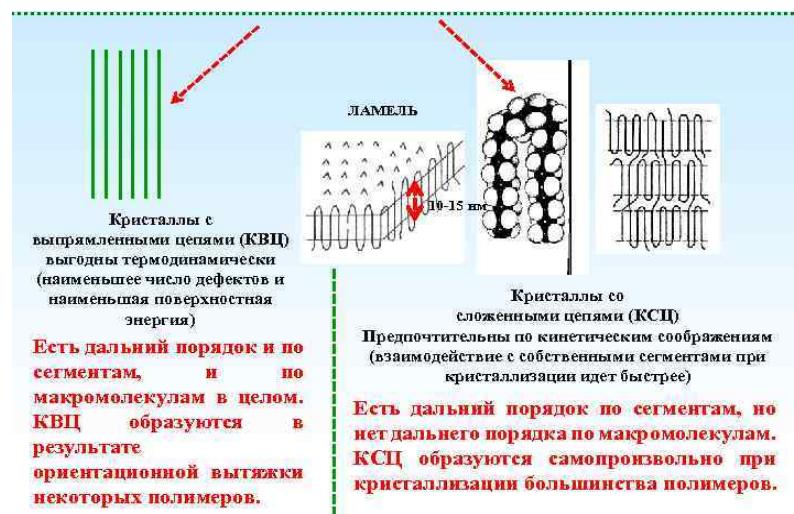


Рис. 1. Кристаллические полимеры и уровни организации гомополиэтиленов

В линейном полиэтилене не наблюдается образование более полных слоистых кристаллических структур (слоистых монокристаллов), в то время как в PERT с использованием октен-1 и гексана в качестве боковой ветви стерические препятствия приводят к образованию неполных центров кристаллической структуры, которые, по-видимому, способствуют увеличению свободного микрообъема и конформационного потенциала. Последний обеспечивает лучшее тепловое квазиравновесие всей структуры в статических и циклических динамических условиях.

Прочность матрицы полиэтилена с разветвленной структурой (PERT) существенно зависит от архитектуры полимерной цепи. Ключевым фактором, определяющим механические свойства PERT, является увеличение концентрации длинных разветвлений и вклад межфазных областей, образующихся при использовании сомономеров, таких как октен-1 или гексан. Эти сомономеры, в отличие от коротких

метильных групп, вводят в полимерную цепь протяженные боковые ответвления. Длинные разветвления подобно «якорям» связывают между собой отдельные полимерные цепи, образуя более плотную и устойчивую трехмерную сеть. Это приводит к значительному упрочнению матрицы PERT по сравнению с линейным полиэтиленом, который характеризуется менее развитой структурой и, следовательно, более слабыми межмолекулярными взаимодействиями. Более подробно механизм упрочнения можно объяснить с точки зрения конформационной энтропии и межмолекулярных взаимодействий. В линейном полиэтилене цепи относительно свободно перемещаются, что приводит к высокой конформационной энтропии. При деформации материала эти цепи переориентируются, что способствуют пластической деформации и низкой прочности. Наличие длинных разветвлений в структуре PERT ограничивает подвижность полимерных цепей, снижая конформационную энтропию. Это, в свою очередь, приводит к увеличению энергии, необходимой для деформации материала и, как следствие, повышает его прочность и жесткость.

Кроме того, протяженные разветвления создают дополнительные точки контакта между полимерными цепями усиливая, межмолекулярные взаимодействия. Эти взаимодействия вносят значительный вклад в когезию полимерной системы. В межфазных областях, образующихся вблизи длинных разветвлений, концентрация таких взаимодействий особенно высока, что дополнительно укрепляет матрицу. Наличие сомономеров также может влиять на кристаллическую структуру PERT. Включение октена-1 или гексана снижает степень кристалличности, создавая аморфные области между кристаллитами. Это может привести к некоторому снижению жесткости, однако увеличение межмолекулярных взаимодействий в аморфных областях, благодаря длинным разветвлениям, компенсируют этот эффект, обеспечивая высокую общую прочность. Сравнение с линейным полиэтиленом показывает, что PERT обладает существенно лучшими механическими характеристиками, включая повышенную прочность на разрыв, ударную вязкость и модуль упругости. Более «разрыхленная» структура PERT обеспечивает повышенный диссипативный потенциал, что означает большую способность поглощать энергию при деформации. Это особенно важно при ударных нагрузках, когда PERT демонстрирует значительно высокую сопротивляемость разрушению, по сравнению с линейным полиэтиленом. Выбор типа и концентрации сомономера позволяет регулировать свойства PERT, подбирая оптимальное соотношение прочности, жесткости и ударной вязкости для конкретных применений. Таким образом, использование сомономеров с длинными боковыми цепями является эффективным методом модификации структуры и свойств полиэтилена, что позволяет создавать материалы с улучшенными механическими характеристиками (рис. 2).

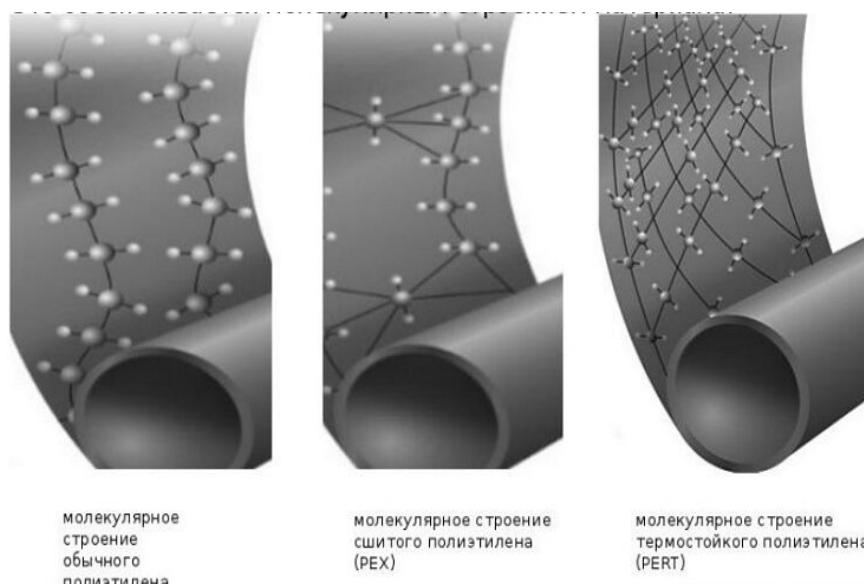


Рис. 2. Молекулярное строение различных марок полиэтилена

Еще одним важным фактором является возрастающее влияние олефинов (C=5; 6) на вероятность получения разветвленных полимеров.

Управляемый статистический уровень существующих мономеров (рис. 3) дает возможность существенно увеличить морфологические возможности в PERT, что благоприятно влияет на взаимосвязь между структурой и свойствами.

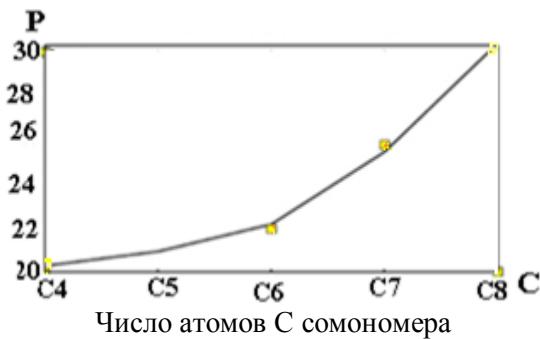


Рис. 3а. График зависимости вероятности формирования макромолекул с разветвлениями от числа атомов углерода

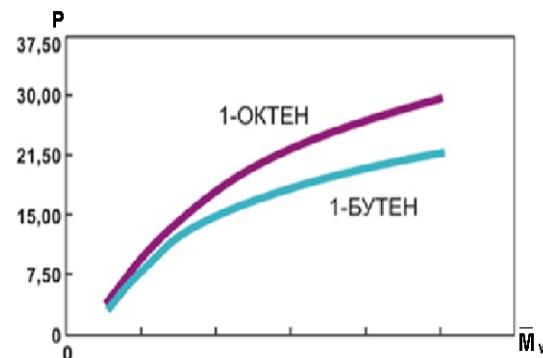


Рис. 3б. Зависимость вероятности P формирования макромолекул с разветвлениями P от  $M_w$

Большой интерес представляет сравнительный анализ некоторых свойств полиэтилена марки PERT, с другими аналогичными продуктами трубных марок полиэтилена, пользующихся большим спросом на рынке (таблица).

Таблица

Основные сравнительные характеристики полиэтиленов трубных марок – газофазного полиэтилена низкого давления (ГПЭНД) и полиэтилена низкого давления марки PERT

№ п/п	Свойства	ГПЭВП	PERT
1.	ПТР, 190 °C; 2,16 кгс, г/ 10 мин	0,3–0,5	0,85
2.	Плотность, г/см <sup>3</sup>	0,953–0,957	0,941
3.	Кратковременное воздействие максимальной рабочей температуры, °C	105–110	124,56
4.	Рабочая температура, °C	95–100	95–110
5.	Теплопроводность BT (М·к) при 60 °C (ASTM 177)	0,4–0,5	0,4
6.	Модуль эластичности (ISO 527)	~ 500	~ 650
7.	Напряжение при растяжении, МПа (ГОСТ 11262-80)	21,0	21,0

Исследование свойств двух видов ПЭНД показывает, что термические характеристики материала марки PERT значительно превышают аналогичные механические свойства. Более того, меньшая вязкость расплава PERT (ПТР примерно равен 1/ММ, где ММ – молекулярная масса,  $\eta$  – вязкость расплава) положительно сказывается на процессе переработки.

Ключевыми областями для дальнейшего улучшения свойств ПЭНД марки PERT являются: сцепление с металлами, огнеупорность и антимикробные свойства. С точки зрения механических, теплофизических и реологических свойств ПЭНД марки PERT демонстрирует хороший потенциал для комбинирования с соответствующими материалами. В этой области проводятся активные исследования и уже получены обнадеживающие результаты, которые сейчас обрабатываются и готовятся к публикации.

### Библиография

1. Куликовская К.А., Водяков В.Н., Шабарин А.А. Исследование физико-механических и реологических характеристик нанокомпозитов сверхвысокомолекулярного полиэтилена // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2019. № 11. С. 113–116.
2. Древаль В.Е. и др. Влияние природы и содержания звеньев разветвленных альфа-олефинов на физико-химические характеристики линейного полиэтилена // Высокомолекулярные соединения. 1991. Т. 33, № 11. С. 84.
3. Ozden S., Hatsukova M.A., Mashukov N.I., Kozlov G.V. Mechanisms of stabilization of high density polyethylene against oxidation using highly dispersed Fe–FeO mixtures // Plastics, Rubber and Composites. 2000. V. 29, N 5. P. 212–215.
4. Богданова О., Бабичев А. Трубопроводы в агрессивных средах // Химическая промышленность сегодня. 2020. № 6. С. 18–20.
5. Архипова З.В., Григорьев В.А., Веселовская Е.В. Полиэтилен низкого давления. Л.: Химия, 1980. 240 с.
6. Нехаева Л.А. и др. Синтез и строение гомо- и сополимеров этилена с другими альфа-олефинами, полученных с участием производных цирконоцендихлоридов и металалюмоксана // Высокомолекулярные соединения А. 1992. Т. 34, № 1. С. 84–91.
7. Распопов Л.Н., Белов Г.П. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен. Синтез и свойства // Пластические массы. 2008. № 5. С. 16.