

Многофункциональный полиэтиленимин: физико-химические свойства и современные области применения

Томирис Нурлыбаева*, Гузель Абилова, Жанагуль Махамбетова, Задагул Сұлтамұратова, Гулмира Жакупова

Актюбинский региональный университет им. К. Жубанова, Актобе, Казахстан; diable.samaaa@gmail.com, guzelab82@mail.ru, mahambetova25@mail.ru, zadasb@mail.ru, gulmira.zhakupova80@bk.ru

*Корреспонденция: diable.samaaa@gmail.com

Цитирование: Нурлыбаева, Т., Абилова, Г., Махамбетова, Ж., Султамұратова, З., Жакупова, Г.
Многофункциональный полиэтиленимин: физико-химические свойства и современные области применения (2025). Вестник ЕНУ имени Л.Н. Гумилева. Серия: Химия. География. 153(4), 56-73.
<https://doi.org/10.32523/2616-6771-2025-153-4-56-73>

Академический редактор:
Э.Е. Копишев

Поступила: 16.05.2025
Исправлена: 08.10.2025
Принята: 15.10.2025
Опубликована: 24.12.2025



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

Аннотация. Полиэтиленимин (ПЭИ) представляет собой синтетический полимер с высокой плотностью аминогрупп, что обуславливает его выраженные физико-химические свойства и широкие возможности структурной модификации. Благодаря сочетанию высокой реакционной способности, термической устойчивости и способности к комплексообразованию, ПЭИ рассматривается как один из наиболее универсальных полимеров современности. В обзорной статье систематизированы современные данные о методах получения линейного и разветвлённого полиэтиленимина, включая анионную полимеризацию азиридина, катионную полимеризацию 2-оксазолинов и кислотный гидролиз поли(2-этил-2-оксазолина). Проанализировано влияние выбранного метода синтеза на молекулярную архитектуру, степень полидисперсности и распределение функциональных групп, что определяет растворимость, структурную стабильность и конформационные особенности полимера.

Особое внимание уделено ключевым физико-химическим характеристикам ПЭИ: способности к образованию координационных комплексов с ионами металлов, устойчивости к термическому и химическому воздействию, а также зависимости его поведения от pH среды. Приведены современные представления о применении ПЭИ в генной терапии и системах доставки лекарственных средств, где катионная природа полимера обеспечивает эффективное связывание и транспорт нуклеиновых кислот. Рассмотрены результаты исследований, подтверждающих эффективность ПЭИ как сорбционного материала для удаления тяжёлых металлов и органических загрязнений в процессах очистки воды, а также его использование в антимикробных покрытиях и биоматериалах медицинского назначения.

Обсуждаются перспективные подходы к повышению биосовместимости и снижению цитотоксичности полиэтиленимина за счёт химической модификации, создания композитных систем и функционализации природными биополимерами. Суммированные данные подтверждают, что полиэтиленимин представляет собой многофункциональный материал нового поколения, сочетающий структурную гибкость, высокую адаптивность и потенциал

применения в медицине, фармацевтике, экологии и современных технологиях материаловедения.

Ключевые слова: разветвлённый полиэтиленимин (р-ПЭИ), линейный полиэтиленимин (л-ПЭИ), поли(2-этил-2-оксазолин), кислотный гидролиз, анионная полимеризация, катионная полимеризация.

1. Введение

Полиэтиленимин (ПЭИ) – это синтетический полимер, содержащий многочисленные аминокгруппы, что придаёт ему уникальные свойства и широкие возможности для модификации. Различают две основные формы ПЭИ: разветвлённый (р-ПЭИ) и линейный (л-ПЭИ). Линейная форма обладает более упорядоченной структурой, что делает её предпочтительной для применения в биомедицинских технологиях, включая доставку лекарственных препаратов, генную терапию и создание антимикробных покрытий.

История ПЭИ берет начало в развитии синтетических полимеров в середине XX века. ПЭИ был впервые синтезирован в 1965 году путем полимеризации азиридина (Zhuk et al., 1965). Данный метод синтеза привел к образованию как линейных, так и разветвленных форм полиэтиленимина. Эта новаторская работа заложила основу для разработки ПЭИ как универсального полимера с различными промышленными и научными приложениями. В 1983 году Tanaka и его коллеги синтезировали высокомолекулярный л-ПЭИ с уникальными физико-химическими свойствами путем кислотно-катализируемой дебензоилизации поли(N-бензоилэтиленимина). Эти свойства делают л-ПЭИ перспективным материалом для разработки многофункциональных катализаторов и других применений, где необходимы высокая структурная однородность и возможность модификации полимера (Tanaka et al., 1983). В 1988 году Weyts и Goethals представили новый метод синтеза линейного ПЭИ, который значительно улучшил эффективность и выход процесса полимеризации. Это достижение позволило более стабильно производить линейный ПЭИ с желаемым распределением молекулярной массы, что повысило его применимость в различных областях (Weyts & Goethals, 1988).

В 1995 году Boussif и его коллеги продемонстрировали, что ПЭИ может эффективно способствовать доставке ДНК в клетки, делая его мощным инструментом для генной терапии и исследований в молекулярной биологии. Это открытие было значимым, так как катионная природа ПЭИ позволяет ему образовывать стабильные комплексы с отрицательно заряженными молекулами ДНК, способствуя их проникновению в клетки и экспрессии генов (Boussif et al., 1995).

Открытие и развитие ПЭИ существенно повлияли на разнообразные научные и промышленные области. Современное развитие полимерных материалов и стремление к созданию многофункциональных систем для медицины, экологии и промышленности стимулируют исследование синтетических полимеров с высокой степенью адаптивности. Полиэтиленимин (ПЭИ) представляет собой один из таких полимеров, обладающий значительным потенциалом за счёт наличия большого количества реакционноспособных аминокгрупп. Это делает ПЭИ привлекательным объектом для применения в генной инженерии, системах доставки биоактивных веществ, сорбентах и антимикробных материалах.

Актуальность темы определяется не только высокой востребованностью ПЭИ в прикладных областях, но и отсутствием исчерпывающих данных по вопросам его направленного синтеза, структурной организации и регуляции свойств. Несмотря на наличие работ, посвящённых его использованию, в научной литературе сохраняется интерес к разработке новых, более безопасных и эффективных форм полиэтиленимина с заданными характеристиками.

Новизна исследования заключается в систематизации современных подходов к синтезу ПЭИ, включая малоизученные методы, такие, как контролируемый кислотный гидролиз поли(2-этил-2-оксазолина), а также сравнительный анализ анионной и катионной полимеризации азиридина. Кроме того, рассмотрены инновационные стратегии модификации ПЭИ с целью повышения его биосовместимости и снижения токсичности. Работа обладает как теоретической, так и прикладной значимостью. Теоретическая часть способствует углублению представлений о структуре, свойствах и реакционной способности полиэтилениминов, тогда как практическая направлена на оценку возможностей использования полученных данных при создании материалов нового поколения для биомедицины, водоочистки и антимикробной защиты.

2. Определение полиэтилениминов и их основные физико-химические свойства

Полиэтиленимины (ПЭИ) представляют собой полимерные молекулы, состоящие из повторяющихся звеньев аминогрупп и двух алифатических атомов углерода.

Полиэтиленимины доступны в двух формах – в виде разветвленного (р-ПЭИ) и линейного (л-ПЭИ) полиэтиленимина. Разветвленный ПЭИ имеет все типы первичных (-NH₂-), вторичных (-NH-), и третичных аминогрупп (-N-), тогда как линейный ПЭИ содержит только вторичные аминогруппы. Структура двух форм полиэтиленимина представлена на рисунке 1.

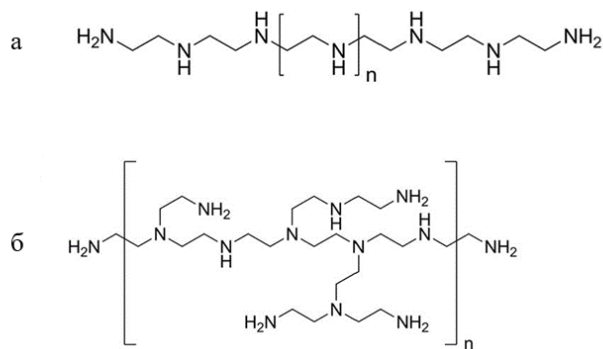


Рисунок 1. Структура линейного (а) и разветвленного (б) полиэтиленimina (Yu et al., 2022)

Низкомолекулярный ПЭИ является жидкостью, в то время как высокомолекулярный ПЭИ – эластомер. Плотность ПЭИ 1050–1070 кг/м³, ПЭИ является малотоксичным; растворим в воде, спиртах, уксусной кислоте. ПЭИ проявляет высокую термическую стабильность. Температура разложения превышает 300°С. Плавление ПЭИ затруднительно из-за его высокой вязкости, но термическое разложение начинается при температуре выше 150°С.

ПЭИ обладает высокой прочностью на растяжение и хорошей эластичностью. Механические свойства зависят от молекулярного веса и степени сшивки полимера. ПЭИ обладает высокой химической устойчивостью и может образовывать прочные комплексы с металлами и органическими молекулами. Полимер активно взаимодействует с кислотами и может быть легко модифицирован за счет протонирования аминогрупп.

Благодаря своему поликатионному характеру ПЭИ имеет множество применений. Свойства ПЭИ могут быть легко модифицированы изменением структуры цепи и молекулярного веса. л-ПЭИ отличается от р-ПЭИ своей более упорядоченной и кристаллической структурой, что влияет на его физические и химические свойства (von Zelewsky et al., 1993). Основные физико-химические свойства ПЭИ представлены в таблице (таблица 1).

Таблица 1. Основные физико-химические свойства ПЭИ

Название показателя	Показатели
Растворимость	ПЭИ обладает высокой растворимостью в воде благодаря наличию гидрофильных аминогрупп. Это свойство делает его идеальным кандидатом для формирования водорастворимых металлических комплексов.
Комплексообразование	ПЭИ демонстрирует высокую способность к связыванию металлических ионов из-за высокой локальной концентрации функциональных групп (аминогрупп). Это свойство позволяет ПЭИ эффективно образовывать комплексы с различными металлами, включая Cu^{2+} , Ni^{2+} и другие, что делает его важным материалом в координационной химии.
Стабильность	ПЭИ и его металлические комплексы обладают хорошей химической и физической стабильностью, что позволяет использовать их в различных химических реакциях и приложениях.
Конформационные свойства	ПЭИ имеет компактную конформацию в растворе, что обусловлено сильными взаимодействиями между соседними аминогруппами через водородные связи. Однако, несмотря на свою компактную форму, распределение функциональных групп не однородно, что приводит к наличию областей с высокой концентрацией аминов и других областей с их дефицитом.
Электростатические взаимодействия	ПЭИ демонстрирует поведение, подобное аллостерическим эффектам, где его химические свойства могут изменяться в зависимости от координации металлических ионов или протонирования. Это позволяет ПЭИ легко адаптироваться к наиболее благоприятной конфигурации для комплексообразования.
pH-зависимость	Поведение ПЭИ зависит от pH среды. В сильно кислых растворах ПЭИ находится в протонированном состоянии и не образует комплексы с металлами. В нейтральной и щелочной средах происходит образование гидроксо-комплексов, и конкуренция между аминогруппами и гидроксидом может привести к образованию смешанных комплексов.
Токсичность и биоактивность	ПЭИ продемонстрировал высокую токсичность в некоторых условиях, однако его способность связываться с анионами и низкомолекулярными биомолекулами может использоваться в биомедицинских приложениях, таких, как доставка лекарств и лечение раковых заболеваний.

Разветвленные формы ПЭИ показывают высокую эффективность трансфекции, но также сопряжены с более высокой токсичностью по сравнению с линейными формами. Различия в токсичности могут зависеть от молекулярной массы и архитектуры полимера.

Синтетические методы позволяют производить ПЭИ с молекулярной массой в диапазоне от 300 до 750,000 Да.

л-ПЭИ является твердым при комнатной температуре (температура плавления около 73–75 °С), тогда как р-ПЭИ является жидким, независимо от молекулярной массы. л-ПЭИ растворим в горячей воде при низком рН, а также в хлороформе, этаноле или метаноле. Физические свойства л-ПЭИ представлены ниже (таблица 2).

Таблица 2. Физические свойства л-ПЭИ

Название показателя	Показатели
Плотность	1.08 г/мл при 25°C
Температура кипения	250°C
Температура вспышки	43,3°C
Парциальное давление:	9 мм рт.ст. при 20°C
Индекс преломления	1.5290 при 20°C

Линейный полиэтиленимин в безводном состоянии имеет кристаллическую структуру в виде двойной спирали, выровненной вдоль оси с конвенциональной кристаллической решетки. Линейный полиэтиленимин обладает антибактериальными свойствами по отношению к различным патогенам, что позволяет использовать его в качестве бактериостатического агента (Yu et al., 2022).

3. Методы синтеза линейного полиэтиленимина

Существует множество способов получения л-ПЭИ с различными молекулярными массами и характеристиками.

Анионная и катионная полимеризация азиридина. Полимеризация азиридина осуществляется двумя основными методами: катионной и анионной полимеризацией. Катионная полимеризация азиридина приводит к образованию р-ПЭИ и характеризуется неконтролируемым ростом цепей, что приводит к широкому распределению молекулярной массы и сложности в регулировании структуры полимера. В отличие от нее, анионная полимеризация позволяет получать линейный полиэтиленимин с узким молекулярно-массовым распределением и предсказуемыми свойствами. Paul A. Rupar и др. разработали метод синтеза л-ПЭИ с использованием живой анионной полимеризации функционализированных азиридиновых мономеров. Этот метод обеспечивает точный контроль молекулярной массы, минимизирует полидисперсность и исключает образование амидных примесей, что делает его перспективным для биомедицинских и промышленных применений (Rupar et al., 2017). Tassilo Gleede и др. провели всесторонний анализ методов полимеризации азиридинов и азетидинов для получения полиаминов, с особым акцентом на синтез л-ПЭИ. Они подчеркнули важность стадии десульфирования, которая позволяет получать чистый л-ПЭИ после анионной полимеризации, а также сравнили эффективность различных инициаторов и растворителей (Gleede et al., 2019). Основные различия между методами катионной и анионной полимеризацией азиридина приведены в таблице 3.

Таблица 3. Сравнение катионной и анионной полимеризации азиридина

Параметр	Анионная полимеризация	Катионная полимеризация
Тип получаемого полиэтиленимина	Линейный	Разветвленный
Контроль молекулярной массы	Высокий (узкий индекс полидисперсности)	Низкий (широкий индекс полидисперсности)
Основные инициаторы	Щелочные металлы, органические основания (NaNH ₂ , LDA, KOBu)	Протонные кислоты, алкилгалогениды (BF ₃ , HCl, AlCl ₃)
Температура реакции	25–80°C	0–50°C
Механизм роста цепи	Нуклеофильное раскрытие кольца	Электрофильное раскрытие кольца
Полидисперсность	Узкая (индекс полидисперсности ≤ 1.10)	Широкая (индекс полидисперсности > 2.0)
Очистка продукта	Десульфирование для удаления защитных групп	Отсутствие стадий очистки

Следовательно, анионная полимеризация является более контролируемым и перспективным методом получения полиэтиленимина, в то время как катионная полимеризация применяется в случаях, когда требуется разветвленная структура полимера.

Катионная полимеризация 2-оксазолинов – это эффективный метод получения поли(оксазолинов), которые после гидролиза могут быть превращены в л-ПЭИ. Этот метод позволяет контролировать молекулярную массу, дисперсность и структуру полимеров, что делает его привлекательным для биомедицинских и промышленных приложений. Fangyu Hu и др. (Hu et al., 2014) исследовали катионную полимеризацию 2-оксазолинов с использованием трифлатов редкоземельных металлов (RE(OTf)₃) в качестве инициаторов. Такой подход позволил синтезировать поли(оксазолины) с высокой степенью контроля над молекулярной массой и узким распределением молекулярного веса. Кроме того, использование трифлатов редкоземельных металлов открывает возможности для создания сложных макромолекулярных структур, таких, как блок-сополимеры, с четко контролируемой архитектурой. С. Petit и коллеги (Petit et al., 2017) продемонстрировали, что применение ионных жидкостей в качестве реакционной среды и использование микрофлюидных технологий значительно ускоряют процесс полимеризации и улучшают контроль над молекулярной массой. Это особенно важно для синтеза л-ПЭИ, где точность молекулярных характеристик влияет на его конечные свойства. Кроме того, использование ионных жидкостей делает процесс более экологически чистым и энергоэффективным. Основные различия между методами катионной полимеризации 2-оксазолинов приведены в таблице 4.

Оба метода позволяют синтезировать поли(оксазолины), которые после гидролиза превращаются в л-ПЭИ, используемый в биомедицинских и промышленных технологиях.

Гидролиз поли(2-оксазолина) – это процесс, при котором полученный методом полимеризации ПОЗ обрабатывается кислотными или щелочными растворами, что приводит к удалению защитных групп и образованию л-ПЭИ. Особенно важно рассмотреть кислотный гидролиз, поскольку он не только эффективно удаляет защитные группы, но и позволяет целенаправленно регулировать молекулярные характеристики ПЭИ. Благодаря своей простоте и возможности оптимизации условий реакции этот метод становится все более востребованным в синтетической химии.

В следующей главе мы подробно рассмотрим кислотный гидролиз поли(2-этил-2-оксазолина), его механизмы, условия проведения и влияние на характеристики конечного продукта, что подчеркивает его ключевую роль в получении функциональных полимеров.

Таблица 4. Основные различия между методами катионной полимеризации 2-оксазолинов, использованными Hu et al. (Hu et al., 2014) и Petit et al. (Petit et al., 2017)

Параметр	Hu et al., 2014	Petit et al., 2017
Инициатор полимеризации	Редкоземельные трифлаты	Ионная жидкость
Растворитель	Нуклеофильный органический (например, толуол)	Ионная жидкость
Температура полимеризации	100–140°C	80–140°C
Время реакции	4–24 ч	2–6 ч (при микроволновом нагреве – 1–2 ч) контроль
Контроль молекулярной массы	Высокий, узкий индекс полидисперсности	Высокий, точный
Выход полимера	≈ 80–85 %	≈ 90 %
Скорость реакции	Средняя	Быстрая, особенно под микроволнами
Оборудование	Традиционный реактор с термостатом	Микрофлюидный реактор
Основные преимущества	Простота, воспроизводимость	Быстрый контроль, низкая полидисперсность, меньшая вязкость системы
Ограничения	Необходимость высоких температур	Требуется специализированное микрофлюидное оборудование

Кислотный гидролиз поли(2-этил-2-оксазолина). Кислотный гидролиз поли(2-этил-2-оксазолина) обычно инициируется в присутствии сильных кислот, таких как HCl. Этот процесс характеризуется превращением амидных групп в этилениминовые звенья, что приводит к образованию л-ПЭИ. Hanneke M. L. Lambermont-Thijs и др. исследовали кинетику кислотного гидролиза ПМОЗ и ПОЗ, устанавливая линейную зависимость между степенью гидролиза и временем реакции (Lambermont-Thijs et al., 2010). Важным аспектом этого метода является возможность точного контроля над процессом, что позволяет регулировать свойства конечного продукта. Работа Halacheva, V. D. и др. демонстрирует успешный синтез линейных и комбинированных полимеров на основе полиэтиленимина и поли(2-этил-2-оксазолина). Полученные полимеры обладают уникальными свойствами в водных растворах, включая термочувствительность и возможность формирования различных морфологий агрегатов (Halacheva et al., 2011). Lutz Tauhardt и др. исследовали оптимизированный метод синтеза л-ПЭИ через кислотный гидролиз поли(2-этил-2-оксазолина) с использованием микроволнового синтезатора. Авторы достигли высокой степени гидролиза и улучшенной чистоты конечного продукта (Tauhardt et al., 2011). Victor R. de la Rosa и др. предложили быстрый и надежный метод частичного гидролиза поли(2-этил-2-оксазолина) в линейные полиэтилениминовые сополимеры с возможностью контроля степени гидролиза (de la Rosa et al., 2014). Использование микроволнового излучения позволяет значительно сократить время реакции и повысить эффективность гидролиза без

риска разрушения полимерных цепей. Такой подход обеспечивает лучший контроль над степенью гидролиза и свойствами получаемого л-ПЭИ, что особенно важно для его дальнейшего использования в сложных технологических процессах. Maarten A. Mees и др. продемонстрировали, что контролируемый гидролиз позволяет получить полимеры с заданными свойствами, что имеет большое значение для разработки новых носителей для доставки генов и других биомолекул. В рамках этих исследований Mees совместно с Richard Hoogenboom провели кинетический анализ кислотного гидролиза поли(2-этил-2-оксазолина) для получения л-ПЭИ (Mees, 2017; Mees & Hoogenboom, 2018). В результате работы Ondrej Sedlacek и его коллег, был представлен метод получения л-ПЭИ через контролируемый кислотный гидролиз поли(2-этил-2-оксазолина) с последующей ациляцией (Sedlacek et al., 2018). Marius Bauer и др. получили л-ПЭИ путем полного кислотного гидролиза поли(2-оксазолинов), синтезированных методом катионной кольцевой полимеризации. Они описали синтез л-ПЭИ и частично гидролизованного поли(2-этил-2-оксазолина) как ключевой полимер для доставки генов (Bauer et al., 2018). Natalie E. Göppert и др. описали метод получения л-ПЭИ из поли(2-этил-2-оксазолина) через гидролиз, частичное окисление и реацилирование. Полученные полимеры продемонстрировали хорошую термическую стабильность и перспективы для применения в биомедицине (Göppert et al., 2020). Xiaoning Shan и др. описали синтез метакрилизованного поли(2-этил-2-оксазолина) и его оценку в качестве мукоадгезивного полимера для назальной доставки лекарств. Метод включает частичный гидролиз поли(2-этил-2-оксазолина) до получения л-ПЭИ, который затем модифицируется с помощью метакрилового ангидрида (Shan et al., 2020). В таблице представлены основные методы получения л-ПЭИ и их ключевые характеристики на основе рассмотренных исследований (таблица 5).

Таблица 5. Сравнение методов кислотного гидролиза ПОЗ

№	Метод гидролиза	Основные характеристики	Применение	Источники, год
1	Кислотный гидролиз (HCl)	Линейная зависимость степени гидролиза от времени	Контроль молекулярных характеристик	Lambermont-Thijs et al., 2010
2	Гидролиз + комбинирование с ПЭИ	Термочувствительность, агрегаты в водных растворах	Биоразлагаемые полимеры	Halacheva et al., 2011
3	Микроволновой кислотный гидролиз	Высокая чистота и скорость реакции	Биомедицинские приложения	Tauhardt et al., 2011
4	Частичный кислотный гидролиз	Контроль степени гидролиза, стабильность структуры	Контроль степени гидролиза, стабильность структуры	de la Rosa et al., 2014
5	Кислотный гидролиз с кинетическим анализом	Оптимизация гидролиза для доставки ДНК	Векторы для генной терапии	Mees et al., 2017
6	Гидролиз + ациляция	Модификация структуры для заданных свойств	Биоматериалы	Sedlacek et al., 2018
7	Полный кислотный гидролиз	Использование катионной полимеризацией азиридина, высокая эффективность трансфекции	Доставка генов	Bauer et al., 2018

8	Гидролиз + окисление	Биодеградируемые полимеры	Имплантаты, фармацевтика	Göppert et al., 2020
9	Частичный гидролиз + метакрилирование	Мукоадгезивные свойства	Назальная доставка лекарств	Shan et al., 2020

Представленные данные показывают, что кислотный гидролиз ПОЗ можно модифицировать для различных целей, включая контроль молекулярных характеристик, функционализацию полимеров и биомедицинские применения. В частности, использование микроволнового излучения позволяет ускорить реакцию, а частичный гидролиз дает возможность точно регулировать структуру полиаминов. Эти различия подчеркивают важность выбора метода гидролиза в зависимости от конечного применения материала.

Учитывая уникальные характеристики, полученные в результате синтеза л-ПЭИ, следующая глава будет посвящена его применениям. Мы рассмотрим различные области применения ПЭИ, включая системы доставки лекарств, биосенсоры и другие высокотехнологичные биомедицинские решения. Это исследование позволит углубить понимание функциональных возможностей ПЭИ и его роли в современных медицинских технологиях.

4. Применение линейного полиэтиленамина

Применение л-ПЭИ в современных технологиях и исследованиях представляет собой широкий аспект, охватывающий различные области.

Генная терапия и доставка лекарств. ПЭИ активно используется в качестве невирусного вектора для доставки генетического материала (Gosselin et al., 2001; Neuberg & Kichler, 2014). В клеточной линии НЕК293 эффективность трансфекции с использованием л-ПЭИ достигает 75–90 % (Huh et al., 2007), тогда как в первичных или менее восприимчивых клетках этот показатель снижается до 30–40 % (Maurisse et al., 2010). Различные модификации ПЭИ разрабатываются с целью повышения трансфекционной эффективности и снижения цитотоксичности (Socia et al., 2020). В последние годы внимание исследователей сосредоточено на создании многофункциональных ПЭИ-основанных систем доставки, обладающих улучшенной стабильностью, биосовместимостью и возможностью направленного действия (Hao et al., 2019). Coulembier O. и др. разработали сополимеры на основе линейного полиэтиленмина и полимолочной кислоты путём органокаталитической полимеризации. Синтезированные сополимерные структуры формировали наночастицы (~400 нм), способные инкапсулировать гидрофобные соединения и проникать в клетки. Благодаря наличию незамещённых аминогрупп, эти материалы рассматриваются как перспективные носители для доставки нуклеиновых кислот и лекарств в системах генной терапии и контролируемого высвобождения (Coulembier et al., 2014). А. А. Rosenkranz и А. S. Sobolev рассмотрели особенности создания и применения наночастиц-полиплексов на основе ПЭИ для доставки нуклеиновых кислот в клетки. Авторы подчеркнули высокую эффективность ПЭИ в качестве вектора для генной терапии, отметив его способность образовывать стабильные комплексы с ДНК и РНК, что обеспечивает защиту генетического материала от деградации и успешную трансфекцию клеток (Rosenkranz & Sobolev, 2015). Zakeri и др. рассмотрели образование полиплексов ПЭИ, их взаимодействие с клетками и механизмы трансфекции. Показано, что ПЭИ стабильно связывается с нуклеиновыми кислотами, защищая их от деградации и способствуя доставке в клетки. Однако токсичность ПЭИ ограничивает его клиническое применение, что требует разработки безопасных модификаций и комбинированных систем доставки (Zakeri et al., 2018). Yadav и Kumar создали линейный полиэтиленмин, модифицированный борновой кислотой, для доставки ДНК. Полученные комплексы лучше проникали в клетки и обеспечивали высокую эффективность трансфекции при низкой токсичности. Такие материалы считаются

перспективными для генной терапии благодаря улучшенному захвату и доставке ДНК (Yadav & Kumar, 2018). Priyam и др. разработали конъюгированные наночастицы на основе полиэтиленимина (ПЭИ) и полидопамина (PDA) для генной доставки (Priyam et al., 2017). Jiang и др. исследовали полиэтилениминовый вектор для безопасной и эффективной доставки нуклеиновых кислот. Они отметили, что ПЭИ остаётся одним из перспективных невиальных векторов благодаря способности конденсировать ДНК и защищать её от деградации (Jiang et al., 2019). Dai Y. и Zhang X. разработали биоредуцируемый полиэтиленимин с дисульфидными связями для доставки микроРНК в клетки рака молочной железы. Полученные наночастицы легко разрушались внутри клетки, высвобождая активную РНК. Такая система показала высокую эффективность трансфекции, низкую токсичность и способность подавлять рост опухоли у мышей, что делает модифицированный полиэтиленимин перспективным невиальным вектором для генной терапии (Dai & Zhang, 2019). Zou и др. изучили наногели на основе ПЭИ и их потенциал в генной терапии. Они показали, что ПЭИ эффективно комплексирует с ДНК и РНК, формируя стабильные структуры, которые защищают генетический материал и способствуют его доставке в клетки (Zou et al., 2019). Casper и др. исследовали механизмы трансфекции с использованием ПЭИ и его производных. Они подтвердили, что ПЭИ остаётся одним из наиболее эффективных катионных полимеров для доставки генетического материала (Casper et al., 2023).

Очистка воды. ПЭИ применяется для удаления тяжелых металлов и органических загрязнений в процессах очистки воды. Сорбционная ёмкость ПЭИ-модифицированных материалов достигает 158 мг/г для Cu^{2+} , 139 мг/г для Zn^{2+} и до 161 мг/г для Pb^{2+} . Равновесие адсорбции устанавливается в течение 5–10 минут, а оптимальные условия сорбции наблюдаются при pH 5–7, при которых аминогруппы депротонированы и активно координируют катионы металлов (Pang et al., 2011; Khalaj et al., 2023). Goncharuk V. V. и др. исследовали эффективность модификации природного минерала монтмориллонита ПЭИ с целью удаления ионов тяжёлых металлов, таких, как Co(II) и Ni(II) , из водных растворов. Полученный композитный сорбент демонстрировал значительно более высокую сорбционную способность по сравнению с немодифицированным монтмориллонитом, особенно при нейтральном значении pH и в условиях высокой ионной силы раствора. Авторы отметили, что связывание ионов металлов происходит преимущественно за счёт аминогрупп ПЭИ, закреплённых на поверхности минерала. Такие модифицированные сорбенты показали перспективность применения для очистки средне- и высокоминерализованных сточных вод от тяжёлых металлов, что особенно актуально для промышленных выбросов (Goncharuk et al., 2010). Sun и др. разработали магнитные микросферы на основе ПЭИ и поливинилового спирта для удаления шестивалентного хрома (Cr(VI)) из водных растворов (Sun et al., 2015). Ma и др. разработали нанопроволочные сорбенты на основе ПЭИ для эффективного удаления хроматов и арсенатов из питьевой воды (Ma et al., 2016). Liu и др. разработали композитный гидрогель на основе полиэтиленимина (ПЭИ) и соевого белка (SPI) для селективного удаления ионов меди (Cu^{2+}) из сточных вод (Liu et al., 2017). Авторы использовали метод химического сшивания для создания пористого материала, обладающего высокой сорбционной способностью (Liu et al., 2018). Guo D.-M. и др. создали целлюлозный аэрогель, модифицированный ПЭИ, для удаления Cr(VI) из воды. Материал показал высокую сорбционную ёмкость (до 229,1 мг/г) и хорошо работал как в статических, так и в проточных условиях (Guo et al., 2017). Zeng и др. разработали новый композиционный сорбент на основе гиперразветвлённого ПЭИ и карбоксиметилхитозана для высокоэффективного удаления ионов ртути (Hg^{2+}) из водных растворов (Zeng et al., 2019). Bediako J. K. и др. разработали волокнистые сорбенты на основе полиэтиленимина и кальций-алгината для извлечения ионов золота (AuCl_4^-) из водных растворов. Волокна формировались методом ионной гелеобразной экструзии и стабилизировались с помощью глутаральдегида. Композит проявил высокую сорбционную ёмкость (более 2300 мг/г) за счёт электростатического взаимодействия аминогрупп ПЭИ с

анионами золота и восстановления Au^{3+} до элементарного золота. Материал сохранял эффективность после многократного использования, что подтверждает потенциал ПЭИ-содержащих волокон в технологиях очистки сточных вод и вторичной переработки драгоценных металлов (Bediako et al., 2020). Wong S. и др. показали, что кофейные отходы, модифицированные полиэтиленгликолем (ПЭИ), эффективно удаляют анионные красители из сточных вод. Благодаря положительно заряженным аминогруппам ПЭИ сорбент обеспечил высокую степень очистки, что делает его перспективным для очистки текстильных сбросов (Wong et al., 2020). Finny и др. разработали 3D-печатаемые гидрогели на основе полиэтиленгликоля для удаления тяжёлых металлов из водных растворов. Авторы предложили инновационный подход, используя биосовместимые чернила для 3D-печати, содержащие альгинат, желатин и ПЭИ. Было показано, что ПЭИ играет ключевую роль в стабилизации структуры гидрогеля и повышении его сорбционных свойств (Finny et al., 2022). Huang T. и др. создали сорбент на основе меламина пены, модифицированной ПЭИ, для удаления ионов Cr(VI) из сточных вод (Huang et al., 2022). Xanthopoulou M. и Katsoyiannis I. A. проанализировали эффективность модификации различных сорбентов ПЭИ для удаления тяжёлых металлов, в частности, хроматов и арсенатов, из загрязнённой водной среды. Авторы подчёркивают высокую перспективность применения ПЭИ-модифицированных материалов в системах очистки питьевых и сточных вод, особенно в регионах с повышенным содержанием шестивалентного хрома и арсена, где традиционные методы очистки демонстрируют ограниченную эффективность. Результаты обзора свидетельствуют о том, что введение ПЭИ значительно повышает сорбционную ёмкость материалов за счёт увеличения плотности активных аминогрупп и усиления электростатического взаимодействия с анионными формами металлов (Xanthopoulou & Katsoyiannis, 2023).

ПЭИ в антимикробных материалах. ПЭИ является перспективным компонентом для создания антимикробных материалов благодаря своей способности разрушать клеточные мембраны бактерий и предотвращать образование биоплёнок. Nuzhdina и др. разработали алкилированные и сшитые производные ПЭИ для создания антимикробных покрытий (Nuzhdina et al., 2017). Mayandi и др. исследовали л-ПЭИ как антимикробный агент (Mayandi et al., 2019). Pandey и др. представили антибактериальную поверхность на основе ПЭИ для медицинских устройств. Результаты исследования демонстрируют потенциал модификации ПЭИ для создания антибиотик-альтернативных биоматериалов, снижая зависимость от системных антибиотиков (Pandey et al., 2024). Xing и др. разработали долговечное антимикробное покрытие на основе ПЭИ и фитиновой кислоты для предотвращения загрязнения стоматологических водопроводов (Xing et al., 2024).

Недавние достижения в области материалов на основе ПЭИ подтверждают его значимость в биотехнологии, медицине, экологии и материаловедении. Благодаря высокой катионной плотности и способности к химической модификации, ПЭИ активно используется в генной терапии, системах доставки лекарств, антимикробных покрытиях, очистке воды, сорбционных материалах и биокатализе. Однако его высокая цитотоксичность и ограниченная биосовместимость остаются ключевыми вызовами, требующими дальнейшей оптимизации. Как отмечают Chen и др., современные исследования сосредоточены на разработке биоинспирированных и адаптивных ПЭИ-материалов, сочетающих высокую эффективность с улучшенными характеристиками безопасности. Инновационные подходы к модификации структуры, комбинированию с биосовместимыми полимерами и внедрению в многофункциональные наноматериалы открывают новые перспективы для его использования в медицине, фармацевтике, охране окружающей среды и промышленности (Chen et al., 2020).

Учитывая совокупность структурных и функциональных характеристик, ПЭИ продолжает удерживать позицию одного из наиболее востребованных материалов, а его дальнейшее развитие открывает перспективы для расширения сферы применения в инновационных технологиях.

5. Заключение

Полиэтиленминин представляет собой многофункциональный полимер, обладающий высоким потенциалом для применения в биотехнологиях, медицине, фармацевтике и экологических технологиях. Его уникальные физико-химические свойства, такие, как высокая растворимость, способность к комплексообразованию и термическая стабильность, делают его важным компонентом для генной терапии, очистки воды, антимикробных покрытий и сорбционных материалов.

Несмотря на многочисленные преимущества, основными ограничениями ПЭИ остаются его высокая цитотоксичность и ограниченная биосовместимость. В этой связи продолжаются исследования, направленные на разработку биосовместимых модификаций, улучшение структуры полимера и снижение его негативного воздействия на клетки. Современные подходы к химической модификации, комбинированию с другими полимерами и созданию адаптивных наноматериалов открывают новые возможности для его безопасного и эффективного использования.

6. Вспомогательный материал: нет вспомогательного материала.

7. Вклады авторов

Концептуализация - А.Г.; методология - С.З.; курирование данных - С.З., Ж.Г.; написание - подготовка оригинального черновика - Н.Т, М.Ж., написание - рецензирование и редактирование - А.Г. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

8. Информация об авторах

Нурлыбаева, Томирис – магистрант, Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, пр. Алии Молдагуловой, 34, Актөбе, Казахстан, 030000; diable.samaaa@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-8190-3888>

Абилова, Гузель – PhD, доцент кафедры, Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, пр. Алии Молдагуловой, 34, Актөбе, Казахстан, 030000; guzelab82@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0028-4598>

Махамбетова, Жанагуль – магистр, старший преподаватель, Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, пр. Алии Молдагуловой, 34, Актөбе, Казахстан, 030000; mahambetova25@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-7836-3426>;

Султамуратова, Задагул – к.х.н., доцент кафедры, Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, пр. Алии Молдагуловой, 34, Актөбе, Казахстан, 030000; zadasb@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3052-9338>;

Жакупова, Гулмира – старший преподаватель, Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, пр. Алии Молдагуловой, 34, Актөбе, Казахстан, 030000; gulmira.zhakupova80@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0001-3055-4464>.

9. Финансирование. Данное исследование было профинансировано Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках программно-целевого финансирования по проекту № BR24992882.

10. Благодарности. Обзор написан в рамках диссертационной работы магистранта Актюбинского регионального университета имени К. Жубанова Нурлыбаевой Т. на тему: «Гидрогели на основе продуктов гидролиза поли(2-этил-2-оксазолина)».

11. Конфликты интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

12. Список литературы

1. Barros, J., Dias, A., Rodrigues, M. A., Pina-Vaz, C., Lopes, M. A., & Pina-Vaz, I. (2015). Antibiofilm and antimicrobial activity of polyethylenimine: An interesting compound for endodontic treatment. *Journal of Contemporary Dental Practice*, 16(6), 427–432. <https://doi.org/10.5005/jp-journals-10024-1701>
2. Bauer, M., Tauhardt, L., Lambermont-Thijs, H. M. L., Kempe, K., Hoogenboom, R., Schubert, U. S., & Fischer, D. (2018). Rethinking the impact of protonable amine density on cationic polymers for gene delivery. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 128, 96–106. <https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2018.10.003>
3. Bediako, J. K., Lin, S., Sarkar, A. K., Zhao, Y., Choi, J.-W., Song, M.-H., Wei, W., Reddy, D. H. K., Cho, C.-W., & Yun, Y.-S. (2020). Benignly-fabricated crosslinked polyethylenimine/calcium-alginate fibers as high-performance adsorbents for effective recovery of gold. *Journal of Cleaner Production*, 252, 119389. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119389>
4. Boussif, O., Lezoualc'h, F., Zanta, M. A., Djavaheri Mergny, M., Scherman, D., Demeneix, B., & Behr, J. P. (1995). A versatile vector for gene and oligonucleotide transfer into cells in culture and in vivo: Polyethylenimine. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 92(16), 7297–7301.
5. Casper, J., Schenk, S. H., Parhizkar, E., Detampel, P., Dehshahri, A., & Huwyler, J. (2023). Polyethylenimine (PEI) in gene therapy: Current status and clinical applications. *Journal of Controlled Release*, 362, 667–691. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2023.09.001>
6. Chen, Z., Lv, Z., Sun, Y., Chi, Z., & Qing, G. (2020). Recent advancements in polyethyleneimine-based materials and their biomedical, biotechnology, and biomaterial applications. *Journal of Materials Chemistry B*, 8(15), 2951–2973. <https://doi.org/10.1039/C9TB02271F>
7. Coulembier, O., Moins, S., Maji, S., Zhang, Z., De Geest, B. G., Dubois, P., & Hoogenboom, R. (2014). Linear polyethyleneimine as (multi)functional initiator for organocatalytic L-lactide polymerization. *Journal of Materials Chemistry B*. Advance Article. <https://doi.org/10.1039/C4TB01387E>
8. Dai, Y., & Zhang, X. (2019). MicroRNA delivery with bio-reducible polyethylenimine as a non-viral vector for breast cancer gene therapy. *Macromolecular Bioscience*, 19(4), 1800445. <https://doi.org/10.1002/mabi.201800445>
9. de la Rosa, V. R., Bauwens, E., Monnery, B. D., De Geest, B. G., & Hoogenboom, R. (2014). Fast and accurate partial hydrolysis of poly(2-ethyl-2-oxazoline) into tailored linear polyethylenimine copolymers. *Polymer Chemistry*, 5(17), 4957–4964. <https://doi.org/10.1039/c4py00355a>
10. Finny, A. S., Cheng, N., Popoola, O., & Andreescu, S. (2022). 3D printable polyethyleneimine-based hydrogel adsorbents for heavy metal ions removal. *Environmental Science: Advances*, 1, 443–455. <https://doi.org/10.1039/d2va00064d>
11. Gleede, T., Reisman, L., Rieger, E., Mbarushimana, P. C., Rupar, P. A., & Wurm, F. R. (2019). Aziridines and azetidines: Building blocks for polyamines by anionic and cationic ring-opening polymerization. *Polymer Chemistry*, 10, 3257–3283.
12. Goncharuk, V. V., Puzyrnaya, L. N., Pshinko, G. N., Bogolepov, A. A., & Demchenko, V. Ya. (2010). The removal of heavy metals from aqueous solutions by montmorillonite modified with polyethylenimine. *Journal of Water Chemistry and Technology*, 32(2), 67–72. <https://doi.org/10.3103/S1063455X10020013>
13. Gosselin, M. A., Guo, W., & Lee, R. J. (2001). Efficient gene transfer using reversibly cross-linked low molecular weight polyethylenimine. *Bioconjugate Chemistry*, 12(6), 989–994. <https://doi.org/10.1021/bc0100455>

14. Göppert, N. E., Kleinstaub, M., Weber, C., & Schubert, U. S. (2020). Degradable poly(2-oxazoline) analogues from partially oxidized poly(ethylene imine). *Macromolecular Rapid Communications*, 41(11), 1900615. <https://doi.org/10.1002/marc.201900615>
15. Guo, D.-M., An, Q.-D., Xiao, Z.-Y., Zhai, S.-R., & Shi, Z. (2017). Polyethylenimine-functionalized cellulose aerogel beads for efficient dynamic removal of chromium(VI) from aqueous solution. *RSC Advances*, 7, 54039–54052. <https://doi.org/10.1039/c7ra09940a>
16. Halacheva, S., Madsen, J., Ladmira, V., Haddleton, D. M., & Howdle, S. M. (2011). Thermoresponsive behavior and self-assembly of linear poly(ethylene imine)-poly(2-ethyl-2-oxazoline) comb block copolymers. *Macromolecules*, 44(19), 7567–7574. <https://doi.org/10.1021/ma201461e>
17. Hao, F., Li, Y., Zhu, J., Sun, J., Marshall, B., Lee, R. J., Teng, L., Yang, Z., & Xie, J. (2019). Polyethylenimine-based formulations for delivery of oligonucleotides. *Current Medicinal Chemistry*, 26(13), 2264–2284. <https://doi.org/10.2174/0929867325666181031094759>
18. Hu, F., Li, Z., Xia, Y., Li, S., & Wu, C. (2014). Rare-earth triflate-initiated cationic ring-opening polymerization of 2-oxazolines: Synthesis of linear polyethyleneimine with controlled properties. *Journal of Polymer Science*, 52(6), 1047–1059. <https://doi.org/10.1039/C4RA11404C>
19. Huang, T., Cao, S., Luo, D., Zhang, N., Lei, Y.-Z., & Wang, Y. (2022). Polydopamine-assisted polyethylenimine grafting melamine foam and the application in wastewater purification. *Chemosphere*, 287, 132054. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132054>
20. Huh, S.-H., Do, H.-J., Lim, H.-Y., Kim, D.-K., Choi, S.-J., Song, H., Kim, N.-H., Park, J.-K., Chang, W.-K., Chung, H.-M., & Kim, J.-H. (2007). Optimization of 25 kDa linear polyethylenimine for efficient gene delivery. *Biologicals*, 35(3), 165–171. <https://doi.org/10.1016/j.biologicals.2006.08.004>
21. Jiang, C., Chen, J., Li, Z., Wang, Z., Zhang, W., & Liu, J. (2019). Recent advances in the development of polyethylenimine-based gene vectors for safe and efficient gene delivery. *Expert Opinion on Drug Delivery*, 16, 1–15. <https://doi.org/10.1080/17425247.2019.1604681>
22. Khalaj, M., Khatami, S.-M., Kalhor, M., Zarandi, M., Anthony, E. T., & Klein, A. (2023). Polyethylenimine grafted onto nano-NiFe₂O₄@SiO₂ for the removal of CrO₄²⁻, Ni²⁺, and Pb²⁺ ions from aqueous solutions. *Molecules*, 29(1), 125. <https://doi.org/10.3390/molecules29010125>
23. Lambermont-Thijs, H. M. L., van der Woerd, F. S., Baumgaertel, A., Bonami, L., Du Prez, F. E., Schubert, U. S., & Hoogenboom, R. (2010). Linear poly(ethylene imine)s by acidic hydrolysis of poly(2-oxazoline)s: Kinetic screening, thermal properties, and temperature-induced solubility transitions. *Macromolecules*, 43(2), 927–933. <https://doi.org/10.1021/ma9020455>
24. Liu, J., Su, D., Yao, J., Huang, Y., Shao, Z., & Chen, X. (2017). Soy protein-based polyethylenimine hydrogel and its high selectivity for copper ions removal in wastewater treatment. *Journal of Materials Chemistry A*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1039/C6TA10814H>
25. Liu, M., Li, J., & Li, B. (2018). Mannose-modified polyethylenimine: A specific and effective antibacterial agent against *Escherichia coli*. *Langmuir*, 34(5), 1574–1580. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.7b03556>
26. Ma, Y., Zhang, B., Ma, H., Yu, M., Li, L., & Li, J. (2016). Electrospun nanofibrous polyethylenimine mat: A potential adsorbent for the removal of chromate and arsenate from drinking water. *RSC Advances*, 6, 30739–30746. <https://doi.org/10.1039/c5ra26973c>
27. Maurisse, R., De Semir, D., Enamekhoo, H., Bedayat, B., Abdolmohammadi, A., Parsi, H., & Gruenert, D. C. (2010). Comparative transfection of DNA into primary and transformed mammalian cells from different lineages. *BMC Biotechnology*, 10, 9. <https://doi.org/10.1186/1472-6750-10-9>

28. Mayandi, V., Sridhar, S., Fazil, M. H. U. T., Goh, E. T. L., Htton, H. M., Orive, G., Choong, Y.K., Saravanan R., Beuerman, R. W., Barkham, T., Yang, L., Baskaran, M., Jhanji, V., Loh, X. J., Verma, N. K., & Lakshminarayanan, R. (2019). Protective action of linear polyethylenimine against *Staphylococcus aureus* colonization and exaggerated inflammation. *ACS Infectious Diseases*, 5(8), 1411–1420. <https://doi.org/10.1021/acsinfecdis.9b00102>
29. Mees, M. A. (2017). Poly(2-alkyl-2-oxazoline)s and poly(ethylene imine): How one thing led to the other [Doctoral dissertation, Ghent University, Belgium]. Ghent University Academic Bibliography. <https://biblio.ugent.be/publication/8516651>
30. Mees, M. A., & Hoogenboom, R. (2018). Full and partial hydrolysis of poly(2-oxazoline)s and subsequent post-polymerization modification. *Polymer Chemistry*, 9, 4957–4964. <https://doi.org/10.1039/C8PY00978C>
31. Neuberg, P., & Kichler, A. (2014). Recent developments in nucleic acid delivery with polyethylenimines. In T. Friedmann (Ed.), *Advances in Genetics* (Vol. 88, pp. 263–284). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800148-6.00009-2>
32. Nuzhdina, A. V., Morozov, A. S., Kopitsyna, M. N., Strukova, E. N., Shlykova, D. S., Bessonov, I. V., & Lobakova, E. S. (2017). Simple and versatile method for creation of non-leaching antimicrobial surfaces based on cross-linked alkylated polyethyleneimine derivatives. *Materials Science and Engineering: C*, 70, 788–795. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2016.09.033>
33. Pandey, R., Pinon, V., Garren, M., Maffe, P., Mondal, A., Brisbois, E. J., & Handa, H. (2024). N-acetyl cysteine-decorated nitric oxide-releasing interface for biomedical applications. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 16, 24248–24260. <https://doi.org/10.1021/acsami.4c02369>
34. Pang, Y., Zeng, G., Tang, L., Zhang, Y., Liu, Y., Lei, X., Li, Z., Zhang, J., & Xie, G. (2011). PEI-grafted magnetic porous powder for highly effective adsorption of heavy metal ions. *Desalination*, 281(1), 278–284. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.08.001>
35. Petit, C., Grassl, B., Mignard, E., Luef, K. P., Wiesbrock, F., & Reynaud, S. (2017). Cationic ring-opening polymerization of 2-oxazolines in ionic liquids and microfluidic reactors for fast and controlled polymerization. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 218(16), 1700253. <https://doi.org/10.1039/C7PY01255A>
36. Priyam, A., Nagar, P., Sharma, A. K., & Kumar, P. (2017). Mussel-inspired polydopamine-polyethylenimine conjugated nanoparticles as efficient gene delivery vectors for mammalian cells. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2017.10.063>
37. Rosenkranz, A. A., & Sobolev, A. S. (2015). Polyethylenimine-based polyplex nanoparticles and features of their behavior in cells and tissues. *Russian Chemical Bulletin, International Edition*, 64(12), 2749–2755.
38. Rupa, P. A., Reisman, L., & Mbarushimana, P. C. (2017). Synthesis of linear polyethyleneimine by living anionic polymerization (U.S. Patent Application No. US20170204224A1). U.S. Patent and Trademark Office.
39. Sedlacek, O., Janoušková, O., Verbraeken, B., & Hoogenboom, R. (2018). Superhydrophilic poly(2-oxazoline)s via acylation of polyethylenimine. *Biomacromolecules*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.8b01366>
40. Shan, X., Williams, A. C., & Khutoryanskiy, V. V. (2020). Polymer structure and property effects on solid dispersions with haloperidol: Poly(N-vinyl pyrrolidone) and poly(2-oxazolines) studies. *International Journal of Pharmaceutics*, 590, 119884. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2020.119884>
41. Socia, A., Liu, Y., Zhao, Y., Abend, A., & Wuelfing, W. P. (2020). Development of an ultra-high-performance liquid chromatography-charged aerosol detection/UV method for the quantitation of linear polyethylenimines in oligonucleotide polyplexes. *Journal of Separation Science*, 43(24), 4421–4429. <https://doi.org/10.1002/jssc.202000414>

42. Sun, X., Yang, L., Li, Q., Liu, Z., Dong, T., & Liu, H. (2015). Polyethylenimine-functionalized poly(vinyl alcohol) magnetic microspheres as a novel adsorbent for rapid removal of Cr(VI) from aqueous solution. *Chemical Engineering Journal*, 262, 101–108. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.09.045>
43. Tanaka, R., Ueoka, I., Takaki, Y., Kataoka, K., & Saito, S. (1983). High molecular weight linear poly(ethyleneimine) and poly(N-methylethylenimine). *Macromolecules*, 16(6), 849–853.
44. Tauhardt, L., Kempe, K., Knop, K., Altuntaş, E., Jäger, M., Schubert, S., Fischer, D., & Schubert, U. S. (2011). Linear polyethyleneimine: Optimized synthesis and characterization - on the way to pharma-grade batches. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 212(19), 1918–1924. <https://doi.org/10.1002/macp.201100190>
45. Weyts, K. R., & Goethals, E. J. (1988). New synthesis of linear polyethyleneimine. *Polymer Bulletin*, 19(1), 13–19.
46. Wong, S., Abd Ghafar, N., Ngadi, N., Razmi, F. A., Inuwa, I. M., Mat, R., & Saidina Amin, N. A. (2020). Effective removal of anionic textile dyes using adsorbent synthesized from coffee waste. *Scientific Reports*, 10, 2928. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60021-6>
47. Xanthopoulou, M., & Katsoyiannis, I. A. (2023). Enhanced adsorption of chromate and arsenate ions from contaminated water with emphasis on polyethyleneimine modified materials: A review. *Separations*, 10, 441. <https://doi.org/10.3390/separations10080441>
48. Xing, M., Zhang, H., Li, Z., Zhang, L., & Qian, W. (2024). Long-lasting renewable antibacterial N-halamine coating enable dental unit waterlines to prevention and control of contamination of dental treatment water. *Frontiers in Materials*, 11, 1399597. <https://doi.org/10.3389/fmats.2024.1399597>
49. Yadav, S., & Kumar, P. (2018). Enhanced uptake of plasmid at boronic acid decorated linear polyethylenimines results in higher transfection efficiency. *Biointerphases*, 13(6), 061003. <https://doi.org/10.1116/1.5054930>
50. Yu, B., Zhang, Y., Zheng, W., Fan, C., & Chen, T. (2022). Polyethyleneimine-based drug delivery systems for cancer theranostics. *ACS Macro Letters*, 11(8), 1043–1056. <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.2c01308>
51. Zakeri, A., Kouhbanani, M. A. J., Beheshtkhoo, N., Beigi, V., Mousavi, S. M., Hashemi, S. A. R., Zade, A. K., Amani, A. M., Savardashtaki, A., Mirzaei, E., Jahandideh, S., & Movahedpour, A. (2018). Polyethyleneimine-based nanocarriers in co-delivery of drug and gene: A developing horizon. *Nano Reviews & Experiments*, 9(1), 1488497. <https://doi.org/10.1080/20022727.2018.1488497>
52. Zeng, H., Wang, L., Zhang, D., Yan, P., Nie, J., Sharma, V. K., & Wang, C. (2019). Highly efficient and selective removal of mercury ions using hyperbranched polyethyleneimine functionalized carboxymethyl chitosan composite adsorbent. *Chemical Engineering Journal*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.10.001>
53. Zhuk, D. S., Gembitskii, P. A., & Kargin, V. A. (1965). Advances in the chemistry of polyethyleneimine (polyaziridine). *Russian Chemical Reviews*, 34(7), 515–525.
54. Zou, Y., Li, D., Shen, M., & Shi, X. (2019). Polyethyleneimine-based nanogels for biomedical applications. *Macromolecular Bioscience*, 19(9), 1900272. <https://doi.org/10.1002/mabi.201900272>
55. von Zelewsky, A., Barbosa, L., & Schläpfer, C.-W. (1993). Poly(ethylenimines) as Brønsted bases and as ligands for metal ions. *Coordination Chemistry Reviews*, 123, 229–246.

Көпфункционалды полиэтиленамин: физика-химиялық қасиеттері және қазіргі қолдану салалары

Томирис Нурлыбаева, Гузель Абилова, Жанагул Махамбетова, Задагул Сұлтамұратова, Гүлмира Жакупова

Аңдатпа. Полиэтиленимин (ПЭИ) – амин топтарының жоғары тығыздығына ие синтетикалық полимер, бұл оның ерекше физика-химиялық қасиеттерін және құрылымдық түрлендіру мүмкіндігін анықтайды. Жоғары реакциялық қабілеттілігі, термиялық тұрақтылығы мен кешен түзу қасиеттерінің үйлесуі ПЭИ-ді қазіргі материалтанудағы ең көпқырлы полимерлердің бірі етеді. Бұл шолуда сызықтық және тармақталған ПЭИ-ді алу әдістері жүйеленіп берілген, олардың ішінде азиридиннің аниондық полимерленуі, 2-оксазолиндердің катиондық полимерленуі және поли(2-этил-2-оксазолиннің) қышқылдық гидролизі қарастырылған. Синтез әдісінің молекулалық архитектураға, полидисперстілікке және функционалды топтардың таралуына әсері талданған, себебі бұл факторлар полимердің еру қабілетін, құрылымдық тұрақтылығын және конформациялық қасиеттерін айқындайды. ПЭИ-дің негізгі физика-химиялық сипаттамаларына ерекше көңіл бөлінген: металл иондарымен координациялық кешендер түзу қабілеті, термиялық және химиялық тұрақтылығы, сондай-ақ рН-қа тәуелді қасиеттері. ПЭИ-дің гендік терапияда және дәрілік заттарды жеткізу жүйелерінде қолданылуы талданған, мұнда оның катиондық табиғаты нуклеин қышқылдарымен тиімді байланысу мен тасымалдануды қамтамасыз етеді. Сондай-ақ ПЭИ-дің ауыр металдар мен органикалық ластаушыларды кетіруде тиімді сорбент ретіндегі рөлі және биомедициналық жабындар құрамында антимикробтық әсері көрсетілген.

Сонымен қатар, ПЭИ-дің биосәйкестілігін арттыру және цитоуыттылығын төмендету бағытындағы химиялық модификациялау, композиттер түзу және табиғи биополимерлермен функционалдандыру стратегиялары қарастырылған. Жинақталған деректер полиэтилениминнің құрылымдық икемділігі мен функционалдық бейімделгіштігі жоғары, келешегі зор көпфункционалды материал екенін дәлелдейді.

Түйін сөздер: тармақталған полиэтиленимин (b-PEI), сызықтық полиэтиленимин (l-PEI), поли (2-этил-2-оксазолин), қышқыл гидролиз, анионды полимерлеу, катионды полимерлеу.

Multifunctional polyethyleneimine: physicochemical properties and modern applications

Tomiris Nurlibayeva, Guzel Abilova, Zhanagul Makhambetova, Zadagul Sultamuratova, Gulmira Zhakupova

Abstract: Polyethylenimine (PEI) is a synthetic polymer characterized by a high density of amino groups, which determines its distinct physicochemical properties and wide potential for structural modification. Due to its combination of high reactivity, thermal stability, and complexation ability, PEI is considered one of the most versatile polymers of modern materials science. This review systematizes current knowledge on the synthesis of linear and branched PEI, including anionic polymerization of aziridine, cationic polymerization of 2-oxazolines, and acid hydrolysis of poly(2-ethyl-2-oxazoline). The influence of the synthesis route on the molecular architecture, polydispersity, and distribution of functional groups is analyzed, as these factors determine the solubility, structural stability, and conformational behavior of the polymer.

Particular attention is given to the key physicochemical characteristics of PEI, such as its ability to form coordination complexes with metal ions, resistance to thermal and chemical degradation, and pH-dependent properties in aqueous systems. The review summarizes recent research on the use of PEI in gene therapy and drug delivery systems, where its cationic nature ensures efficient binding and transport of nucleic acids. The effectiveness of PEI as a sorbent for the removal of heavy metals

and organic pollutants in water treatment processes is discussed, along with its antimicrobial potential in protective coatings and biomedical materials.

Finally, the review highlights promising strategies for improving the biocompatibility and reducing the cytotoxicity of PEI through chemical modification, composite formation, and functionalization with natural biopolymers. The summarized findings demonstrate that polyethylenimine is a multifunctional next-generation material combining structural flexibility, high adaptability, and broad potential for applications in medicine, pharmaceuticals, environmental technologies, and materials science.

Keywords: branched polyethylenimine (b-PEI), linear polyethylenimine (l-PEI), poly(2-ethyl-2-oxazoline), acid hydrolysis, anionic polymerization, cationic polymerization.