JOURNAL OF INTERNATIONAL SCIENTIFIC RESEARCH
Volume 4, Issue 6, July- August 2026 Online ISSN: 3030-3508
https://spaceknowladge.com

ПРИНЦИПЫ ЗЕЛЕНОЙ ХИМИИ В СОВРЕМЕННЫХ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

Есебаева Зебо Конырбаевна
Нукусский государственный технический университет

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

ИСТОРИЯ СТАТЬИ:
Received:03.07.2026
Revised: 04.07.2026
Accepted:05.07.2026

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
зеленая химия, устойчивое развитие, химико-технологические процессы, катализ, возобновляемое сырье, энергоэффективность, циркулярная экономика, экологическая безопасность.

АННОТАЦИЯ:

Современное развитие химической промышленности сопровождается ростом потребления природных ресурсов, увеличением энергозатрат и усилением антропогенного воздействия на окружающую среду. В этих условиях концепция зеленой химии рассматривается как один из ключевых инструментов достижения устойчивого развития, поскольку ориентирована на предотвращение образования загрязняющих веществ, рациональное использование сырья и энергии, а также снижение экологических рисков на всех стадиях жизненного цикла химической продукции. В статье представлен аналитический обзор современных подходов к внедрению принципов зеленой химии в химико-технологические процессы.

Введение. Химическая промышленность является одной из базовых отраслей мировой экономики, обеспечивая производство материалов, лекарственных препаратов, удобрений, полимеров, топлива и других продуктов, необходимых для функционирования современной промышленности и общества. Вместе с тем именно химическое производство относится к числу наиболее ресурсоемких отраслей, характеризующихся высоким потреблением энергии, использованием невозобновляемого сырья и образованием значительных объемов отходов и выбросов загрязняющих веществ [2,3].

Традиционный подход к обеспечению экологической безопасности химических производств основывался преимущественно на технологиях очистки выбросов, переработке отходов и снижении последствий загрязнения уже после завершения производственного процесса. Однако современные требования устойчивого развития предполагают переход к превентивным стратегиям, предусматривающим предотвращение образования загрязняющих веществ еще на стадии проектирования химических процессов и разработки новых материалов [1,2].

Концепция зеленой химии (Green Chemistry), предложенная Полом Анастасом и Джоном Уорнером в конце XX века, представляет собой научную основу такого подхода. Она определяется как разработка химических продуктов и процессов, уменьшающих или полностью исключающих использование и образование опасных веществ. В основу концепции положены двенадцать фундаментальных принципов, включающих предотвращение образования отходов, повышение атомной эффективности, применение менее токсичных реагентов и растворителей, использование возобновляемого сырья, внедрение каталитических процессов, повышение энергоэффективности и проектирование безопасных химических продуктов [1].

За последние два десятилетия зеленая химия превратилась из самостоятельной научной концепции в одно из важнейших направлений реализации политики устойчивого развития. Современные исследования рассматривают ее уже не только как совокупность экологически ориентированных методов органического синтеза, но и как системный подход, объединяющий химическую технологию, инженерные решения, оценку жизненного цикла продукции, циркулярную экономику и цифровизацию промышленности [2,4].

Особое внимание уделяется разработке высокоселективных катализаторов, использованию биомассы в качестве альтернативного источника углерода, созданию безопасных растворителей, совершенствованию процессов химической переработки диоксида углерода и внедрению энергоэффективных технологий. Эти направления позволяют одновременно уменьшить образование отходов, сократить выбросы парниковых газов, снизить материалоемкость производства и повысить конкурентоспособность химической продукции на мировом рынке [3,5].

Материалы и методы. Настоящее исследование выполнено в форме аналитического обзора современной научной литературы, посвященной применению принципов зеленой химии в химико-технологических процессах. Методологическую основу работы составили методы системного анализа, сравнительного анализа и обобщения результатов отечественных и зарубежных исследований в области устойчивой химии, промышленного катализа, переработки возобновляемого сырья и экологизации химических технологий [2–5].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Основные принципы зеленой химии. Концепция зеленой химии основана на двенадцати принципах, сформулированных П. Анастасом и Дж. Уорнером в 1998 году. Эти принципы ориентированы не на устранение последствий загрязнения, а на его предупреждение посредством рационального проектирования химических процессов и продукции [1].

К фундаментальным принципам относятся предотвращение образования отходов, максимальное использование атомов исходных реагентов в целевом продукте (атомная

эффективность), применение менее токсичных методов синтеза, использование безопасных растворителей и вспомогательных веществ, повышение энергоэффективности процессов, применение возобновляемого сырья, использование катализа вместо стехиометрических реагентов, минимизация образования производных соединений, проектирование безопасных химических продуктов, аналитический контроль процессов в реальном времени и снижение риска аварийных ситуаций [1,4].

Современные исследования показывают, что применение указанных принципов позволяет одновременно снижать экологическую нагрузку и повышать экономическую эффективность производства благодаря сокращению расхода сырья, энергии и затрат на обращение с отходами [2,5].

В отличие от традиционного подхода, при котором основное внимание уделяется очистке выбросов после завершения технологического процесса, зеленая химия предусматривает предотвращение загрязнения уже на стадии разработки технологии.

Таблица 1 – Основные принципы зеленой химии и их применение

Принцип	Практическое применение
Предотвращение образования отходов	Оптимизация технологических процессов
Атомная эффективность	Повышение выхода целевого продукта
Менее опасные методы синтеза	Замена токсичных реагентов
Безопасные растворители	Использование воды, сверхкритического CO_2 и ионных жидкостей
Энергоэффективность	Проведение реакций при умеренных температурах и давлениях
Возобновляемое сырье	Использование биомассы вместо нефти
Катализ	Гетерогенные и биокатализаторы
Минимизация производных продуктов	Сокращение числа стадий синтеза
Проектирование безопасных веществ	Получение экологически безопасной продукции
Аналитический контроль процессов	Мониторинг образования побочных продуктов
Минимизация аварийных рисков	Использование безопасных технологий
Учет жизненного цикла продукции	Переработка и повторное использование материалов

Катализ как основа современных зеленых технологий. Одним из наиболее эффективных инструментов реализации принципов зеленой химии является катализ. Каталитические процессы обеспечивают увеличение селективности химических

реакций, сокращение числа побочных продуктов и снижение энергозатрат за счет проведения процессов при более мягких температурных и барических условиях [3,6].

Особое значение приобретают гетерогенные катализаторы, обладающие высокой стабильностью, возможностью многократного использования и простотой отделения от реакционной среды. Одновременно активно развиваются биокатализ и ферментативные процессы, позволяющие осуществлять синтез органических соединений при практически нейтральных условиях и значительно уменьшать использование токсичных реагентов [3,5].

Развитие нанокатализаторов и многофункциональных каталитических систем способствует дальнейшему повышению атомной эффективности процессов, сокращению образования отходов и снижению углеродного следа химического производства [5,6].

Использование возобновляемого сырья. Одним из ключевых направлений современной зеленой химии является постепенная замена ископаемого углеродного сырья возобновляемыми биологическими ресурсами. В качестве альтернативных источников широко используются древесная биомасса, сельскохозяйственные остатки, растительные масла, сахаросодержащее сырье, водоросли и органические отходы пищевой промышленности [5,7].

Переработка биомассы позволяет получать биоэтанол, молочную кислоту, янтарную кислоту, левулиновую кислоту, гидроксиметилфурфурол и другие платформенные химические соединения, служащие исходным сырьем для производства полимеров, растворителей и фармацевтических препаратов. Использование подобных технологий способствует снижению зависимости химической промышленности от нефти и природного газа, а также уменьшению выбросов парниковых газов [5,7].

Альтернативные растворители. Традиционные органические растворители являются одним из основных источников загрязнения окружающей среды вследствие высокой летучести, токсичности и пожароопасности. По этой причине разработка безопасных растворителей рассматривается как одно из важнейших направлений развития зеленой химии [1,3].

В настоящее время широкое распространение получают вода, сверхкритический диоксид углерода, ионные жидкости и глубокие эвтектические растворители. Их применение позволяет уменьшить образование летучих органических соединений, повысить безопасность производственных процессов и упростить регенерацию растворителей [3,5].

Несмотря на значительный потенциал новых растворителей, современные исследования подчеркивают необходимость комплексной оценки их токсичности, биоразлагаемости и жизненного цикла до начала широкого промышленного внедрения [5,6].

Химическая переработка диоксида углерода. В последние годы диоксид углерода рассматривается не только как основной парниковый газ, но и как перспективный источник углерода для химической промышленности. Развитие технологий Carbon Capture and Utilization позволяет использовать CO_2 для получения метанола, мочевины, поликарбонатов, циклических карбонатов и синтетических видов топлива [5,6].

Использование подобных технологий способствует формированию циркулярной углеродной экономики, в которой выбросы углекислого газа становятся вторичным сырьем для производства новой продукции. Вместе с тем исследователи отмечают, что экологическая эффективность процессов CCU существенно зависит от источника энергии, используемой при их реализации, поэтому их наибольшая эффективность достигается при интеграции с возобновляемыми источниками энергии [4–6].

Внедрение принципов зеленой химии обеспечивает комплексный положительный эффект как с экологической, так и с экономической точки зрения. К основным экологическим преимуществам относятся:

- снижение образования токсичных отходов;
- уменьшение выбросов парниковых газов;
- сокращение потребления невозобновляемых природных ресурсов;
- повышение экологической безопасности химических производств;
- снижение загрязнения атмосферного воздуха и водных объектов.

Одновременно предприятия получают существенные экономические преимущества. Благодаря использованию каталитических процессов и энергоэффективных технологий уменьшается расход сырья и энергоресурсов, сокращаются затраты на очистку сточных вод и утилизацию отходов, повышается производительность оборудования и качество выпускаемой продукции.

Заключение. Проведенный анализ показал, что принципы зеленой химии являются эффективной основой для совершенствования современных химико-технологических процессов и повышения их экологической и экономической эффективности. Применение возобновляемого сырья, каталитических технологий, безопасных растворителей, энергоэффективных процессов и методов минимизации отходов способствует снижению негативного воздействия химического производства на окружающую среду и рациональному использованию природных ресурсов. Интеграция принципов зеленой химии с концепциями устойчивого развития и циркулярной экономики открывает новые возможности для создания конкурентоспособных и экологически безопасных технологий. Дальнейшее развитие данного направления связано с внедрением инновационных решений, цифровых технологий и расширением промышленного применения экологически ориентированных химических процессов.

Список литературы

1. Anastas PT, Warner JC. Green Chemistry: Theory and Practice. Oxford University Press; 1998.
2. Constable DJC. Green and sustainable chemistry – The case for a systems-based, interdisciplinary approach. iScience. 2021;24(12):103489.
3. Sharma S, Gallou F, Handa S. Towards a sustainable tomorrow: advancing green practices in organic chemistry. Green Chemistry. 2024;26:6289–6317.
4. Anastas PT, Zimmerman JB. Creating cascading non-linear solutions for the UN Sustainable Development Goals through green chemistry. Chem. 2021;7(11):2825–2828.
5. Sánchez Morales R, Sáenz-López P, de las Heras Perez MA. Green Chemistry and Its Impact on the Transition towards Sustainable Chemistry: A Systematic Review. Sustainability. 2024;16(15):6526.