Критические опасности экологических загрязнений водных ресурсов для здоровья человека, животных и природы из-за роста потребления населения, необходимые решения и технологии для снижения выбросов и загрязнения водных ресурсов

Жарков Игорь Васильевич
главный конструктор – руководитель проекта, Компания PLASMATRON GLOBAL ENERGY SOLUTIONS PRIVATE LIMITED, igor@plasmatron.in

В статье рассматривается комплексная экологическая проблема загрязнения окружающей среды, обусловленная накоплением промышленных, бытовых и сельскохозяйственных отходов, ростом объемов сточных вод и использованием технологий, основанных на сжигании углеводородного топлива. Проанализированы основные источники антропогенной нагрузки: промышленные выбросы, хозяйственно-бытовые сточные воды, твердые коммунальные отходы, транспортное загрязнение, а также связанные с ними процессы образования токсичных органических соединений, тяжелых металлов, микропластика, парниковых газов и стойких загрязнителей. Показано, что существующие методы обращения с отходами, включая захоронение и традиционное сжигание, не обеспечивают полного устранения экологических рисков и могут сопровождаться образованием вторичных загрязнений. Предложен комплекс технологических решений, основанный на глубокой переработке различных видов отходов с получением синтез-газа, применении плазменных технологий, высоковольтных электроразрядных процессов и методов очистки сточных вод без образования опасных выбросов и необходимости длительного хранения отходов.
Рассмотрены возможности использования полученного синтез-газа в энергетике и химической промышленности, а также технологии минерализации и остекловывания остаточных компонентов. Реализация предложенного подхода позволяет сформировать замкнутую систему переработки отходов, снизить антропогенную нагрузку на биосферу и повысить экологическую безопасность современных промышленных процессов.
Ключевые слова: бытовые химические загрязнения; очистные сооружения сточных вод; иловые осадки; полигоны хранения отходов; полигонные газы; полигонные стоки и фильтраты; высокотемпературная газификация; плазменные технологии; окислением сверхкритическом состоянии воды; электроискровые разряды; стеклование.

Введение

Экологическая угроза, обусловленная промышленным развитием человечества за последние 200 лет и ориентированностью современной экономики на постоянный рост потребления, привела к загрязнению огромных территорий промышленными и бытовыми отходами, площадь которых сопоставима с территориями крупных государств, а также к загрязнению рек, озёр, морей и океанов. Эти процессы оказывают разрушительное воздействие на окружающую среду и превратили деятельность человека не только в биологический, но и в геологический фактор, изменяющий фундаментальные процессы в биосфере Земли. Земля остаётся уникальным объектом — единственным домом человечества, который оно продолжает бездумно разрушать. По данным ЮНЕСКО, около 80 % использованной в быту и промышленности воды в мире сбрасывается без предварительной очистки.

Сжигание органического топлива для удовлетворения энергетических потребностей оказывает существенное негативное воздействие на окружающую среду. Вместе с тем современное человечество не может существовать без энергии, что обусловливает необходимость ускоренного и научно обоснованного энергетического перехода от технологий, основанных на сжигании топлива, к экологически безопасным способам получения энергии. Дополнительную нагрузку на окружающую среду создают природные процессы, включая вулканическую деятельность и лесные пожары.

Серьёзную опасность для здоровья человека и состояния окружающей среды представляют десятки миллионов органических соединений, созданных человеком и применяемых в быту, медицине, промышленности и сельском хозяйстве. Их нерациональное использование и токсическое воздействие создают серьёзную угрозу для живых организмов и устойчивости природных экосистем. В статье предлагается комплекс технологий, направленных на полную ликвидацию негативного воздействия промышленных, бытовых и сельскохозяйственных отходов без образования выбросов и необходимости их захоронения.

Источники загрязнения воды

Промышленность и энергетика

С начала существования человечества человек подвергался воздействию продуктов горения. Первоначально источником загрязнения воздуха являлись лесные пожары, а впоследствии — использование огня для приготовления пищи и отопления жилищ посредством сжигания древесины. В процессе горения образуются опасные химические соединения, включая органические загрязняющие вещества и сажистый углерод (СУ).

Химический состав продуктов сгорания определяется составом исходного топлива, образованного в результате фотосинтеза из диоксида углерода, воды и солнечной энергии. К таким видам топлива относятся древесина, торф, каменный уголь, нефть и природный газ. При их окислении (горении) в зависимости от температуры, количества окислителя и протекающих химических реакций (полимеризации, циклизации, дегидрирования и др.) образуется широкий спектр химических соединений, многие из которых представляют опасность для здоровья человека и окружающей среды.

При сжигании древесины, других видов биомассы, каменного угля, дизельного топлива, мазута, природного газа и твердых коммунальных отходов (ТКО) в атмосферный воздух поступают конденсируемые и неконденсируемые загрязняющие вещества. К ним относятся твердые частицы PM2,5, PM5 и PM10, содержащие сажистый и органический углерод, оксид углерода (CO), оксиды азота (NO_x), летучие органические соединения (акролеин, формальдегид, бензол), полициклические ароматические углеводороды, включая бенз(а)пирен, нитрофенолы, диоксины, фураны, смолы, карбоновые кислоты, насыщенные и ненасыщенные углеводороды, а также кислородсодержащие органические соединения (альдегиды, хиноны, фенолы, спирты и органические кислоты).

При сжигании ТКО, содержащих серу, хлор, тяжелые металлы и мышьяк, дополнительно образуются токсичные органические соединения, сажа, диоксины, фураны и кислотообразующие компоненты, способствующие формированию кислотных осадков. Значительная часть загрязняющих веществ впоследствии осаждается на поверхности почвы и водных объектов, вовлекается в пищевые цепи и может поступать в организм человека и животных.

Промышленные выбросы способны переноситься воздушными массами на тысячи километров от источников загрязнения, ухудшая качество почв, поверхностных вод и атмосферного воздуха, а также снижая пригодность территорий для проживания населения и ведения сельского хозяйства.

Населенные пункты. Хозяйственно-бытовые сточные воды

В современном мире около 80 % воды, используемой в промышленности, сельском хозяйстве и быту, сбрасывается в водные объекты без достаточной очистки. Одновременно широкое применение консервантов, полимерных упаковочных материалов и других химических веществ увеличивает антропогенную нагрузку на окружающую среду и создает дополнительные химические, биологические и микробиологические риски.

Исследования показывают, что кухонная мойка является одним из наиболее загрязненных объектов бытовой среды вследствие постоянного контакта с сырыми пищевыми продуктами. Поэтому хозяйственно-бытовые сточные воды характеризуются высокой микробиологической нагрузкой.

Дополнительной экологической проблемой является образование микропластика при использовании синтетических моющих губок. По опубликованным данным европейская губка выделяет в среднем около 19 мг микропластика в сутки, североамериканская — около 5 мг, а губка из органических материалов — около 4 мг. Снижение поступления микропластика в окружающую среду возможно за счет рационального использования воды и применения изделий с меньшим содержанием синтетических полимеров. По данным современных исследований, частицы микропластика способны проникать в ткани организма и могут оказывать неблагоприятное воздействие на здоровье человека.

Канализационные сточные воды содержат широкий спектр биологических, химических и токсичных загрязнителей, представляющих опасность для человека и окружающей среды. К основным биологическим загрязнителям относятся патогенные бактерии (возбудители холеры, дизентерии и брюшного тифа), вирусы (энтеровирусы, ротавирусы, вирусы гепатита А и Е), а также яйца гельминтов и цисты простейших. Среди химических загрязнителей наибольшую опасность представляют тяжелые металлы (ртуть, свинец, кадмий, цинк), поступающие с промышленными и бытовыми стоками, нефтепродукты, поверхностно-активные вещества (ПАВ), а также пестициды и гербициды, попадающие в канализационную сеть с поверхностным стоком.

При разложении органических веществ в канализационных сетях образуются сероводород (H_2S), метан (CH_4) и аммиак (NH_3). Сероводород является высокотоксичным газом, метан представляет взрывоопасное горючее соединение, а аммиак оказывает выраженное раздражающее действие на слизистые оболочки и органы дыхания [1, 2].

В связи с этим очистные сооружения должны обеспечивать эффективное удаление биологических, химических и газообразных загрязнителей, предотвращая их поступление в окружающую среду. Работа персонала очистных сооружений официально относится к работам с вредными и (или) опасными условиями труда, что обусловлено постоянным воздействием биологических агентов и токсичных химических соединений.

Таким образом, хозяйственно-бытовые сточные воды представляют собой сложную многокомпонентную систему загрязнений. Их эффективная очистка является необходимым условием сохранения качества водных ресурсов, защиты здоровья населения и предотвращения деградации природных экосистем.

2.2. Твердые коммунальные отходы: сбор, транспортировка, хранение и загрязнение окружающей среды

Полигоны твердых коммунальных отходов (ТКО) являются одним из крупнейших антропогенных источников выбросов метана, обеспечивая около 11 % его общемировых антропогенных выбросов, а также более 750 млн т CO_2-эквивалента ежегодно. Площадь полигонов ТКО в России, без учета несанкционированных свалок, превышает 4 млн га, что сопоставимо с территорией Швейцарии или Дании. Ежегодно российские полигоны выделяют в атмосферу более 15 млн т метана и свыше 22 млн т диоксида углерода.

Полигоны ТКО представляют собой сложные биохимические системы, в которых на протяжении 30–50 лет протекают процессы разложения органических веществ с образованием свалочного газа и фильтрата. По данным исследований, в составе свалочного газа и фильтрата обнаружено более 140 химических соединений, многие из которых обладают токсичными свойствами. Эти загрязняющие вещества способны загрязнять атмосферный воздух, почвы, подземные и поверхностные воды, оказывая негативное воздействие на окружающую среду в радиусе до 25–50 км от полигона.

Особую экологическую опасность представляют пожары на полигонах ТКО, сопровождающиеся выбросами диоксинов, фуранов, полихлорированных бифенилов (ПХБ), стойких органических загрязнителей (СОЗ) и других высокотоксичных соединений.

Мусоросжигательные заводы (МСЗ), наряду с сокращением объема отходов, также являются источниками загрязнения окружающей среды. На каждую тонну сжигаемых отходов образуются значительные объемы дымовых газов, содержащих тяжелые металлы, диоксины, полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) и другие стойкие органические загрязнители. Кроме того, в процессе сжигания образуются зольные остатки и шламы, относящиеся к опасным отходам и требующие последующего безопасного обращения и захоронения.

Полигонные газы, фильтраты и тело полигона представляют собой потенциальные источники вторичных загрязнений окружающей среды. В настоящей статье предлагается комплекс технологий, позволяющих осуществлять комплексную переработку указанных компонентов без их длительного хранения и захоронения, что обеспечивает существенное снижение экологической нагрузки на окружающую среду.

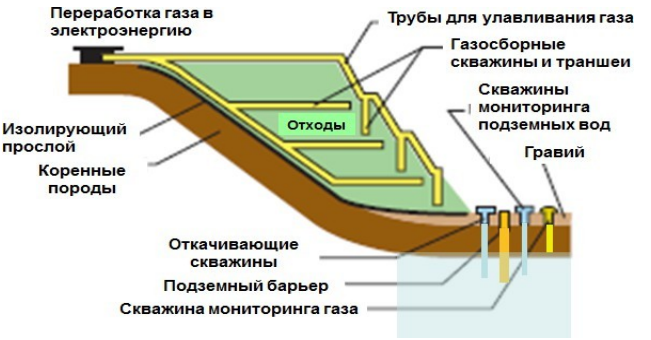


Рисунок 1. Современные технологии мониторинга и защиты грунтовых вод.



Рисунок 2. Биохимические преобразования биомассы на полигоне.

Современные технологии эксплуатации полигонов ТКО предусматривают применение многослойных противофильтрационных экранов (лайнеров), систем сбора и очистки фильтрата, а также сети наблюдательных скважин для постоянного мониторинга состояния грунтовых вод. Эти инженерные решения предназначены для предотвращения миграции загрязняющих веществ в почву и водные объекты. Однако значительная часть действующих полигонов хранения отходов в России не соответствует современным экологическим требованиям и не оснащена полноценными системами защиты и контроля. В результате образующиеся фильтрационные воды и другие жидкие продукты разложения отходов могут поступать в грунтовые воды, вызывая их загрязнение токсичными органическими соединениями, тяжелыми металлами и другими опасными веществами.



Рисунок 3. Сортировка ТКО и мусорный полигон.

Сбор, транспортировка, сортировка и переработка отходов, аналогично процессам загрязнения пищевых продуктов в результате воздействия загрязняющих веществ, поступающих в окружающую среду в рамках природных круговоротов, применения пестицидов, удобрений и химических веществ, могут сопровождаться химическими, бактериальными, вирусными и патогенно-грибковыми рисками. Данные процессы способны приводить к загрязнению территорий вдоль транспортных маршрутов, а также участков размещения, сортировки и переработки отходов.

Сортировка твердых коммунальных отходов (ТКО), поступающих в виде смешанного потока на мусоросортировочные комплексы, имеет ограниченную эффективность с экономической и экологической точек зрения. Смешивание различных видов отходов приводит к загрязнению

потенциального вторичного сырья органическими компонентами и биологическими загрязнителями, что значительно снижает возможность его дальнейшего использования. В результате извлечение ценных компонентов из смешанной массы отходов становится технологически сложным процессом, а доля материалов, пригодных для повторного использования и вовлечения во вторичный оборот, остается относительно низкой.

Биохимическое преобразование органической части твердых бытовых отходов осуществляется посредством процессов компостирования (в условиях аэробиоза) или метанизации (при анаэробиозе). В процессе переработки органических компонентов образуются газообразные продукты, включая метан (40–80 %), диоксид углерода (13–50 %), водород (H_2), сероводород (H_2S), азот (N_2), а также летучие соединения, обладающие неприятным запахом, в том числе ацетальдегид и меркаптаны.

Развитие системы раздельного сбора, сортировки и переработки вторичного сырья – бумаги, картона, алюминиевых банок, стеклянной тары и металлов – является экологически и экономически целесообразным направлением обращения с отходами.

На действующих полигонах состав образующегося свалочного газа может значительно изменяться в зависимости от состава отходов и стадии их разложения. В атмосферу могут поступать метан, диоксид углерода, аммиак, сероводород, диоксид серы, меркаптаны, серосодержащие органические соединения и альдегиды.

При внутренних возгораниях отходов на полигонах, происходящих в условиях ограниченного доступа кислорода и высоких температур (400–900°С), возможно образование значительных количеств токсичных соединений, включая альдегиды, полициклические ароматические углеводороды, хлорированные ароматические соединения, фтороводород, диоксины и фураны.

Таким образом, существующая система обращения с отходами формирует значительную экологическую нагрузку, приводя к загрязнению почв, поверхностных и подземных вод. Особую опасность представляет сжигание остаточных фракций отходов на мусоросжигательных заводах (МСЗ), особенно при наличии хлорсодержащих компонентов, поскольку это может сопровождаться образованием диоксинов и фуранов – высокотоксичных соединений, способных оказывать негативное воздействие на здоровье человека и состояние экосистем даже при чрезвычайно низких концентрациях.

2.4. Транспорт

Автомобильный транспорт, использующий углеводородное топливо, остается одним из наиболее значимых источников негативного воздействия на состояние атмосферного воздуха. В процессе эксплуатации автотранспорта в окружающую среду поступают токсичные загрязняющие вещества, включая оксид углерода (II) (угарный газ), оксиды азота и серы, тяжелые металлы (ртуть, медь, никель и др.), полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), относящиеся к канцерогенным веществам и стойким органическим загрязнителям.

Особую опасность представляет бенз(а)пирен – представитель группы ПАУ, относящийся к веществам 1-го класса опасности и обладающий выраженными канцерогенными свойствами даже при чрезвычайно низких концентрациях. Согласно СанПиН 1.2.3685-21, его среднесуточная предельно допустимая концентрация в атмосферном воздухе составляет 10^{-6} мг/м³.

Дополнительным источником загрязнения является дорожная пыль, которая повышает риск негативного воздействия на здоровье населения, особенно в крупных городах. В ее состав входят частицы износа автомобильных шин, фрагменты дорожного покрытия, мелкодисперсные бытовые загрязнения и остатки противогололедных реагентов. Эти компоненты могут выступать в качестве сорбентов и центров конденсации для более токсичных загрязняющих веществ, включая тяжелые металлы и полициклические ароматические углеводороды.

Твердые частицы PM2,5 и PM10 вносят значительный вклад в формирование суммарного загрязнения атмосферного воздуха. Их присутствие связано как с выбросами двигателей внутреннего сгорания, так и с процессами износа автомобильных шин, дорожных покрытий и повторного поднятия пыли с поверхности дорог. Установлено, что более 80 % бенз(а)пирена, поступающего в атмосферу в результате техногенной деятельности, переносится воздушными потоками в сорбированном на частицах сажи и пыли состоянии. Благодаря этому данное соединение может обнаруживаться на значительном удалении от источников загрязнения – до 5–10 км.

В окружающей среде бенз(а)пирен подвергается различным процессам трансформации, включая фотохимическое окисление под воздействием солнечного излучения, сорбцию донными отложениями и микробиологическую деструкцию с участием водных микроорганизмов и высших растений. При этом бенз(а)пирен способен накапливаться в донных отложениях и передаваться по пищевым цепям. Под воздействием ультрафиолетового излучения его молекулы в поверхностных слоях воды могут окисляться с образованием менее сложных, но также биологически активных соединений, включая хиноны, фенолы и нитрофенолы.

Таким образом, загрязнение окружающей среды различными видами отходов и сточных вод представляет комплексную экологическую проблему. Эффективная очистка сточных вод и предотвращение поступления загрязняющих веществ в природные экосистемы являются необходимыми условиями сохранения качества окружающей среды и защиты здоровья населения.

Предложения по комплексу технологий преобразования всех видов отходов и очистки сточных вод без образования выбросов и захоронений

Предлагаемый комплекс технологических решений основан на использовании закономерностей превращения органических соединений, заложенных природными процессами. При нагревании органических веществ в диапазоне температур 150–980 °С происходит их переход из твердого и жидкого состояния в газообразное, сопровождающийся протеканием сложных химических реакций, включая полимеризацию, циклизацию и дегидрирование. В результате могут образовываться новые химические соединения, в том числе стойкие органические загрязнители (СОЗ).

При повышении температуры свыше 2000 °С происходит глубокая термическая деструкция органических соединений с образованием водорода (H_2) и оксида углерода (II) (CO), формирующих синтез-газ. Полученный синтез-газ может использоваться в химической промышленности, энергетике, а также для производства метанола и аммиака. При его применении в энергетических установках возможно получение электроэнергии с электрическим коэффициентом полезного действия в диапазоне 42–60 %.

Применение технологий комплексной переработки различных видов отходов на универсальных перерабатывающих комплексах позволяет отказаться от предварительной сортировки отходов. В реакторы газификации твердые отходы могут поступать в прессованном виде, а для переработки жидких отходов предусматриваются специальные системы подачи, включая загрузочные устройства, воронки и специализированные реакторы.

Все виды отходов в процессе переработки преобразуются в синтез-газ. Твердые отходы, составляющие до 65 % исходной массы, проходят двухстадийную газификацию и при воздействии низкотемпературной плазмы преобразуются до 95 % в синтез-газ состава $3H_2 + CO$, который может использоваться для производства электроэнергии и тепловой энергии. Оставшиеся около 5 % зольных остатков подвергаются минерализации или остекловыванию с целью предотвращения их дальнейшего негативного воздействия на окружающую среду.

Очистка сточных вод осуществляется с применением реакторов, основанных на воздействии высоковольтных электрических полей, импульсных электроразрядов или плазменных разрядов непосредственно в водной среде. Данные методы позволяют разрушать органические загрязнители, снижать содержание тяжелых металлов и уничтожать патогенные микроорганизмы без применения значительных объемов химических реагентов.

При необходимости полученный синтез-газ может использоваться в качестве сырья для производства метанола и других химических продуктов. Газовые потоки в технологическом комплексе формируют замкнутый контур, что позволяет минимизировать выбросы загрязняющих веществ в атмосферу.

На собственные технологиче ские нужды и компенс ацию производственных потерь расходуется не более 35–45 % химической энергии исходных отходов в зависимости от выбранного конечного продукта. Дополнительно в технологическую цепочку могут входить процессы окисления веществ в сверхкритическом состоянии воды, а для стабилизации минеральных компонентов применяться технология стеклования.

Комплексное применение указанных технологий позволяет обеспечить автономное функционирование перерабатывающего комплекса за счет собственного производства электроэнергии и использования оборотного водоснабжения. Низкая себестоимость переработки отходов создает возможность получения дополнительной продукции с конкурентоспособными экономическими показателями.

Выводы

В настоящее время в России и мире накоплен значительный объем научных исследований, посвященных применению плазменных технологий, электроразрядных методов, процессов окисления в сверхкритическом состоянии воды и других передовых методов переработки отходов и очистки сточных вод. Разработка и промышленное внедрение таких технологий способны обеспечить снижение антропогенной нагрузки на окружающую среду, повышение качества очистки сточных вод и улучшение условий жизни населения.

Постоянное расширение спектра загрязняющих веществ, поступающих в сточные воды, обусловливает необходимость дальнейшего развития инновационных технологий очистки и внедрения эффективных методов удаления химических, биологических и токсичных компонентов. Комплексный подход к переработке отходов и очистке сточных вод является одним из ключевых направлений обеспечения экологической безопасности и сохранения природных экосистем.

Литература

1. Арутюнов В. С. и др. Контролируемое воспламенение низкоуглеродных газомоторных топлив на основе природного газа и водорода: кинетика процесса //Успехи химии. – 2023. – Т. 92. – №. 7. – С. 1-27.
2. Арутюнов В. С. Кинетика газофазных проце ссов в углеродсодержащих системах //Успехи химии. – 1992. – Т. 61. – №. 11. – С. 2078-2104.
3. Аксенов В.С., Иванов В.С., Садыков И.А., Шамшин И.О., Фролов С.М. Детонационные волны в сужающихся конических каналах. XII Международная

конференция "Лазерные, плазменные исследования и технологии – ЛаПлаз-2026": Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2026
4. Апальков Н. В., Фролов С. М., Хасяк Я. К. Термодинамический расчет высокотемпературной пароуглекислотной газификации сера- и хлорсодержащих углеводородов. XII Международная конференция "Лазерные, плазменные исследования и технологии – ЛаПлаз-2026": Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2026
5. Виноградов П.О., Дудко Я.С., Садыков И.А., Сметанюк В.А., Фролов С.М. Газификация лузги семян подсолнечника продуктами газовой детонации. XII Международная конференция "Лазерные, плазменные исследования и технологии – ЛаПлаз-2026": Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2026
6. Варев М. А. «Критическая верификация гипотезы об антропогенном углеродном следе: последствия выявления отсутствия корреляции между выбросами CO2 и климатическими изменениями». DOI: 10.36871/ ek.up.p.r.2025.06.01.001
7. Варев М. А. «Системный анализ барьеров реализации мусорной реформы в России: институциональные, экономические и социокультурные детерминанты». DOI: 10.51409/v.a.2025.09.01.001
8. Переславцев А. В., Вощинин С. А., Артемов А. В. Плазменная переработка отходов производства и потребления (технологические процессы и оборудование, физико-химические аспекты переработки, включая опасные и радиоактивные отходы). LAP LAMBERT Academic Publishing RU, 2020. 361 с.
9. Абдурахманова Э. Г. Влияние выхлопных газов на организм человека // Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. – 2015. – № 1-1. – С. 53–57.
10. Алексеев П. Д., Хорев Д. Ю. Коньково. История и современность. Природные условия // Москва. Юго-Запад. Тёплый стан : [сайт]. – 2004. – URL: https://testan.narod.ru/knigi_moskow/konkov/ 0201.htm (дата обращения: 01.02.2025).

Critical hazards of ecological pollution of water resources to the health of humans, animal biodiversity, and the environment due to increasing population consumption, necessary solutions and technologies to reduce emissions and pollution of water resources

Zharkov I.V.
Chief Designer-Project Manager

JEL classification: L61, L74, R53

The article considers the comprehensive environmental problem of pollution caused by the accumulation of industrial, municipal, and agricultural waste, increasing volumes of wastewater, and the widespread use of technologies based on hydrocarbon fuel combustion. The main sources of anthropogenic pressure are analyzed, including industrial emissions, domestic wastewater, municipal solid waste, transport-related pollution, and associated formation processes of toxic organic compounds, heavy metals, microplastics, greenhouse gases, and persistent pollutants. It is demonstrated that conventional waste management approaches, including landfill disposal and traditional incineration, do not provide complete elimination of environmental risks and may result in secondary pollution formation. A technological concept is proposed based on the deep conversion of various waste streams into synthesis gas using plasma technologies, high-voltage electrical discharge processes, and advanced wastewater treatment methods without hazardous emissions and long-term waste storage. The potential application of synthesis gas in energy production and chemical industries is considered, along with technologies for mineralization and vitrification of residual components. The proposed approach enables the development of a closed-loop waste conversion system, reducing anthropogenic pressure on the biosphere and improving environmental safety of industrial processes. The implementation of such technologies may contribute to sustainable development, resource recovery, and transition toward environmentally safe energy and waste management systems.

Keywords: household chemical pollutants; wastewater treatment plants; sludge; waste storage landfills; landfill gases; landfill effluents and leachates; high-temperature gasification; steam plasma technologies; supercritical water oxidation; electric spark discharges; vitrification.

References

1. Arutyunov V. S. et al. Controlled ignition of low-carbon gas-engine fuels based on natural gas and hydrogen: process kinetics // Russian Chemical Reviews. – 2023. – Vol. 92. – No. 7. – P. 1–27.
2. Arutyunov V. S. Kinetics of gas-phase processes in carbon-containing systems // Russian Chemical Reviews. – 1992. – Vol. 61. – No. 11. – P. 2078–2104.
3. Aksenov V. S., Ivanov V. S., Sadykov I. A., Shamshin I. O., Frolov S. M. Detonation waves in converging conical channels. XII International Conference "Laser and Plasma Research and Technologies – LaPlaz-2026": Collection of Scientific Papers. Moscow: NRNU MEPhI, 2026.
4. Apalkov N. V., Frolov S. M., Khasyak Ya. K. Thermodynamic calculation of high-temperature steam-carbon dioxide gasification of sulfur- and chlorine-containing hydrocarbons. XII International Conference "Laser and Plasma Research and Technologies – LaPlaz-2026": Collection of Scientific Papers. Moscow: NRNU MEPhI, 2026.
5. Vinogradov P. O., Dudko Ya. S., Sadykov I. A., Smetanyuk V. A., Frolov S. M. Gasification of sunflower seed husks using gas detonation products. XII International Conference "Laser and Plasma Research and Technologies – LaPlaz-2026": Collection of Scientific Papers. Moscow: NRNU MEPhI, 2026
6. Varev M. A. "Critical verification of the anthropogenic carbon footprint hypothesis: implications of finding no correlation between CO2 emissions and climate change." DOI: 10.36871/ ek.up.p.r.2025.06.01.001
7. Varev M. A. "Systems analysis of barriers to implementing waste management reform in Russia: institutional, economic, and sociocultural determinants." DOI: 10.51409/ v.a.2025.09.01.001
8. Pereslavtsev A. V., Voshchinin S. A., Artemov A. V. Plasma processing of industrial and consumer waste (technological processes and equipment; physicochemical aspects of processing, including hazardous and radioactive waste). LAP LAMBERT Academic Publishing RU, 2020. 361 p.
9. Abdurakhmanova E. G. "Impact of exhaust gases on the human body" // Problems of ensuring safety during emergency response operations. – 2015. – No. 1-1. – P. 53–57.
10. Alekseev P. D., Khorev D. Yu. "Konkovo. History and modernity. Natural conditions" // Moscow. South-West. Teply Stan : [website]. – 2004. – URL: https://testan.narod.ru/knigi_moskow/konkov/ 0201.htm (accessed: 01.02.2025).