

Интернет-журнал «Отходы и ресурсы» <https://resources.today>
Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling

2025, Том 12, № 2 / 2025, Vol. 12, Iss. 2 <https://resources.today/issue-2-2025.html>

URL статьи: <https://resources.today/PDF/03NZOR225.pdf>

DOI: 10.15862/03NZOR225 (<https://doi.org/10.15862/03NZOR225>)

1.5.15. Экология (химические, технические)

2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Трубачев, А. В. Анализ и оценка технологических решений по обезвреживанию промышленных отходов I и II классов опасности / А. В. Трубачев, Л. В. Трубачева // Отходы и ресурсы. — 2025. — Т. 12. — № 2. — URL: <https://resources.today/PDF/03NZOR225.pdf>. DOI: 10.15862/03NZOR225.

For citation:

Trubachev A.V., Trubacheva L.V. Analysis and evaluation of technological solutions for the neutralization of industrial waste of hazard classes I and II. *Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling*. 2025;12(2): 03NZOR225. Available at: <https://resources.today/PDF/03NZOR225.pdf>. DOI: 10.15862/03NZOR225. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 504.064.47

Трубачев Алексей Владиславович

ФГБНУ «Научно-исследовательский институт — Республиканский исследовательский научно-консультационный центр экспертизы», Москва, Россия

Эксперт научно-технической сферы

Кандидат химических наук, доцент

E-mail: trub_av@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3773-740X>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=147629

Трубачева Лариса Викторовна

ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет», Ижевск, Россия

Заведующая кафедрой

Кандидат химических наук, доцент

E-mail: trub12@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3315-8974>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=147631

Анализ и оценка технологических решений по обезвреживанию промышленных отходов I и II классов опасности

Аннотация. В статье проанализированы технологические решения по обезвреживанию промышленных отходов I и II классов опасности, предложенные для реализации на производственно-технических комплексах по обработке, утилизации и обезвреживанию опасных отходов, созданных на базе перепрофилированных объектах по уничтожению химического оружия в Кировской, Саратовской, Курганской областях и в Удмуртской Республике.

Дана характеристика технических и эксплуатационных параметров термического обезвреживания (сжигания) твердых и жидких отходов, а также физико-химической обработки жидких неорганических отходов I и II классов опасности на соответствующих установках и технологических линиях отечественного производства, акцентировано внимание на

альтернативных сжиганию технологиях пиролиза, плазменной утилизации и сверхкритического водного окисления.

Описаны преимущества и недостатки термического обезвреживания (сжигания) и физико-химической обработки опасных отходов, современные методы производственного контроля состава газовых выбросов в атмосферу, образующихся при их сжигании, подчеркнута важность входного химико-аналитического контроля поступающих на обезвреживание отходов.

На основе анализа материалов проектной документации четырех производственно-технических комплексов по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов I и II классов опасности дана оценка технологических и экологических рисков функционирования данных комплексов в регионах их дислокации, сформулированы предложения по минимизации данных рисков с учетом имеющихся технологических возможностей и систем контроля загрязняющих выбросов с целью снижения негативного влияния на окружающую среду и здоровье человека.

Ключевые слова: отходы I и II классов опасности; технологические решения; термическое обезвреживание; обработка отходов; контроль; выбросы; минимизация рисков

Введение

Организация рационального и технологически грамотного обращения с отходами является одной из главных задач экономики замкнутого цикла. В рамках национальных экологических проектов в настоящее время формируется целый ряд направлений, призванных обеспечить экологическую безопасность населения и сохранность природного комплекса в условиях современного производства и развитой структуры техносферного пространства, среди которых большое внимание уделяется вопросу сбора, накопления, транспортирования, обработки, утилизации и обезвреживания отходов [1]. Отходы I и II классов опасности занимают особую нишу в данном вопросе, т. к. обращение с ними требует специальных подходов ввиду их химического разнообразия и высокой токсичности. Одним из приоритетов указанной проблематики является обезвреживание и переработка таких отходов, реализация современных технологических приемов их обработки и утилизации, которые позволяли бы безопасно и эффективно решать задачи, обозначенные в отечественной экологической доктрине.

Федеральный проект «Инфраструктура для обращения с отходами I–II классов опасности» предусматривает создание сети производственно-технических комплексов по обработке, утилизации и обезвреживанию данных отходов, на которых предполагается реализация в качестве основных технологических решений высокотемпературного обезвреживания и физико-химической обработки твердых и жидких субстанций. Целью данной работы является изучение возможностей предложенных решений для эффективной и безопасной переработки широкой номенклатуры органических и неорганических чрезвычайно- и особоопасных промышленных отходов, выработка рекомендаций по минимизации негативного влияния на окружающую среду технологий сжигания и физико-химической обработки отходов I и II классов опасности в представленных разработчиками вариантах для реализации на производственно-технических комплексах в Кировской, Саратовской, Курганской областях и в Удмуртской Республике.

Общая характеристика химико-токсикологических свойств опасных отходов

Отходы I класса опасности можно условно разделить на две химические группы — отходы, содержащие неорганические токсиканты (например, соли тяжелых металлов, мышьяка,

селена и др.), и отходы, содержащие органические яды (например, полихлордифенилы, пестициды и др.).

Отходы II класса опасности также можно разделить на две группы: группу, содержащую опасные неорганические компоненты (например, кислоты, щелочи, электролиты гальванических ванн и др.), и группу, содержащую вредные органические вещества (циклические углеводороды и их производные, а также производные алифатических и непредельных углеводородов).

Компоненты отходов I и II классов опасности при попадании в организм человека вызывают многочисленные патологии (легочные, желудочно-кишечные, почечные, неврологические и т. д.), при этом их предельно допустимые концентрации в объектах окружающей среды не должны превышать весьма малые значения (например, мышьяка в атмосферном воздухе городских и сельских поселений — $0,3 \text{ мкг/м}^3$, полихлорбифенилов — $1,0 \text{ мкг/м}^3$).

Особо следует отметить наличие диоксинов в продуктах термического обезвреживания отходов — веществ, являющихся полихлорпроизводными дибензодиоксином и образующихся при взаимодействии хлорсодержащих компонентов с органическими веществами в области высоких температур; их предельно допустимые концентрации в атмосферном воздухе чрезвычайно малы (например, для 2,3,7,8-тетрахлородibenзо-1,4-диоксида — $0,5 \cdot 10^{-6} \text{ мкг/м}^3$). Диоксины высокотоксичны для человека, они поражают печень, иммунную и центральную нервную систему, обладают тератогенным, мутагенным и канцерогенным действием, способны накапливаться в организме [2; 3].

Термическое обезвреживание отходов (ТО)

Термическое обезвреживание отходов — это процесс обработки отходов при высоких температурах с целью уничтожения опасных и токсичных веществ, а также сокращения объема отходов, основанный на использовании термической энергии для разложения и окисления отходов [4]. Высокотемпературное обезвреживание промышленных отходов в печах барабанного типа [5] является приоритетным технологическим решением, принятым для реализации на российских ПТК. В целом, процесс состоит из пяти стадий, которые, как правило, протекают последовательно — сушка, газификация, воспламенение, горение и дожигание. В зоне сушки влага, содержащаяся в отходах, превращается в пар, в зоне газификации происходит превращение горючих веществ в летучие компоненты. Летучие газы, проходя по топке, попадают в зону воспламенения и загораются при 250°C . В зоне горения повышается температура отходов, для сгорания которых необходим подвод достаточного количества воздуха, причем необходимо, чтобы отходы находились в зоне высоких температур достаточно продолжительное время. Сжигание опасных отходов приводит к образованию в отходящих газах высокотоксичных веществ, которые улавливаются в системах очистки. Данный режим должен обеспечивать полное сгорание отходов с выбросом в атмосферу паро-газового облака с содержанием загрязняющих веществ, не превышающим нормативные показатели, в т. ч. по тяжелым металлам и диоксидам. Отмечено¹, что сжигание позволяет проводить высокотемпературное обезвреживание всех типов органических отходов, является наиболее эффективным по сравнению с другими способами и имеет преимущественное распространение.

¹ ИТС 52-2022. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Обращение с отходами I и II классов опасности (утв. приказом Росстандарта от 22.09.2022 г. № 2333).

Состав материалов проектной документации (ПД) ПТК, строящихся в Кировской, Саратовской, Курганской областях и в Удмуртской Республике², в части реализации технологических решений по термическому обезвреживанию отходов свидетельствует о том, что они идентичны для всех четырех комплексов. Общая технологическая схема ТО предполагает загрузку во вращающуюся печь подготовленной смеси отходов, ее нагрев с помощью многотопливных горелок до температуры горения (850–1100°C), сжигание смеси отходов в течение необходимого времени, дожигание дымовых газов в камере дожига при температуре 1200°C, выгрузка через дно камеры образовавшегося шлака (золы), ступенчатое охлаждение газовой смеси в котле-утилизаторе до 210°C, очистку газо-дымовых продуктов сгорания в скрубберах и на рукавных фильтрах, вывод очищенной газовой смеси в атмосферу.

Проектной документацией предусматривается пламенное сжигание твердых/жидких отходов I и II классов опасности в количестве 25 000 т/год на установке термического обезвреживания (УТО), разработанной отечественными производителями. Предполагается, что на сжигание будет поступать порядка 200 видов отходов, в т. ч. 450 тонн/год галогенорганических соединений, являющихся диоксиногенными отходами. Как следует из материалов ПД, результатом сжигания заявленной массы отходов будет образование дымовых газов в количестве ~130 млн м³/год, при этом реализуемые технологические и температурные режимы горения в печи, нагрева отходящих газов в камере дожигания и охлаждения в котле-утилизаторе и экономайзере, не предотвращают образования диоксинов в газовой фазе, в т. ч. вторичных, и не гарантируют их полной задержки в рукавных фильтрах.

Для контроля содержания вредных веществ в отходящих газах планируется осуществлять мониторинг их химического состава по 25 наименованиям, при этом «on-line» контроль в режиме реального времени предусматривается только по 10 наименованиям веществ, в которые не входят наиболее критичные по токсичности компоненты (диоксины, бензапирен, ртуть, кадмий, барий, кобальт, ванадий, мышьяк, свинец, хром и их соединения). Выполнение измерений содержания диоксинов в пробах промышленных выбросов и атмосферном воздухе в настоящее время проводится в соответствии с ПНДФ 13.1.65-08 и ПНДФ 13.3.64-08 хромато-масс-спектрометрическим методом, а измерение массовых концентраций в данных средах других указанных выше токсичных компонентов — в соответствии с ПНДФ 13.1.2:3.71-11 методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой. Данные методики достаточно трудоёмки, требуют весьма больших затрат времени и не располагают возможностями «on-line» контроля содержания ЗВ в потоках газовых сред, что не позволит оперативно реагировать на превышение величин предельно-допустимых выбросов по данным компонентам и ведет к существенному экологическому риску. В связи с этим возникает проблема проведения такого контроля в отношении состава газовых выбросов УТО и атмосферного воздуха на территориях, прилегающих к ПТК. На современном этапе развития химико-аналитический арсенал не обладает ни приборным, ни методическим обеспечением для решения указанной проблемы, что может привести к существенным экологическим рискам функционирования ПТК в плане оперативного реагирования на сверхнормативные загрязнения окружающей среды опасными

² Производственно-технический комплекс по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов I и II классов опасности «Марадыковский». Проектная документация: АО ГСПИ, Саратов, 2020.

Производственно-технический комплекс по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов I и II классов опасности «Горный». Проектная документация: АО ГСПИ, Москва, 2022.

Производственно-технический комплекс по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов I и II классов опасности «Щучье». Проектная документация: АО ГСПИ, Железногорск, 2022.

Производственно-технический комплекс по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов I и II классов опасности «Камбарка». Проектная документация: АО ГСПИ, Саратов, 2020.

химическими веществами. Разработка и создание аналитических комплексов и методик, позволяющих на уровне, максимально приближенном к условиям «on-line» контроля газовых потоков на содержание названных выше загрязняющих веществ, должны занимать приоритетные позиции в экоаналитической повестке.

Одними из наиболее токсичных продуктов сгорания производственных отходов являются фракции ультрадисперсной пыли, на которых оседает значительная часть диоксинов, распространяясь на большие расстояния в результате попадания ее в атмосферу. В проектной документации указывается, что попадание такой пыли в атмосферу практически исключено в связи с применением рукавных фильтров очистки, однако известно, что сверхнормативные выбросы диоксинов происходят в режимах «остановка-пуск» печи после каждого ежегодного планового ремонта, т. к. схема пуска предполагает, что пыль не фильтруется до тех пор, пока не начнется горение отходов. Другой причиной, по которой выбрасывается больше диоксинов, чем предписано нормами, является использование байпасов на промежуточных фазах технологического процесса, когда выбросы не проходят через фильтр (режим обхода фильтра автоматически включается тогда, когда по тем или иным причинам существенно повышается уровень пылевых выбросов, и система включает проход дымовых газов в трубу, минуя тканевые фильтры во избежание их преждевременного эксплуатационно-технологического засорения. В конструкции узлов УТО имеются также предпосылки к образованию так называемых «вторичных» диоксинов, а именно: в трех частях котла-утилизатора УТО происходит последовательное охлаждение дымового газа с 1 200 до 620°C, далее дымовой газ движется через конвективный проход и охлаждается до температуры 420°C, а затем проходит через четыре узла экономайзера и охлаждается до температуры 210°C, при этом время пребывания дымового газа в температурном интервале образования диоксинов от 500 до 200°C составляет 7 с. Известно, что время пребывания отходящих газов при этих температурах должно составлять ~1 с для соответствия выбросов установки термического обезвреживания нормам на содержание диоксинов [6]. Пребывание отходящих газов в данном температурном интервале в течение 7 с гарантированно создаст условия для ресинтеза диоксинов в охлаждающем контуре. Превышение норматива выбросов диоксинов в атмосферу в 1,7 раза подтверждается данными, приведенными в материалах по оценке воздействия на окружающую среду ПТК «Камбарка». ³ Необходимо ответить, что процесс ресинтеза диоксинов при современном уровне развития техники и технологии невозможно предотвратить полностью в условиях пламенного сжигания отходов и исключить попадание токсикантов в атмосферу после прохождения через существующие системы очистки [7–9].

Материальный баланс на УТО, приведенный в ПД, свидетельствует о том, что за год на установке образуется ~1 120 тонн золы и шлака, являющихся токсичными отходами из-за повышенного содержания в них диоксинов и соединений тяжелых металлов. Данные отходы предполагается вывозить для размещения на полигон промышленных отходов и рекомендуется использовать в дальнейшем в качестве пересыпного материала для полигонов ТБО. Такая рекомендация должна иметь документированное обоснование санитарно-экологической безопасности конечного продукта, образующегося на УТО при сжигании конкретных видов отходов I и II классов опасности (например, при сжигании массы, содержащей значительное количество диоксиногенных отходов, состав золы и шлака будет отличаться от такового для массы, содержащей повышенное содержание токсичных металлов, в связи с чем будет различным и класс опасности золы/шлака).

³ Производственно-технический комплекс по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов I и II классов опасности «Камбарка». Оценка воздействия на окружающую среду, 116.2-01-ОВОС1.2, часть 1, текстовая часть, книга 2: ООО «АПРИТ», Ижевск, 2020.

В качестве перспективных технологических решений по термическому обезвреживанию специалистами рассматривается ряд методов, в т. ч. методы пиролиза, плазменной утилизации и сверхкритического водного окисления отходов.

Методы пиролиза

Пиролиз — это процесс термического разложения отходов, содержащих органические вещества, под действием повышенной температуры без доступа или с ограниченным доступом кислорода с выделением твердого углеродсодержащего остатка, горючего пиролизного газа (пирогаза), жидких органических продуктов [10; 11]. Окислительный пиролиз представляет собой процесс термического разложения отходов при их частичном сжигании или непосредственном контакте с продуктами сгорания топлива. Сухой пиролиз заключается в термическом разложении отходов, твердого и жидкого топлива без доступа окислителя, он делится на три вида в зависимости от температуры: низкотемпературный пиролиз при температуре 450–500°C; среднетемпературный пиролиз при температуре до 800°C и высокотемпературный пиролиз (900–1 050°C). Методом пиролиза можно утилизировать автопокрышки, резинотехнические изделия, отходы пластмасс, ТКО, отработанные масла, некоторые другие отходы. Процесс пиролиза обладает рядом лучших показателей по сравнению со сжиганием: количество отходящих газов, подвергаемых очистке, намного меньше, чем при сжигании отходов; объем твердого остатка, получаемого по схеме высокотемпературного пиролиза, может быть значительно уменьшен; твердый остаток можно использовать в промышленности (сажа, активированный уголь и др.). Таким образом, некоторые схемы пиролиза отходов могут быть безотходными.

Методы плазменной утилизации

Методы плазменной утилизации [12; 13] заключается в обезвреживании жидких и твердых отходов непосредственно в плазменной дуге: в области температур выше 4 000°C за счет энергии электрической дуги плазмотрона молекулы кислорода и отходов расщепляются на атомы, ионы и радикалы, при этом степень разложения полихлорированных дибензодиоксинов, фуранов, полихлорбифенилов и пестицидов достигает 99,9999 %. Перспективным является применение способа с впрыском жидких отходов в плазменную струю для переработки отходов в восстановительной среде с целью получения ценных товарных продуктов. Метод плазменной газификации является наиболее технологичным и эффективным для обезвреживания разнородных отходов при минимальной подготовке. Установка плазменной газификации работает при температурах, превышающих 5 500°C, гарантируя практически полное преобразование исходного сырья в синтетический газ. Процесс превращения органических компонентов смеси опасных отходов в синтез-газ и превращения неорганических компонентов в расплавленный шлак осуществляется в двух стандартных реакторах-газификаторах, при этом неорганические вещества выводятся у основания газификатора в виде сплава металлов и инертного шлака (базальта), который охлаждается и превращается в неопасный невыщелачиваемый продукт.

Метод сверхкритического водного окисления

Данный метод (СКВО) основан на обработке органических отходов сверхкритической водой при избытке кислорода, температуре 400–600°C и давлении 200–300 атм. [14; 15]. Сверхкритическая вода является сильным окислителем и универсальным растворителем, что позволяет превращать вредные соединения исходной смеси отходов в углекислый газ и воду.

Обезвреживание стойких органических загрязнителей реализуется окислительной деструкцией органосодержащих веществ с использованием уникальных свойств воды при сверхкритических параметрах температуры и давления, что обеспечивает практически полное уничтожение органических соединений в исходной смеси, в результате разложения образуются экологически безвредные вода, кислород, азот, углекислый газ и твердый осадок 4 класса опасности. Преимуществами данного технологического процесса перед стандартными технологиями сжигания являются: более низкая температура процесса, более высокая устойчивость процесса, пренебрежимо малый конечный выход окислов азота и серы, локализация всех конечных продуктов, отсутствие необходимости их улавливания. Окисление достигается в гомогенной однофазной среде, что обеспечивает оптимальные условия для смешения компонентов и высокие скорости тепло- и массопереноса, при этом высокая эффективность разрушения токсичных компонентов достигается сравнительно быстро и в сравнительно малых по объему реакторах. Процесс происходит в полностью замкнутой системе, позволяющей изолировать от окружающей среды токсичные и опасные материалы до проведения процесса и осуществлять сбор и анализ обезвреженных продуктов окисления до их контролируемого выброса в окружающую среду. Зарегистрированная эффективность уничтожения для технологии СКВО составляет $> 99,99994\%$ для переработки диоксиногенных отходов и $> 99,999\%$ для уничтожения различных опасных органических соединений, в т. ч. хлорсодержащих растворителей, ПХБ и пестицидов). Метод находится в России на стадии промышленного внедрения.

Таким образом, термическое обезвреживание отходов в виде пламенного сжигания в печах барабанного типа имеет ряд технологических трудностей в части предотвращения образования вторичных диоксинов и отсутствия возможностей «on-line» контроля наиболее токсичных компонентов в газо-дымовых выбросах УТО.

Физико-химическая обработка отходов (ФХО)

Физико-химическая обработка жидких неорганических отходов (отработанные электролиты гальваники, производственные сточные воды, растворы кислот, щелочей и солей, дегазирующие среды и т. д.) основана на применении реагентных химических методов, методах ионного обмена, электролиза и других с целью перевода отходов в форму безопасных соединений и их утилизации с получением товарного продукта [16; 17]. Схема, предложенная для реализации ФХО на ПТК², предполагает обработку отходов на 9 технологических линиях:

1. Линия утилизации кислотнo-щелочных отходов включает следующие основные стадии — выделение гидроксидов черных металлов; выделение гидроксидов цветных металлов; электрофлотационная обработка; фильтрование.
2. Линия утилизации хромсодержащих отходов включает стадии восстановления Cr(VI) до Cr(III); выделение ионов Cr³⁺ из раствора в виде труднорастворимых соединений; отделение твердой части, содержащей малорастворимые соединения черных и цветных металлов, в т. ч. гипс и фторид кальция; фильтрование.
3. Линия утилизации циансодержащих отходов состоит из стадий разрушения цианидов до азота и углекислого газа; обезвреживание образовавшейся пульпы нерастворимых гидроксидов тяжелых металлов; доочистка водной фазы до нейтральных значений кислотности.
4. Линия утилизации отходов, содержащих органические компоненты включает следующие стадии: нейтрализация среды: коагуляция и осаждение органических соединений; отделение осадка; сорбционная очистка раствора.

5. Линия утилизации отходов, содержащих комплексобразующие компоненты включает стадии нейтрализации среды; окисления перекисью водорода; осаждения гидроксида меди флокулянтами; отделения осадка гидроксида меди; сорбционной очистка раствора.
6. Линия утилизации медно-аммиачных отходов состоит из стадий экстракции-реэкстракции; электролиза; выделения солей аммония.
7. Линия утилизации серебросодержащих растворов включает следующие стадии: подготовка отходов путем измельчения, прокаливания, удаления органических примесей и растворения металлической составляющей; хлоридного выщелачивания; цементации.
8. Линия очистки и обессоливания воды предназначена для обработки растворов, полученных на линиях 1–7, путем флотации, фильтрации, декантации, сорбции, кристаллизации, центрифугирования, обратного осмоса, выпаривания и термической сушки.
9. Линия термической переработки отходов, содержащих гидроксиды металлов, предназначена для обработки продуктов, получаемых на соответствующих линиях утилизации, и включает стадии первичной подготовки отходов путем гранулирования; сушки и обжига в барабанных печах; обезвреживания отходящих газов и окончательной обработки продукта путем фракционирования.

Данные технологические линии позволяют достаточно эффективно перерабатывать жидкие неорганические отходы с получением на выходе товарного продукта. Следует отметить, что поступающие на ФХО жидкие промышленные отходы имеют разнообразный химический состав, при этом их смесевой характер оказывает существенное влияние на эффективность переработки, выбор оптимального варианта которой во многом определяется установлением содержания тех или иных компонентов отходов в их смесях. В связи с этим важное значение имеет входной химико-аналитический контроль поступающих на ПТК жидких отходов, разработка и применение для этих целей экспрессных и селективных физико-химических методов анализа [18; 19].

В материалах проектной документации в части мероприятий по охране окружающей среды отмечается, что участок ФХО функционирует по принципу замкнутого водооборота с исключением сброса стоков во внешнюю среду, однако анализ применяемых технологических решений свидетельствует об обратном. Согласно материалам ОВОС⁴, на линию очистки и обессоливания воды поступает ~49 000 т/год минерализованных сточных вод (МСВ) с общим солесодержанием МСВ ~150 г/л. С учетом содержания взвешенных веществ, масел, нефтепродуктов и общего количества МСВ суммарная масса образующейся за год растворенной неорганической, дисперсной и органической фазы в МСВ будет составлять ~7 400 т, следовательно, масса собственно воды в МСВ будет равна ~42 000 т, при этом на линию приготовления реагентов, линию промывки и в промежуточную емкость для последующей передачи потребителям ПТК после очистки и обессоливания МСВ подается ~36 000 т/год условно чистой воды. Следовательно, разница в 6 000 т/год выводится за пределы системы водооборота, из чего следует, что за планируемые 30 лет функционирования производственно-технического комплекса во внешнюю среду попадет 180 000 т сточных вод.

⁴ Производственно-технический комплекс по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов I и II классов опасности «Горный». Оценка воздействия на окружающую среду, часть 1, книга 1: ООО «НИИТОНХиБ», Саратов, 2022.

Функционирование сушильной камеры и обжиговой печи на линии термообработки (9 линия ФХО) создает существенные риски образования (ресинтеза) диоксинов с последующим их выбросом в атмосферу и адсорбцией на ультрадисперсных частицах получаемых продуктов. Известно [20; 21], что одновременное присутствие в реакционной среде хлор-, кислород-, водород- и углеродсодержащих соединений в интервале температур от 230 до 530°C достоверно ведет к образованию в результате обратимой химической реакции полихлорированных дибензо-*n*-диоксинов. Именно такие условия реализуются в блоке термообработки и тепловом модуле утилизации тепла дымовых газов на линии 9: на термообработку поступают хлоросодержащие массы гидроксидов и оксидов металлов, топочный газ, подаваемый в сушилку и печь, содержит углеводороды, подаваемый кислород обеспечивает горение, реакционная среда разогревается до 350°C (сушилка) и 1 000°C (печь), а затем охлаждается, находясь в интервале критических температур образования ПХДД/ПХДФ в течение времени, необходимым для их ресинтеза.

Таким образом, физико-химическая обработка жидких неорганических отходов также имеет ряд технологических трудностей, связанных с невозможностью реализации полностью замкнутого водооборота и образованием (ресинтезом) диоксинов.

Заключение

Проведенное исследование демонстрирует возможности рекомендованных к реализации на ПТК технологических решений по термическому обезвреживанию и физико-химической обработке промышленных отходов I и II классов опасности. Показано, что наряду с достижением требуемых эксплуатационно-технических показателей (полное сгорание, широкая номенклатура сжигаемых отходов, высокая производительность процесса для ТО, универсальность и эффективность переработки отходов для ФХО) имеется ряд технологических затруднений, оказывающих негативное влияние на состояние окружающей среды и здоровье человека. Для термического обезвреживания отходов возможно применение технологий, не связанных с прямым сжиганием утилизируемой массы, позволяющих в ряде случаев исключить появление диоксинов в реакционной среде.

В современных условиях технологической невозможности достижения полного исключения ресинтеза диоксинов в процессе пламенного ТО опасных отходов, во избежание их загрязнением окружающей среды в российских регионах с достаточно высокой плотностью населения (Саратовская, Кировская, Курганская области, Удмуртия) видится целесообразным размещение производственно-технических комплексов по обработке, утилизации и обезвреживанию опасных отходов на территориях, где нет постоянно проживающего населения, а также отсутствуют развитые сети водных источников, способствующие активной миграции загрязняющих веществ, содержащихся в производственных стоках технологических линий ФХО. Важной проблемой является также разработка и создание методов «on-line» контроля состава газовых выбросов установок термического обезвреживания отходов на содержание наиболее токсичных компонентов, таких, как диоксины и тяжелые металлы, что позволит существенно снизить экологические риски при их эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хорошавин Л.Б. Основные технологии переработки промышленных и твердых коммунальных отходов / Л.Б. Хорошавин, В.А. Беляков, Е.А. Свалов. — Саратов, Екатеринбург: Профобразование, 2024. — 219 с.

2. Mathew N. Dioxins and their impact: a review of toxicity, persistence, and novel remediation strategies / N. Mathew, A. Somanathan, A. Tirpude, A.M. Pillai, P. Mondal, T. Arfin // *Analytical Methods*. — 2025. — V 17, № 8. — P. 1698–1748. — DOI: 10.1039/d4ay01767f. (дата обращения: 20.04.2025 г.).
3. Румак В.С. Молекулярные и клеточные аспекты токсичности диоксинов / В.С. Румак, Н.В. Умнова, Г.А. Софронов // *Вестник РАМН*. — 2014. — № 3-4. — С. 77–84. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21466933> (дата обращения: 18.04.2025 г.).
4. Жиганков Д.В. Термическое обезвреживание отходов: значение для обеспечения экологической безопасности // *Вестник науки*. — 2023. — Т 2, № 10(67). — С. 299–303. — URL: <https://www.вестник-науки.рф/article/10215> (дата обращения: 18.04.2025 г.).
5. Кофман Д.И. Термическое уничтожение и обезвреживание отходов / Д.И. Кофман, М.М. Востриков. — СПб.: Профессинал, 2013. — 337 с.
6. Петров В.Г. Расчет количества образовавшихся диоксинов в дымовых газах установок по сжиганию отходов и оценка токсичности газовой смеси / В.Г. Петров // *Химическая физика и мезоскопия*. — 2016. — Т 18, № 3. — С. 460–467. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27165653> (дата обращения: 18.04.2025 г.).
7. Осипов В.И. Что лучше — сжигать или разлагать твердые коммунальные отходы? / В.И. Осипов // *Вестник РАН*. — 2021. — Т 91, № 8. — С. 769–778. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46386420> (дата обращения 21.04.2025 г.).
8. Мазурин И.М. Системный анализ задачи переработки твёрдых бытовых отходов / И.М. Мазурин, В.В. Понуровская, С.П. Колотухин // *Вестник РАЕН*. — 2018. — № 5. — С. 76–84.
9. Трубачев А.В. Проблема диоксиновой безопасности при эксплуатации установок термообезвреживания отходов / А.В. Трубачев, Л.В. Трубачева, С.Ю. Лоханина // *Экологическая безопасность в техносферном пространстве* / Екатеринбург: РГППУ, 2023 — С. 315–318. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=fnoaha> (дата обращения: 16.04.2025 г.).
10. Мишустин О.А. Обзор развития и применения технологии пиролиза для переработки отходов / О.А. Мишустин, В.Ф. Желтоброхов, Н.В. Грачева, С.Б. Хантимирова // *Молодой ученый*. — 2018. — № 45(231). — С. 42–45. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36423277> (дата обращения: 16.04.2025 г.).
11. Габитов Р.Н. Повышение эффективности пиролизной переработки твердых коммунальных отходов / Р.Н. Габитов, О.Б. Колибаба, Д.А. Долинин, М.М. Чижикова // *Вестник Ивановского государственного экономического экономического университета*. — 2023. — № 2. — С. 19–27. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=53700383> (дата обращения: 18.04.2025 г.).
12. Патент RU 2478168 С1 «Плазмохимический способ переработки твердых бытовых и промышленных отходов». Емельянов С.Г., Звягинцев Г.Л., Кобелев Н.С., Назарова Д.Г., Назаров А.Н., Ларичкина Д.О. 23.09.2011, ФГБОУ ВО Юго-Западный государственный университет, опубл. 27.03.2013, Бюл. № 9, Юго-Западный государственный университет. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37508291> (дата обращения: 21.04.2025 г.).

13. Ханзафарова А.У. Плазменная утилизация отходов: достоинства и недостатки / А.У. Ханзафарова, С.В. Анахов // Экологическая безопасность в техносферном пространстве / Екатеринбург: РГППУ, 2022. — С. 321–326. URL: <https://elibrary.ru/usiwfi> (дата обращения: 20.04.2025 г.).
14. Fedyaeva O.N. Supercritical water oxidation of chlorinated waste from pulp and paper mill / O.N. Fedyaeva, Morozov S.V., Vostrikov A.A. // Chemosphere. — 2021. — V 283. — P. 131239. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46875524> (дата обращения: 18.04.2025 г.).
15. Каюмов Р.А. Сверхкритическое водное окисление для обезвреживания отхода процесса эпоксицирования пропилена / Р.А. Каюмов, А.А. Сагдеев, А.Т. Галимова, Ф.М. Гумеров, Р.А. Усманов // Вестник Казанского технологического университета. — 2012. — Т 15, № 1. — С. 43–47. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17294287> (дата обращения: 18.04.2025 г.).
16. Бродский В.А. Обезвреживание жидких техногенных отходов I и II классов опасности и получение вторичных продуктов / А.В. Бродский, А.В. Колесников, В.А. Колесников В.А. — М.: РХТУ, 2021. — 111 с.
17. Стоянова А.Д. Физико-химические основы технологии обезвреживания жидких техногенных отходов / А.Д. Стоянова, Т.В. Конькова. — М.: Инфа-Инженерия, 2023. — 228 с.
18. Трубачева Л.В. Применение минерально-органических фоновых электролитов для вольтамперометрического контроля химического состава жидких неорганических отходов I–II классов опасности / Л.В. Трубачева, С.Ю. Лоханина, А.В. Трубачев // Химическая физика и мезоскопия. — 2021. — Т 23, № 3. — С. 366–373. Режим доступа URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-mineralno-organicheskikh-fonovykh-elektrolitov-dlya-voltamperometricheskogo-kontrolya-himicheskogo-sostava-zhidkikh> (дата обращения: 22.04.2025 г.).
19. Трубачева Л.В. Одновременное вольтамперометрическое определение меди (II), свинца (II) и кадмия (II) в растворах электролитов с применением хлоридных диметилсульфоксидсодержащих фоновых сред / Л.В. Трубачева, А.В. Трубачев // Восточно-европейский научный журнал. — 2024. — Т 1, № 107-108. — С. 4–9. — URL: <https://archive.eesa-journal.com/index.php/eesa/issue/view/103/152> (дата обращения 22.04.2025 г.).
20. Петров В.Г. Расчет предэкспоненциального множителя в уравнении Аррениуса для реакций синтеза диоксинов в зонах охлаждения отходящих газов инсинераторов / В.Г. Петров // Химическая физика и мезоскопия. — 2011. — Т 13, № 2. — С. 251–254. Режим доступа URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/raschet-predeksponentsialnogo-mnozhitelya-v-uravnenii-arreniusa-dlya-reaktsiy-sinteza-dioksinov-v-zonah-ohlazhdeniya-othodyaschih> (дата обращения 22.04.2025 г.).
21. Петров В.Г. Применение термодинамических и кинетических расчетов реакций синтеза диоксинов для контроля их количества в дымовых газах установок по сжиганию отходов / В.Г. Петров, М.А. Корепанов, А.В. Трубачев, Д.К. Жиров // Механика и физико-химия гетерогенных сред, наносистем и новых материалов / Ижевск: ИМ УрО РАН, 2015. — С. 147–161. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=ulmeur> (дата обращения 21.04.2025 г.).

Trubachev Alexey Vladislavovich

Scientific Research Institute — Federal Research Centre for Projects Evaluation and Consulting Services, Moscow, Russia
E-mail: trub_av@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3773-740X>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=147629

Trubacheva Larisa Viktorovna

Udmurt State University, Izhevsk, Russia
E-mail: trub12@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3315-8974>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=147631

Analysis and evaluation of technological solutions for the neutralization of industrial waste of hazard classes I and II

Abstract. The article analyzes technological solutions for the neutralization of industrial waste of hazard classes I and II, proposed for implementation at industrial and technical complexes for the treatment, disposal and neutralization of hazardous waste created on the basis of repurposed facilities for the destruction of chemical weapons in the Kirov, Saratov, Kurgan regions and the Udmurt Republic.

The characteristics of the technical and operational parameters of thermal neutralization (incineration) of solid and liquid waste, as well as the physico-chemical treatment of liquid inorganic waste at appropriate installations and production lines of domestic production are given, attention is focused on alternative combustion technologies of pyrolysis, plasma utilization and supercritical aqueous oxidation.

The advantages and disadvantages of thermal neutralization (incineration) and physico-chemical treatment of hazardous waste are described, modern methods of industrial control of the composition of gas emissions into the atmosphere generated during their incineration, and the importance of input chemical and analytical control of incoming waste is emphasized.

Based on the analysis of the materials of the project documentation of four industrial and technical complexes for the treatment, disposal and neutralization of waste of hazard classes I and II, an assessment of the technological and environmental risks of the functioning of this complexes in the regions of their deployment is given, proposals are formulated to minimize these risks, taking into account the available technological capabilities and control systems of polluting emissions in order to reduce the negative impact on the environment and human health.

Keywords: waste of hazard classes I and II; technological solutions; thermal neutralization; waste treatment; control; polluting emissions; risk minimization