А. Л. Моссэ, В. В. Савчин

ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ
Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова

А. Л. Моссэ, В. В. Савчин

ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ

Минск
«Беларуская навука»
2015

УДК 658.567.5:[621.039.6:533.9]

Моссэ, А. Л. Плазменные технологии и устройства для переработки отходов / А. Л. Моссэ, В. В. Савчин. – Минск : Беларуская навука, 2015. – 411 с. – ISBN 978-985-08-1856-0.

В настоящее время интерес и разнообразие подходов к решению проблемы переработки и уничтожения различных видов накопленных и образующихся отходов существенно возросли. Это связано с тенденцией на «экологизацию» среды обитания, а также с возрастанием опасности от быстронакапливающихся токсичных отходов.

В монографии рассмотрены основные промышленные технологии переработки и уничтожения отходов различного происхождения и оборудование для их термической переработки. Показано, что для реализации экологически чистой технологии переработки отходов перспективно применение низкотемпературной плазмы. Достоинствами метода являются высокая производительность при малых габаритах оборудования, возможность создания желательной газовой атмосферы и совместной переработки различных отходов без их предварительной сортировки. Высокие температуры обеспечивают большую глубину переработки отходов и эффективное уменьшение их объема. Данная технология реализуется в плазменных устройствах стационарного и мобильного исполнения, конструкции и методы расчета которых представлены в монографии.

Предназначена для сотрудников научных и промышленных организаций, а также для студентов, преподавателей, аспирантов и докторантов.

Табл. 51. Ил. 189. Библиогр.: 195 назв.

Рецензенты:

член-корреспондент НАН Беларуси,
доктор технических наук, профессор В. А. Бородуля,
доктор физико-математических наук, профессор Ю. А. Лебедев

ISBN 978-985-08-1856-0

© Моссэ А. Л., Савчин В. В., 2015
© Оформление. РУП «Издательский дом «Беларуская навука», 2015

ВВЕДЕНИЕ

Достигнутые успехи в создании плазменной техники и разработка на ее основе новых технологических процессов позволяют считать низкотемпературную плазму важным инновационным элементом новых промышленных технологий, позволяющим существенно интенсифицировать производство. Использование плазменных технологий открывает новые возможности для подхода к оптимальному управлению физико-химическими процессами, а также к более простой реализации весьма многообразных технологических процессов с максимально возможной эффективностью.

Важное значение в настоящее время приобретают плазменные методы для решения проблемы уничтожения и утилизации промышленных и бытовых отходов. Накопленный опыт исследований по плазменной переработке различных видов отходов (включая радиоактивные и конверсионные) убеждает в больших потенциальных возможностях использования плазмы для поиска и разработки новых направлений при решении задач переработки и уничтожения различных видов отходов и вредных веществ. При этом возможна реализация процессов, основанных на испарении, концентрации или термическом разложении соединений, входящих в состав отходов.

Основным элементом плазменных установок для переработки отходов в большинстве случаев является электрическая дуга, генерирующая термическую плазму любых газов с температурой 5000 К и более. При такой температуре полностью разлагаются любые сложные органические и неорганические соеди-

нения до атомов и ионов. Главная отличительная особенность плазменной технологии заключается в значительной интенсификации процесса деструкции отходов, который протекает за весьма короткие промежутки времени за счет передачи энергии обрабатываемым материалам излучением и конвекцией. В результате фактически исключается необходимость применения окислителя для разложения (сжигания) отходов. Другая существенная особенность плазменных технологий переработки и уничтожения отходов – отсутствие каких-либо высокомолекулярных соединений в продуктах кинетической рекомбинации, т. е. разрушенные в плазме многоатомные соединения обратно не синтезируются.

Таким образом, можно утверждать, что применение низкотемпературной плазмы – одно из перспективных направлений в области утилизации опасных отходов. Посредством плазмы достигается высокая степень обезвреживания отходов различного происхождения, в том числе галогеносодержащих органических соединений, отходов медицинских учреждений. Плазменным методом ведется переработка твердых, пастообразных, жидких, газообразных; органических и неорганических отходов; радиоактивных отходов среднего и низкого уровня активности; бытовых отходов; канцерогенных веществ, на которые установлены жесткие нормы ПДК в воздухе, воде, почве, конверсионных отходов и др.

В книге представлен достаточно полный перечень ведущих мировых фирм и их разработок в области переработки отходов и создания плазменного оборудования. Особое внимание также уделено работам российских и белорусских организаций и компаний, которые в течение многих лет занимаются разработкой плазменных технологий и плазменного оборудования – электродуговых плазмотронов, плазменных модулей, плазменных реакторов и плазменных печей. Также представлены результаты работ по созданию стационарных и мобильных плазменных комплексов.

Одна из наиболее важных проблем при переработке токсичных отходов – это обезвреживание хлорорганических отходов.

Количество таких отходов, получаемых при производстве и применении хлорорганических веществ, исчисляется миллионами тонн. К ним относятся отслужившие срок изделия из хлорорганических полимеров, отработанные хлорорганические растворители (в том числе и с токсичными добавками), диэлектрики (многохлористые дифенилы), пришедшие в негодность пестициды, отходы хлорорганических производств и др. Размещение хлорорганических отходов на полигонах и захоронение должно быть исключено ввиду невозможности их разложения биологическими методами, а также возможности окисления многих из них кислородом воздуха под воздействием солнечного излучения с образованием вторичных токсичных продуктов.

Разработке и промышленной реализации плазмохимических технологий переработки отходов, главным образом хлорорганических и других галогенов (брома и фтора), уделяется большое внимание во многих промышленно развитых странах. К настоящему времени разработано и реализовано несколько опытно-промышленных и промышленных процессов по уничтожению различных видов отходов. К сожалению, технические и технологические данные по их практической реализации в научной и патентной литературе практически отсутствуют, а известная информация носит в основном рекламный характер. Однако известно, что во всех случаях используются электродуговые плазменные реакторы одноструйного или трехструйного типа, а также плазменные печи, которые перерабатывают в основном отходы, подаваемые в виде дисперсных материалов или диспергированных растворов. Возможна также переработка отходов в виде суспензий или эмульсий. Особое место в этом ряду занимают твердые, пакетированные или кусковые отходы, переработка которых возможна в специальных технологических устройствах – плазменных печах различного конструктивного исполнения.

Большой объем исследований по технологиям переработки токсичных отходов и внедрения их в промышленность выполнен в бывшем Советском Союзе, а теперь на постсоветском пространстве, в России, Беларуси и Казахстане. Во всех этих

работах активное участие принимал и принимает в настоящее время Институт тепло- и массообмена академии наук Беларуси. В лаборатории плазменной технологии института для переработки и уничтожения промышленных токсичных отходов разработана и создана плазменная установка с реактором на основе трехструйной камеры смешения. Исследованы технологии уничтожения хлорорганических отходов (хлористый метилен и метилхлороформ), органических отходов с токсичными добавками, пестицидов с истекшим сроком годности и других токсичных отходов, которые содержат хлор. Также исследованы технологии уничтожения галогенов (chlorofluorocarbons) и броморганических отходов. Работы выполнялись по заказам финской, израильской, немецкой и французской фирм. По результатам научно-исследовательских работ изготовлены и переданы заказчикам плазменные технологические установки для переработки токсичных отходов в опытно-промышленном и промышленном масштабах.

В лаборатории плазменной технологии ИТМО Национальной академии наук Беларуси совместно с организациями «МосНПО-Радон» (г. Москва, РФ) и ГУП Всероссийский проектный и научно-исследовательский институт комплексной энергетической технологии (г. Санкт-Петербург, РФ) в течение ряда лет проводились работы по разработке и исследованию плазменной технологии переработки радиоактивных отходов среднего и низкого уровня активности. В результате этих исследований предложена и разработана технологическая установка на базе шахтной печи с плазменными или топливно-плазменными нагревателями для комплексной переработки различных типов радиоактивных отходов. Такая плазменная шахтная печь позволяет перерабатывать различные твердые радиоактивные отходы: бумагу, картон, древесину, спецодежду, резиновые перчатки, поливинилхлоридный пластикат, трупы подопытных животных, бой лабораторной посуды, куски керамики и бетона и другой строительный мусор. Таким образом, могут перерабатываться, с одновременным остекловыванием, различные виды не идентифицированных, радиоактивных отходов. Результаты работы нашли практическую реализацию на промышленных предприятиях.

Опыт, накопленный при разработке технологии и оборудования для переработки радиоактивных отходов, позволил перейти к работам по переработке и уничтожению других видов твердых отходов: промышленных, бытовых и медико-биологических. По заказам японской и немецкой фирм разработаны, изготовлены и поставлены заказчикам плазменные шахтные печи для переработки и уничтожения промышленных и медико-биологических отходов.

Предлагаемая монография ставит своей целью показать состояние проблем в решении комплекса экологических и энергетических задач уничтожения бытовых и промышленных отходов с одновременным использованием этих отходов как возобновляемого энергетического сырья. При этом в качестве основного фактора приоритетности предусматривается минимально отрицательное воздействие на окружающую среду. Рассматривая возможные пути решения этой комплексной задачи, содержание монографии ориентировано на анализ перспективных, высокотемпературных технологий, не требующих специальной трудоемкой и энергозатратной подготовки исходного сырья к переработке, а также технологий, позволяющих получать конечные экологически чистые продукты переработки, пригодные для повторного использования.

Обзор и анализ известных и опубликованных результатов работ показывают, что высокотемпературная газификация отходов в случае плазменного нагрева и окисления водяным паром экономически и экологически является наиболее выгодным технологическим процессом. Высокая температура в реакционной зоне позволяет осуществлять необходимое глубокое разложение отходов с образованием простых соединений, что значительно упрощает их очистку от вредных примесей; переводить в жидкий, безопасный в экологическом отношении шлак все не пиролизуемые остатки; проводить оперативно тонкую регулировку процесса газификации изменением расхода окислителя и мощности плазменных генераторов. Разработаны и реализованы схемы утилизации тепла, получения электроэнергии и использования ее для работы генераторов низкотемпературной плазмы, которые генерируют плазму различных газов для работы печи.

Сравнительный анализ будет выполнен на основе обзора и сравнения представленных технологий и оборудования для реализации этих технологий. Будет показано, что плазменные методы пиролиза устраняют недостатки известных классических методов. Также в монографии будут представлены новые и достаточно интересные публикации по недавно разработанным проектам, комбинированным технологическим схемам и устройствам, которые указывают на целесообразность и эффективность реализации плазменных технологий.

Монография предназначена для сотрудников научных организаций, разработчиков плазмотермических технологий и оборудования, а также может быть использована студентами, преподавателями, докторантами и аспирантами высших учебных заведений.

Глава 1

ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОЦЕССОВ ПЛАЗМОТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ

1.1. Плазменные методы в технологии переработки токсичных отходов

Одной из наиболее серьезных экологических проблем, стоящих перед человечеством, является загрязнение окружающей среды бытовыми и промышленными отходами, которые в большинстве случаев обладают такими нежелательными свойствами, как токсичность, канцерогенность, мутагенность, коррозийность, реакционная способность, пожароопасность. В настоящее время в индустриально развитых странах введены жесткие нормы и условия по размещению и оборудованию полигонов для складирования и захоронения опасных отходов.

В последние годы проблема утилизации токсичных отходов стала актуальной в Республике Беларусь, Российской Федерации, Республике Казахстан и других странах СНГ, что совпадает и с общемировой оценкой ее важности. Это связано с декларируемой на межгосударственном уровне стратегической тенденцией на всестороннюю «экологизацию» среды обитания как фактора, компенсирующего ее деградацию вследствие индустриального развития, а также с возрастанием конкретной опасности для населения от накапливающихся объемов высокотоксичных и инфицированных отходов производства и потребления.

Наиболее распространенным способом переработки опасных органических отходов является их сжигание. Для этих целей широко применяются промышленные тепловые агрегаты [1.1–1.8], например асфальтовые или цементные печи, паровые котлы, циркуляционные печи с псевдоожиженным слоем, вращающиеся обжиговые печи. При температуре в таких печах и устройствах 1000–1200 °С дожигание образующихся летучих органических

соединений проводят во вторичных камерах с дополнительной подачей топлива и окислителя. В некоторых случаях для повышения температуры в горелках воздух обогащают кислородом.

Проведенные исследования [1.1, 1.9–1.13, 1.15–1.17] требуют критического отношения к огневому обезвреживанию токсичных отходов в связи с возможностью вторичных процессов образования чрезвычайно вредных соединений: диоксинов и фуранов [1.14]. Недостатком огневого обезвреживания является также использование дополнительного топлива (обычно природного газа) [1.19–1.21], что существенно увеличивает объемы отходящих газов, а соответственно значительно возрастает нагрузка на систему газоочистки, ее размеры и материалоемкость.

Низкие экологические показатели и ограниченное число отходов, состав которых приемлем для использования в существующих печах, приводят к поискам и разработкам новых технологий.

Проблема полного уничтожения токсичных отходов актуальна, прежде всего, с точки зрения отрицательного воздействия их на окружающую среду. Из известных способов наименьший вред окружающей среде наносит высокотемпературный (плазменный) метод переработки отходов. Основой данной технологии является термохимическое разложение органической составляющей материала отходов (высокотемпературный пиролиз) до атомарного уровня и при этом неорганическая составляющая переводится в расплав и остекловывается. Под воздействием плазменного потока, генерируемого плазменной горелкой, отходы разлагаются. Температура электрической дуги может достигать от 6000 до 10 000 К [1.18], а среднемассовая температура плазменного потока 3000–6000 К [1.19]. Важное преимущество такого процесса – его практическая универсальность. Проведенные исследования и испытания показали высокую эффективность данной технологии для переработки отходов различного происхождения, таких, как отработавшие автомобильные шины; осадки сточных вод; опасные шлаки; зола и шлаки после сжигания твердого топлива и бытовых отходов; металлическая стружка; медицинские и ветеринарные отходы (включая

инфицированный материал); пестициды и другие ядохимикаты с истекшим сроком годности; материалы, содержащие асбест; отходы керамики; стойкие органические загрязнители (СОЗ), отходы растворителей лакокрасочных изделий; загрязненные почвы; смешанные отходы; продукты нефтепереработки; радиоактивные отходы; отравляющие и взрывчатые вещества. Таким образом, практически всех отходов, образующихся в различных сферах производства. Высокотемпературная переработка – это единственная гарантия уничтожения в первую очередь опаснейших биологических, биохимических, химических продуктов и супертоксикантов – диоксинов и диоксиноподобных веществ [1.20].

Одним из наиболее перспективных и бурно развивающихся в последнее время направлений в технологиях переработки и утилизации токсичных отходов является применение методов с использованием низкотемпературной плазмы. Примером может служить использование плазменных печей для сжигания в кислородсодержащей среде или для пиролиза в восстановительной атмосфере, с получением смеси газов H_2 и CO, которые могут быть в дальнейшем использованы в качестве синтез-газа для химической промышленности или как топливная смесь. Причем непосредственное сжигание или пиролиз исходных твердых отходов, обеспечивающих газификацию его неорганических компонентов, обычно являются только первой стадией общего технологического процесса. В целом же он состоит из трех стадий. На второй стадии происходит преобразование газовых продуктов первой стадии до заданного состава (иногда он проводится в специальной камере дожигания), на третьей – обезвреживание негазифицированного неорганического остатка – золы, количество которой составляет до 20% от массы вводимых в печь несортированных медицинских отходов [1.21]. Последняя стадия может проводиться путем плавления золы с получением подлежащего захоронению кристаллического материала или же с получением остеклованных слитков, имеющих более высокую химическую стойкость. Процесс остекловывания может требовать подшихтовки перерабатываемых отходов различными добав-

ками (наиболее распространенные добавки – железо и диоксид кремния). Это позволяет получать силикатные материалы, из которых при хранении в обычных почвах практически не происходит утечки ионов тяжелых металлов. Скорость их выщелачивания не превышает 10^{-9} –10^{-10} кг/(м^2·сут).

1.1.1. Переработка медико-биологических отходов плазменными методами

Особое место среди различных видов отходов занимают так называемые медико-биологические отходы. Все они, в большинстве случаев, подвергаются термическому обезвреживанию или термической обработке, включая чаще всего сжигание (употребляется также термин «инсинерация», от incinerate – сжигать, испепелять).

Увеличивающиеся объемы накапливаемых отходов, в том числе и медико-биологических, представляют серьезную опасность для человека и окружающей среды. Как правило, состав образующихся и известных видов отходов весьма разнообразен и не поддается точной идентификации. Для утилизации таких отходов необходимо использовать специальные технологии. Исследования, проводимые в ряде индустриально развитых стран, направлены на разработку таких новых инновационных технологий и оборудования для эффективной переработки бытовых, промышленных и в первую очередь медико-биологических отходов.

Установки для сжигания медицинских отходов, в том числе и плазменные, реализуют высокотемпературные процессы пиролиза и газификации, которые в результате химических и физических преобразований приводят к разрушению и разложению как органических, так и неорганических соединений, входящих в состав отходов. Установки для сжигания, для гарантии экологически безопасного уничтожения отходов, необходимо комплектовать системами газоочистки. Установка небольших сжигающих устройств (не плазменных) на территориях учреждений здравоохранения с системами очистки отходящих

газов является экономически необоснованной. Их применение связано с опасностью загрязнения окружающей среды диоксинами и тяжелыми металлами. ВОЗ трактует установки для сжигания как «временное решение специально для развивающихся стран, где альтернативные варианты утилизации, типа автоклавирования, измельчения или микроволновой обработки, а также плазменные методы ограничены».

По мнению многих специалистов, безальтернативной технологией для деструкции вредных медицинских отходов являются плазменные технологии. В плазменных системах используется электрический ток, который ионизирует инертный газ (аргон и др.) и формирует электрическую дугу с температурой около 6000 К. Медицинские отходы в этих установках нагреваются до 1300–1700 °С и более, в результате чего уничтожаются потенциально патогенные микробы, а отходы преобразовываются в плавленный шлак, металлические слитки и инертные газы.

При современном уровне развития промышленности проблема переработки медицинских отходов приобретает первостепенное значение. В большинстве стран с каждым годом вводятся новые законы, ужесточаются экологические нормы. Крупные промышленные компании и муниципальные структуры в этой ситуации вынуждены вкладывать значительные средства в уничтожение отходов. С каждым годом разработка и реализация экологически безопасных технологий переработки отходов приобретает все большую инвестиционную привлекательность.

До недавнего времени проблеме утилизации медико-биологических отходов не уделялось должного внимания вследствие малых объемов производимых медико-биологических отходов по сравнению с другими видами отходов. Так, например, по данным на последние годы XX в., в Республике Беларусь ежегодно накапливалось около 37 млн т, неутилизированных отходов химической отрасли, 200 тыс. т – нефтехимической. Необходимость ежегодного обезвреживания или уничтожения опасных отходов медико-биологического происхождения составляла приблизительно 20 т. Сравнительный анализ количества образующихся отходов, показан на рис. 1.1. Аналогичная ситуация

Рис. 1.1. Сравнение объема отходов, образующихся в различных отраслях промышленности

складывалась и в других регионах на постсоветском пространстве. Таким образом, очевидно, что все большие объемы накапливаемых медико-биологических отходов представляют серьезную экологическую опасность.

Санитарно-гигиенические исследования типичных твердых медико-биологических отходов, выполненные в Республике Беларусь, Российской Федерации и в других зарубежных странах, показывают, что их опасность для окружающей среды значительно выше, чем у большинства химических отходов (за исключением лишь содержащих вещества 1-го класса опасности по токсикологической классификации). Так, например, в случае твердых отходов, содержащих цитостатические препараты, вирусы, антибиотики и др., их опасность сравнима с опасностью загрязнения радиоактивными отходами высокого и среднего уровня активности.

Медико-биологические отходы в большинстве случаев содержат токсичные вещества и вредные биологические формы (вирусы, микробы, штаммы, прионы). Типичный фазовый со-

став таких отходов: 50–60% по объему составляют жидкости, 20–40% – твердые вещества, 10–20% – газы. Содержание неорганических веществ составляет примерно 50%, средняя теплотворная способность примерно 4000 ккал/кг. В составе медико-биологических отходов присутствуют пищевые отходы, бумага, дерево, текстиль, кожа, резина, различные виды пластмасс, стекло, металл, керамика и многое другое, а также различные медицинские и химические препараты. Средний качественный состав медико-биологических отходов приведен на рис. 1.2.

Известно, что при производстве различных лекарственных препаратов образуются не только подлежащие дальнейшему использованию вещества и продукты, но и разнообразные отходы. В состав медико-биологических отходов входят также фильтровальные ткани, активированный уголь и др. Большое количество разнообразных отходов образуется в госпиталях и больницах в результате оказания медицинской помощи больным и как результат обслуживания медицинских приборов и оборудования. Это могут быть не только пищевые отходы и перевязочные материалы, в том числе содержащие микробы и вирусы, а также

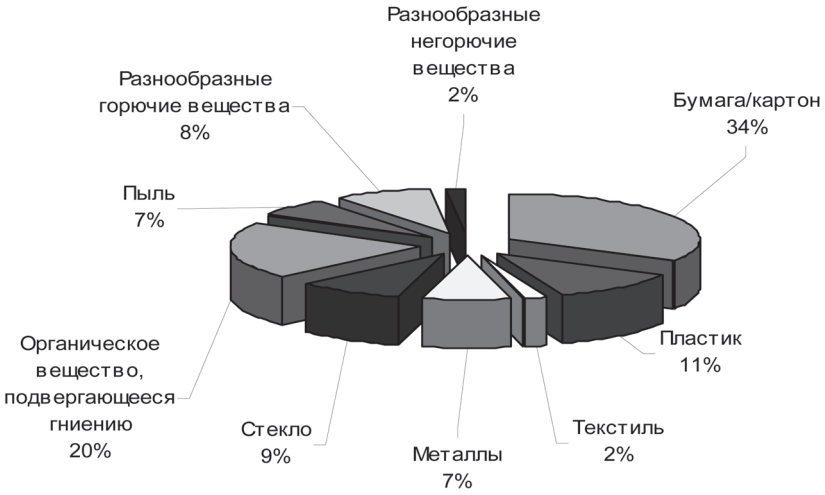

Рис. 1.2. Средний качественный состав медико-биологических отходов

различные виды отходов, содержащие использованные терапевтические медикаменты, в том числе с радиоактивными элементами, такими, как ^{3}H, ^{14}C, ^{35}P, ^{60}Co, ^{90S}Sr, ^{137}Cs и др. В итоге следует отметить, что количество только медицинских отходов, образующихся в лечебных учреждениях в расчете на одно койкоместо, может достигать примерно шести килограмм в день, а в среднем, по известным и опубликованным данным, составляет примерно 3,0–3,5 кг/день. И как показано на рис. 1.3, может существенно отличаться для различных стран.

В технологии переработки и уничтожения медико-биологических отходов основными общепризнанными методами являются термические методы, в частности с использованием топливных или плазменных печей, для сжигания в кислородсодержащей среде. Или для пиролиза в восстановительной атмосфере с получением H_2 и CO, которые могут быть в дальнейшем использованы в качестве синтез-газа или как топливная смесь.

Одним из наиболее перспективных направлений решения этой проблемы является применение высокотемпературных плаз-

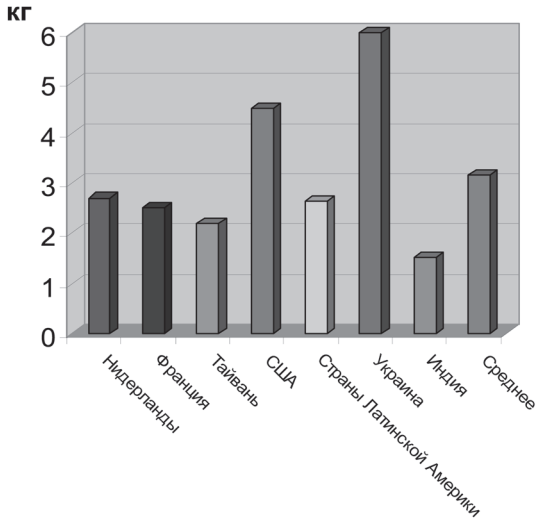

Рис. 1.3. Количество отходов, образующихся в лечебных учреждениях разных стран, в расчете на одно койкоместо

менных методов. Плазмотермическая переработка медико-биологических отходов, так же как и других видов отходов, характеризуется полным разрушением материала отходов и уничтожением вредных веществ. Любые органические и неорганические вещества могут быть утилизированы в плазме при высокой температуре, которая достигается применением электродуговых генераторов плазмы – плазмотронов. Плавление зольного остатка позволяет получить химически инертные остеклованные вещества, утилизация которых или использование в качестве наполнителей не представляет никакой опасности.

По сравнению с неплазменными печами, даже использующими интенсивные газодинамические режимы обработки (псевдоожиженный слой, кислородное дутье и др.), при использовании плазменного нагрева достигается ряд существенных преимуществ. Объем печи уменьшается в 6–8 раз (при сохранении производительности по сырью), соответственно снижается площадь необходимых производственных помещений. Уменьшается примерно на порядок объем отходящих газов и увеличивается температура в реакционной зоне печи до 1800–2000 К. Это позволяет улучшить проплавление зольного остатка, образующегося от сжигания отходов, и исключить образование в газовой фазе токсичных компонентов – хлора, диоксинов и полихлорированных бифенилов, а также возможных высокомолекулярных соединений продуктов кинетической рекомбинации.

Все вышеперечисленное стимулировало постановку и проведение исследований по применению плазменных методов в технологии переработки и уничтожения медико-биологических отходов, некоторые результаты которых представлены в работах [1.22–1.24].

1.1.2. Плазмотермическая переработка бытовых отходов

Основой процесса термической обработки отходов различного происхождения является воздействие высоких температур, приводящих к термолизу и окислению их составляющих. В результате образуется твердый продукт, в котором сконцентрирована подавляющая часть радиоактивных загрязнителей,

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение 3

Глава 1

Технологии и оборудование для процессов плазмотермической переработки отходов

1.1. Плазменные методы в технологии переработки токсичных отходов 9
1.1.1. Переработка медико-биологических отходов плазменными методами 12
1.1.2. Плазмотермическая переработка бытовых отходов 17
1.1.3. Плазменная переработка радиоактивных отходов 22
1.1.4. Переработка промышленных отходов различного происхождения 26
1.1.5. Технология переработки и повторного использования упаковки «ТетраПак» 31
1.2. Плазменные аппараты и устройства для переработки отходов 37
1.2.1. Плазменные реакторы и печи 37
1.2.2. Электродуговые генераторы низкотемпературной плазмы – плазмотроны постоянного тока 66
1.2.3. Электродуговые плазмотроны переменного тока 72

Глава 2

Плазменные устройства для переработки отходов

2.1. Плазменная камерная печь 74
2.2. Плазменная двухкамерная печь 82
2.3. Плазменная шахтная печь 86
2.4. Вращающаяся печь с плазменным нагревом 94
2.5. Проектное предложение по созданию производства для плазмохимической переработки токсичных отходов (ПППТО – 500х4) 99
2.5.1. Технические характеристики и состав блока плазменной переработки токсичных отходов 100
2.5.2. Плазменный блок 104

2.5.3. Блок очистки отходящих газов и сбора продуктов переработки твердых отходов 105
2.5.4. Блок рекуперации тепла отходящих газов 108
2.5.5. Система газоснабжения различными газами и компрессорный блок плазмообразующего газа 108
2.5.6. Система оборотного водоснабжения 110
2.5.7. Система электроснабжения 112
2.5.8. Спецификация оборудования системы электроснабжения 114
2.5.9. Пульт и система автоматизированного управления блоком ППТМО 117
2.5.10. Место расположения блока ППТМО 123
2.5.11. Показатели назначения и использования электроэнергии, компремированных газов и воды 125

Глава 3

Генераторы низкотемпературной плазмы – плазмотроны для работы плазменных устройств

3.1. Плазмотроны постоянного тока для нагрева печи 126
3.1.1. Плазмотроны постоянного тока с термокатодом 126
3.1.2. Плазмотроны постоянного тока с охлаждаемым полым электродом – катодом типа ПД-1 мощностью до 100 кВт 142
3.2. Плазмотроны постоянного тока с охлаждаемым полым электродом – катодом ПД-26 и УП-45 мощностью 200–500 кВт 149
3.3. Плазмотроны постоянного тока для технологических процессов, работающие на смесях различных газов 159
3.4. Обобщенные ВАХ плазмотронов ПД-1 и УП-45, работающих в режимах пиролиза и окислительного пиролиза 164
3.5. Плазменное горелочное устройство – ПГУ на основе электродугового плазмотрона типа ПДС-50/03 177
3.5.1. Техническое описание конструкции модернизированного плазмотрона ПДС-50/03 179
3.5.2. Расчет температуры нагрева охлаждающего воздуха в корпусе ПГУ 182
3.5.3. Расчет ресурса работы гафниевого катода плазмотрона ПДС-50/03 185
3.5.4. Испытания плазменных горелочных устройств с плазмотронами ПДС-50/03, результаты измерений и определения оптимальных параметров работы 187
3.5.5. Оптимальные параметры работы плазмотрона ПДС-50/03 188
3.5.6. Результаты испытаний плазменных горелочных устройств с плазмотроном ПДС-50/03 189
3.5.7. Результаты испытаний плазменных горелочных устройств, с плазмотроном ПДС-50/03 на ресурс работы в течение 50 ч и более 190
3.6. Плазмотроны переменного тока для нагрева печи 193
3.7. Плазмотроны прямого и комбинированного действия 201

Глава 4

Методы и результаты расчетов процессов теплообмена плазменных печей

4.1. Тепловой расчет плазменной печи камерного типа для переработки отходов 205
4.1.1. Методика теплового расчета камерной печи 205
4.1.2. Влияние расхода плазмообразующего газа – воздуха на состав синтез-газа и энергетические параметры печи 210
4.1.3. Результаты теплового расчета плазменной камерной печи..... 213
4.2. Тепловой расчет плазменной двухкамерной печи 216
4.2.1. Методика расчета плазменной двухкамерной печи 216
4.2.2. Результаты моделирования нагрева камеры сжигания печи... 219
4.2.3. Тепловой и газодинамический расчет дожигания отходящих дымовых газов 221
4.2.4. Газодинамический и тепловой расчет смешения потока дымовых газов и плазменной струи в камере дожигания..... 225
4.3. Тепловой расчет камеры сжигания плазменной шахтной печи 229
4.4. Расчет шахтной печи со сгораемым фильтрующим материалом 233
4.4.1. Разработка математической модели фильтрации отходящих газов в слое загрузки при плазмотермической переработке отходов в шахтной печи со сгораемым фильтрующим материалом 233
4.4.2. Техническая реализация процесса в слое загрузки при плазмотермической переработке отходов в шахтной печи со сгораемым фильтрующим материалом..... 235
4.4.3. Теоретическая разработка математической модели процесса ... 238
4.4.4. Сравнительный анализ результатов расчета..... 243
4.5. Расчет параметров процесса и элементов конструкции шахтной печи 245
4.5.1. Расчет тепловой мощности печи 245
4.5.2. Расчет тепловой мощности камеры дожигания..... 248
4.5.3. Расчет объема и удельной радиоактивности дымовых газов 249
4.5.4. Расчет высоты фильтрующего шахтного слоя загрузки..... 252
4.5.5. Расчет гидравлического сопротивления слоя загрузки..... 254

Глава 5

Результаты исследований и эксплуатации плазменных печей

5.1. Результаты исследования и работы плазменной камерной печи 257
5.2. Результаты исследования и опытной эксплуатации плазменной двухкамерной печи 263
5.2.1. Двухкамерная плазменная печь для сжигания РАО 263
5.3. Результаты исследований и работы плазменной шахтной печи 266
5.3.1. Результаты исследований динамики нагрева плазменной шахтной печи..... 266

5.3.2. Исследование процесса плазмотермической переработки модельных отходов в шахтной печи 274
5.3.3. Результаты исследования процесса плазмотермической переработки радиоактивных отходов в шахтной печи..... 279
5.3.4. Результаты экспериментальных исследований по нагреву плазменной шахтной печи плазмотроном переменного тока..... 285
5.3.5. Реактор-газификатор шахтного типа 290
5.4. Промышленные плазменные установки для уничтожения токсичных отходов..... 296
5.4.1. Плазмотермическая установка для уничтожения медицинских отходов 296
5.4.2. Результаты исследования и работы вращающейся печи с плазменным нагревом..... 308

Глава 6

Плазменные установки и комплексы для переработки отходов, результаты разработок и исследований, перспективы использования

6.1. Сравнительный анализ термических технологий..... 311
6.2. Сравнение параметров работы печей с огневым и плазменным обогревом для высокотемпературной переработки твердых радиоактивных отходов..... 320
6.3. Применение пароплазменной технологии для пиролиза органических, в том числе медицинских и других опасных, отходов..... 327
6.4. Мобильные плазменные установки и комплексы для переработки твердых и жидких токсичных отходов 337
6.4.1. Технологические стадии процесса плазмотермической переработки опасных отходов в мобильной плазменной установке 340
6.4.2. Технологическая схема установки переработки отходов..... 341
6.4.3. Материальный баланс процесса переработки отходов 347
6.4.4. Оборудование установки плазмотермической переработки опасных отходов 349
6.4.5. Расход электроэнергии и материальных сред..... 356
6.5. Новые технологические схемы и устройства для процессов переработки отходов..... 357
6.5.1. Получение тепла и электроэнергии..... 358
6.5.2. Получение дизельного топлива из полимерных отходов..... 362
6.5.3. Получение теплоизоляционных материалов из шлака..... 364
6.5.4. Получение диоксида углерода из отходов..... 368
6.5.5. Получение технологического водорода..... 371
6.6. Технологические схемы утилизации тепла 376
6.7. Экономические показатели технологии экологически безопасной плазменной утилизации твердых отходов..... 380

Литература..... 395

Научное издание

Моссэ Альфред Львович
Савчин Василий Васильевич

ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ

Редактор *А. А. Баранова*
Художественный редактор *Д. А. Комлев*
Технический редактор *О. А. Толстая*
Компьютерная верстка *Л. И. Кудерко*

Подписано в печать 26.05.2015. Формат $60\times84^{1}/_{16}$. Бумага офсетная.
Печать цифровая. Усл. печ. л. 23,95+0,12 вкл. Уч.-изд. л. 21,1.
Тираж 120 экз. Заказ 95.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Республиканское унитарное предприятие «Издательский дом «Беларуская навука». Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/18 от 02.08.2013.
Ул. Ф. Скорины, 40, 220141, г. Минск.

ISBN 978-985-08-1856-0