

**С. В. Анахов**

**S. V. Anakhov**

*sergej.anahov@rsvpu.ru*

ФГАОУ ВО «Российский государственный  
профессионально-педагогический университет», г. Екатеринбург  
Russian state vocational pedagogical university, Ekaterinburg

## **СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОПЛАЗМЕННОГО ОБЕЗВРЕЖИВАНИЯ ОТХОДОВ**

### **MODERN TECHNOLOGIES OF PLASMA WASTE DECONTAMINATION**

**Аннотация.** Рассмотрены направления использования плазменных процессов в технологиях переработки отходов. Отмечена актуальность и значимость внедрения технологий электроплазменного обезвреживания отходов, а также возможности решения имеющихся проблем. Обращено внимание на эффективность применения плазменного дожигания токсичных газообразных выбросов в технологиях термической утилизации отходов.

**Abstract.** The directions of using plasma processes in waste processing technologies are considered. The relevance and significance of plasma technologies introduction for waste decontamination, as well as the possibility of solving existing problems, are noted. Attention is drawn to the efficiency of plasma afterburning of toxic gaseous emissions in technologies of thermal waste decontamination.

**Ключевые слова:** экологическая безопасность, утилизация отходов, плазменное обезвреживание, обеззараживание, инсинерация, плазмотрон.

**Keywords:** ecological safety, waste recycling, waste treatment, plasma decontamination, incineration.

В последние годы ученые и инженеры разных стран активизировали свои усилия в поисках новых эффективных решений экологических проблем. Одним из таких решений является применение плазменных методов в технологиях утилизации отходов. Свидетельством значимости данного направления стало присуждение в 2011 г. премии «Глобальная энергия» академику Ф. Рутбергу за разработку различных видов электроплазменной техники и её внедрение в проектах экологической направленности. Эффективное внедрение плазменных технологий способствует решению одной из основных задач национального проекта «Экология» – организации современной системы сбора и

утилизации бытовых и промышленных отходов, постановка и решение такого рода задач находятся в русле Приоритетных направлений развития науки и техники РФ и дорожной карты НТИ (Technet, EnergyNet, SafeNet), относятся к Перечню критических технологий РФ.

В основе любого электроплазменного метода лежит применение генератора низкотемпературной плазмы – плазмотрона, в котором при температурах плазменной струи свыше 5000 К возникает эффект высокоэнергетичного воздействия на вредные вещества различного фазового состава, позволяющий произвести их глубокое и быстрое разложение. Однако, эффективное внедрение электроплазменных технологий в производства по переработке отходов требует оптимальных решений с учетом критериев производительности, себестоимости и безопасности процесса, а также качества достигаемого в ходе его осуществления результата.

Наиболее широко применяемой плазменной технологией в настоящее время является переработка техногенных металлосодержащих отходов, использующая традиционный метод плазменной резки для ручного или автоматизированного демонтажа металлоконструкций (корпусов судов, самолетов, объектов военного и спецназначения, элементов нефте- и газодобычи и транспортировки) и их разделки в транспортный габарит для последующей утилизации в виде металлолома [2]. Для резки в полевых условиях можно использовать мобильные плазмо-резательные установки мощностью до 50–60 кВт в перемещаемом контейнерном или передвижном (на базе прицепов) исполнении, при разделке металлолома в стационарных условиях – автоматизированные плазменные комплексы мощностью от 10 до 1000 кВт. Известными преимуществами плазменных технологий является возможность резки любых металлов (а иногда и неметаллов) толщиной до 150 мм, использование воздуха в качестве плазмообразующего газа, высокая скорость и производительность резки, низкая себестоимость (в расчете на метр реза). При этом, конечно, следует учитывать необходимость использования вспомогательного оборудования – источника питания, компрессора и системы водоохлаждения (для мощных плазмотронов), а также применения мер защиты от опасных и вредных факторов – больших токов, искр, брызг и выбросов расплава, высокого уровня шума, различных видов излучений и газовыделения. В качестве примеров мобильных комплексов для воздушно-плазменной резки, можно упомянуть российские разработки ООО «НПО Полигон» (г. Екатеринбург), за рубежом – установки для утилизации металлов и токсичных отходов неметаллического происхождения Westinghouse Plasma Co. (США), позволяющие избавиться от их транспортировки к местам переработки. Можно также упомянуть заводы General Motors в Огайо (США), Essar Steel (Индия), ALCAN (Канада), перерабатывающий десятки тонн металлолома в час с использованием плазмотронов Marc II фирмы Solena мощностью 2,5 МВт.

В последние годы увеличивается интерес к применению плазменных технологий в сфере переработки отходов производства и потребления. К отходам производства обычно относят токсичные вещества (хлорорганика, радиоактивные вещества, пестициды), неорганические материалы (стеклобой, бетон), сельскохозяйственные отходы, сточные воды и т.д., а к муниципальным – твердые бытовые отходы (ТБО), отходы медицинских учреждений и очистных сооружений. Большинство современных методов обезвреживания и утилизации таких отходов (сортировка на мусороперерабатывающих заводах, захоронение с засыпкой на полигонах, сжигание на мусоросжигающих заводах, биотермическое компостирование, низко- и среднетемпературный пиролиз) не отвечают в полной мере требованиям природоохранного законодательства, из-за чего появляются различные способы переработки, характеризующиеся существенным увеличением температур в зоне термического воздействия на утилизируемый материал – барботажная плавка в печах Ванюкова и электрошлаковых печах, плазменные электротехнологии. Последнее направление является одним из наиболее развиваемых – например, в США в год появляется до 400 патентов и до 1500 публикаций в сфере плазменных электротехнологий, свидетельствующих о переходе к стадии их промышленного внедрения в сфере плазменной газификации [5], переработки высоко-опасных отходов, отвалов горно-металлургических производств [4] и т.д. В качестве примеров подобных технологий можно упомянуть продукцию фирм Recovered Energy, Inc. и Mason and Hanger National, Inc.(США), RCL (Канада), Europlasma (Франция), оборудование для плазменной газификации ТБО на борту круизных судов фирмы Solena Group (США) и т.д. Завод по извлечению кобальта и меди из медных шлаков на основе процесса Enviroplas фирмы Mintek (ЮАР) работает с 2001 г., подобные же технологии используются для извлечения никеля из медно-никелевых шлаков и цинка – из доменных, для переработки пыли при производстве нержавеющей стали (оборудование фирм SKF (Швеция) и Tetronics (Великобритания)). Принцип работы технологий плазменного обогащения основан на пропускании, как правило, порошкообразного вещества через плазменную струю, после чего его состав оказывается обогащенным ценным металлом, а остающийся экологически безвредный остеклованный шлак может быть использован в строительстве. В нашей стране известны разработки плазменных электропечей НГТУ, ИТ СО РАН и ОАО «Сибэлектротерм», в том числе совместно с фирмой «Самсунг». В Приморском научно-техническом центре РКК «Энергия» с участием институтов нефтехимического синтеза и высоких температур РАН создана установка для получения бензина из природного газа. Можно упомянуть авторские разработки технологий по переработке содосульфатных отходов алюминиевых производств, а также совместный с институтом металлургии УрО РАН проект плазмохимической технологии переработки различных молибденсодержащих материалов.

Отдельного внимания заслуживает применение плазменных технологий для решения задач обезвреживания и утилизации отходов высокой степени опасности (в первую очередь – медицинских отходов). Такие отходы часто имеют сложный морфологический состав с металлическими включениями, инфицирующими компонентами и мутагенной микрофлорой, а, следовательно, их обеззараживание и утилизация (с учетом жестких требований по газовым выбросам) могут быть обеспечены за счет высокотемпературного плазменного воздействия на расплав утилизируемого вещества с последующей очисткой отходящих газов. Подобные технологии реализованы в разработках института проблем электрофизики РАН, ЗАО «Плазма-Тест», совместном проекте института теоретической и прикладной механики СО РАН, ООО «Огневая технология» и фирмы Dept of Environmental Sci & Tech. (Корея). Можно упомянуть авторскую разработку по обезвреживанию отходов плазменным методом на стадии дегазации после их предварительного нагрева в солевом расплаве (включена в стратегический проект «Управление отходами» г. Екатеринбурга), а также исследования НПО «Радон» процессов переработки радиоактивных отходов в шахтной печи с плазменным источником нагрева. Активно разрабатываются в настоящее время технологии переработки крайне вредных для человека полихлорированных бифенилов в составе трансформаторных масел, соволов и совтолов. К настоящему времени в мировой практике сложилось мнение об исключительности применения плазменных методов для обезвреживания токсичных веществ I и II класса опасности, а при определенных условиях и радиоактивных газов.

Необходимо сразу отметить, что широкое внедрение плазменных электротехнологий сдерживается из-за ряда особенностей, связанных с высоким энергопотреблением плазмотронов и соответствующим экономическим обоснованием проекта, необходимостью предварительной сушки и сепарации отходов, проектированием специальной системы их дозации в плазменную струю и т.д. В результате перед разработчиками подобных технологий возникает несколько взаимоисключающих задач (например, высокая температура и производительность плазмотрона при низком энергопотреблении или надежность соплового узла плазменной горелки при сложном физико-химическом воздействии на него различных токсичных сред), требующих поиска оптимальных конструктивных и технологических решений. В технологическом плане для повышения энергоэффективности и экономической выгоды применения плазменных технологий можно обратить внимание на использование отходов в качестве постоянно возобновляемого источника энергии, когда помимо плазменного пиролиза всех утилизируемых соединений появляется возможность получения синтез-газа (25-35% CO + 35-45% H<sub>2</sub> + метан, ацетилен и этилен), который можно сжигать в энергетических котлах, использовать при производстве электроэнергии или в химическом производстве, для предотвращения образования токсичных соединений (диоксинов, окислов

азота, соединений хлора, серы и т.д.). Следует, однако, отметить, что объем вырабатываемой энергии на разработанных и внедренных к настоящему времени установках подобного типа, как правило, невелик и чаще всего используется в замкнутом цикле самого производства.

К настоящему времени разработано большое количество плазмотронов и схем их применения в технологиях обезвреживания отходов (экотехнологиях). Подобными исследованиями в России занималось большое количество научно-исследовательских структур – ИТПМ СО РАН, ИВТ РАН, ФГУП «ИЦ им. М.В. Келдыша», МГТУ, С.-Пб. ПУ, ИЭФ РАН; ООО «Огневая технология», г. Бердск; ГП «Экотехпром», ООО «КТ-Авиа», ООО "Дефус" и др., за рубежом известны разработки УкрАН и БелНАН, упомянутых выше корпораций "Вестингауз", США и «Mitsubishi», Япония и т.д. Целесообразно обратить внимание и на ряд зарубежных исследований, проводимых в последние годы в КНР (Sichuan University), Германии, США, Индии, Южной Корее и других странах. Наиболее полный обзор технологий плазменного обезвреживания представлен в монографии НГТУ [5] и информационно-техническом справочнике по наилучшим доступным технологиям ИТС-9-2015 «Обезвреживание отходов термическим способом» (ИТС НДТ ТОО) от 1 июля 2016 г. (актуализирован в 2020 г. и имеет статус документа национальной системы стандартизации) [3]. Следует заметить, что представленный перечень плазменных технологий охватывает далеко не все известные на данный момент разработки, а их анализ сделан зачастую без учета широкого числа критериев эффективности и серьезного сравнительного исследования. Например, вне рамок рассмотрения ИТС НДТ ТОО остались технологии обезвреживания дугowymi плазмотронами постоянного тока, а по одному из наиболее перспективных направлений их внедрения – дожиганию токсичных газообразных отходов – упомянута всего одна импортная технология. С учетом данного обстоятельства, следует обратить внимание на исследования, проводимые в последние годы под руководством автора данной статьи.

Необходимо в этой связи отметить, что по технико-экономическим показателям внедрение плазмотронов часто оказывается эффективным в случае их применения на отдельных стадиях сложного и, как правило, многоступенчатого процесса утилизации. Плазмотроны могут применяться в плазменных реакторах для воздействия на вещество, попадающее в плазменную струю уже в газовом или паровом состоянии (после предварительной стадии низко- и среднетемпературного нагрева и деструкции), либо в виде предварительно осушенных твердых компонент. Плазменное воздействие используется для остекловывания образующихся шлаков и зол, для их последующего применения в строительных материалах (технология Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.). Однако, наиболее эффективным применением плазмотронов в таких процессах, по мнению автора, следует

считать их внедрение на стадии дожигания образующихся после термической переработки отходов газов, позволяющее существенно упростить многоступенчатые системы их обезвреживания.

Следует в этой связи обратить внимание на задачи, реализуемые в рамках национального проекта «Экология» и связанные с запуском нескольких больших мусоросжигательных заводов (МСЗ). Известно, что многие МСЗ и пиролизные установки, использующие, как правило, технологии паро-воздушной газификации и слоевого сжигания на колосниковых решетках, не отвечают современным экологическим требованиям по концентрациям супертоксикантов (диоксинов и фуранов, тяжелых металлов и их соединений) в токсичных летучих золах, из-за чего основные расходы приходится, в основном, на систему очистки газов, включающую в себя несколько стадий пропускания газовых выбросов через циклоны, скрубберы, адсорберы, электромагнитные и механические фильтры. Следует также учесть, что из-за невозможности быстрого мониторинга, как правило, отсутствует контроль по наличию канцерогенных компонент в газовых выбросах. С учетом перечисленных проблем перспективным представляется дооснащение различных установок по термической переработке различного вида отходов плазменными дожигателями, что позволит существенно повысить экологический эффект их внедрения. Метод плазменной инсинерации («сжигания») на настоящий момент является фактически безальтернативным для обезвреживания образующихся при сжигании газообразных супертоксикантов (диоксинов, фуранов и т.д.).

В рамках реализации НИОКР по гранту РФФИ «Разработка фундаментальных научных основ применения процессов плазменной инсинерации в технологиях рециклинга отходов» (2019–2021 гг.) под руководством автора статьи были проведены исследования, обосновывающие применимость плазмотронов для обезвреживания газообразных токсичных выбросов, образующихся в процессе термической утилизации отходов. Была разработана конструкция плазмотрона с камерой дожигания, в которой происходит смешение потоков газообразных токсичных веществ с потоками плазмообразующего газа и их нагрев плазменной дугой, генерируемой в сопловом узле плазмотрона. Вынесение камеры дожигания и узла подачи в неё обезвреживаемых газов за пределы соплового узла позволило решить проблему термохимической стойкости катодного узла и использовать для нагрева более простой тип плазмотрона постоянного тока по сравнению с достаточно сложными для широкого внедрения ВЧИ-плазмотронами. Применение оригинальной системы газовыхревой стабилизации в плазмотроне с устройством тангенциального ввода обезвреживаемых газов позволило интенсифицировать процесс перемешивания и нагрева газов в камере дожигания. Полученные в результате численного 3D-моделирования газодинамических процессов в камере дожигания результаты показали эффективность температурно-временных параметров

нагрева для обезвреживания наиболее часто образующихся супертоксиантов – диоксинов и их прекурсоров, а также оксидов азота и аммиака [1].

Внедрение плазменных технологий, как уже отмечалось, должно происходить с учетом критериев качества, эффективности и безопасности процесса. Следует также обратить внимание и на проблему импортозамещения, так как подавляющая часть внедряемых в настоящее время в рамках нацпроекта «Экология» технологий термического обезвреживания отходов имеют зарубежное происхождение, а многие из перечисленных выше отечественных исследований имеют более чем 20-летнюю историю. Для эффективного внедрения необходимо также выработать рекомендации в сфере метрологии плазменных технологий утилизации и обезвреживания, так как многие разработки находятся вне рамок современных (в том числе международных) стандартов. Очевидна также и необходимость расширения кругозора современных инженеров-экологов, в программе обучения которых зачастую отсутствуют сведения о плазменных экотехнологиях, а образовательные процессы нередко ведутся при отсутствии полноценных учебных пособий, базирующихся на анализе современных разработок и опыте внедрения плазменных процессов.

Список литературы.

1. *Анахов, С. В.* Обоснование способа плазменного дожигания газообразных продуктов переработки опасных отходов / С. В. Анахов, А. В. Матушкин, Ю. А. Пыкин. – Текст : непосредственный // Техносферная безопасность. – 2020. – № 4 (29). – С. 23–36.

2. *Анахов, С. В.* Экологическое проектирование: стратегии и технологии / С. В. Анахов, Ю. А. Пыкин. – Saarbrücken : LAP LAMBERT Academic Publishing : AV Akademikerverlag GmbH & Co. KG, 2012. – 132 с. – Текст : непосредственный.

3. *Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям «Обезвреживание отходов термическим способом (сжигание отходов)»* : ИТС 9–2015 : дата введения 2016-07-01. – Текст : электронный // Кодекс. Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200128669>.

4. *Каренгин, А. Г.* Плазменные процессы и технологии / А. Г. Каренгин. – Томск : Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2009. – Ч. 2. – 144 с. – Текст : непосредственный.

5. *Чердниченко, В. С.* Плазменные электротехнологические установки / В. С. Чердниченко, А. С. Аньшаков, М. Г. Кузьмин. – Новосибирск : Изд-во Новосиб. гос. техн. ун-та, 2011. – 601 с. – Текст : непосредственный.

\*Статья опубликована при поддержке гранта РФФИ №19-08-00190