

С. В. Анахов, Г. В. Харина

S. V. Anakhov, G. V. Kharina

ФГАОУ ВО «Российский государственный профессионально-педагогический университет», Екатеринбург

Russian State Vocational Pedagogical University, Ekaterinburg

sergej.anahov@rsvpu.ru, gvkharina32@yandex.ru

СТАНДАРТИЗАЦИЯ МЕТОДОВ ПЛАЗМЕННОГО ДОЖИГАНИЯ В СИСТЕМЕ НДТ*

STANDARDIZATION OF PLASMA AFTERBURNING METHODS IN THE BAT

***Аннотация.** Рассмотрены имеющиеся стандарты организации плазменного дожигания токсичных газов в системе НДТ (наилучших доступных технологий). Показано соответствие разработанной технологии дуговой плазменной инсинерации известным требованиям на примере обезвреживания диоксинов и отходов азота. Отмечены недостатки в сфере стандартизации и применения технологий плазменного дожигания газообразных токсичных отходов.*

***Abstract.** The available standards in the organization of toxic gases plasma afterburning in the BAT (the best available technologies) system are considered. It is shown that the developed technology of arc plasma incineration meets the known requirements on the example of dioxins and nitrogen waste neutralization. Shortcomings in the field of standardization and application of technologies for plasma afterburning of gaseous toxic waste are noted.*

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

***Keywords:** ecological safety; waste recycling; waste treatment; decontamination; incineration; plasmatron; plasma torch.*

Одна из основных задач национального проекта «Экология» – организация современной системы сбора и утилизации бытовых и промышленных отходов. В рамках реализации этой задачи запланировано построить в различных регионах Российской Федерации 30 заводов по термической утилизации отходов с общим объемом затрат в 600 млрд. рублей (совместный проект ВЭБ, Ростеха и Росатома). По уверению российской компании «РТ-Инвест», строящей в Подмоскowie и Казани инфраструктуру по обращению с отходами, в том числе несколько комплексов сортировки и пять мусорожигательных заводов для энергетической утилизации отходов, выбраны самые современные японские и швейцарские технологии термической утили-

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

зации при температуре 1260 °С с последующей 3-х ступенчатой системой очистки. Однако по утверждению многих российских ученых [1], эффективность подобной системы очистки требует дополнительного обоснования, как с точки зрения соответствия экологическим нормам, так и с точки зрения политики импортозамещения, направленной на внедрение менее затратных и эффективных российских технологий. В этой связи целесообразно обратить внимание на современные подходы к стандартизации и обоснованию эффективности подобных технологий, которые в наиболее полной форме отражены в информационно-техническом справочнике по наилучшим доступным технологиям ИТС 9-2015 «Обезвреживание отходов термическим способом (Сжигание отходов)» (ИТС НДТ ТОО). Данный справочник был разработан технической рабочей группой (ТРГ 9), созданной приказом Росстандарта от 17 июля 2015 г. № 836, утвержден на бюро НДТ и приказом Росстандарта от 15 декабря 2015 г. № 1579, опубликован и введен в действие с 1 июля 2016 г. Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии (актуализирован в 2020 г.). Как известно, федеральный закон от 29 июня 2015 г. № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации» закрепил статус справочников НДТ как документов национальной системы стандартизации, а также определил механизм использования ссылок на них в нормативных правовых актах. В Российской Федерации критерии определения технологии в качестве НДТ установлены статьей 28.1 [2]. Для определения НДТ в сфере термического обезвреживания отходов используется сочетание следующих критериев – наименьший удельный уровень негативного воздействия на окружающую среду; экономическая эффективность внедрения и эксплуатации; применение ресурсо- и энергосберегающих методов; период внедрения и промышленное внедрение технологии на двух и более объектах, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду.

Упомянутый справочник рассматривает широкий спектр имеющихся на данный момент технологий термического обезвреживания различных видов отходов, пытаясь, по возможности, дать их сравнительную характеристику, а также оценить их соответствие современным нормативным требованиям в экологической сфере. При разработке ИТС 9-2015 учитывался европейский опыт – справочники Европейского союза по НДТ (European Commission. Integrated Pollution Prevention and Control. Reference Document on Best Available Techniques for the Waste Incineration. и Integrated Pollution Prevention and Control. Reference Document on Best Available Techniques for the Waste Treatments Industries. August 2006), а также российский опыт, полученный на основе анализа открытых данных и анкетирования предприятий, задействованных в сфере обезвреживания и утилизации отходов. Среди большого числа анали-

зируемых в ИТС НДТ ТОО технологий особого внимания заслуживают технологии очистки газообразных продуктов сгорания, а также обезвреживания и удаление остатков, образующихся при очистке газообразных продуктов сгорания. Известно, что организация высокоэффективной очистки газовых выбросов, образующихся в процессе термической утилизации, – наиболее ресурсозатратная часть большинства заводов упомянутого выше типа, из-за чего выбор наиболее эффективной технологии очистки становится приоритетной задачей в стратегии развития и внедрения экологических технологий.

Термическое обезвреживание отходов – наиболее эффективная экологическая технология, позволяющая добиться разложения и превращения практически любых органических и окисляющихся неорганических примесей при высоких температурах в безвредные продукты полного сгорания. В ИТС НДТ ТОО анализируются необходимые для этого режимные параметры процесса – температура в реакторе и его удельный объем, дисперсность распыления (для жидких отходов), аэродинамическая структура и степень турбулентности газового потока в реакторе, виды и количество вводимых реагентов и др. Эффективность процесса термического обезвреживания отходов, содержащих органические вещества, может быть оценена по двум методикам. Методика Агентства по защите окружающей среды США (EPA) показывает соотношение разрушенных компонентов к поступившим отходам в пределах термического реактора – DE (destruction efficiency) (%), либо отношение для установки термического обезвреживания отходов в целом – DRE (%). В Западной Европе используют методику контроля остаточных концентраций токсичных компонентов в уходящих дымовых газах при законодательно принятых нормативных величинах. Наиболее жесткие нормативы в части газовых выбросов в атмосферу установлены Директивой Совета Европы от 4 декабря 2000 г. № 2000/76/ЕС «О сжигании отходов». Согласно этой директиве среднесуточная концентрация вредных веществ в уходящих газах (при 11 % кислорода, сухой газ) должна составлять не более, указанных в таблице 1. Вместе с выбросами дымовых газов необходимо контролировать и токсичные компоненты, синтезируемых на различных стадиях собственно технологического процесса (например, образование и выброс фосгена COCl_2 при сжигании хлорорганических отходов).

Очевидно, что мониторинг атмосферных выбросов должен осуществляться и в сфере обезвреживания отходов термическим способом. Для этого могут быть использованы различные методы системного анализа и математического моделирования – экспертных и аналоговых оценок и сравнение с универсальными стандартами; метод списка и метод матриц для выявления значимых воздействий; метод причинно-следственных связей для анализа

непрямых воздействий; расчетный метод определения прогнозируемых выбросов, сбросов и норм образования отходов. Для каждой конкретной установки выбросы определяются в индивидуальном порядке с учетом номенклатуры обезвреживаемых отходов и санитарно-технических нормативов по предельным допустимым выбросам.

Таблица 1

Предельно-допустимые значения концентраций вредных веществ

Компонент	Пыль	HF	HCl	SO ₂	CO	NO _x	ПХДД + ПХДФ	Hg	Cd + Pb	Сумма остальных тяжелых металлов
Остаточная концентрация, мг/м ³	10	10	1	50	50	200	0,1 нг/м ³	0,05	0,05	0,5

В широком ряду известных методов термического обезвреживания особое место занимают плазменные технологии [3]. В основе их применения лежит использование генератора низкотемпературной плазмы – плазмотрона, обеспечивающего температуру в плазменной дуге от 5 до 20000 К (в зависимости от вида плазмообразующего газа, типа и мощности плазмотрона) и, соответственно, возможность высокотемпературного воздействия на материалы различной структуры и фазового состава. Их применение в технологиях обезвреживания отходов возможно на разных стадиях процесса утилизации [4] – от непосредственного ввода токсичных веществ в плазменную дугу (мелкодисперсных, в паровой и газовой фазе) до остекловывания твердых остатков термического распада отходов или их нагрева в турбулентном потоке смешения плазменной струи с потоком токсичных газов. Главный эффект, достигаемый при таком высокотемпературном воздействии, – высокая (почти 100 %) степень диссоциации (до атомарного уровня и образования радикалов) и ионизации веществ (в том числе высокомолекулярных соединений – таких как диоксины, полихлорбифенилы, бензопирен и т. д.), позволяющая (в сочетании с последующей закалкой) быстро и высокоэффективно обезвреживать почти любые токсичные вещества. При плазменном остекловывании достигается существенное сокращение объема отходов (до 95 %), а получаемые твердые остатки устойчивы на протяжении сотни лет и содержат вредные компоненты в связанном, безопасном состоянии. Снижается и объем газовых выбросов (до 90 % при использовании органического топлива) по сравнению с огневыми системами. Это, в свою очередь, приводит к существенному уменьшению производительности систем газоочистки, приборов и

средств экологического контроля загрязнения воздуха и соответствующему сокращению их стоимости.

В ИТС НТД ТОО рассматриваются различные плазменные технологии и устройства, известные на данный момент и позволяющие вести процесс обезвреживания на разных вышеупомянутых стадиях комплексных технологий утилизации отходов (как российского, так и зарубежного производства). Отмечается универсальность таких технологий, т. е. возможность эффективно обезвреживать самые различные отходы. При этом, однако, обращается внимание на общий недостаток плазменных технологий – ограниченный срок службы плазмотронов (в пределах нескольких сотен часов), которые работают как на инертных, так и на кислородсодержащих газах. В качестве одного из решений, позволяющих добиться кардинального повышения эксплуатационного ресурса электродуговых генераторов плазмы и увеличения их мощности, упоминается технология с применением разработанного в Международном научном центре по теплофизике и энергетике (г. Новосибирск) [5] плазмотрона с жидкометаллическими электродами. В качестве лимитирующего фактора широкого применения способа окислительного обезвреживания отходов непосредственно в плазменной струе следует также отметить высокие затраты энергии и сложность аппаратурного оформления плазменных реакторов. В качестве энергоэффективного решения можно упомянуть плазменную газификацию с образованием синтез-газа и возможностью его использования как для существенного повышения теплоты сгорания, а, следовательно, общей энергетической эффективности процесса газификации, так и для выработки определенного количества электроэнергии.

С учетом упомянутых недостатков плазменных технологий целесообразно обратить особое внимание на их применение на стадии дожигания токсичных газообразных выбросов, образующихся в процессе использования других методов термической утилизации отходов (сжигание на колосниковой решетке, в кипящем слое и т. д.). Как отмечается в ИСО НТД ООО, особое внимание в этом случае обычно обращается на содержание в таких выбросах, так называемых, маркерных веществ – супертоксикантов (диоксионов, бифенилов, бифуранов и т. д.), а также ряда других опасных компонентов, упомянутых в таблице 1. К сожалению, в рассматриваемом справочнике рассматривается только одна работа [6], связанная с разработкой камеры дожигания газов пиролиза, отходящих из шахтной печи, с плазменным источником энергии во Франции и с аналогичным решением, примененным рядом российских фирм и организаций. В этой связи следует упомянуть авторский опыт в сфере разработки плазменных технологий для дожигания токсичных газовых выбросов [7].

В данной технологии плазменная струя формируется в камере смешения (КС) путем взаимодействия плазменной дуги, возбуждаемой и горячей между катодом и анодом соплового узла дугового плазмотрона постоянного тока, с вихревым потоком плазмообразующего газа (ПОГ) и последующим её выдуванием в КС за счет высокой кинетической энергии потока ПОГ. В КС происходит нагрев потоков тангенциально подаваемой токсичной парогазовой смеси и предварительно закрученного с помощью системы газовихревой стабилизации и нагретого плазменной дугой потока ПОГ. Патрубки для подачи вторичного (утилизируемого) потока располагаются на сменной части плазмотрона, либо могут быть вынесенным за его пределы и располагаться под срезом сопла под любым углом к оси плазменной струи (рисунок 1).

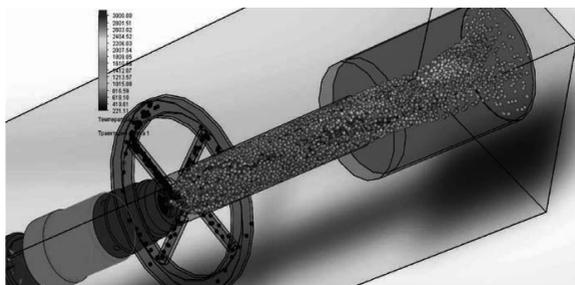


Рисунок 1 – 3D-моделирование газодинамических процессов в камере смешения плазмотрона для обезвреживания токсичных газообразных отходов

Сделанные в приложении FlowWorks программной среды SolidWorks расчеты газодинамических параметров (температуры, скорости и времена нагрева) утилизируемого газа в различных областях КС цилиндрического и конфузорного типа показали, что нагрев происходит при температурах в КС от 2500 до 10000 К (в зависимости от состава ПОГ и мощности плазмотрона) и скоростях в 50-150 м/с при характерных временах нагрева от 2 до 5 мс. Полученные результаты позволили оценить эффективность термической деструкции в КС на примере одного из супертоксикантов – диоксиана, а также оксидов азота (NO и NO_2). Опираясь на небольшое количество известных сведений по высокотемпературному обезвреживанию диоксинов [8] (при температурах 1500 °С и 5000 °С), на основе уравнения Аррениуса для константы скорости реакции были сделаны аппроксимации времени разложения и получены критерии эффективности обезвреживания. Для оценки эффективности разложения оксидов азота в качестве критерия были взяты их ПДК и характерное время полного разложения при соответствующих температурах на-

грева в КС (таблица 2), полученные на основе анализа ряда исследований [9]. Рассмотрение различных конструкций КС (цилиндрической и конфузорной), длины плазменной дуги (от 90 до 170 мм), схем подачи утилизируемого газа (от двух до четырех патрубков с разными углами ввода в плазменную струю), а также технологических параметров процесса (расходов ПОГ и токсичных газов, мощности плазмотрона и температуры плазменной дуги) позволило найти оптимальные конструкторские и технологические решения, соответствующие, как упомянутым в ИСО НТД ТОО нормативным требованиям, так и введенным авторами критериям эффективности обезвреживания.

Таблица 2

Равновесные концентрации оксида азота в обратимой системе
(расчетные значения)

Концентрация кислорода	Температура нагрева	Время полного разложения	Концентрация NO	ПДК
CO ₂ , моль/дм ³	T, К	τ, с	C _{NO} , мг/м ³	ПДК _{NO} , мг/м ³
0,125	3000	1·10 ⁻⁴	4,1·10 ⁻³	0,06
0,125	4000	1·10 ⁻⁵	1,1·10 ⁻⁵	
0,125	5000	1·10 ⁻⁶	1,3·10 ⁻⁷	
1,25	3000	1·10 ⁻⁴	1,3·10 ⁻²	
1,25	4000	1·10 ⁻⁵	3,5·10 ⁻⁵	
1,25	5000	1·10 ⁻⁶	4,0·10 ⁻⁷	
2,5	3000	1·10 ⁻⁴	1,8·10 ⁻²	
2,5	4000	1·10 ⁻⁵	4,9·10 ⁻⁵	
2,5	5000	1·10 ⁻⁶	5,9·10 ⁻⁷	

По результатам проведенного авторами исследования можно сделать вывод об обоснованности предложенного способа плазменного дожигания токсичных газообразных отходов на примере одного из наиболее опасного супертоксиканта – диоксина, а также монооксида азота. Преимущества данного метода по сравнению с известными технологиями высокотемпературного сжигания и обезвреживания отходов заключается в скорости и эффективности процесса. Следует заметить, что по мнению разработчиков ИСО НТД ТОО плазменные генераторы не могут обеспечить эффективное перемешивание относительно большого объема дымовых газов с поддержанием их температуры на уровне ~ 1200-1250 °С при времени их пребывания при указанной температуре более 2 с. Данное требование в настоящий момент является одним из необходимых нормативов высокотемпературного воздействия,

предотвращающего образование супертоксикантов типа диоксинов. По мнению авторов, рассмотренная возможность плазменного нагрева газов до более высоких температур позволяет эффективно вести процесс на порядок более высоких скоростях. Тем не менее, следует, очевидно, продолжить разработку и анализ данной методики с целью поиска оптимальных параметров её применения, обоснования её валидности в соответствии с имеющимися стандартами применения плазменных экотехнологий.

Список литературы

1. Леонтьев, Л. И. Перспективы утилизации твердых коммунальных отходов РФ / Л. И. Леонтьев // *Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований: «ТЕХНОГЕН-2019»* : труды конгресса с международным участием и конференции молодых ученых. – Екатеринбург : УрО РАН, 2019. – С. 18–24.
2. Российская Федерация. Законы. Об охране окружающей среды : Федеральный закон № 7-ФЗ : [принят Государственной думой 20 декабря 2001 года : одобрен Советом Федерации 26 декабря 2001 года] // *Техэксперт* : [сайт]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/901808297> (дата обращения: 05.05.2020).
3. Чердниченко, В. С. Плазменные электротехнологические установки / В. С. Чердниченко, А. С. Аньшаков, М. Г. Кузьмин. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2011. – 602 с.
4. Анахов, С. В. Экологическое проектирование: стратегии и технологии / С. В. Анахов, Ю. А. Пыкин. – Saarbrücken : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. – 132 с. – ISBN 978-3-8465-4578-2.
5. Предтеченский М. Р. Плазмохимический реактор с жидкометаллическими электродами / М. Р. Предтеченский, О. М. Тухто // *Химия высоких энергий*. – 2006. – Т. 40. – № 2. – С. 1–6.
6. Савчин, В. В. Плазменные методы в технологии переработки ПАО / В. В. Савчин, А. Л. Моссэ // *Сотрудничество для решения проблемы отходов : материалы V Международной конференции, Харьков, 2–3 апреля 2008 г.* – URL: <https://waste.ua/cooperation/2008/theses/index.html> (дата обращения: 04.05.2020).
7. Анахов, С. В. Моделирование процессов плазменной инсинерации в технологиях утилизации и обезвреживания отходов / С. В. Анахов, Ю. А. Пыкин, А. В. Матушкин // *Техносферная безопасность*. – 2019. – № 1. – С. 129–141.
8. Федоров, Л. А. Диоксины как экологическая опасность: ретроспектива и перспективы : монография / Л. А. Федоров. – Москва : Наука, 1993. – 266 с. – ISBN 5-02-001674-8.
9. Фиксация атмосферного азота в ВЧ в факельном плазмотроне: методические указания к лабораторному практикуму по курсу «Плазменные технологии переработки веществ». – Томск : Томский политехн. ун-т, 2016. – 22 с. – URL: https://portal.tpu.ru/SHARED/i/INOVOSELOV/training/Tab2/Fiksatsiya_ptpv.pdf (дата обращения: 28.04.2020).