

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ИНЖЕНЕРНОЙ ЭКОЛОГИИ ПЛАЗМЕННЫМИ МЕТОДАМИ

NUMERICAL SIMULATION OF PHYSICAL PROCESSES FOR SOLVING PROBLEMS OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING BY PLASMA METHODS

Сергей Вадимович Анахов **Sergey Vadimovitch Anakhov**

кандидат технических наук, доцент

sergej.anahov@rsvpu.ru

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

Russian State Vocational Pedagogical University, Yekaterinburg, Russia

Анатолий Владимирович Матушкин **Anatoliy Vladimirovitch Matushkin**

старший преподаватель

227433@e1.ru

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет», Екатеринбург, Россия

Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

Юрий Анатольевич Пыкин **Yuriy Anatolievich Pykin**

доктор технических наук, профессор

yappoligon@mail.ru

ФГАОУ ВО «Уральский лесотехнический университет», Екатеринбург, Россия

Ural State Forest Engineering University, Yekaterinburg, Russia

***Аннотация.** Рассмотрены достоинства технологий, основанных на высокотемпературном плазменном воздействии на материалы. Методами численного моделирования определены параметры газового потока в камере смешения плазматрона для экологических технологий.*

Обозначены направления дальнейших исследований и разработок, необходимых для создания максимально эффективной технологии плазменного обезвреживания.

***Abstract.** The advantages of technologies based on high-temperature plasma action on materials are considered. The parameters of the gas flow in the plasma torch mixing chamber for environmental technologies are determined by numerical modeling methods. The directions of further research and development necessary for the creation of plasma neutralization technology with maximum efficiency are outlined.*

***Ключевые слова:** инженерная экология, численное моделирование, утилизация отходов, плазменное обезвреживание, плазматрон.*

***Keywords:** environmental engineering, numerical simulation, waste disposal, plasma neutralization, plasma torch.*

Одним из направлений инновационного применения электроплазменных технологий является их использование на разных стадиях многоступенчатого цикла переработки и обезвреживания отходов [1]. Данная возможность обусловлена тем, что при температурах плазменной струи $T_{пл} > 5000 \text{ K}$ возникает эффект высокоэнергетического воздействия на материалы, позволяющий подвергнуть глубокому разложению соединения, входящие в состав различных веществ.

К отходам производства обычно относят токсичные вещества (хлорорганика, радиоактивные вещества, пестициды), неорганические материалы (стеклобой, бетон), сельскохозяйственные отходы, сточные воды и т. д. Под муниципальными отходами, как правило, понимают твердые бытовые отходы (ТБО), отходы медицинских организаций и очистных сооружений. Из-за чрезвычайно малой доли сортированного мусора большая часть отходов является смешанной и разнородной по морфологическому составу, содержит органические и неорганические компоненты. Применяемые в настоящее время методы их обезвреживания и утилизации (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. Тенденцией последних лет является смещение технологических способов переработки в сторону существенного увеличения температур в зоне термического воздействия на утилизируемый материал [2]. Такой эффект достигается за счет барботажной плавки в печах Ванюкова, в электрошлаковых печах и при применении плазменных электротехнологий.

Интерес к применению плазменных технологий в сфере переработки муниципальных отходов в последние годы заметно растет. Например, в США за год патентуется до 400 разработок по данному направлению, а общее число публикаций достигает 1500. Опыт последних лет свидетельствует о переходе от стадии экспериментальных и опытных разработок к стадии промышленного внедрения плазменных электротехнологий. В качестве основных направлений такого внедрения следует отметить

плазменную газификацию, обогащение сырья в промышленных отвалах, переработку высокоопасных отходов и функциональное одно- или многостадийное применение плазмотронов [3].

Достоинством плазмотермических устройств является возможность совместной переработки как бытовых, так и промышленных отходов. Однако внедрение любого такого устройства во многом зависит от того, насколько экономически и энергетически обоснована соответствующая технология. Эффективность высокотемпературной деструкции утилизируемых веществ достигается за счет большой мощности плазменных генераторов, что, в свою очередь, не всегда оправдывает их применение в технологиях переработки отходов. Выходами из такой ситуации являются: использование отходов в качестве постоянно возобновляемого источника энергии (синтез-газа) [1]; применение плазменных технологий в случаях, когда другие возможности обезвреживания отсутствуют по санитарно-эпидемиологическим и экологическим требованиям — уничтожение инфицированных отходов, кремация трупов животных, обезвреживание супертоксикантов (полихлорированных дибензодиоксидов, дибензофуранов, бифенилов, отравляющих веществ, тяжелых металлов и их соединений и т. д.); использование плазменных технологий на отдельных стадиях процесса переработки (остекловывание твердых шлаковых отходов или дожигание токсичных газовых выбросов — диоксинов, окислов азота, соединений хлора, серы и т. д.). Следует при этом сослаться на мировую практику, в которой сложилось мнение об исключительности применения плазменных методов для обезвреживания токсичных веществ I и II классов опасности [4], а при определенных условиях и радиоактивных газов. В качестве серийно выпускаемого оборудования можно упомянуть продукцию фирм Recovered Energy, Inc. и Mason and Hanger National, Inc. (США), RCL (Канада), Europlasma (Франция). Фирма Solena Group (США) разработала оборудование для плазменной газификации ТБО на борту круизных судов. В нашей стране известны разработки плазменных электропечей НГТУ, НПО «ЭКОС», ИТ СО РАН и ОАО «Сибэлектротерм», в том числе совместно с фирмой «Самсунг». Следует, однако, отметить, что объем вырабатываемой

на таких установках энергии, как правило, не велик, и вся она обычно используется в замкнутом цикле самого производства.

Задача повышения эффективности применения плазмотронов в технологиях обезвреживания отходов должна решаться современными проектными и экспериментальными методами. Анализ известных методов проектирования позволяет сделать важный для разработчика плазмотронов вывод о существенном влиянии функциональных (расход, давление) и геометрических параметров на показатели эффективности работы плазменного генератора [5]. Таким образом, одной из задач проектирования становится параметрическая оптимизация по упомянутым выше критериям. Однако помимо легко определяемых электрических и конструктивных параметров в такого рода расчетах используются и газодинамические характеристики, значения которых в формирующей плазменную дугу (струю) сопловом узле плазмотрона трудноизмеряемы и могут сильно отличаться от параметров на входе в плазмотрон. К сожалению, задача непосредственного измерения газодинамических параметров потока плазмообразующего газа (ПОГ), протекающего по газовоздушному тракту плазмотрона, по-прежнему остается трудноразрешимой. Применение для этого модельных измерений, как и внесение датчиков и зондов в поток газа или плазмы, сопровождается искажением реальных газодинамических условий протекания среды, а доступ к отдельным элементам конструкции плазмотронов в эксплуатационном режиме зачастую оказывается технически невозможным. По этой причине актуальной остается задача разработки и применения методов расчета и оценки таких параметров по всему газовому тракту плазмотрона с учетом экспериментально определяемых их значений на входе и выходе из него. Очевидно, подобная задача должна решаться и применительно к водяным и воздушным системам охлаждения плазмотронов. В связи с упомянутыми задачами следует отметить увеличение в общем объеме подобных исследований как формализованных, так и экспериментальных методов доли процедур, относящихся к сфере *машинного эксперимента*.

Известно, что математическая модель для струйно-плазменного процесса обработки ма-

териалов различного фазового состава должна представлять собой систему уравнений, отражающих смешение реагентов, теплообмен, фазовые переходы в исходном сырье, химические реакции и процессы формирования целевого продукта (конденсация, коагуляция, кристаллизация) с возможным наложением обратных химических реакций, причем практически все эти стадии совмещены. Сложность моделирования процессов взаимодействия дисперсного вещества с газовой фазой заключается в том, что соответствующие этим процессам уравнения чувствительны к изменению размера частиц, температур и скоростей фазовых реакций и, следовательно, необходима непрерывная коррекция их структуры или введение уточняющих поправок. С учетом данных трудностей при моделировании таких процессов обычно опираются на два основных подхода, сформированных на основе различных представлений об определяющей роли отдельных стадий и различном уровне и объеме допущений, принимаемых при математическом описании. В первом случае упрощают представления о механизме взаимодействия частиц с газовым потоком при строгом пространственно-временном учете эволюции параметров газовой и дисперсной фаз, во втором — детально описывают процесс взаимодействия отдельной частицы с нагретым газом без учета динамики всей системы в целом. В этой связи актуальными являются задачи, связанные с выделением наиболее существенных факторов процесса (структура струи, размеры и конфигурация рабочей зоны, наличие возмущений в потоке, способ ввода сырья и т. д.), требующих учета при аппаратурно-технологическом проектировании, а также задачи, связанные с исследованиями конкретного процесса, оптимизацией его режимов для разработки систем автоматического управления.

Газодинамические и энергетические параметры, определяющие эффективность нагрева частиц в плазменной струе, существенно зависят от режима работы плазмотрона. Говоря о дуговых плазмотронах, обратим внимание на факторы, от которых зависят скорость и температура плазменной струи и нагреваемых частиц: расход плазмообразующего газа, его давление в сопловом узле, профиль газовоздушного тракта, способ стабилизации дуги и т. д. Спецификой

устройств плазменного нагрева является увеличенная длина и объем дуги, что влияет на ее напряжение. Как правило, основной задачей таких устройств является достижение максимальной температуры и энтальпии струи за счет повышения мощности дуги. При этом стараются подобрать режим работы плазмотрона, обеспечивающий максимальное напряжение на дуге (зависит также от расхода ПОГ), с последующей регулировкой мощности путем изменения силы тока. Рост мощности дуги тоже ведет к росту скорости струи и частиц, что может отрицательно сказаться на эффективности нагрева (зависит от теплофизических свойств газа и частиц), а следовательно, требует оптимизации, в том числе по критериям экономичности и безопасности. Увеличение расхода ПОГ повышает скорость частиц и при неизменной мощности снижает температуру их нагрева. Очевидно, что эффективность нагрева порошкообразных частиц определяется сочетанием большого числа параметров процесса, и для нахождения допустимых параметрических диапазонов требуется предварительное моделирование процесса с последующей экспериментальной оптимизацией.

Требования к плазмообразующим газам в технологиях плазменного обезвреживания, как правило, ограничиваются высокими значениями температур или энтальпии, а также необходимостью учета окислительно-восстановительных свойств струи (активности) по отношению к нагреваемому материалу. Поскольку температурные интервалы фазовых превращений и физико-химических реакций большинства токсичных соединений, обезвреживаемых плазменным способом, находятся в диапазонах менее 3000 К, на выбор сорта ПОГ в большей степени влияют размер нагреваемых частиц и время их пребывания в плазменной струе. С этой точки зрения, допустима работа плазмотронов для обезвреживания на воздухе или азоте с добавками, для повышения тепловой мощности, водорода, аммиака, горючих газов. Для эффективного нагрева частиц их размеры (гранулометрический состав) желательно минимизировать до 10 – 200 мкм и оптимизировать скорость (обычно 1 – 5 м/с) и относительный расход порошка к расходу газа (~10 %). Увеличение расхода ПОГ облегчает подачу порошка, однако приводит к смещению потока частиц относительно

оси струи, а следовательно, к снижению эффективности их нагрева. Частично данная проблема решается за счет применения многодуговых схем нагрева в плазменном реакторе.

Характерные среднемассовые параметры плазменной струи и потока дисперсного материала: температура струи на срезе сопла — $(6 - 25) \cdot 10^3$ К, энтальпия — 2 – 20 Дж/г, скорость струи — до 1000 – 1500 м/с, скорость частиц — 100 – 500 м/с, в пределах начального участка ($l_{\text{ну}} = (5 - 10) d_c$ или 30 – 60 мм) могут считаться постоянными. На основном участке струи значение этих параметров начинает снижаться, причем более интенсивно для одно- и менее — для многоатомных (высокоэнтальпийных) газов. Длина участка нагрева l_n (обычно 70 – 300 мм) в этом случае увеличивается с ростом степени диссоциации многоатомного газа и уменьшается с ростом турбулизации струи (у ламинарных струй $l_{\text{ну}}$ и l_n в 2 – 3 раза больше, однако их применение неэффективно из-за низких скоростей потока и трудностей с удержанием частиц в высокотемпературной области струи).

Упомянутое выше увеличение доли машинных экспериментов в научных исследованиях, как правило, связано с применением специализированных программных пакетов для решения различных задач с высокой точностью и минимальными затратами на время их проведения. При этом появляется возможность выбрать из множества различных вариантов решения поставленной задачи наиболее качественные результаты и использовать их для проведения практической части исследований.

Алгоритм машинного (численного) моделирования в процедурах проектирования электроплазменных технологий в целом рассмотрен авторами [1], включает в себя формирование аналитической модели и ее анализ с использованием программных средств системы автоматизированного расчета и конструирования CAE (computer-aided engineering) — технологии, предназначенной для анализа результатов геометрического (CAD) проектирования (ANSYS/Multyphysics, T-FLEX, AI*NASTRAN, MSC.NASTRAN, COSMOS/FloWorks или EFD.Lab для SolidWorks и т. д.). В этих программах в основе алгоритмов численного моделирования, характерных для электроплазменных технологий процессов тепло- и массообмена, расчета пара-

метров потоков одно- и мультифазового состава и решения других задач механики сплошных сред, лежит метод конечных элементов FEM (finite-element method). Основы работы EFD. Lab были рассмотрены авторами на примере проектирования и анализа газодинамических процессов в плазматронах для резки металлов [6]. Результаты применения аналогичного программного пакета FloWorks в программной среде SolidWorks для расчета газодинамических параметров потоков в плазматроне для экологических технологий можно проиллюстрировать на нижеследующих примерах.

Как уже было отмечено, моделирование процесса обезвреживания токсичных газов с применением плазматрона является многопараметрической задачей, так как помимо конструктивных следует учитывать газодинамические и теплоэнергетические параметры технологии. Как правило, плазматроны подобного типа имеют сопло, выполняющее также функцию камеры смешения (КС) основного потока ПОГ (закрученного с помощью системы газовихревой стабилизации и нагреваемого плазменной дугой) и обезвреживаемого вторичного потока токсичной парогазовой смеси, тангенциально подаваемого в КС. Для интенсификации теплообмена потоков камера смешения имеет конфузорный участок, сопряженный с сопловой камерой плазматрона для увеличения времени нагрева молекул токсичного вещества в плазменном потоке [7].

Для определения газодинамических параметров потоков в КС с различным конструктивным исполнением зоны нагрева и охлаждения утилизируемого газа было проведено численное моделирование термокинетических процессов обезвреживания токсичных отходов. Расчетная модель плазматрона представлена на рис. 1. Расчеты проводились для воздушно-плазменной среды при характерном для эффективной газовихревой стабилизации дугового плазматрона массовом расходе основного потока ПОГ 0,011 кг/с и диаметре входного отверстия в КС 4 мм. Вторичный поток утилизируемого газа подавался по двум осесимметрично расположенным патрубкам под углом 60°, обеспечивающим ввод утилизируемого газа по касательной в плазменную струю, с массовым расходом 0,005 кг/с на каждую трубку. Расчет температур

в камере смешения проводился по нескольким прямолинейным траекториям (линиям) различной удаленности от оси камеры (рис. 2) при характерной для воздушно-плазменной дуги (струи) длине в 90 мм и температуре в 7000 К. Геометрия КС: длина не менее 150 мм, угол раскрытия начальной части — 20°, остальной (для конфузорной КС) — 5°.

Расчеты скоростей газовых потоков были выполнены вдоль траекторий по направлению оси Y (рис. 2) в камерах смешения двух типов — цилиндрической и конфузорной (нумерация линий — от оси КС). Результаты оценки средних скоростей потоков вдоль расчетных линий показали, что в цилиндрической камере смешения существенного изменения скоростей по мере удаления от оси камеры смешения не наблюдается, а при наличии конфузорности средние скорости по мере удаления от оси уменьшаются в 2–3 раза, что, очевидно, связано как с изменением траекторий движения потоков, так и со снижением температуры потока по мере удаления от оси в КС конфузорного (конусного) типа. Кроме того, результаты расчета скоростей потоков позволили оценить время пребывания утилизируемого газа в камере смешения.

Представленные на рис. 3 результаты свидетельствуют о характерном времени нагрева

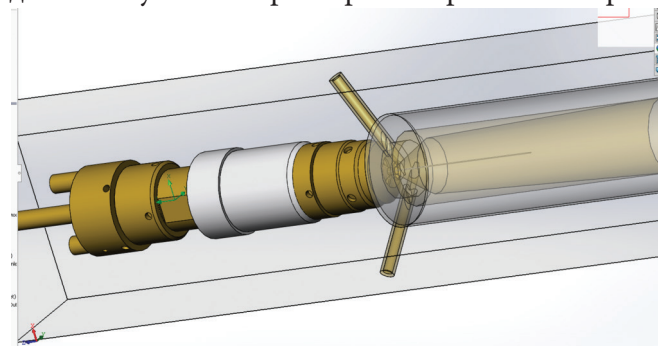


Рис. 1. Расчетная модель плазматрона для обезвреживания газов

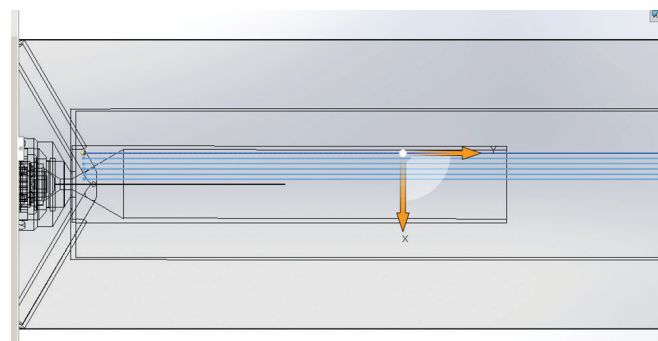


Рис. 2. Траектории расчета скоростей и температур в камере смешения плазматрона

свидетельствуют об эффективности применения численных методов в процедурах анализа эффективности обезвреживания токсичных газов плазменными методами. Эффективность обезвреживания может быть повышена конструктивными (за счет модификации размеров и геометрии КС) и технологическими (путем ис-

пользования более высокоэнтальпийных газов или более мощных плазмотронов) методами [8].

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-08-00190а «Разработка фундаментальных научных основ применения процессов плазменной инсинерации в технологиях рециклинга отходов».

Список литературы

1. 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. 125 с.
2. Бернадинер М. И. Огневая переработка и обезвреживание отходов / М. И. Бернадинер, А. П. Шурыгин. Москва: Химия, 1990. 302 с.
3. Анахов С. В. О методах плазменной инсинерации в технологиях утилизации и обезвреживания отходов / С. В. Анахов, Ю. А. Пыкин // Аграрный вестник Урала. 2017. № 7. С. 46–51.
4. Fridman A. Plasma Chemistry / A. Fridman. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. 978 p.
5. Анахов С. В. Принципы и методы проектирования в электроплазменных и сварочных технологиях: учебное пособие / С. В. Анахов. Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2014. 144 с.
6. Анахов С. В. Применение специализированных программ для решения газодинамических задач при проектировании плазмотронов / С. В. Анахов, А. В. Матушкин, И. Ю. Матушкина // Наука. Информатизация. Технологии. Образование: материалы 11-й Международной научно-практической конференции «Новые информационные технологии в образовании и науке. НИТО-2018», Екатеринбург, 26 февр. – 2 марта, 2018 г. Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2018. С. 464–472.
7. Плазмотрон: патент № 67909 на полезную модель / Ю. А. Пыкин, С. В. Анахов, С. А. Шакуров. 2007. 22 мая. 6 с.
8. Анахов С. В. Системные принципы в решении задач экологической безопасности с применением плазменных технологий / С. В. Анахов, Ю. А. Пыкин, С. А. Шакуров // Экология и промышленность России. 2014. № 1. С. 4–9.