
СЕКЦИЯ 2. НАУЧНЫЕ И ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ РЕШЕНИЯ
ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЙ НА ПУТИ ЦИФРОВИЗАЦИИ

УДК [621.387.143+533.9-115]:[658.512:004.896]

Анахов С. В., Матушкин А. В.

**ПРАКТИКА САД И САЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ В СФЕРЕ
ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ***

Сергей Вадимович Анахов

sergej.anahov@rsvpu.ru

*ФГАОУ ВПО «Российский государственный профессионально-педагогический
университет», Россия, г. Екатеринбург*

Анатолий Владимирович Матушкин

227433@rambler.ru

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет», Россия, г. Екатеринбург

**PRACTICE OF CAD AND CAE DESIGN IN THE FIELD OF PLASMA
TECHNOLOGIES**

Anakhov Sergey Vadimovitch

Russian State Vocational Pedagogical University, Russia, Yekaterinburg

Matushkin Anatoliy Vladimirovitch

Ural Federal University, Russia, Yekaterinburg

Аннотация. Эффективность автоматизированных методов проектирования плазматронов можно повысить за счет интеграции технологий проектирования и инженерного анализа. Рассмотрены особенности САД и САЕ технологий проектирования плазматронов. Показаны примеры проектирования плазматронов для резки металлов и обезвреживания отходов с применением цифровых технологий.

Abstract. The effectiveness of automated plasma torch design methods can be improved by integrating design and engineering analysis technologies. The features of

CAD and CAE technologies for designing plasma torches are considered. Shows examples of the design of plasma torches for cutting metals and waste treatment with the use of digital technologies.

Ключевые слова: *плазматрон, автоматизация, проектирование, эффективность, качество, безопасность.*

Keywords: *plasmatron, automation, designing, efficiency, quality, safety.*

Любая завоевавшая свое место на рынке технология, как известно, проходит несколько стадий развития. Эволюцию таких технологий можно охарактеризовать в рамках теории циклов Н. Кондратьева [1], либо в соответствии с кривой развития технологических инноваций Нуре cycle («Цикл хайпа»), представляемой компанией Gartner [2]. Последняя методика используется с 1995 года для описания и оценки энтузиазма, который вызывает у пользователей появление новых технологических решений. В течении Нуре cycle любая эталонная инновация проходит 5 стадий, графически изображаемых в виде S-образной кривой:

- 1) запуск технологии;
- 2) пик завышенных ожиданий;
- 3) пропасть разочарования;
- 4) склон просвещения;
- 5) плато продуктивности.

Последняя стадия характеризует технологию, которая завоевала себе место на рынке (ею пользуется как минимум 20% целевой аудитории), став удобным инструментом или решением в определенной области и даже ступенью для очередной инновации.

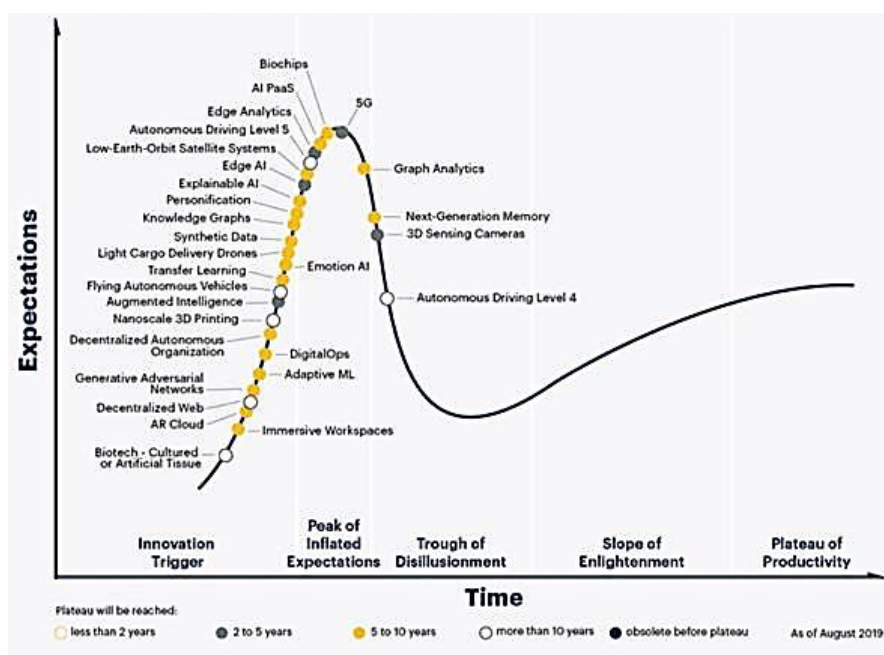


Рисунок 1 — Кривая развития инноваций (Gartner, 2019 год)

Если проанализировать, представленные Gartner кривые за последние несколько лет, то мы увидим характерные для современного периода перехода к 5-му и 6-му технологическому укладу наукоемкие инновации, находящиеся на разных стадиях своего развития. В основе большинства подобных технологий лежат современные цифровые методы обработки информации, применение которых на, казалось бы, уже сложившемся сегменте рынка часто дает эффект скачкообразного ускорения с потенциалом последующего инновационного развития. С этой точки зрения интересно посмотреть на современные практики применения методов компьютерного инжиниринга (систем проектирования и анализа CAD и CAE) в сфере достаточно стабильно используемых в промышленности технологий плазменной обработки материалов.

В основе применения плазменных технологий лежит использование генератора низкотемпературной плазмы — плазмотрона [3] — устройства, разработка и внедрение которого в промышленность начались ещё в 60-е годы XX века, а выход на плато продуктивности состоялся на рубеже двух последних столетий. Плазмотрон, как правило, — достаточно компактное устройство, для работы которого, однако, требуется взаимосогласованное функционирование большого числа различных систем — электрической, газовой, механической,

охлаждающей и др. К концу прошлого века была создана полноценная теория характерных для данных технологий газо-, тепло- и электрофизических процессов, разработаны методики проектирования плазмотронов для широкого класса их практического применения [4]. Однако, сложность экспериментальной оценки физических процессов, происходящих внутри плазмотрона, оставила перед разработчиками ряд проблем, которые удалось решить лишь с приходом в сферу инженерного проектирования современных средств цифрового анализа.

Технологии компьютерного инжиниринга (CAD/CAM/CAE/PDM/PLM), в свою очередь, прошли характерный для кривой инноваций путь развития. В настоящее время различают несколько подгрупп CAD (Computer-Aided Design), среди которых наиболее развитыми являются машиностроительные технологии MCAD (Mechanical CAD), рынок которых начал формироваться ещё в 1970-е годы, когда CAD-системы ещё воспринимались в качестве «электронного кульмана». Среди событий 1970-х годов следует отметить покупку авиационной французской компанией Avion Marcel Dassault у американского авиастроителя Lockheed компьютерной программы CADAM (Computer Augmented Drafting And Manufacturing) и последующий выход системы CATIA (Computer-Aided Three-Dimensional Interactive Application), которые широко применяются и в наши дни на многих промышленных предприятиях. К началу 1990-х годов сформировались явные лидеры корпоративных MCAD-систем: альянс Dassault Systèmes / IBM, Unigraphics, SDRC, PTC, среди продуктов которых обратим внимание на пакет SolidWorks (впервые выпущенный в 1995 году начинающей компанией SolidWorks), который позволил создавать полные цифровые 3-D модели изделия и заложил тем самым основы массового применения 3-D подходов в машиностроении. В 1997 году компания SolidWorks Corp. была приобретена Dassault Systèmes (DS), а в мае 2009 года DS SolidWorks Corp. уже продала миллионную лицензию [5]. В настоящее время данный программный пакет можно отнести к «средним CAD/CAM системам» («3-D middle range»), объединяющим возможности 3-D твердотельного моделирования с невысокой по сравнению с «тяже-

лыми» системами ценой и ориентацией на платформу Windows. Среди отечественных CAD/CAM-систем этого уровня отметим, в первую очередь, КОМПАС (производитель — АСКОН) и T-Flex (ЗАО «Топ-Системы»), а также ADEM (Automated Design Engineering Manufacturing), CAPP («автоматизированная система технологической подготовки производства») и российскую линейку программных продуктов для трехмерного проектирования промышленных объектов Model Studio CS.

С 2005 года ведет свой отсчет тесная интеграция CAD- и CAE-систем (Computer-Aided Engineering), связавшая в единое целое процессы управления цифровыми данными и жизненным циклом изделия (технологии PLM — Product Lifecycle Management) за счет применения суперкомпьютерных технологий и давшая толчок развитию концепции «цифрового производства». Работа CAE-систем в настоящее время основана на применении рациональных математических моделей, обладающих высоким уровнем адекватности реальным объектам и физическим процессам и позволяющих находить эффективные решения многомерных исследовательских и промышленных задач, описываемых нестационарными нелинейными дифференциальными уравнениями в частных производных в пространственных областях сложной формы, преимущественно численными методами — (метод конечных элементов — МКЭ; Finite Element Analysis — FEA). Интерес к применению CAE-систем за прошедшие с момента их появления 30 лет только вырос, что обусловлено регулярным увеличением вычислительной мощности компьютеров; значительным расширением спектра функциональных возможностей, удобства и наглядности в применении CAE-систем; появления широкого спектра возможностей визуализации и анимации результатов численных расчетов и т. д.

К настоящему времени разработаны сотни MCAE-систем, предназначенных для решения широкого круга задач [6-9]. Однако, примерно две трети доходов глобального рынка MCAE-систем приходится на долю таких компаний, как Altair Engineering, ANSYS, Inc., Dassault Systèmes, MSC Software и Siemens PLM

Software (указаны в алфавитном порядке). Для решения характерных для плазменных технологий задач механики жидкости и газа (Computational Fluid Dynamics, CFD), как правило, применяется метод конечных объемов. Наиболее широкими возможностями в этой сфере обладают программные системы Fluent, STAR-CD (разработчик CD-adapco) и ANSYS CFX, а среди интегрированных модулей для пакетов класса «3-D middle range» (например, SolidWorks) можно отметить FloWorks (Flow Simulation) и EFD.Lab (отдельная программа, не привязанная к конкретной CAD системе).

Применение технологий инженерного анализа к описанию и решению мультидисциплинарных задач при проектировании плазмотронов различного функционального назначения, как уже было отмечено, позволило с середины 2000-х годов придать новый импульс развитию плазменных технологий. Результатом такого развития стало, например, появление технологии т.н. «точной» или «сжатой» плазмы, представленной в серии аппаратов плазменной резки HiFocus (Kjellberg) и EASYTHERM (Messer Greisheim) — Германия, а также HyPerformance (Hypertherm) — США, и использующей двухпоточный принцип организации газовых потоков при формировании плазменной дуги (струи) в плазмотроне. Примененные в данных технологии принципы были предложены разработчиками плазменного оборудования несколько десятилетий назад, однако только с появлением в конце 1990-х годов CAE-систем удалось смоделировать физические процессы в таких сложных системах и получить оптимальные конструкторские и технологические решения. В результате металлорежущие плазменные технологии стали конкурентоспособными (по качеству, производительности и эффективности) не только при разделке металлов средних и больших толщин, но и при резке тонколистовых металлов, где до этого преобладали методы лазерной резки.

Анализ рынка отечественных металлорежущих плазмотронов и разработок по ряду других направлений плазменной обработки материалов показал, что к рубежу 2010-х годов наметилось серьезное отставание в сфере разработки высокоэффективных плазмотронов, преодоление которого стало одной из главных

задач для российских специалистов, работающих в данной сфере. Можно сказать, что к концу 2010-х годов данная задача оказалась преимущественно решена, так как на рынке и в качестве опытно-промышленных моделей появились конкурентоспособные разработки отечественных плазмотронов, решающие проблему импортозамещения плазменных технологий и оборудования. В качестве иллюстрации опыта решения подобных задач, можно обратить внимание на практику применения CAD и CAE систем для проектирования плазмотронов авторами данной статьи.

При проектировании металлорежущих плазмотронов в качестве основных критериев эффективности, как правило, выбираются производительность, качество реза и надежность работы плазменного оборудования. Высокие значения этих показателей зависят, в первую очередь, от эффективности системы газодинамической стабилизации [3], определяющей высокую степень тепловложения и кинетические свойства плазменной дуги (струи), надежность работы катодного и соплового узлов плазмотрона. В современных плазмотронах для резки металлов, как правило, применяется газовихревой способ стабилизации (ГВС) с тангенциальной подачей плазмообразующего газа (ПОГ) в сопловый узел и дополнительным обжатием плазменной дуги (струи) как самим соплом, так и на выходе из сопла вихревым потоком стабилизирующего газа (в технологии узкоструйной плазмы). Тангенциально закрученный поток газа формируется в вихревых камерах (завихрителях), количество, конструкция и расположение которых в плазмотроне существенным образом определяет эффективность резки металлов.

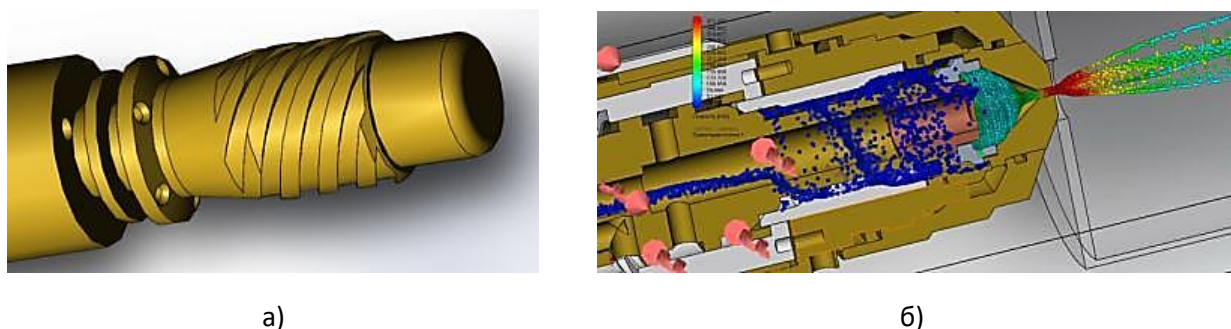


Рисунок 2 — CAD и CAE технологии при разработке однопоточного плазмотрона ПМВР-5.1: а — 3D-моделирование системы газодинамических фильтров, б — газодинамический анализ

Для решения поставленной задачи повышения эффективности плазменной резки авторами были применены численные методы САД и САЕ проектирования и анализа. 3D-модель плазмотрона (рис. 2 а) создавалась, как правило, в SolidWorks с применением КОМПАС-3D (отечественной системе трехмерного моделирования, построенной на собственном математическом ядре), с последующим её экспортом для анализа газодинамических процессов (рис.2 б) в интегрированный с SolidWorks программный модуль FlowWorks или EFD.lab, где производился расчет с переменной дискретизацией расчетной сетки. В результате исследований было показано, что известный способ газовихревой стабилизации с применением однопоточной схемы подачи ПОГ в сопловой узел через единственный завихритель не обеспечивает равномерность распределения газового потока по сечению газоздушного тракта (ГВТ) и в сопловом канале плазмотрона. Данная проблема возникает из-за асимметрии подачи газа в расширительную камеру, расположенную перед завихрителем, и ограниченных размеров самой камеры. Повысить коэффициент равномерности распределения газового потока можно путем увеличения размеров камеры, использования системы газодинамических фильтров в виде дополнительных препятствий (рис. 2 а), применения симметричной подачи ПОГ в камеру и 2-х завихрителей (рис. 3 а), поиск конструктивного исполнения которых можно провести путем с применением САД и САЕ систем в процессе оптимизацию в соответствии с критерием равномерности (рис. 3 б). Однако, при этом возрастает трудоемкость изготовления и стоимость плазмотрона. В этой связи были исследованы и другие возможности конструктивного улучшения системы ГВС металлорежущих плазмотронов.

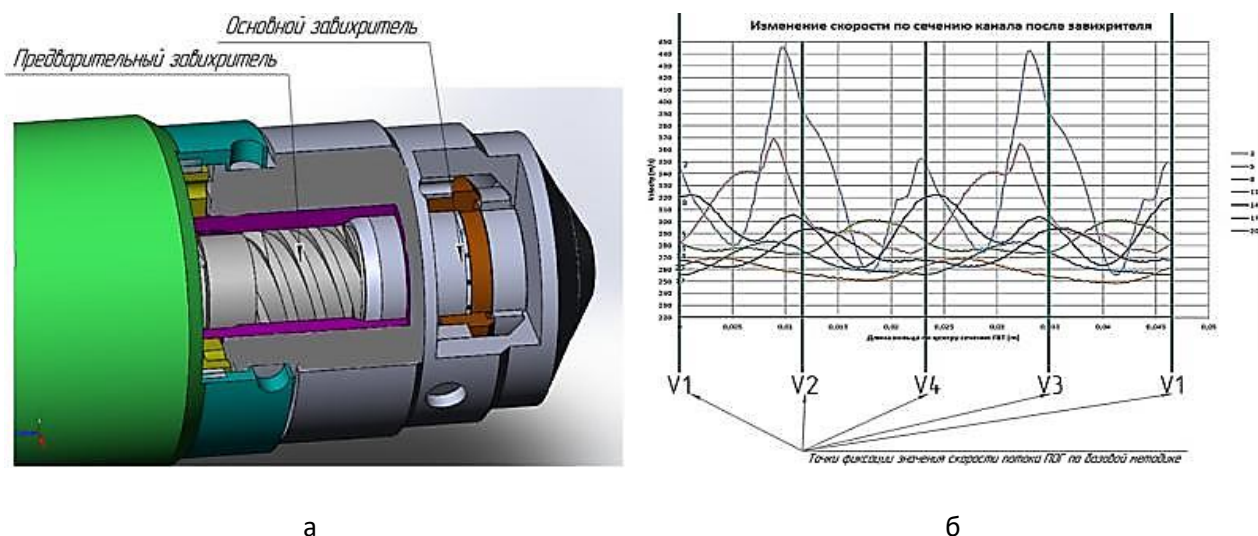


Рисунок 3 — Проектная модель однопоточного плазматрона ПМВР-5.2 с двумя завихрителями:

а — проектная 3D-модель, б — оптимизация геометрии путем газодинамического анализа

Помимо расчета газодинамических параметров газовых потоков в пределах ГВТ плазматрона (рис.2 б и 3 б) упомянутые системы инженерного анализа позволяют сделать расчет и газо-плазменного потока в пределах сформированной за пределами сопла плазматрона плазменной дуги (струи). Для оценки влияния различных способов газовихревой стабилизации на эффективность работы плазматронов были проведены расчеты кинематических свойств (локальной скорости) плазменной струи для ряда других разработанных конструкций.



Рисунок 4 — Опытно-промышленные модели плазматронов (производитель — ООО НПО «Полигон»): а — однопоточный ПМВР-5.3, б — двухпоточный ПМВР-9.1 (технология «узкоструйной плазмы»)

В качестве моделей для исследования были взяты два разработанных в авторском коллективе плазматрона для резки металлов производства ООО НПО «Полигон» (г. Екатеринбург) — ПМВР-5.3 (из серии однопоточных плазматронов ПМВР-5 со встроенным ступенчатым газодинамическим фильтром повы-

шенной производительности для работы на токах до 180 А) и ПМВР-9.1 (из серии двухпоточных плазмотронов ПМВР-9 со встроенным газодинамическим фильтром и системой двойного обжата плазменной дуги (технология «узкоструйной плазмы»)) — рис. 4. В качестве исходных данных были использованы паспортные данные плазмотронов подобного типа по массовому расходу газа (общеупотребимое значение — 0,011 кг/с). На выходе из сопла плазмотрона использовались параметры окружающей среды с нормальным атмосферным давлением. В целях абстрагирования от термодинамических эффектов расчет производился на холодной струе газа в пренебрежении нагревом плазменной дугой и теплообменом между потоком ПОГ и стенками каналов ГВТ плазмотрона. Результаты расчетов скоростей в исследуемом режиме подачи ПОГ для различных способов газовихревой стабилизации в одно- и двухпоточных плазмотронах представлены на рис. 5. Анализ представленных изображений позволяет сделать вывод об имеющихся различиях в распределении скоростей, определяющем форму, протяженность, кинематические и энергетические параметры плазменной струи.

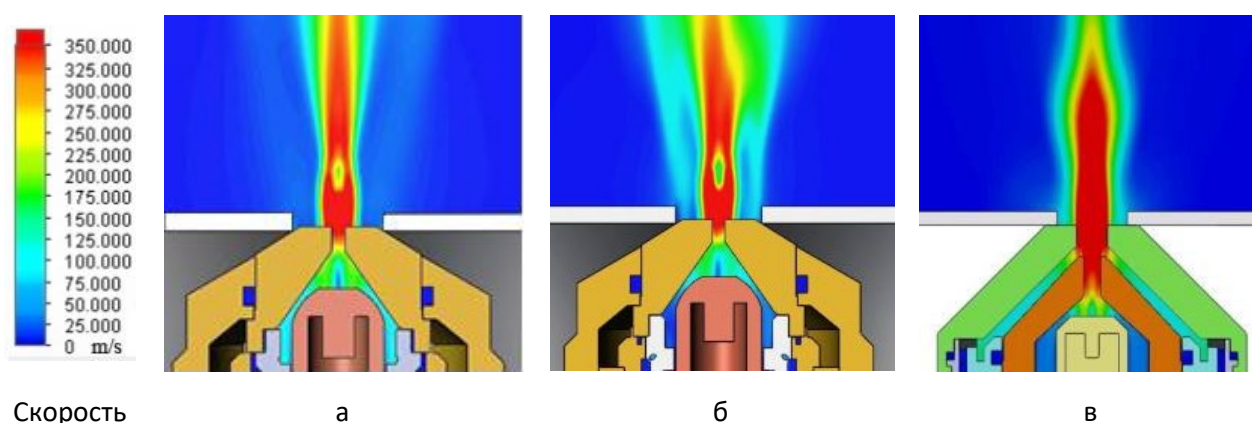


Рисунок 5 — Распределение скоростей в плазменной струе плазмотронов: а - ПМВР-5.3 с серийным завихрителем, б - ПМВР-5.3 с новым завихрителем, в - ПМВР-9.1 (двойное сопло)

Для анализа полученных данных была разработана методика дополнительного расчета параметров распределения кинематических характеристик в плазменной струе, который производился на разном удалении от оси соплового ка-

нала и среза катода плазмотрона по параллельным оси линиям, в пределах цилиндрической области, ограниченной диаметром соплового канала (рис. 6). В основу методики, позволяющей сравнивать характеристики потоков как с точки зрения кинетических свойств струи, так и с учетом равномерности распределения скоростей в сечении газового потока, было положено использование 3-х статистических параметров: 1. Размах вариации $R=V_{\max}-V_{\min}$, 2. Отношение вариации $L=V_{\max}/V_{\min}$ и 3. Коэффициент вариации $F=S/(\bar{V})$, где S — дисперсия V , \bar{V} — средняя скорость.

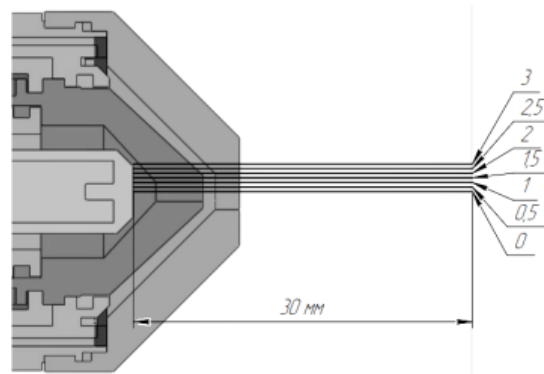


Рисунок 6 — Схема определения кинематических характеристик струи плазмотрона ПМВР-5.3

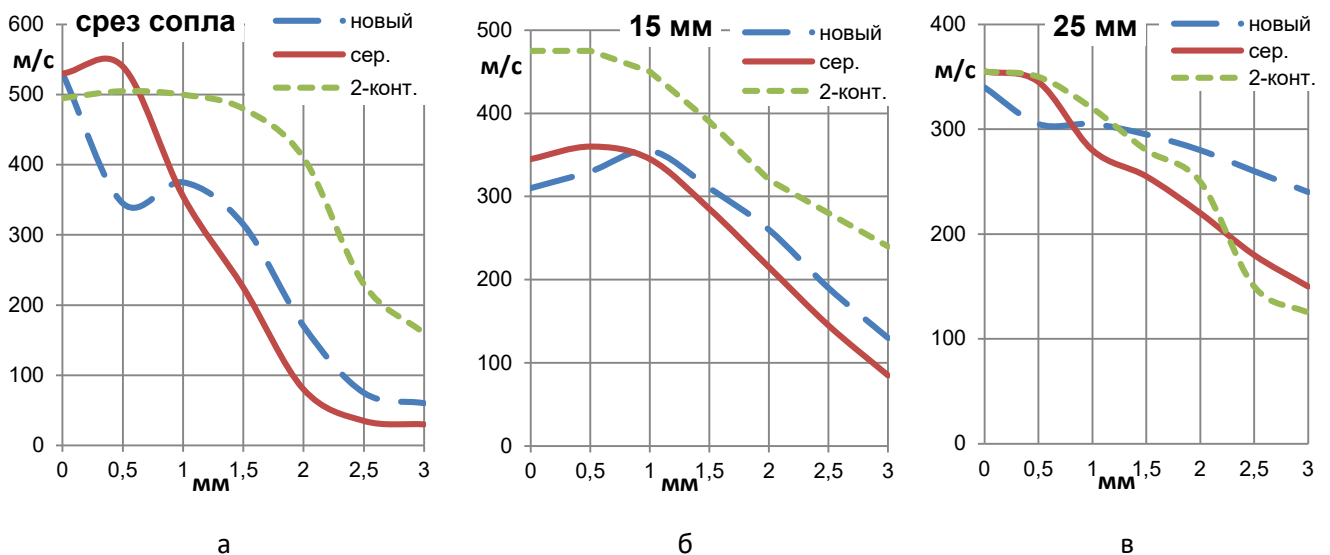


Рисунок 7 — Распределение скоростей по сечению струи (расчетная схема — рис.5) в зависимости от удаления от среза сопла плазмотронов (ПМВР-5.3 с серийным и новым завихрителями и 2-контурного ПМВР-9.1)

Анализ полученных результатов (рис.7) позволил сделать вывод, что струя плазмотрона ПМВР-5.3 с новым завихрителем, использующим принцип тангенциальной подачи газа в сопловой узел, сохраняет более высокие энергетические свойства на большем диапазоне длины по сравнению со струей плазмотрона ПМВР-5.3 с серийным завихрителем. Угол ввода ПОГ в сопловой узел влияет на кинематические и кинетические свойства плазменной струи, а, следовательно, на вольт-амперные характеристики дуги и её способность к резке металла большей толщины с повышенной скоростью. Последний вывод был подтвержден данными, полученными в процессе резки плазмотроном ПМВР-5.3. При резке пластины из стали 09Г2С толщиной 10 мм на токе в 90 А максимальная скорость резки была не более 1.1–1.2 м/мин. В результате применения модернизированного завихрителя максимальная скорость резки увеличилась до 1.5–1.6 м/мин. Было также определено, что дополнительное обжатие струи в плазмотроне ПМВР-9.1 позволяет получить более однородное распределение скоростей и более высокие кинетические свойства, чем в струе плазмотрона ПМВР-5.3, но лишь в пределах удаления на 15–20 мм от среза катода. На больших расстояниях более высокие показатели равномерности распределения и кинетических свойств имеет плазмотрон ПМВР-5.3 с новым завихрителем. Это дает основание провести дальнейшие исследования по определению оптимального угла ввода ПОГ и его влиянию на производительность, качество резки и надежность работы плазмотрона. При резке тонколистовых металлов предпочтительнее использовать примененную в плазмотроне ПМВР-9.1 технологию «узкоструйной плазмы» (отечественный импортозамещающий аналог импортной технологии «точной» или «сжатой» плазмы).

Другой важной задачей, решаемой авторами методами САД и САЕ проектирования в сфере плазменных технологий, стала проблема образования супертоксикантов (полихлорированных дибензодиоксидов, дибензофуранов, бифенилов и т. д.) в процессе термической переработки бытовых и промышленных отходов различного состава. Одним из решений данной проблемы является применение в технологиях экологической направленности плазменных генераторов —

плазмотронов, в которых за счет высокоэнергетического плазменного воздействия на вещества различного фазового состава происходит их глубокое разложение — плазменная инсинерация («сжигание»). С точки зрения авторов, одним из рациональных методов плазменного обезвреживания является внедрение плазмотронов на стадии дожигания газообразных продуктов переработки опасных отходов. Очевидно, что такая технология должна, как минимум, обеспечивать требуемое время нахождения газового потока опасных отходов при соответствующей температуре, задаваемой при нагреве камеры смешения (КС) утилизируемых и плазмообразующих газовых потоков плазменной дугой (струей).

Подобная технология была разработана авторами на базе запатентованной полезной модели дугового плазмотрона [10] с последующей её модернизацией за счет применения модифицированной конструкции для обезвреживания токсичных парогазовых потоков различного состава и фазового состояния. Сама плазменная струя формируется в КС путем взаимодействия плазменной дуги, возбуждаемой и горящей между катодом и анодом соплового узла плазмотрона, с вихревым потоком ПОГ и последующим её выдуванием в КС за счет высокой кинетической энергии потока ПОГ. Новая конструкция такого плазмотрона отличается наличием камеры смешения (КС), в которой обеспечивается смешение и нагрев потоков тангенциально подаваемой токсичной парогазовой смеси и предварительно закрученного с помощью системы газовихревой стабилизации плазмообразующего газа. 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 (рис. 8). Количество патрубков в расчетных моделях изменялось от 2-х до 4-х.

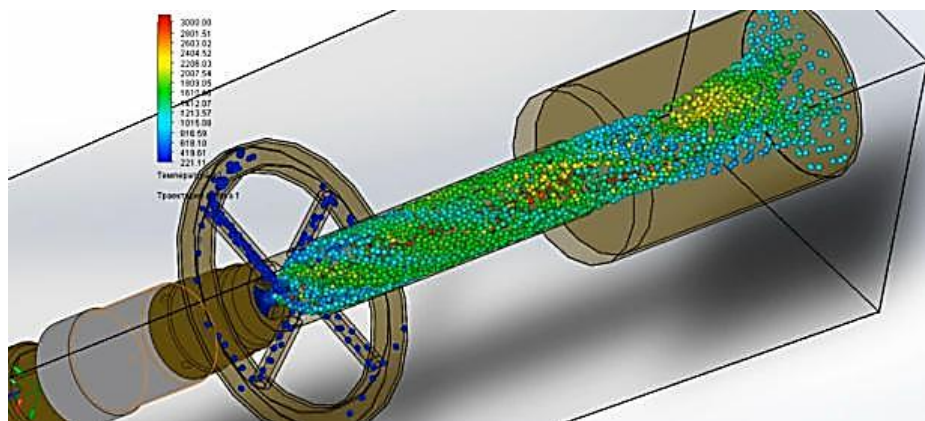


Рисунок 8 — 3D-моделирование газодинамических процессов в камере смешения плазмотрона

Оценка эффективности нагрева газозвушной смеси в КС производилась путем расчета газодинамических параметров в приложении FlowWorks программной среды SolidWorks. Газодинамическое моделирование проводилось для воздушно-плазменной среды при характерном для эффективной газовихревой стабилизации дугового плазмотрона массовом расходе основного потока ПОГ 0,011 кг/с (схема с 2 патрубками) и 0,005 кг/с (схема с 4 патрубками), расход утилизируемого газа на 1 патрубков — 0,004 кг/с, диаметре входного отверстия в КС 4 мм. Расчет температур в КС проводился по нескольким прямолинейным траекториям (линиям) различной удаленности от оси камеры (по аналогии со схемой на рис. 6) при характерной для воздушно-плазменной дуги (струи) температуре в 7000 К. В целях обеспечения эффективного обезвреживания были рассмотрены 2 варианта нагрева — «короткой» плазменной струей длиной не менее 90 мм и «длинной» плазменной струей не менее 170 мм. Очевидно, что последний вариант нагрева требует примерно 2-кратного увеличения мощности источника питания плазменной дуги. Геометрия КС: длина не менее 170 мм, угол раскрытия начальной части — 20° , раскрытие на остальной длине КС — 0° (цилиндрическая конфигурация).

Как показали расчеты, основной поток утилизируемого газа движется в КС по спиралевидной траектории (рис.9), поэтому были сделаны оценки изменения кинематических параметров и вдоль характерной для такой траектории винтовой линии (диаметр — 5 см, шаг — 8,5 см, длина одного витка — 20 см). Так как при

винтовом характере движения газового потока расчет по прямолинейной траектории приводит к сильным осцилляциям параметров вдоль линии движения, применялся также расчет средних по сечению КС температур и скоростей. При расчете вдоль винтовой траектории наблюдались существенно меньшие осцилляции газодинамических параметров, что подтверждает преимущественное распределение и характер движения утилизируемого газа в КС.

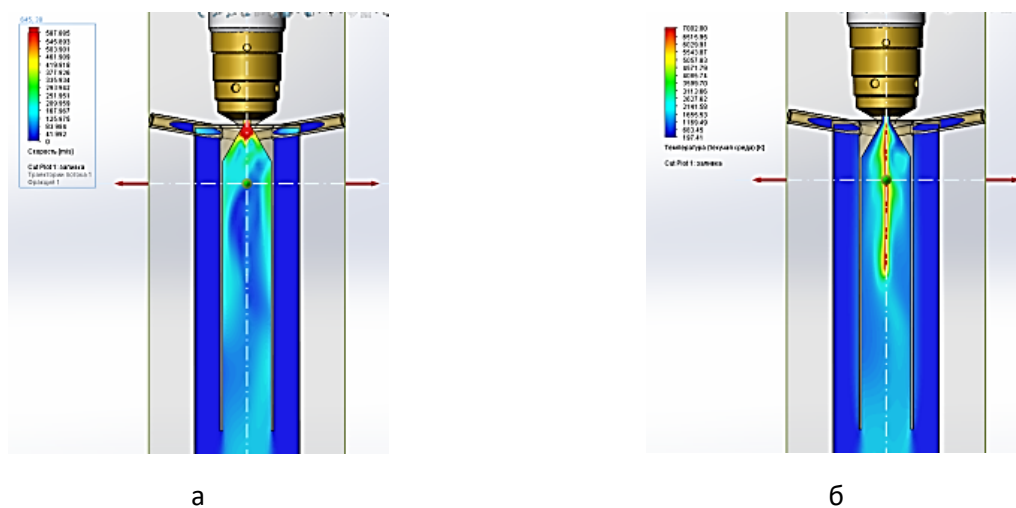


Рисунок 9 — Результаты расчета газодинамических параметров в КС плазмоторна:
 а — распределение скоростей, б — распределение температур

Анализ представленных результатов расчета параметров нагрева (рис.10) позволяет сделать вывод о том, что увеличение длины плазменной струи в КС приводит к росту скорости газа, что закономерно сказывается на снижении времени нагрева. Однако, при этом примерно на 500 К возрастает средняя температура газа во всех областях КС, в результате чего результирующая эффективность разложения супертоксикантов (модельное вещество — диоксин) оказывается на 30-40 % более высокой. Подобные выводы можно сделать и при анализе газодинамических параметров и температур нагрева, сделанном вдоль винтовой линии, что, как было отмечено ранее, соответствует движения основной массы утилизируемого газа в КС. Оценки эффективности процесса позволили однозначно определить необходимость применения длинной (170 мм) плазменной струи для обезвреживания диоксинов. Очевидно, что дальнейшим направлением совершенствования рассматриваемой технологии должна стать её конструктивная оп-

тимизация в соответствии с интегральными критериями эффективности обезвреживания и экономичности. В этой связи следует учесть такие параметры как расход плазмообразующего и утилизируемого газа, углы подачи утилизируемого газа и геометрию камеры смешения, мощность источника питания, обеспечивающего горение плазменной струи в КС необходимой длины. Целесообразно также при проектировании технологии обезвреживания предусмотреть и проанализировать процессы в камере закалки перед выбросом газов в атмосферу.

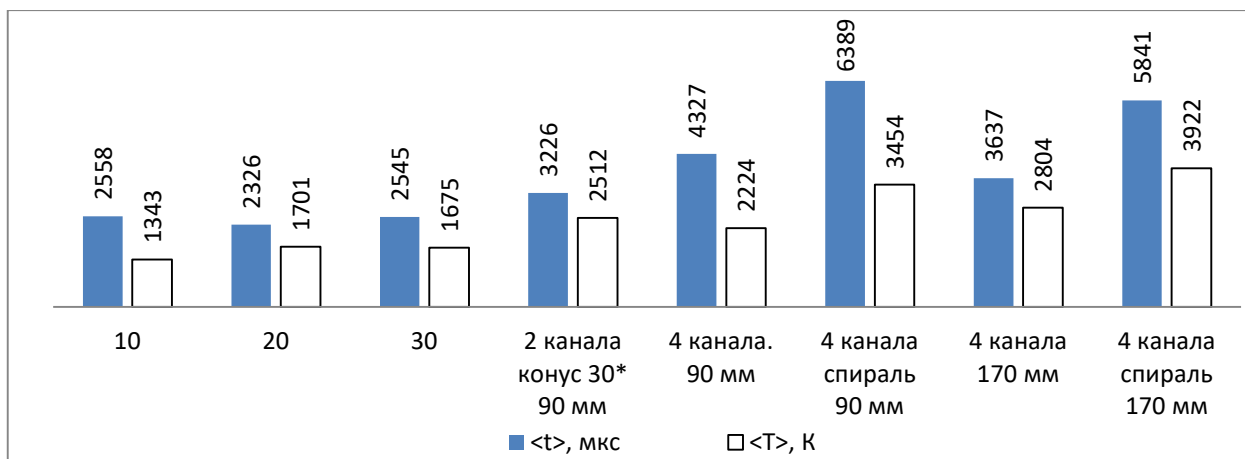


Рисунок 10 — Средние значения времени и температуры нагрева для различных конструкций КС

Представленные в данной работе результаты анализа модернизированной технологии плазменного дожигания газообразных продуктов переработки опасных отходов позволили обосновать применимость данного способа обезвреживания на примере одного из наиболее опасного супертоксикуанта — диоксина. Данная технология обладает существенными преимуществами по сравнению с известными технологиями высокотемпературного сжигания и обезвреживания отходов за счет скорости и эффективности процесса. Следует, однако, продолжить разработку и анализ данной экотехнологии с целью поиска оптимальных параметров её применения.

Подводя итоги, представленным в данной работе методам и результатам исследований процессов в сфере применения плазменных технологий, следует сделать очевидный вывод об эффективности применения современных методов конструктивного инжиниринга (CAD и CAE систем). Использование совместимых программных пакетов среднего уровня (3D-Компас, SolidWorks, FlowWorks,

EFD.lab) позволяет рассматривать данную методику в качестве основы для PLM — технологии проектирования в сфере плазменных технологий. Основное назначение PLM-технологий — объединение и эффективное взаимодействие изолированных участков автоматизации, образовавшихся в результате внедрения различных систем (CAD/CAM/CAE/PDM) для реализации сквозного конструкторского, технологического и коммерческого циклов производства продукции — «от зарождения идеи, создания конкурентоспособного продукта, его эксплуатации и, наконец, до его утилизации» [5]. Создание подобной методики автоматизированного проектирования позволит эффективно ответить на ряд ключевых проблем и вызовов, с которыми сталкиваются в последнее время инженеры-разработчики, применяющие методы автоматизированного проектирования — ужесточение санкций и сложности использования зарубежного программного обеспечения при отсутствии российских аналогов необходимого качества; отсутствие необходимых компетенций у проектировщиков и потребителей продукции; всё возрастающие требования к конкурентоспособности и эффективности технологий на пути перехода к Индустрии 4.0. Необходимое для валидации получаемых численных результатов сочетание компьютерного моделирования и анализа с натурными экспериментами, должно позволить российским разработчикам плазменных технологий решить необходимые задачи по импортозамещению, а также приобрести опыт, необходимый для повышения точности результатов компьютерного моделирования.

** Работа выполнена при поддержке Государственного задания Минобрнауки РФ №13.10317.2018/11.12 (2018-2019 гг.) и гранта РФФИ №19-08-00190*

Список литературы

1. Анахов, С. В. Стратегии цифровой экономики и тренды научно-образовательной политики / С. В. Анахов // Новые информационные технологии в образовании и науке. – 2018. – № 1 – С. 93–102.
2. Цикл зрелости технологий Gartner. – URL: [https:// http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Gartner_Hype_Cycle_for_Emerging_Technologies_](https://http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Gartner_Hype_Cycle_for_Emerging_Technologies_) (дата обращения: 20.02.2020).

3. Анахов, С. В. Принципы и методы проектирования плазмотронов / С. В. Анахов. – Екатеринбург : Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2018. – 165 с.
4. Электродуговые генераторы термической плазмы / М. Ф. Жуков, И. М. Засыпкин, А. Н. Тимошевский и др. – Новосибирск : Наука, 1999. – 712 с.
5. Компьютерный инжиниринг: учебное пособие / А. И. Боровков [и др.]. – Санкт-Петербург : Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 93 с.
6. Cyon Research 2010 Survey of Engineering Software Users. A Cyon Research Report. September 7. – 2010.
7. Павлов, С. К вопросу о классификации МСАЕ-систем. Часть 1 / С. Павлов, Ю. Береза // CAD/CAM/CAE Observer. – 2009. – № 1. – С. 64–69.
8. Павлов, С. К вопросу о классификации МСАЕ-систем. Часть 2 / С. Павлов, Ю. Береза // CAD/CAM/CAE Observer. – 2009. – № 2. – С. 58–63.
9. Павлов, С. К вопросу о классификации МСАЕ-систем. Часть 3 / С. Павлов, Ю. Береза // CAD/CAM/CAE Observer. – 2009. – № 4. – С. 64–75.
10. Патент на изобретение «Плазмотрон» №2584367 от 11.03.2015 (опубликовано 20.05.2016 г.) / Пыкин Ю. А., Анахов С. В., Матушкин А. В.