

**С.В. Анахов<sup>1,2</sup>, Ю.А. Пыкин<sup>3,4</sup>, А.В. Матушкин<sup>5</sup>**

<sup>1</sup> Российский государственный профессионально-педагогический университет,  
Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup> ООО «ТЕРУС», Екатеринбург, Россия

<sup>3</sup> Уральский государственный лесотехнический университет, Екатеринбург, Россия

<sup>4</sup> ООО НПО «Полигон», Екатеринбург, Россия

<sup>5</sup> Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
Екатеринбург, Россия

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ В ЭЛЕКТРОПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ**

Представлены результаты по разработке методики расчета и проектирования металлорежущих плазматронов. Отмечено, что среди большого числа автоматизированных исследований в сфере электроплазменных технологий очень редко предметом рассмотрения являются металлорежущие плазматроны, а сами решаемые задачи затрагивают узкие проблемы надежности и эффективности работы плазменного оборудования, не позволяя сформулировать системную методику проектного анализа. Любая методика конструирования дуговых плазматронов постоянного тока должна учитывать основные факторы работы электроплазменных технологий, обобщенные принципы и методы их проектирования. В основу подобной методики должны быть положены принципы функциональности, системности и оптимальности. Особое внимание при проектировании надо обращать на газодинамические факторы. В этой связи рассмотрены особенности нескольких известных методик газодинамического проектирования плазматронов. Отмечено, что они не учитывают неизбежные потери давления, возникающие на предшествующих сопловой камере участках газоздушного тракта (в первую очередь в завихрителе). Также не учитывается асимметрия распределения подачи газа по сечению тракта плазматрона. Предложенная методика включает в себя расчет газодинамических потерь и коэффициента равномерности распределения скоростей по тракту плазматрона. Результаты газодинамического анализа используются для профилирования газоздушного тракта плазматрона с учетом принципов проектирования. Обсуждена целесообразность применения специализированных программ для исследования процессов и проектирования плазматронов. В качестве примера рассмотрена работа программного пакета EFD.Lab при проектировании плазматронов для резки металлов. Представлены результаты автоматизированного проектирования в электроплазменных технологиях. Рассмотренная методика применяется для разработки новых плазматронов, в том числе использующих технологию узкоструйной плазмы.

**Ключевые слова:** плазматрон, проектирование, газодинамика, скорость, газоздушный тракт, профилирование, газодинамическая стабилизация, завихритель, расширительная камера, плазмообразующий газ, плазменная струя, численное моделирование.

**S.V. Anakhov<sup>1,2</sup>, Yu.A. Pykin<sup>3,4</sup>, A.V. Matushkin<sup>5</sup>**

<sup>1</sup> Russian State Vocational-Professional University, Ekaterinburg, Russian Federation

<sup>2</sup> CJSC "TERUS", Ekaterinburg, Russian Federation

<sup>3</sup> Ural State Forest Engineering University, Ekaterinburg, Russian Federation

<sup>4</sup> CJSC NPO "Poligon", Ekaterinburg, Russian Federation

<sup>5</sup> Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin,  
Ekaterinburg, Russian Federation

## **METHODICAL PRINCIPLES OF COMPUTER-AIDED GAS-DYNAMIC DESIGN IN ELECTROPLASMA TECHNOLOGIES**

Results on development of a computation procedure and designing for metal-cutting plasmatrons are presented. It is noted, that the similar technique should be based on functional, systemic and optimal principles. Any method of designing DC arc plasmatrons should take into account the main factors of electroplasmic technologies, generalized principles and methods of their design. The principles of functionality, consistency and optimality should be the basis of such method. Special attention at

designing it is necessary to turn on gas-dynamic factors and safety of plasma technologies. In this regard, the features of several known methods of gas-dynamic design of plasmatrons are considered. It is noted that they do not take into account the inevitable pressure losses arising in the areas of the gas-air path preceding the nozzle chamber (primarily in the swirl). Also, the asymmetry of the gas supply distribution along the section of the plasma torch path is not taken into account. The offered method includes calculation of gas-dynamic losses and plasma gas uniformity in cross-section of an air-gas path. The results of gas-dynamic analysis are used for profiling an air-gas path in view of design principles. Discussed the feasibility of applying specialized software for the study of processes and design of plasma torches. As an example, the work of the software package EFD.lab in the design of plasma torches for cutting metals is presented. Also presents the results of computer-aided design in electroplating technologies. The considered technique is applied for new plasmatrons development, including narrow jet plasma technology.

**Keywords:** plasmatron, designing, flow dynamics, velocity, air-gas path, profiling, gas rotating stabilization, swirl canals, expansion chamber, plasma gas, plasma jet, computational modeling.

За последние годы в изучении методов научных исследований и проектирования электроплазменных технологий произошли характерные изменения, связанные с увеличением доли машинных экспериментов, основанных на применении как широко используемого, так и специализированного программного обеспечения для решения различных задач. Очевидно, что применение программных исследовательских пакетов позволяет повысить не только точность выполняемых расчетов, но и заметно сократить время их проведения. Это, в свою очередь, дает возможность за время исследования проверить множество различных вариантов решения поставленной задачи и при проведении практической части исследований использовать наиболее качественные результаты теоретического анализа. Однако среди большого числа автоматизированных исследований в сфере электроплазменных технологий очень редко предметом рассмотрения являются металлорежущие плазмотроны, а сами решаемые задачи затрагивают узкие проблемы надежности и эффективности работы плазменного оборудования, не позволяя сформулировать системную методику проектного анализа. В результате имеющиеся на рынке предложения отечественных производителей в сфере плазморезательных технологий начинают уступать по многим показателям характеристикам импортной продукции.

Основным элементом любой электроплазменной технологии, как известно, является плазмотрон, работа которого определяет эффективность применения технологии в целом. Плазмотрон является сложным техническим устройством, при проектировании которого необходимо учитывать большое количество нюансов, так как в процессе его работы в плазменном потоке протекает огромное количество разнообразных процессов при температурах в несколько тысяч или десятков тысяч градусов. В связи с этим перед проектировщиками возникают задачи управления данной энергией, связанные с необходимостью не только подавать газ для формирования потока плазмы в сопловой узел плазмотрона, но и организовывать газоплазменный поток с целью создания условий для эффективной, качественной и безопасной работы плазмотрона. Физика и методы описания таких процессов в целом известны, однако специфика решаемых задач заставляет исследователей учитывать параметрические и геометрические особенности конкретных плазменных технологий.

Любая методика конструирования дуговых плазмотронов постоянного тока должна учитывать основные факторы работы электроплазменных технологий, обобщенные принципы и методы их проектирования [1]. При проектировании плазмотронов необходимо в первую очередь опираться на системный принцип и учитывать взаимодействие всех подсистем, обеспечивающих их работу. Однако среди подсистем плазмотрона главную функциональную роль играет, как известно, сопловой узел, при проектировании которого необходим учет газодинамических, электро- и теплофизических факторов дугообразования. Применение в этих целях известных методик, полученных в 70–80-е гг. [2, 3], в настоящее время требует внесения корректив, учитывающих опыт последних лет в сфере эксплуатации, исследования и проектирования плазмотронов.

Рассмотрим особенности известных методик газодинамического проектирования плазмотронов. Газодинамический фактор – один из основных аспектов, требующих внимания при анализе работы любого плазмотрона, поскольку именно организация прохождения потока

плазмообразующего газа (ПОГ) по газовоздушному тракту плазмотрона (ГВТ) определяет производительность, качество и безопасность всей технологии. Характерная конструкция ГВТ дугового металлорежущего плазмотрона (рис. 1) включает в себя участок подачи газа в плазмотрон, успокоительную (расширительную) камеру и систему газовихревой стабилизации, которая обеспечивается за счет тангенциальной подачи ПОГ из завихрителя (вихревой камеры) в сопловой узел.

Известные методики расчета отдельных элементов данной конструкции дают рекомендации по расчету геометрии завихрителя и соплового узла в привязке к основным характеристикам газового потока – давлению  $P$  и скорости  $V$  [4]. Однако подобный подход не учитывает неизбежные потери давления, возникающие на предшествующих сопловой камере участках ГВТ (в первую очередь в завихрителе). Кроме того, методика подразумевает условие равномерности распределения скоростей ПОГ по сечению ГВТ в электродуговой камере плазмотрона, которое, как показали исследования авторов, не выполняется из-за асимметричной и неравномерной подачи газа в расширительную камеру. Это, в свою очередь, влияет на качество и надежность работы плазмотрона. Следует также учесть особенности проектирования плазмотронов, работающих по технологии узкоструйной (точной или сжатой) плазмы с применением двухпоточной схемы подачи ПОГ и нескольких вихревых камер. Влияние газодинамического фактора необходимо также учитывать и с точки зрения акустической безопасности – важного аспекта, определяющего безопасность работы технологии плазменной резки.

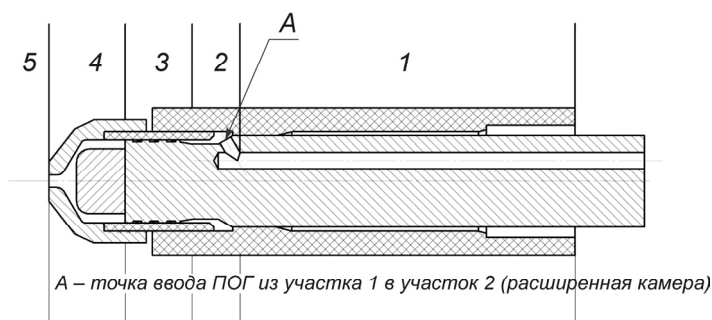


Рис. 1. Схема газовоздушного тракта металлорежущего плазмотрона ПМВР-М. Участки ГВТ: 1 – ввод ПОГ в плазмотрон; 2 – расширительная камера; 3 – завихритель; 4 – сопловой узел; 5 – выход плазмы

Алгоритм применения программных средств в процедурах проектирования электроплазменных технологий рассмотрен в работе [1]. Очевидно, что на начальном этапе проектирования необходимо средствами геометрического проектирования (CAD) сформировать 2D- или 3D-модель, которая затем путем неизбежной редукции малозначимых деталей и элементов будет трансформирована в аналитическую модель для параметрического и геометрического анализа. На первой стадии газодинамического анализа модели плазмотрона можно выполнить оценку потери давления в ГВТ с одно- и двухпоточными схемами газового распределения. С целью подобных расчетов не обязательно применять специализированные программные пакеты. Можно использовать известные газодинамические зависимости [5, 6] для оценки динамических и инерционных потерь, зависящих от сильно изменяющейся геометрии ГВТ на различных его участках, в различных программных средах типа MathCad или MatLab. К однотипным плазмотронам для воздушно-плазменной резки (ПВР-402, ПМВР, ПМВР-М, ВПР-410, ПЗ-400ВА и др.) можно с точностью ~5 % применять полученные авторами аппроксимационные формулы по расчету суммарного количества потерь  $\Delta P_{\Sigma}$  (атм) в зависимости от входного давления  $P_{вх}$  (атм), объемного  $Q$  (л/с) и массового  $G$  (г/с) расходов ПОГ [5]. Как показали исследования, конструкция ГВТ отдельных плазмотронов не обеспечивает эффективную подачу ПОГ в сопловой узел из-за больших потерь давления, вызванных в первую очередь конструкцией завихрителя (до 60 % инерционных потерь), а также большим перепадом значений площади поперечного

сечения на отдельных участках ГВТ. В связи с этим основной задачей проектирования становится снижение потерь давления по ГВТ конструктивными методами в целях повышения кинетических и энергетических параметров плазменной струи, снижения тепловых потерь в сопловом узле плазмотрона.

Существенно важным фактором газодинамического проектирования, как показали проведенные авторами исследования [7, 8], является равномерность распределения значений скорости газового потока по сечению ГВТ в области формирования плазменной дуги (сопловом узле). Ответственная за формирование газового потока система газвихревой стабилизации в большинстве однопоточных плазмотронов (ПВР-402, ПМВР-М и т.д.) не обеспечивает равенство значений скорости в проходном сечении сопловой камеры, вызывая тем самым эффекты шунтирования дуги, снижение параметров качества плазменного реза и т.д. Основная причина подобной неравномерности заключается в общепринятом асимметричном способе подачи ПОГ в расширительную камеру, которая в силу ограниченности своих размеров не успевает сформировать равномерный газовый поток перед его распределением по каналам завихрителя. Подобная асимметрия значений скорости сохраняется и при прохождении ПОГ через сопловый узел, вызывая названные выше негативные эффекты.

Для оценки неравномерности распределения газового потока необходимо использовать программные средства системы автоматизированного расчета и конструирования CAE (computer-aided engineering) типа ANSYS/Multyphysics, T-FLEX, AI\*NASTRAN и MSC.NASTRAN, позволяющие производить расчеты газодинамических параметров в заданных точках ГВТ. Можно использовать менее мощные средства анализа, которыми обладают системы, встроенные в САПР, например COSMOSFloWorks для SolidWorks. Как правило, эти программы используют метод конечных элементов FEM (finite-element method) с целью анализа характерных для электроплазменных технологий процессов тепло- и массообмена, расчета параметров потоков одно- и мультифазового состава и решения других задач механики сплошных сред.

В ходе анализа фактора неравномерности газового потока был использован специализированный пакет EFD.Lab (аналог COSMOSFloWorks), способный выполнять множество разнообразных расчетов, связанных с анализом течения жидкостей и газов, с возможностью получения результата высокой точности вне зависимости от сложности модели. EFD.Lab анализирует геометрию плазмотрона и создает *Расчетную область* в виде прямоугольного параллелепипеда с моделью внутри (рис. 2). Граничные плоскости расчетной области ортогональны осям *Глобальной системы координат модели*. В случае решения *Внешней задачи* граничные плоскости расчетной области автоматически располагаются на некотором расстоянии от модели. Если решается *Внутренняя задача*, то граничные плоскости расчетной области автоматически проводятся по габаритам модели или по габаритам только ГВТ.

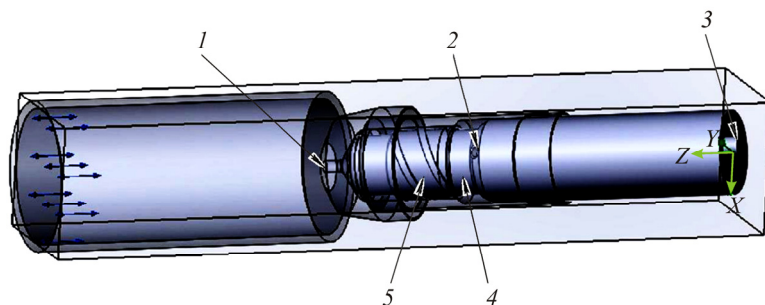


Рис. 2. Расчетная модель плазмотрона в EFD.Lab: 1 – выход из сопла; 2 – ввод газа на участок 2; 3 – точка ввода газа; 4 – расширительная камера; 5 – завихритель

Движение и теплообмен текучей среды моделируются в EFD.Lab с помощью уравнений Навье – Стокса, уравнений состояния компонентов текучей среды, а также эмпирических зависимостей плотности, вязкости и теплопроводности этих компонентов среды от температуры  $T$

и давления  $P$ . Этими уравнениями моделируются турбулентные, ламинарные и переходные течения (по критическим значениям числа Рейнольдса –  $Re$ ). Поскольку течение газа происходит внутри плазмотрона, граничные условия, определяющие связь физических процессов в расчетной области с физическими процессами вне ее, задаются параметрами текучей среды на входном (массовый расход ПОГ) и выходном (статическое давление) отверстиях модели. Для нахождения искомого численного решения задачи непрерывная нестационарная математическая модель физических процессов, используемая в EFD.Lab, дискретизируется как по пространству, так и по времени. При этом минимальный размер ячейки основной расчетной сетки был выбран по величине площади канала проточной части плазмотрона с наименьшим сечением, что обеспечивает получение достоверных результатов при выполнении расчета.

Моделирование течения потока газа позволяет получить характерную картину изменения газодинамических параметров, значений скорости газового потока на отдельных участках тракта плазмотрона, давления и плотности распределения газового потока по сечениям каналов плазмотрона (рис. 3) [4]. Выполненные расчеты дают возможность определить зоны возмущений потока газа, негативно влияющих на характер его течения, которые сопровождаются появлением вихревых зон, потерей скорости и давления, наличием неравномерности распределения потока по сечению каналов плазмотрона. По результатам такого анализа определяются участки-узлы плазмотрона, которые требуют конструктивных изменений для улучшения условий течения газа.

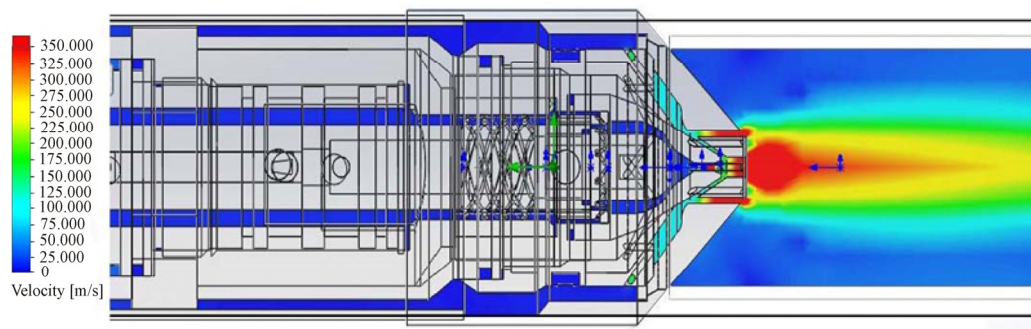


Рис. 3. 3D-Моделирование газодинамических процессов в плазмотроне ПМВР-5

Процесс определения равномерности распределения динамических характеристик газового потока зависит от аппаратных возможностей применения программного комплекса и требуемой точности вычислений. При ограниченных ресурсах (в том числе временных) можно ограничиться расчетом значений скорости потока ПОГ в четырех симметричных точках в выбранном сечении плазмотрона (рис. 4), причем одна из точек выбирается напротив точки ввода газа в расширительную камеру.

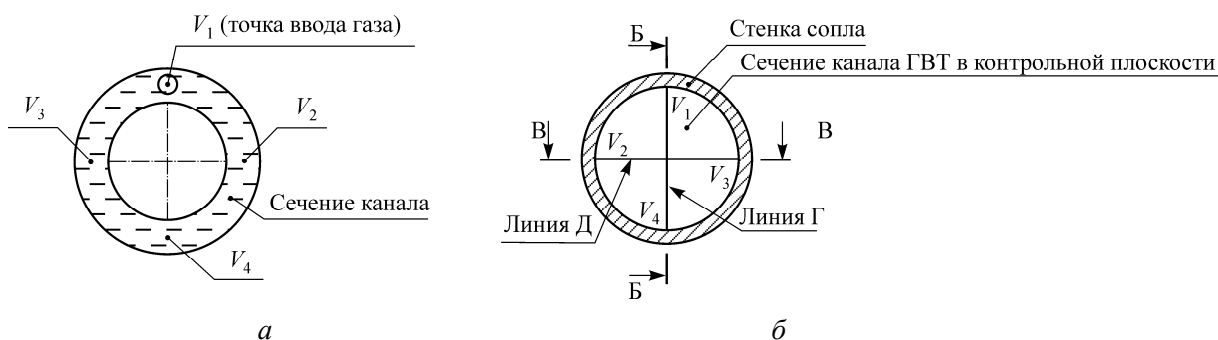


Рис. 4. Схема определения равномерности распределения скорости потока ПОГ в ГВТ плазмотрона:  $a$  – в расширительной камере;  $b$  – в сопловом узле

Очевидно, что абсолютно равномерный поток должен характеризоваться равенством скоростей во всех расчетных точках. Степень неравномерности распределения скорости потока по сечению ГВТ плазматрона в этом случае можно оценить путем нахождения отношений значений скорости  $X_i = V_1/V_2 = V_1/V_3 = V_1/V_4$  (см. рис. 4). Анализ неравномерности желательнее провести по всему ГВТ (начиная с расширительной камеры), так как это позволит выявить участки, требующие конструктивных изменений. Расчет значений скорости можно выполнять по двум контрольным линиям Г и Д диаметра сечения канала ГВТ, при этом линия Г будет характеризовать изменения скорости потока ПОГ между точками  $V_1$  и  $V_4$ , а линия Д – изменения скорости между точками  $V_2$  и  $V_3$ . Для упрощения расчета можно его выполнять на холодной струе газа, так как нагрев ПОГ происходит в сопловом канале ГВТ, а равномерность распределения ПОГ должна быть обеспечена уже на входе в сопловую камеру.

Примером подобного расчета является анализ неравномерности распределения газового потока в плазматроне ПМВР-М (рис. 5). Анализ показал, что данная неравномерность появляется в расширительной камере плазматрона и сохраняется в сопловом узле, где было взято контрольное сечение. Результаты анализа были использованы для оптимизации конструкции зоны выравнивания потока газа (участок 2 ГВТ – см. рис. 1) и создания модернизированного плазматрона ПМВР-2М, в котором была предложена система газодинамических фильтров, включающая в себя оптимизированную по размерам расширительную камеру с дополнительной стенкой и сеткой на входе в завихритель. Кроме того, была предложена и оптимизирована конструкция завихрителя с шестизаходной резьбой. Полученные расчеты подтвердили, что предложенный завихритель обеспечивает необходимую, согласно работе [2], скорость газа на выходе из кольца закрутки в пределах 150–200 м/с, создавая в вихревом и сопловом каналах соплового узла необходимый для стабилизации дуги и охлаждения стенок значительный радиальный градиент давления (до 2 атм/мм). В результате выполненных расчетов различных вариантов конструктивного оформления ГВТ была получена модель плазматрона ПМВР-2М, у которой эффективность организации течения потока плазмообразующего газа по внутренним каналам плазматрона повысилась более чем на 30 % по сравнению с базовой моделью, при разработке которой предлагаемая методика автоматизированного анализа не использовалась (рис. 6).

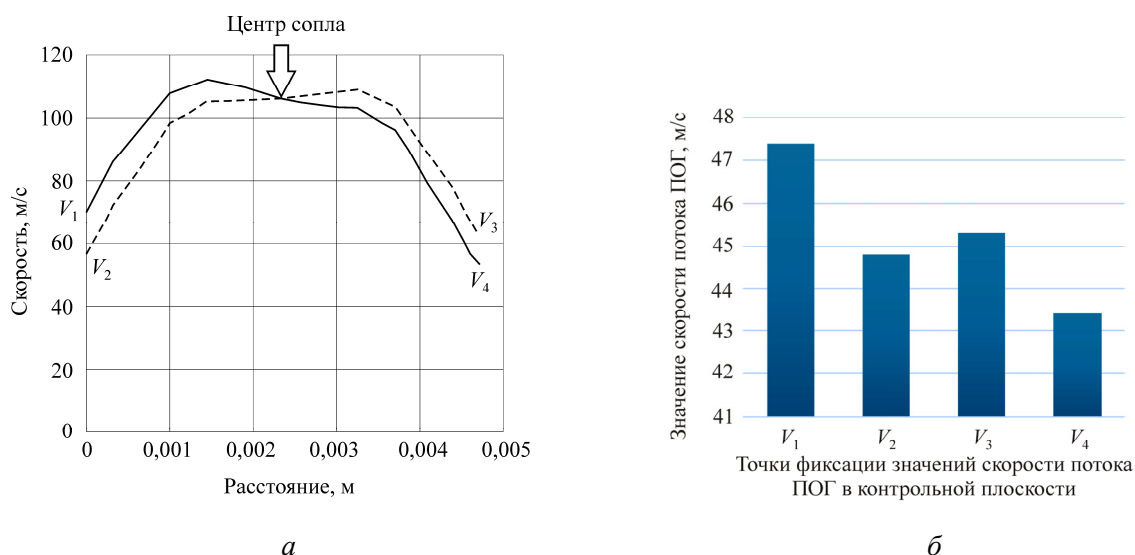


Рис. 5. Неравномерность распределения потока в контрольной плоскости плазматрона ПМВР-М: — — изменение скорости между точками  $V_2$  и  $V_3$ ; — — изменение скорости между точками  $V_1$  и  $V_4$ ; а – значения скорости по контрольным линиям; б –  $X_i$  в фиксированных точках,  $X_i = V_1/V_i$

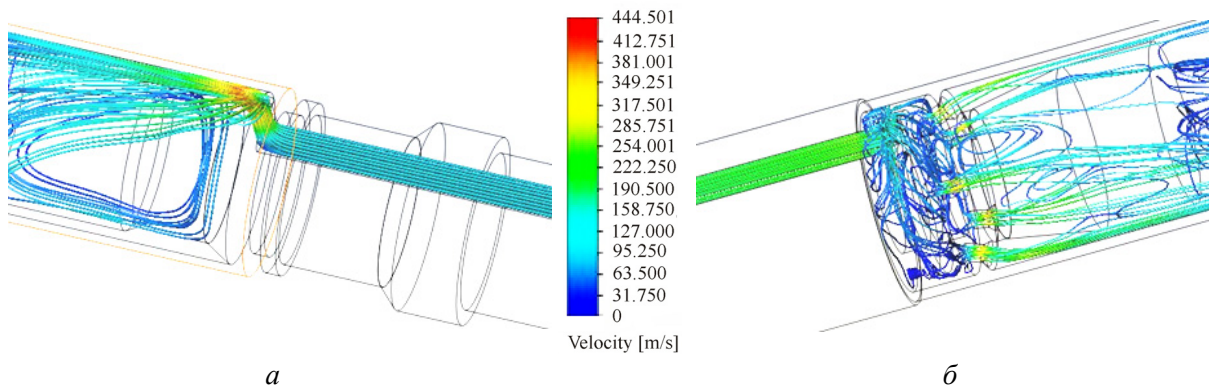


Рис. 6. Моделирование течения скорости потока ПОГ в системе газовихревой стабилизации плазмотрона (SolidWorks/Flow Simulation): *а* – в плазмотроне ПМВР-М (без газодинамических фильтров); *б* – в плазмотроне ПМВР-2М (с фильтрами)

Более точный, но и более трудоемкий расчет связан с определением значений скорости не в заданных четырех точках, а по всему сечению ГВТ. Очевидно, что в этом случае для корректности сравнения необходимо производить расчет значений скорости по кольцевой траектории на равноудаленном от оси плазмотрона расстоянии (по средней линии проходного сечения). На рис. 7 представлена схема, а на рис. 8 – результаты подобного расчета, проведенного при анализе конструкции ГВТ с симметричной подачей ПОГ в расширительную камеру, двумя завихрителями и двумя расширительными камерами, которая обеспечивает существенное увеличение равномерности распределения ПОГ. Расчеты позволяют определить необходимый для полного выравнивания потока размер расширительной камеры или оценить степень неравномерности, сохраняющуюся при входе газа на последующий участок ГВТ, при использовании камеры меньшей длины.

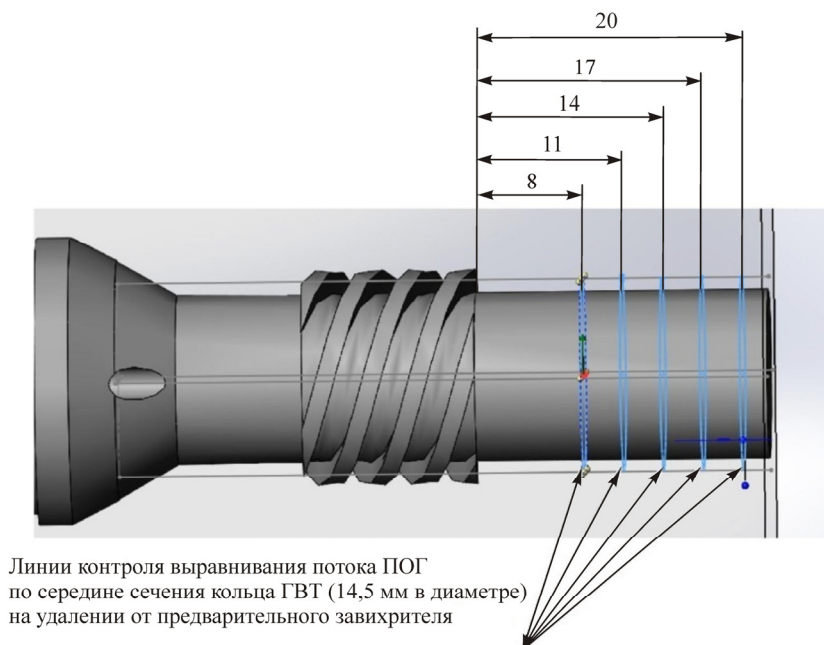


Рис. 7. Расчет значений скорости в контрольных сечениях второй расширительной камеры

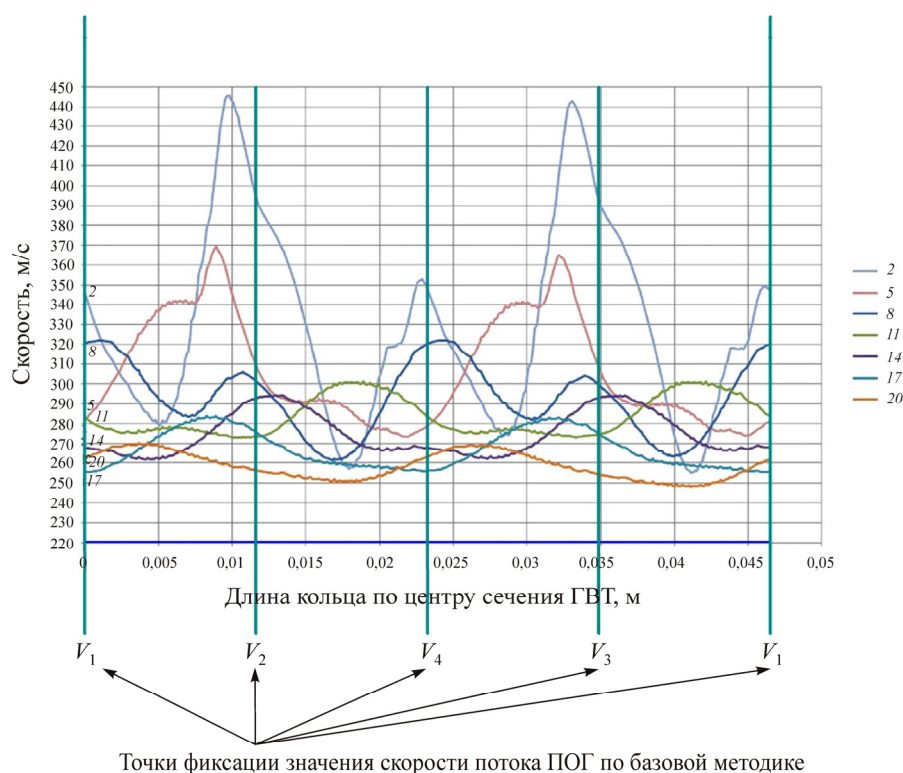


Рис. 8. Анализ распределения скорости по сечению ГВТ плазмотрона после завихрителя: 2–20 – расстояния от завихрителя до сечения (см. рис. 6)

Определение с помощью представленной методики расчета газодинамических параметров ПОГ характера течения газа на отдельных участках ГВТ плазмотрона, формы и размеров плазменной струи на выходе из соплового узла плазмотрона необходимо также при проектировании плазмотронов с учетом фактора безопасности. Как показали исследования [10], процессы акустической и оптической генерации существенным образом зависят от организации газодинамического потока в плазмотроне и результаты их негативного воздействия на рабочий персонал могут быть снижены до более безопасного уровня путем профилирования ГВТ и внедрения новых конструктивных решений, таких как узкоструйная плазменная резка, которая опирается на двухпоточный принцип организации газоплазменного потока.

### Список литературы

1. Анахов С.В. Принципы и методы проектирования в электроплазменных и сварочных технологиях: учеб. пособие. – Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2014. – 144 с.
2. Жуков М.Ф., Аньшаков А.С. Основы расчета плазмотронов линейной схемы / Ин-т теплофизики Сибир. отд-ния Акад. наук СССР. – Новосибирск, 1979. – 146 с.
3. Электродуговые генераторы термической плазмы. Т. 17. Низкотемпературная плазма / М.Ф. Жуков, И.М. Засыпкин, А.Н. Тимошевский [и др.]. – Новосибирск: Наука, 1999. – 712 с.
4. Чередниченко В.С., Аньшаков А.С., Кузьмин М.Г. Плазменные электротехнологические установки. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – 602 с.
5. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. – М.: Наука, 1991. – Ч. 1. – 597 с.
6. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.
7. Анахов С.В., Пыкин Ю.А., Матушкин А.В. Исследование систем газовихревой стабилизации плазмотронов // Сварочное производство. – 2015. – № 4. – С. 20–24.
8. Анахов С.В., Пыкин Ю.А., Матушкин А.В. Газовихревая стабилизация в плазмотронах: новые решения // Сварочное производство. – 2015. – № 5. – С. 49–53.
9. Anakhov S.V., Pykin Yu.A., Matushkin A.V. Narrow jet plasma as the energy efficient and safe technology for metal cutting // Solid State Phenomena (Material Science Forum). – 2016. – Vol. 870. – P. 523–527.



10. Анахов С.В., Пыкин Ю.А. Плазмотроны: проблема акустической безопасности. Теплофизические и газодинамические принципы проектирования малощумных плазмотронов / Урал. отд-ние Рос. акад. наук. – Екатеринбург, 2012. – 224 с.

#### References

1. Anakhov S.V. Printsipy i metody proektirovaniia v elektroplazmennyykh i svarochnykh tekhnologiiakh [The principles and design methods in electroplasma and welding technologies]. Ekaterinburg: Izdatel'stvo Rossiiskogo gosudarstvennogo professional'no-pedagogicheskogo universiteta, 2014, 144 p.
2. Zhukov M.F., An'shakov A.S. Osnovy rascheta plazmotronov lineinoi skhemy [Bases of calculation of plasmotrons of the linear scheme]. Institut teplofiziki Sibirskogo otdeleniia Akademii nauk Soiuza Sovetskikh Sotsialisticheskikh Respublik. Novosibirsk, 1979, 146 p.
3. Zhukov M.F., Zasyupkin I.M., Timoshevskii A.N. et al. Elektrodugovye generatory termicheskoi plazmy [Arc generators of thermal plasma]. Vol. 17. Nizkotemperaturnaia plazma. Novosibirsk: Nauka, 1999, 712 p.
4. Cherednichenko V.S., An'shakov A.S., Kuz'min M.G. Plazmennyye elektrotekhnologicheskie ustanovki [Plasma electrotechnological installations]. Novosibirsk: Izdatel'stvo Novosibirskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta, 2011, 602 p.
5. Abramovich G.N. Prikladnaia gazovaia dinamika [Applied gas dynamics]. Moscow: Nauka, 1991, Chast'. 1, 597 p.
6. Idel'chik I.E. Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniiam [Reference book on hydraulic resistance]. Moscow: Mashinostroenie, 1992, 672 p.
7. Anakhov S.V., Pykin Iu.A., Matushkin A.V. Issledovanie sistem gazovikhrevoi stabilizatsii plazmotronov [Research of systems of gas-vortex stabilization of plasmotrons]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2015, no. 4, pp. 20–24.
8. Anakhov S.V., Pykin Iu.A., Matushkin A.V. Gazovikhrevaia stabilizatsiia v plazmotronakh: novye resheniia [Gas-vortex stabilization in plasmotrons: new decisions]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2015, no. 5, pp. 49–53.
9. Anakhov S.V., Pykin Yu.A., Matushkin A.V. Narrow jet plasma as the energy efficient and safe technology for metal cutting. *Solid State Phenomena (Material Science Forum)*, 2016, vol. 870, pp. 523–527.
10. Anakhov S.V., Pykin Iu.A. Plazmotrony: problema akusticheskoi bezopasnosti. Teplofizicheskie i gazodinamicheskie printsipy proektirovaniia maloshumnykh plazmotronov [Plasmotrons: problem of acoustic safety. Heatphysical and gasdynamic principles of design of quiet plasmotrons]. Ural'skoe otdelenie Rossiiskoi akademii nauk. Ekaterinburg, 2012, 224 p.

Получено 15.02.2018

#### Об авторах

**Анахов Сергей Вадимович** (Екатеринбург, Россия) – кандидат физико-математических наук, заведующий кафедрой математических и естественно-научных дисциплин Российского государственного профессионально-педагогического университета, директор ООО «ТЕРУС»; e-mail: sergej.anahov@rsvpu.ru.

**Пыкин Юрий Анатольевич** (Екатеринбург, Россия) – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры физико-химических технологий защиты биосферы Уральского государственного лесотехнического университета, ген. директор ООО НПО «Полигон»; e-mail: yapoligon@mail.ru.

**Матушкин Анатолий Владимирович** (Екатеринбург, Россия) – старший преподаватель кафедры технологии сварочного производства Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина.

#### About the authors

**Sergey V. Anakhov** (Ekaterinburg, Russian Federation) – Ph. D. in Physical and Mathematical Sciences, Head of Department Mathematics and Natural Sciences, Russian State Vocational-Professional University, Director of CJSC “TERUS”; e-mail: sergej.anahov@rsvpu.ru.

**Yuriy A. Pykin** (Ekaterinburg, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor of Department of Physico-Chemical Technologies of Biosphere Protection, Ural State Forest Engineering University, General Director of CJSC NPO “Polygon”; e-mail: yapoligon@mail.ru.

**Anatoliy V. Matushkin** (Ekaterinburg, Russian Federation) – Senior Lecturer, Department of Welding Production, Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin; e-mail: 227433@rambler.ru.