

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.7

doi: 10.26907/2541-7746.2024.1.58-73

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ВНУТРЕННЕГО КАНАЛА АНОДНОГО УЗЛА НА СКОРОСТЬ ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА

Р.А. Окулов^{1,2}, В.А. Крашанинин¹, Б.Р. Гельчинский¹,
А.А. Ремпель¹

¹Институт металлургии Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург, 620016, Россия

²Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, 620002, Россия

Аннотация

Охарактеризовано влияние формы внутреннего канала анодного узла плазмотрона на скорость плазменного потока. Рассмотрены три варианта формы анодного узла с конфузорной частью в виде конической поверхности длиной 50 мм: первый – с переходом диаметров с 12 до 6 мм; второй – с переходом диаметров с 12 до 8 мм; третий – с переходом диаметров с 12 до 10 мм. Выполнен компьютерный эксперимент с последующей верификацией путем проведения натурного эксперимента на лабораторной плазменной установке. Верификация показала удовлетворительную сходимость и согласуется с данными, представленными в литературе. Компьютерный эксперимент проведен с помощью метода конечных элементов. Выполнен литературный обзор конструкций плазменных установок, применяемых для получения порошков, нанесения функциональных покрытий и модификации поверхностей, а также программных пакетов, используемых для реализации метода конечных элементов при решении подобных задач. Разработаны рекомендации, имеющие практическое значение для потребителей и разработчиков плазмотронного оборудования. Определены формы анодного узла, позволяющие достигать сверхзвукового и дозвукового режимов течения плазменного потока.

Ключевые слова: порошок, функциональное покрытие, модификация поверхности, пламенный метод, скорость потока, дозвуковая плазма, сверхзвуковая плазма, анодный узел, сопло

Введение

В настоящее время растет интерес к применению в производственной практике аддитивных технологий в качестве способа создания деталей сложной конфигурации [1]. Качество изделий, полученных этим способом, зависит от свойств порошков, применяемых в качестве сырья для 3D-принтеров. Плазменное распыление является одной из эффективных технологий получения порошков с требуемыми свойствами [2]. Порошки для печати требуют высокой степени сферичности, соответствующего гранулометрического состава для обеспечения необходимой сыпучести [3]. Кроме того, плазменный метод получения порошков является привлекательным с точки зрения его экологичности [4]. Плазменным методом получают

и функциональные покрытия [5]. Использование различных способов напыления оказывает существенное влияние на микроструктуру и свойства покрытий [6]. Благодаря особенностям процесса плазменного напыления можно создавать покрытия на основе меди, алюминия, титана и т. д. [7]. Полученные таким способом покрытия позволяют повысить эксплуатационные свойства изделий [8]. Нанесенные плазменным методом покрытия нашли широкое применение для создания антикоррозионных покрытий [9]. Плазменным методом производят модификацию поверхности в нефтегазовой сфере [10]. Плазменная модификация улучшает трибологические свойства изделий, благотворно влияя на износостойкость и продлевая срок их эксплуатации [11]. Благодаря плазменной модификации можно достигать упрочнения поверхности обрабатываемых изделий [12]. Широкое применение в производственной практике нашло азотирование поверхности плазменным методом для придания изделиям стойкости к окислению [13].

От параметров плазменного потока зависят свойства получаемых порошков, функциональных покрытий и модифицируемых поверхностей. Среди параметров плазменного потока особую роль играет скорость. Известны конструкции плазменных головок, позволяющих реализовать режим с дозвуковым [14, 15] и сверхзвуковым [16–18] плазменными течениями. Скорость плазменного потока зависит от формы внутреннего канала плазменной головки, которая описана формой составных частей [19].

В научной литературе представлены конструкции плазмотронов, которые для достижения сверхзвукового режима течения плазменного потока применяют сопло [20], например, параболическое сопло Лаваля [21].

Применение сопла имеет ряд недостатков, например, возникают сложности с эффективностью охлаждения подобных конструкций плазмотронов. Известны конструкции плазменных установок, в которых сопло не используется в качестве отдельного элемента плазмотрона. Вместо него применяют плазменную головку, в анодном узле которой канал выполнен в виде конического конфузора [22] или диффузора [23].

В литературе широко представлен также тезис о том, что прогнозирование воздействия формы составных частей, описывающих внутренний канал плазменной головки, на скорость плазменного потока позволяет достигать требуемых свойств получаемых порошков, наносимых покрытий и модифицируемых поверхностей. Таким образом, изучение влияния формы внутреннего канала плазменной головки на скорость плазменного потока является актуальной задачей научного исследования и имеет практическую ценность для производителей и потребителей плазмотронного оборудования.

В настоящей работе поставлена задача определить, как влияет форма внутреннего канала анодного узла на скорость плазменного потока. Для этого выбрана конструкция плазмотрона, в анодном узле которого внутренний канал выполнен в виде конфузорного конического участка. Данная конструкция выбрана исходя из простоты изготовления, например по сравнению с применением сопла Лаваля, и обслуживания, например по сравнению с конструкциями плазмотронов, в которых предусмотрено сопло-насадок, выполненное в виде отдельного узла, что предполагает наличие дополнительных коммуникаций для охлаждения. Рассмотрены три варианта форм анодного узла с конфузорной частью в виде конической поверхности длиной 50 мм и входным диаметром 12 мм: первый – с выходным диаметром 6 мм, второй – с выходным диаметром 8 мм и третий – с выходным диаметром 10 мм.

Поставленная цель достигалась путем проведения компьютерного эксперимента с последующей верификацией при проведении натурных экспериментов. Компьютерный эксперимент выполнен при помощи метода конечных элементов, зарекомендовавшего себя в производственной практике при решении подобных задач.

В литературе описаны работы, в которых метод конечных элементов применен для моделирования нанопорошков заданных размеров с учетом связи между физическими условиями в промышленной установке и геометрическими свойствами получаемых частиц [24]. Для исследования свойств получаемых порошков плазменным методом используются пакеты COMSOL [25], ANSYS [26] и FLOW-3D [27]. Применение численного метода для изучения свойств функциональных покрытий из высокотропных сплавов, например GdTbDyHoSc и GdTbDyHoY, описано в обзорной статье [28].

Для высокотропных сплавов на основе редкоземельных элементов исключительно важны антикоррозионные покрытия, которые наносятся плазменным методом. Среди пакетов прикладных программ, применяемых для проведения расчетов по определению характеристик функциональных покрытий плазменным методом, используются ANSYS [29], JmarPro [30] и SolidWorks [31]. Численный метод для исследования модификации поверхности плазменным методом применен нами в [32–34].

1. Описание компьютерного эксперимента

Применен пакет Flow Simulation SolidWorks, версия 2016 г. (ссылка на источник программного пакета: www.solidworks.com), позволяющий реализовать метод конечных элементов. Создана компьютерная модель лабораторной плазменной установки МАК-10, собранной на базе Института металлургии Уральского отделения Российской академии наук. Эта установка применяется для получения порошков, нанесения функциональных покрытий и модификации поверхностей. Принципиальная схема МАК-10 представлена на рис. 1 и более подробно описана в [35].

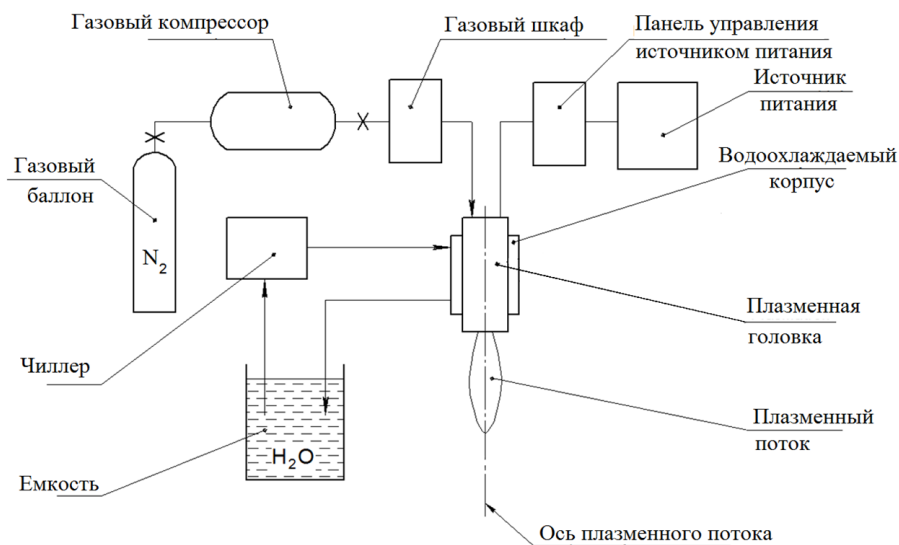


Рис. 1. Принципиальная схема МАК-10

МАК-10 – это плазменная установка косвенного действия, в состав которой входит источник питания мощностью 10 кВт (напряжение 40 В, ток 250 А). Поперечное сечение плазменной головки МАК-10 представлено на рис. 2 и более подробно описано в [36].

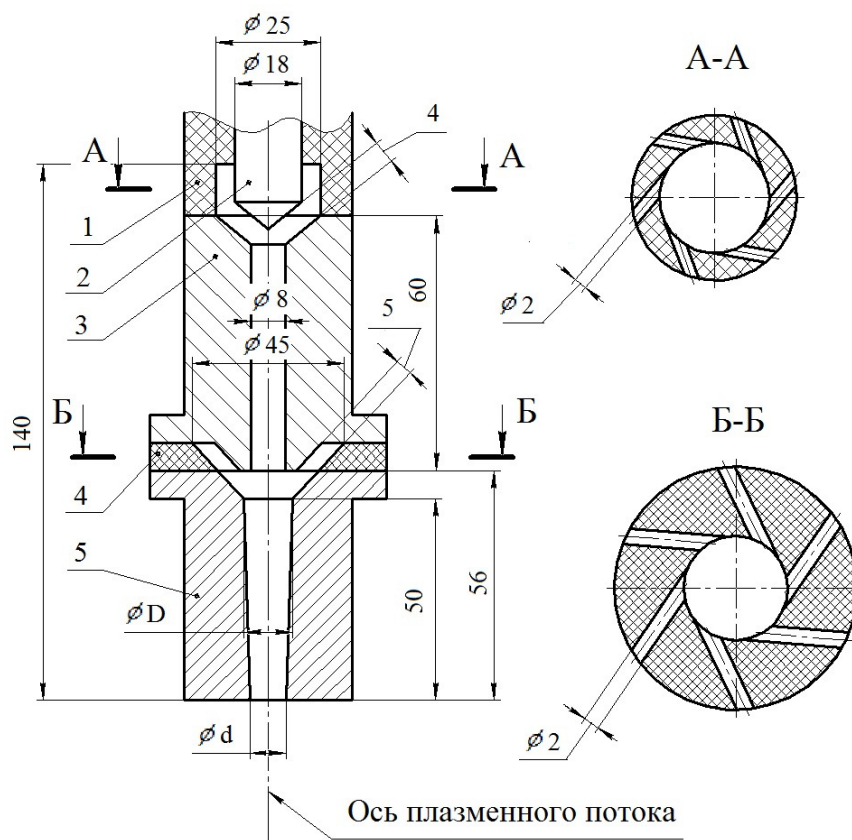


Рис. 2. Схема поперечного сечения плазменной головки: 1 – верхний завихритель, 2 – катодный узел, 3 – межэлектродная вставка, 4 – нижний завихритель, 5 – анодный узел, D – диаметр входного участка в конфузурную часть анода, d – диаметр выходного участка из конфузурной части анода

Программный пакет Flow Simulation зарекомендовал себя как удобный инструмент для вычислительной гидродинамики (computational fluid dynamics). При решении численным методом применили уравнения Эйлера и Навье–Стокса. В основе сходимости численного метода был метод спектральных элементов. Размер конечных элементов сетки разбиения выбран таким образом, чтобы в наиболее узком месте трехмерной компьютерной модели плазмотрона (канал ввода плазмообразующего газа завихрителя диаметром 2 мм) размещались как минимум 8 элементов. Сделано это для учета поверхностных, подповерхностных и срединных процессов, происходящих в потоке. Размер конечных элементов сетки разбиения составлял 0.236 мм.

В качестве плазмообразующего газа был применен технический азот первого сорта чистоты 99.6% по ГОСТу 9293. Массовый расход плазмообразующего газа составлял 50 л/мин.

Граничные условия, использованные в расчетах, следующие: на входном участке в газопроводы закрутки (верхний и нижний) давление составляло 0.3 МПа; радиальная составляющая скорости газового потока подаваемого в газопроводы закрутки принята равной нулю, температура подаваемого в закрутки газа 300 К; на внешних поверхностях анода, межэлектродной вставки и катода локальный тепловой поток определяется тепловым излучением с учетом водного охлаждения при помощи чиллера холодопроизводительностью 6.3 кВт; для вольфрамового сердечника катода используется коэффициент излучения 0.3; материал элементов конструкции плазменной головки (анод, межэлектродная вставка) – медь М1 по ГОСТу 859; на всех границах, кроме катода и анода, предполагается нулевая плотность тока. Плазменный поток направлен в воздушное пространство.

При проведении компьютерного эксперимента были использованы следующие допущения:

1. Процесс течения газа является изоэнтальпийным и адиабатическим.
2. Массовый расход газа одинаков во всех поперечных сечениях потока.
3. Газовое течение является установившимся, в любой фиксированной точке анодного узла все параметры потока постоянны во времени и изменяются вдоль его оси. Во всех точках поперечного сечения параметры потока одинаковы, и вектор скорости газа параллелен оси симметрии.

4. Влияние внешних сил, в том числе гравитационной, пренебрежимо мало.

Фактор изоэнтальпийного расширения (показатель адиабаты) азота зависит от температуры и определяется по формуле [37]: $\gamma = 1.472 - 2 \cdot 10^{-4} T$, где T – абсолютная температура газа на выходе из конфузора анодного узла (определяется исходя из мощности плазмотрона), К.

Согласно уравнению Сен-Венана – Ванцеля [38] скорость газа на выходе из конфузора анодного узла определяется в виде

$$V_e = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma - 1} \frac{TR}{M} \left(1 - (P_e/P)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right)},$$

где R – универсальная газовая постоянная, равная 8.31446261815324 Дж/(моль · К); M – молярная масса газа (для азота принята равной 0.028 кг/моль); P_e – абсолютное давление газа на выходе из конфузора анодного узла, принята равной 98100 Па; P – абсолютное давление газа на входе из конфузора анодного узла (соответствует значению из пересчета массового расхода плазмообразующего газа), Па.

Скорость звука в газовой среде зависит от ее температуры [39]: $C = \sqrt{\gamma RT/M}$.

2. Итоги проведенного компьютерного эксперимента

Данные по определению скорости на оси плазменного потока для трех рассмотренных вариантов форм каналов анодного узла, полученные в результате компьютерного эксперимента, представлены на рис. 3, где начало отсчета расположено на выходе из анодного узла. На рис. 4б представлена картина распределения скорости плазменного потока в поперечном сечении для анодного узла с переходом конфузорного конического участка с диаметра 12 мм до диаметра 6 мм.

Как видно из представленных данных, скорость плазменного потока зависит от формы конфузорной части анодного узла. Наибольшее значение скорости достигается при использовании формы анодного узла с переходом диаметров входного участка к выходному с 12 до 6 мм. При использовании такого анодного узла возможно достижение сверхзвукового течения плазменного потока с образованием «бочек уплотнения», представленных на рисунке 4б. Сверхзвуковое течение

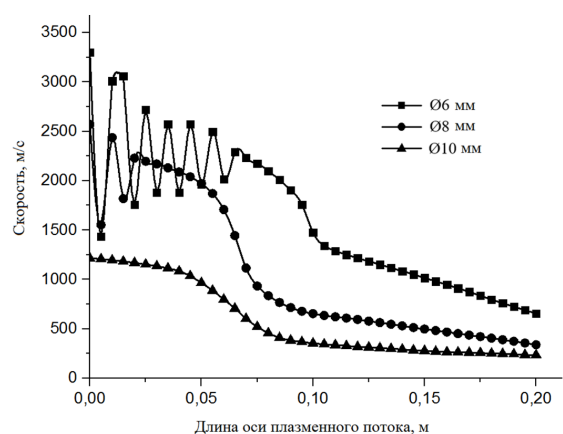


Рис. 3. Распределение скорости в центре плазменного потока вдоль его оси в зависимости от формы анодного узла

плазменного потока наблюдается при использовании анодного узла с переходом диаметров входного участка к выходному с 12 до 8 мм. Длина участка плазменного потока со значением скорости, превышающей сверхзвуковую, у конструкции анодного узла с переходом диаметров входного участка к выходному с 12 до 8 мм примерно в два раза короче по сравнению с анодным узлом с переходом диаметров входного участка к выходному с 12 до 6 мм. При использовании анодного узла с переходом диаметров входного участка к выходному с 12 до 10 мм значение скорости снижается приблизительно в три раза по сравнению с первым вариантом, и реализуется режим дозвукового течения плазменного потока. Все три варианта используемых конфигураций рассмотренных анодных узлов имеют общую зависимость и условно могут быть разделены на три области: первая, расположенная у выхода из анодного узла; вторая, которая расположена за первой и характеризуется резким снижением скорости плазменного потока; третья расположена на конце плазменного потока и может быть аппроксимирована линейной функцией. По мере удаления от плазменной головки скорость плазменного потока для трех рассмотренных случаев снижается.

С учетом вышеизложенного пришли к выводу о том, что дозвуковой и сверхзвуковой режимы течения плазменного потока можно достигать с использованием анода, внутренняя поверхность которого имеет вид конического конфузорного участка. Данное заключение имеет практическую пользу для производителей и потребителей технологического оборудования, потому что сверхзвуковой режим течения плазмы достигнут без использования дополнительного узла в виде сопла-насадка сложной формы наподобие сопла Лавалья. Использование представленной в рамках данной работы формы анода значительно облегчает эксплуатацию и обслуживание технологического оборудования, а также положительно влияет на сокращение габаритных размеров, снижает себестоимость производства оборудования за счет сокращения количества элементов конструкции (в том числе путем сокращения дополнительных коммуникаций) и простоты их изготовления.

Рекомендуется применять набор анодных узлов с разной конфигурацией формы внутреннего канала, при смене которых можно достичь требуемые параметры скорости плазменного потока в зависимости от поставленных задач. Для процессов получения порошков требуется плазменный поток более низкой скорости, который

возможен при использовании анода с конфузорной частью с переходом диаметров с 12 до 10 мм. Это обусловлено применением приемной камеры (реактора), так как использование сверхзвукового плазменного потока приводит к увеличению ее габаритных размеров вследствие необходимости предотвращения налипания расплавленных частиц производимого порошка на стенки, а также к росту расхода инертных газов для заполнения. В случае применения плазмотронного оборудования для задач нанесения функциональных покрытий требуется применять плазменный поток более высокой скорости, то есть использовать анод с конфузорной частью с переходом диаметров с 12 до 6 мм. Представленную компьютерную модель можно использовать для определения рационального положения подложки, на которую наносится функциональное покрытие. То же справедливо по отношению к процессам модификации поверхности, поскольку результат термообработки зависит от удаленности обрабатываемой поверхности от плазмотрона, угла между ней и осью плазменного потока, ширины потока. Представленная компьютерная модель может быть использована для прогнозирования результата в зависимости от формы внутреннего канала анода на этапе проектирования процессов.

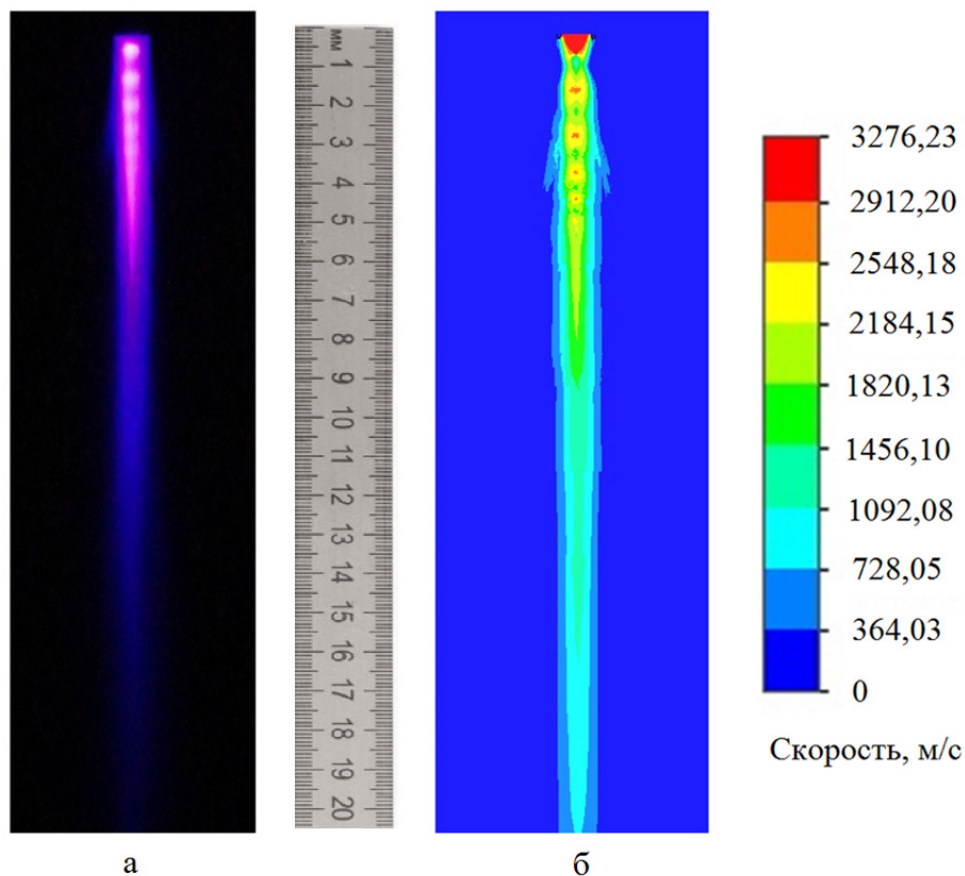


Рис. 4. Результаты исследования скорости плазменного потока по результатам натурального (а) и компьютерного (б) экспериментов для случая применения анодного узла с переходом диаметров входного участка к выходному с 12 до 6 мм

3. Проведение натурного эксперимента и верификация

С целью верификации результатов компьютерного эксперимента был проведен натурный. Для этого был выполнен сравнительный анализ картины распределения скорости в поперечном сечении вдоль оси плазменной головки, полученный в результате компьютерного эксперимента с фотографией плазменного потока, выполненной при функционировании МАК-10. Данные, полученные при проведении натурного эксперимента, представлены на рис. 4а. Был использован анодный узел с переходом конфузорного конического участка с диаметра 12 мм до диаметра 6 мм.

Очертания плазменного потока имеют схожую картину. Сравнительный анализ результатов вычисления скоростей аналитическим способом с данными, полученными в результате проведения компьютерного эксперимента, показал, что относительное отклонение не превышает 8,4%. Итоги проведенного исследования согласуются в допустимых пределах и соответствуют описанным в литературе (см., например, [40]). Более подробное описание верификации компьютерного эксперимента представлено в работе [41]. На рис. 4 можно видеть образование «бочек» Маха. Такое явление можно наблюдать в сверхзвуковом потоке, когда скорость центральной части на участках при переходе через скачки уплотнения в результате перепада давления становится дозвуковой.

Заключение

Создана компьютерная модель формы каналов анодного узла плазменной головки, позволяющей формировать дозвуковой и сверхзвуковой режимы течения плазменного потока. Установлены размеры анодного канала, при которых дозвуковой режим течения плазменного потока переходит в сверхзвуковой. Представленную компьютерную модель можно использовать для прогнозирования распределения скоростей плазменной струи с целью определения рациональной формы анодного узла плазменной головки в зависимости от поставленных задач. Для получения порошков рекомендуется применять конфигурацию анодного узла с формой конфузорной части, обеспечивающей наименьшее значение скорости плазменного потока, поскольку такое снижение скорости позволяет сократить габариты приемной камеры. В процессе нанесения функциональных покрытий, напротив, рекомендуется применять конфигурацию анодного узла, обеспечивающего наибольшую скорость, поскольку такая конструкция благотворно влияет на свойства наносимых покрытий.

При помощи представленных данных рекомендуется определять рациональное положение подложки, на которую наносится покрытие, за счет выбора следующих параметров: удаленность от плазмотрона, угол наклона плазменного потока относительно подложки, ширина потока. Рациональное положение подложки можно определить с помощью построенной компьютерной модели для модификации поверхности плазмотрона.

Проведена верификация результатов компьютерного эксперимента, сравнительный анализ полученных результатов показал удовлетворительную сходимость и согласование с результатами проведенных исследований, описанных в литературе. Представленные данные имеют практическую ценность для потребителей и разработчиков плазмотронного оборудования.

Благодарности. Работа выполнена в рамках госзадания Института металлургии Уральского отделения РАН (тема № 122020100287-1 ЕГИСУ НИОКТР).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература

1. *Fu P., Wang N., Liao H., Xu W., Peng L., Chen J., Hu G., Ding W.* Microstructure and mechanical properties of high strength Mg-15Gd-1Zn-0.4Zr alloy additive-manufactured by selective laser melting process // *Trans. Nonferrous Met. Soc. China.* 2021. V. 31, No 7. P. 1969–1978. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(21\)65630-3](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(21)65630-3).
2. *Yurtkuran E., Ünal R.* Theoretical and experimental investigation of Tialloy powder production using low-power plasma torches // *Trans. Nonferrous Met. Soc. China.* 2022. V. 32, No 1. P. 175–191. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(21\)65786-2](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(21)65786-2).
3. *Bao Q., Yang Y., Wen X., Guo L., Guo Z.* The preparation of spherical metal powders using the high-temperature remelting spheroidization technology // *Mater. Des.* 2021. V. 199. Art. 109283. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109382>.
4. *Amarnath P., Nandy N., Indumathy B., Yugeswaran S.* Study on CO₂ based thermal plasma torch and its effective utilization for material processing in atmospheric pressure // *J. CO₂ Util.* 2022. V. 66. Art. 102290. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2022.102290>.
5. *Kornienko E., Gulyaev I., Smirnov A., Nikulina A., Ruktuev A., Kuzmin V., Tuezov A.* Microstructure and properties of Ni-Al coatings obtained by conventional and high-velocity atmospheric plasma spraying // *Results Surf. Interfaces.* 2022. V. 6. Art. 100038. <https://doi.org/10.1016/j.rsufi.2022.100038>.
6. *Tang L., Kang J., He P., Ding S., Chen S., Liu M., Xiong Y., Ma G., Wang H.* Effects of spraying conditions on the microstructure and properties of NiCrBSi coatings prepared by internal rotating plasma spraying // *Surf. Coat. Technol.* 2019. V. 374. P. 625–633. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.06.056>.
7. *Li W., Cao C., Yin S.* Solid-state cold spraying of Ti and its alloys: A literature review // *Prog. Mater. Sci.* 2020. V. 110. Art. 100633. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2019.100633>.
8. *Miao Y., Zhu H., Gao P., Li L.* The effects of spraying power on microstructure, magnetic and dielectric properties of plasma sprayed cobalt ferrite coatings // *J. Mater. Res. Technol.* 2020. V. 9, No 6. P. 14237–14243. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.10.006>.
9. *Morończyk B., Ura-Bińczyk E., Kuroda S., Jaroszewicz J., Molak R.M.* Microstructure and corrosion resistance of warm sprayed titanium coatings with polymer sealing for corrosion protection of AZ91E magnesium alloy // *Surf. Coat. Technol.* 2019. V. 363. P. 142–151. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.02.023>.
10. *Malyshev V.N.* Oil and gas steels surface hardening investigation by anodic plasma electrolytic treatment // *Chem. Eng. Process. – Process Intensif.* 2022. V. 179. Art. 109055. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2022.109055>.
11. *Guo D., Yu D., Zhang P., Duan Y., Zhang B., Zhong Y., Qiu J.* Laminar plasma jet surface hardening of the U75V rail steel: Insight into the hardening mechanism and control scheme // *Surf. Coat. Technol.* 2020. V. 394. Art. 125857. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125857>.
12. *Guo D., Yu D., Zhang P., Song W., Zhang B., Peng K.* Laminar plasma jet surface hardening of P20 mold steel: Analysis on the wear and corrosion behaviors // *Surf. Coat. Technol.* 2021. V. 415. Art. 127129. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127129>.
13. *Sun J., Li J., Xie J.M., Yang Y., Wu W.P., Zhou X., Zhang S.H., Wang Q.M.* Properties of rapid arc discharge plasma nitriding of AISI 420 martensitic stainless: Effect of nitriding temperatures // *J. Mater. Res. Technol.* 2022. V. 19. P. 4804–4814. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.07.028>.

14. *Liu S.-H., Trelles J.P., Li C.-J., Li C.-X., Guo H.-B.* A review and progress of multiphase flows in atmospheric and low pressure plasma spray advanced coating // *Mater. Today Phys.* 2022. V. 27. Art. 100832. <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2022.100832>.
15. *Okulov R.A., Popov E.V., Gelchinsky B.R., Rempel A.A.* Development of the computer model of the plasma installation // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021. V. 2064, No 1. Art. 012044. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2064/1/012044>.
16. *Zou K., Zou J.-P., Deng C.-M., Liu M., Liu X.-Z., Zhao R.-M., Li S.-H., Zhu R.-B., Gao D.* Preparation and properties of supersonic atmospheric plasma sprayed TiB₂-SiC coating // *Trans. Nonferrous Met. Soc. China.* 2021. V. 31, No 1. P. 243–254. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(20\)65491-7](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(20)65491-7).
17. *Shuai K., Zhang Y., Fu Y., Guo X., Li T., Li J.* MoSi₂-HfC/TaC-HfC multi-phase coatings synthesized by supersonic atmospheric plasma spraying for C/C composites against ablation // *Corros. Sci.* 2021. V. 193. Art. 109884. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.109884>.
18. *Wang Z., Huang Y., Guo W., Shan D., Xing Z., Wang H., He G.* Effects of pulsed magnetic field on the flight and impact of supersonic plasma spraying particles and the properties of coatings // *Mater. Des.* 2022. V. 223. Art. 111127. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111127>.
19. *Okulov R., Ilinykh S., Zakharov M., Akhmetin S.* Mathematical model of the process of the plasma atomizing of the rod electrode to produce of titanium powder // *Proc. 2020 Int. Conf. on Information Technology and Nanotechnology (ITNT). IEEE*, 2020. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ITNT49337.2020.9253292>.
20. *Ishimoto J., Abe H., Ochiai N.* Computational prediction of cryogenic micro-nano solid nitrogen particle production using laval nozzle for physical photo resist removal-cleaning technology // *Phys. Procedia.* 2015. V. 67. P. 607–612. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.06.103>.
21. *Patel M., Thomas J., Hem J.C.* Experimental investigation of rarefied flows through supersonic nozzles // *Vacuum.* 2023. V. 211. Art. 111909. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2023.111909>.
22. *Li J., Zhang X., Shen J., Ran T., Chen P., Yin Y.* Dissociation of CO₂ by thermal plasma with contracting nozzle quenching // *J. CO₂ Util.* 2017. V. 21. P. 72–76. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2017.04.003>.
23. *Lazarev A.V., Semenov T.A., Belega E.D., Gordienko V.M.* Dynamics of expanding gas from supercritical state in conical nozzle and cluster formation // *J. Supercrit. Fluids.* 2022. V. 187. Art. 105631. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2022.105631>.
24. *Korenchenko A.E., Vorontsov A.G., Okulov R.A., Gel'chinskii B.R.* Simulation of the self-assembly of metal nanoclusters // *Russ. Metall. (Metally).* 2022. V. 2022, No 8. P. 927–932. <https://doi.org/10.1134/S0036029522080067>.
25. *AlShunaifi I.A., Elaissi S., Ghiloufi I., Alterary S.S., Alharbi A.A.* Modelling of a non-transferred plasma torch used for nano-silica powders production // *Appl. Sci.* 2021. V. 11, No 21. Art. 9842. <https://doi.org/10.3390/app11219842>.
26. *Yin Z., Yu D., Zhang Q., Yang S., Yang T.* Experimental and numerical analysis of a reverse-polarity plasma torch for plasma atomization // *Plasma Chem. Plasma Process.* 2021. V. 41, No 5. P. 1471–1495. <https://doi.org/10.1007/s11090-021-10181-8>.
27. *Cui Y., Zhao Y., Numata H., Yamanaka K., Bian H., Aoyagi K., Chiba A.* Effects of process parameters and cooling gas on powder formation during the plasma rotating electrode process // *Powder Technol.* 2021. V. 393. P. 301–311. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.07.062>.

28. *Gelchinski B.R., Balyakin I.A., Yuryev A.A., Rempel A.A.* High-entropy alloys: Properties and prospects of application as protective coatings // *Russ. Chem. Rev.* 2022. V. 91, No 6. Art. RCR5023. <https://doi.org/10.1070/RCR5023>.
29. *Li Q., Zhang N., Gao Y., Qing Y., Zhu Y., Yang K., Zhu J., Wang H., Ma Z., Gao L., Liu Y., He J.* Effect of the core-shell structure powders on the microstructure and thermal conduction property of YSZ/Cu composite coatings // *Surf. Coat. Technol.* 2021. V. 424. Art. 127658. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127658>.
30. *Dong X.-Y., Luo X.-T., Zhang S.-L., Li C.-J.* A novel strategy for depositing dense self-fluxing alloy coatings with sufficiently bonded splats by one-step atmospheric plasma spraying // *J. Therm. Spray Technol.* 2020. V. 29, No 1. P. 173–184. <https://doi.org/10.1007/s11666-019-00943-4>.
31. *Golewski P., Sadowski T.* Technological and strength aspects of layers made of different powders laminated on a polymer matrix composite substrate // *Molecules.* 2022. V. 27, No 4. Art. 1168. <https://doi.org/10.3390/molecules27041168>.
32. *Schramm A., Jafarpour S.M., Schimpf C., Biermann H., Dalke A.* Effect of bias plasma on active screen nitrocarburising response of AISI 420 martensitic stainless steel // *Vacuum.* 2022. V. 205. Art. 111389. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2022.111389>.
33. *Quinones D., Braun K., Meirner A., Chassé T.* Comparing chemical and plasma modification of stainless steel surfaces – relevance for adsorption of adhesion promotor vinyltrimethoxysilane (VTMS) // *Appl. Surf. Sci.* 2022. V. 575. Art. 151674. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.151674>.
34. *Deng T., Li J., Zheng Z., Tian W., Li G.* Influence of plasma beam polishing process parameters on surface roughness of AISI 304 stainless steel // *Appl. Surf. Sci.* 2022. V. 585. Art. 152741. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.152741>.
35. *Okulov R.A., Krashaninin V.A., Popov E.V.* Plasma jet stream simulation for formation coating and powder manufacturing processes // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021. V. 1954, No 1. Art. 012033. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1954/1/012033>.
36. *Okulov R.A., Sarsadskikh K.I., Ilinykh S.A., Zakharov M.N.* Effect of the plasma-forming gas consumption on processes of plasma spray coating and metal powder production // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019. V. 1281, No 1. Art. 012058. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1281/1/012058>.
37. *Карташева М.А.* Математическое моделирование нестационарных газодинамических процессов в областях отрыва потока за элементами летательных аппаратов: Дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18. Челябинск: Юж.-Урал. гос. ун-т. 2008. 168 с.
38. *Лойцянский Л. Г.* Механика жидкости и газа. М.: Дрофа, 2003. 840 с.
39. *Абрамович Г.Н.* Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1969. 824 с.
40. *Mungiguerra S., Di Martino G.D., Savino R., Zoli L., Silvestroni L., Sciti D.* Characterization of novel ceramic composites for rocket nozzles in high-temperature harsh environments // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2020. V. 163. Art. 120492. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120492>.
41. *Okulov R.A., Krashaninin V.A., Popov E.V.* Influence of the plasmatron anode length in the processes of powder production and coating // *AIP Conf. Proc.* 2022. V. 2456, No 1. Art. 020035. <https://doi.org/10.1063/5.0074612>.

Поступила в редакцию 6.10.2023

Принята к публикации 19.01.2024

Окулов Роман Александрович, старший научный сотрудник лаборатории «порошковых и композиционных материалов» Института металлургии; доцент института фундаментального образования

Уральское отделение РАН

ул. Амундсена, д. 101, г. Екатеринбург, 620016, Россия

Уральский федеральный университет имени первого Президента России

Б.Н. Ельцина

ул. Мира, д. 19, г. Екатеринбург, 620002, Россия

E-mail: okulov.roman@gmail.com

Крашанинин Владимир Александрович, заведующий лабораторией «порошковых и композиционных материалов» Института металлургии

Уральское отделение РАН

ул. Амундсена, д. 101, г. Екатеринбург, 620016, Россия

E-mail: krash_55@mail.ru

Гельчинский Борис Рафаилович, руководитель отдела «материаловедения» Института металлургии

Уральское отделение РАН

ул. Амундсена, д. 101, г. Екатеринбург, 620016, Россия

E-mail: brg47@list.ru

Ремпель Андрей Андреевич, директор Института металлургии

Уральское отделение РАН

ул. Амундсена, д. 101, г. Екатеринбург, 620016, Россия

E-mail: rempel.imet@mail.ru

ISSN 2541–7746 (Print)

ISSN 2500–2198 (Online)

UCHENYE ZAPISKI KAZANSKOGO UNIVERSITETA.

SERIYA FIZIKO-MATEMATICHESKIE NAUKI

(Proceedings of Kazan University. Physics and Mathematics Series)

2024, vol. 166, no. 1, pp. 58–73

ORIGINAL ARTICLE

doi: 10.26907/2541-7746.2024.1.58-73

**Influence of the Shape of the Anode Assembly
Inner Channel on Plasma Flow Velocity**

R.A. Okulov^{a,b}, V.A. Krashaninin^{a**}, B.R. Gelchinsky^{a***}, A.A. Rempel^{a****}*

^a *Institute of Metallurgy, Ural Branch, Russian Academy of Sciences,
Yekaterinburg, 620016 Russia*

^b *Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin,
Yekaterinburg, 620002 Russia*

E-mail: ^{*}okulov.roman@gmail.com, ^{**}krash_55@mail.ru,

^{***}brg47@list.ru, ^{****}rempel.imet@mail.ru

Received October 6, 2023; Accepted January 19, 2024

Abstract

This article considers how the shape of the inner channel in the anode assembly affects plasma flow velocity in a plasma torch. Three different shapes of the anode assembly were analyzed, all with a conical confusor part of 50 mm in length: with a diameter transition from 12 to 6 mm, from 12 to 8 mm, and from 12 to 10 mm. A computer experiment was performed using the finite element method and then validated by the subsequent full-scale experiment

on a laboratory plasma unit. The obtained results were verified. The verification outcomes showed a satisfactory convergence and were consistent with the published data. A review of the existing plasma unit designs for powder production, application of functional coatings, and surface modification was carried out. The software packages implementing the finite element method to solve these problems were examined. The study yielded practical recommendations for consumers and developers of plasma equipment and identified the shapes of the anode assembly enabling both supersonic and subsonic plasma flow regimes.

Keywords: powder, functional coating, surface modification, flame method, flow velocity, subsonic plasma, supersonic plasma, anode assembly, nozzle

Acknowledgments. This study was carried out as part the state assignment to the Institute of Metallurgy, Ural Branch, Russian Academy of Sciences (project no. 122020100287-1 EGISU NIOKTR).

Conflicts of Interest. The authors declare no conflicts of interest.

Figure Captions

Fig. 1. Schematic diagram of the MAK-10 unit.

Fig. 2. Scheme of the plasma head cross section: 1 – upper swirler, 2 – cathode assembly, 3 – interelectrode insert, 4 – lower swirler, 5 – anode assembly, D – diameter of the inlet section into the confusor part of the anode, d – diameter of the outlet section from the confusor part of the anode.

Fig. 3. Velocity profile in the center of the plasma flow along its axis depending on the shape of the anode assembly.

Fig. 4. Results of the study on plasma flow velocity based on the in-situ (a) and computer (b) experiments for the anode assembly with a transition of inlet section diameters to outlet section diameters from 12 to 6 mm.

References

1. Fu P., Wang N., Liao H., Xu W., Peng L., Chen J., Hu G., Ding W. Microstructure and mechanical properties of high strength Mg-15Gd-1Zn-0.4Zr alloy additive-manufactured by selective laser melting process. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 2021, vol. 31, no. 7, pp. 1969–1978. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(21\)65630-3](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(21)65630-3).
2. Yurtkuran E., Unal R. Theoretical and experimental investigation of Tialloy powder production using low-power plasma torches. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 2022, vol. 32, no. 1, pp. 175–191. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(21\)65786-2](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(21)65786-2).
3. Bao Q., Yang Y., Wen X., Guo L., Guo Z. The preparation of spherical metal powders using the high-temperature remelting spheroidization technology. *Mater. Des.*, 2021, vol. 199, art. 109283. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109382>.
4. Amarnath P., Nandy N., Indumathy B., Yugeswaran S. Study on CO₂ based thermal plasma torch and its effective utilization for material processing in atmospheric pressure. *J. CO₂ Util.*, 2022, vol. 66, art. 102290. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2022.102290>.
5. Kornienko E., Gulyaev I., Smirnov A., Nikulina A., Ruktuev A., Kuzmin V., Tuezov A. Microstructure and properties of Ni-Al coatings obtained by conventional and high-velocity atmospheric plasma spraying. *Results Surf. Interfaces*, 2022, vol. 6, art. 100038. <https://doi.org/10.1016/j.rsufi.2022.100038>.
6. Tang L., Kang J., He P., Ding S., Chen S., Liu M., Xiong Y., Ma G., Wang H. Effects of spraying conditions on the microstructure and properties of NiCrBSi coatings prepared by internal rotating plasma spraying. *Surf. Coat. Technol.*, 2019, vol. 374, pp. 625–633. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.06.056>.

7. Li W., Cao C., Yin S. Solid-state cold spraying of Ti and its alloys: A literature review. *Prog. Mater. Sci.*, 2020, vol. 110, art. 100633. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2019.100633>.
8. Miao Y., Zhu H., Gao P., Li L. The effects of spraying power on microstructure, magnetic and dielectric properties of plasma sprayed cobalt ferrite coatings. *J. Mater. Res. Technol.*, 2020, vol. 9, no. 6, pp. 14237–14243. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.10.006>.
9. Morończyk B., Ura-Bińczyk E., Kuroda S., Jaroszewicz J., Molak R.M. Microstructure and corrosion resistance of warm sprayed titanium coatings with polymer sealing for corrosion protection of AZ91E magnesium alloy. *Surf. Coat. Technol.*, 2019, vol. 363, pp. 142–151. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.02.023>.
10. Malyshev V.N. Oil and gas steels surface hardening investigation by anodic plasma electrolytic treatment. *Chem. Eng. Process. – Process Intensif.*, 2022, vol. 179, art. 109055. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2022.109055>.
11. Guo D., Yu D., Zhang P., Duan Y., Zhang B., Zhong Y., Qiu J. Laminar plasma jet surface hardening of the U75V rail steel: Insight into the hardening mechanism and control scheme. *Surf. Coat. Technol.*, 2020, vol. 394, art. 125857. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125857>.
12. Guo D., Yu D., Zhang P., Song W., Zhang B., Peng K. Laminar plasma jet surface hardening of P20 mold steel: Analysis on the wear and corrosion behaviors. *Surf. Coat. Technol.*, 2021, vol. 415, art. 127129. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127129>.
13. Sun J., Li J., Xie J.M., Yang Y., Wu W.P., Zhou X., Zhang S.H., Wang Q.M. Properties of rapid arc discharge plasma nitriding of AISI 420 martensitic stainless: Effect of nitriding temperatures. *J. Mater. Res. Technol.*, 2022, vol. 19, pp. 4804–4814. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.07.028>.
14. Liu S.-H., Trelles J.P., Li C.-J., Li C.-X., Guo H.-B. A review and progress of multiphase flows in atmospheric and low pressure plasma spray advanced coating. *Mater. Today Phys.*, 2022, vol. 27, art. 100832. <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2022.100832>.
15. Okulov R.A., Popov E.V., Gelchinsky B.R., Rempel A.A. Development of the computer model of the plasma installation. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021, vol. 2064, no. 1, art. 012044. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2064/1/012044>.
16. Zou K., Zou J.-P., Deng C.-M., Liu M., Liu X.-Z., Zhao R.-M., Li S.-H., Zhu R.-B., Gao D. Preparation and properties of supersonic atmospheric plasma sprayed TiB₂-SiC coating. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 2021, vol. 31, no. 1, pp. 243–254. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(20\)65491-7](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(20)65491-7).
17. Shuai K., Zhang Y., Fu Y., Guo X., Li T., Li J. MoSi₂-HfC/TaC-HfC multi-phase coatings synthesized by supersonic atmospheric plasma spraying for C/C composites against ablation. *Corros. Sci.*, 2021, vol. 193, art. 109884. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.109884>.
18. Wang Z., Huang Y., Guo W., Shan D., Xing Z., Wang H., He G. Effects of pulsed magnetic field on the flight and impact of supersonic plasma spraying particles and the properties of coatings. *Mater. Des.*, 2022, vol. 223, art. 111127. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111127>.
19. Okulov R., Ilinykh S., Zakharov M., Akhmetin S. Mathematical model of the process of the plasma atomizing of the rod electrode to produce of titanium powder. *Proc. 2020 Int. Conf. on Information Technology and Nanotechnology (ITNT)*. IEEE, 2020, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ITNT49337.2020.9253292>.

20. Ishimoto J., Abe H., Ochiai N. Computational prediction of cryogenic micro-nano solid nitrogen particle production using laval nozzle for physical photo resist removal-cleaning technology. *Phys. Procedia*, 2015, vol. 67, pp. 607–612.
<https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.06.103>.
21. Patel M., Thomas J., Hem J.C. Experimental investigation of rarefied flows through supersonic nozzles. *Vacuum*, 2023, vol. 211, art. 111909.
<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2023.111909>.
22. Li J., Zhang X., Shen J., Ran T., Chen P., Yin Y. Dissociation of CO₂ by thermal plasma with contracting nozzle quenching. *J. CO₂ Util.*, 2017, vol. 21, pp. 72–76.
<https://doi.org/10.1016/j.jcou.2017.04.003>.
23. Lazarev A.V., Semenov T.A., Belega E.D., Gordienko V.M. Dynamics of expanding gas from supercritical state in conical nozzle and cluster formation. *J. Supercrit. Fluids*, 2022, vol. 187, art. 105631. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2022.105631>.
24. Korenchenko A.E., Vorontsov A.G., Okulov R.A., Gel'chinskii B.R. Simulation of the self-assembly of metal nanoclusters. *Russ. Metall. (Metally)*, 2022, vol. 2022, no. 8, pp. 927–932. <https://doi.org/10.1134/S0036029522080067>.
25. AlShunaifi I.A., Elaissi S., Ghiloufi I., Alterary S.S., Alharbi A.A. Modelling of a non-transferred plasma torch used for nano-silica powders production. *Appl. Sci.*, 2021, vol. 11, no. 21, art. 9842. <https://doi.org/10.3390/app11219842>.
26. Yin Z., Yu D., Zhang Q., Yang S., Yang T. Experimental and numerical analysis of a reverse-polarity plasma torch for plasma atomization. *Plasma Chem. Plasma Process.*, 2021, vol. 41, no. 5, pp. 1471–1495. <https://doi.org/10.1007/s11090-021-10181-8>.
27. Cui Y., Zhao Y., Numata H., Yamanaka K., Bian H., Aoyagi K., Chiba A. Effects of process parameters and cooling gas on powder formation during the plasma rotating electrode process. *Powder Technol.*, 2021, vol. 393, pp. 301–311.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.07.062>.
28. Gelchinski B.R., Balyakin I.A., Yuryev A.A., Rempel A.A. High-entropy alloys: Properties and prospects of application as protective coatings. *Russ. Chem. Rev.*, 2022, vol. 91, no. 6, art. RCR5023. <https://doi.org/10.1070/RCR5023>.
29. Li Q., Zhang N., Gao Y., Qing Y., Zhu Y., Yang K., Zhu J., Wang H., Ma Z., Gao L., Liu Y., He J. Effect of the core-shell structure powders on the microstructure and thermal conduction property of YSZ/Cu composite coatings. *Surf. Coat. Technol.*, 2021, vol. 3424, art. 127658. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127658>.
30. Dong X.-Y., Luo X.-T., Zhang S.-L., Li C.-J. A novel strategy for depositing dense self-fluxing alloy coatings with sufficiently bonded splats by one-step atmospheric plasma spraying. *J. Therm. Spray Technol.*, 2020, vol. 29, no. 1, pp. 173–184.
<https://doi.org/10.1007/s11666-019-00943-4>.
31. Golewski P., Sadowski T. Technological and strength aspects of layers made of different powders laminated on a polymer matrix composite substrate. *Molecules*, 2022, vol. 27, no. 4, art. 1168. <https://doi.org/10.3390/molecules27041168>.
32. Schramm A., Jafarpour S.M., Schimpf C., Biermann H., Dalke A. Effect of bias plasma on active screen nitrocarburising response of AISI 420 martensitic stainless steel. *Vacuum*, 2022, vol. 205, art. 111389. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2022.111389>.
33. Quinones D., Braun K., Meixner A., Chassé T. Comparing chemical and plasma modification of stainless steel surfaces – relevance for adsorption of adhesion promotor vinyltrimethoxysilane (VTMS). *Appl. Surf. Sci.*, 2022, vol. 575, art. 151674.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.151674>.

34. Deng T., Li J., Zheng Z., Tian W., Li G. Influence of plasma beam polishing process parameters on surface roughness of AISI 304 stainless steel. *Appl. Surf. Sci.*, 2022, vol. 585, art. 152741. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.152741>.
35. Okulov R.A., Krashaninin V.A., Popov E.V. Plasma jet stream simulation for formation coating and powder manufacturing processes. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021, vol. 1954, no. 1, art. 012033. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1954/1/012033>.
36. Okulov R.A., Sarsadskikh K.I., Ilinykh S.A., Zakharov M.N. Effect of the plasma-forming gas consumption on processes of plasma spray coating and metal powder production. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2019, vol. 1281, no. 1, art. 012058. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1281/1/012058>.
37. Kartasheva M.A. Mathematical modeling of non-stationary gas-dynamic processes in the regions of flow separation behind aircraft elements. *Cand. Tech. Sci. Diss.* Chelyabinsk, Yuzhno-Ural. Gos. Univ., 2008. 168 p. (In Russian)
38. Loitsyanskii L. G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Mechanics of Liquids and Gases]. Moscow, Drofa, 2003. 840 p. (In Russian)
39. Abramovich G.N. *Prikladnaya gazovaya dinamika* [Applied Gas Dynamics]. Moscow, Nauka, 1969. 824 p. (In Russian)
40. Mungiguerra S., Di Martino G.D., Savino R., Zoli L., Silvestroni L., Sciti D. Characterization of novel ceramic composites for rocket nozzles in high-temperature harsh environments. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2020, vol. 163, art. 120492. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120492>.
41. Okulov R.A., Krashaninin V.A., Popov E.V. Influence of the plasmatron anode length in the processes of powder production and coating. *AIP Conf. Proc.*, 2022, vol. 2456, no. 1, art. 020035. <https://doi.org/10.1063/5.0074612>.

Для цитирования: Окулов Р.А., Крашанинин В.А., Гельчинский Б.Р., Ремпель А.А. Влияние формы внутреннего канала анодного узла на скорость плазменного потока // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. 2024. Т. 166, кн. 1. С. 58–73. URL: <https://doi.org/10.26907/2541-7746.2024.1.58-73>.

For citation: Okulov R.A., Krashaninin V.A., Gelchinsky B.R., Rempel A.A. Influence of the shape of the anode assembly inner channel on plasma flow velocity. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki*, 2024, vol. 166, no. 1, pp. 58–73. URL: <https://doi.org/10.26907/2541-7746.2024.1.58-73>. (In Russian)