

Анахов С.В., Пыкин Ю.А., Матушкин А.В. Температурные корреляции параметров газовихревой стабилизации металлорежущих плазматронов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2018. – Т. 20, № 3. – С. 29–37. DOI: 10.15593/2224-9877/2018.3.04

Anakhov S.V., Pykin Yu.A., Matushkin A.V. The temperature correlation parameters of gas-vortex stabilization of metal-cutting plasma torches. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2018, vol. 20, no. 3, pp. 29–37. DOI: 10.15593/2224-9877/2018.3.04

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 20, № 3, 2018
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9877/2018.3.04
УДК 620.18:621.791

С.В. Анахов¹, Ю.А. Пыкин², А.В. Матушкин³

¹ Российский государственный профессионально-педагогический университет, ООО «ТЕРУС», Екатеринбург, Россия

² Уральский государственный лесотехнический университет, ООО НПО «Полигон», Екатеринбург, Россия

³ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

**ТЕМПЕРАТУРНЫЕ КОРРЕЛЯЦИИ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОВИХРЕВОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ
МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ ПЛАЗМОТРОНОВ**

Представлены результаты исследований эффективности систем газовихревой стабилизации металлорежущих плазматронов. В связи с тем, что в настоящее время внедрение автоматизированных комплексов резки металлов предусматривает, как правило, многофункциональное использование нескольких технологий, разработка универсальной или конкурентной в более широком диапазоне технологии может стать серьезным фактором при поиске наиболее эффективной технологии резки металлов. Подобной технологией могут стать современные методы высокоточной плазменной резки, включающие в себя появившиеся в последние годы под названием «сжатая», «точная» или «узкоструйная» плазма разработки таких производителей, как Kjellberg, MesserGreisheim, HyperTherm. Повышение эффективности газовихревой стабилизации может стать серьезным фактором при выборе плазменной резки в качестве оптимальной технологии резки металлов. Отмечено, что разработанная авторами методика оценки эффективности должна основываться на расчете равномерности распределения скорости потока газа по сечению газовихревого тракта плазматрона. Предложены различные (упрощенный и точный) методы оценки. Представлены результаты расчета распределения скорости в контрольном сечении для различных модификаций плазматронов. Расчеты сделаны на «холодном» модельном газовом потоке и при его нагреве плазменной дугой. Показано, что при нагреве плазменной дугой увеличиваются скорость потока на входе в сопловой канал плазматрона и степень неравномерности распределения скорости в контрольном сечении. Методами статистического анализа выбран основной параметр оценки эффективности газовихревой стабилизации – критерий вариации скорости. Продемонстрированы преимущества новых модернизированных плазматронов, в том числе работающих по технологии узкоструйной плазмы, с точки зрения эффективности газовихревой стабилизации.

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

S.V. Anakhov¹, Yu.A. Pykin², A.V. Matushkin³

¹ Russian State Vocational-Professional University, LLC “TERUS”, Ekaterinburg, Russian Federation

² Ural State Forest Engineering University, LLC NPO “Polygon”, Ekaterinburg, Russian Federation

³ Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltzin, Ekaterinburg, Russian Federation

**THE TEMPERATURE CORRELATION PARAMETERS OF GAS-VORTEX STABILIZATION
OF METAL-CUTTING PLASMA TORCHES**

The results of the efficiency studies of gas-temperature stabilization systems for metal-cutting plasmatrons are presented. Due to the fact that currently the introduction of automated metal cutting systems usually involves multi-functional use of several technologies, the development of universal or competitive in a wider range of technologies can be a serious factor in the search for the most effective metal cutting technology. Such technology can be modern methods of high-precision plasma cutting, which include appeared in recent years under the name “compressed”, “accurate” or “narrow-jet” plasma development of manufacturers such as Kjellberg, MesserGreisheim, HyperTherm. Improving the efficiency of individual gaseous-vortex stabilization may be an important factor when choosing plasma cutting, optimum cutting technology of metals It is noted that the method of efficiency evaluation developed by the authors should be based on the calculation of the uniformity of the gas flow velocity distribution over the section of the gas-heating path of the plasma torch. Various (simplified and accurate) estimation methods are

proposed. The results of calculation of the velocity distribution in the control section for different modifications of plasma torches are presented. Calculations are made on the "cold" model gas flow and its heating by a plasma arc. It is shown that when heated by a plasma arc, the flow rate at the inlet to the nozzle channel of the plasma torch and the degree of irregularity of the velocity distribution in the control section increase. By methods of statistical analysis the main parameter of the effectiveness evaluation of individual gaseous-vortex stabilization was chosen – criterion for the velocity variations. Demonstrated the advantages of the new upgraded torches, including working on technology narrow jet plasma, from the point of view of the effectiveness of individual gaseous-vortex stabilization.

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

В настоящее время внедрение автоматизированных комплексов резки металлов предусматривает, как правило, многофункциональное использование нескольких технологий [1] – плазменной и лазерной, а иногда и гидроабразивной и газовой резки [2, 3]. Подобная необходимость обусловлена спецификой упомянутых технологий, каждая из которых имеет свои преимущества – по качеству, эффективности, себестоимости и так далее [4], причем зачастую эти преимущества характерны только для определенных диапазонов применяемой технологии [5, 6]. В этой связи разработка универсальной или конкурентной в более широком диапазоне технологии может стать серьезным фактором при поиске оптимальной технологии резки металлов. На наш взгляд, подобной технологией могут стать современные технологии высокоточной плазменной резки, включающие в себя появившиеся в последние годы под названием «сжатая», «точная» или «узкоструйная» плазма разработки таких производителей, как Kjellberg, MesserGreisheim, HyperTherm. Применение данного способа позволяет достичь максимальных показателей эффективности и безопасности процесса, а также качества, эквивалентного уровню, достигаемому при лазерной резке [2, 7]. Аналогов подобной продукции в России нет, поэтому разработка и внедрение устройств высокоточной (прецизионной) плазменной резки должно стать высокоэффективной заменой конкурентным технологиям в рамках поддерживаемой государством политики импортозамещения. В этой связи следует отметить, что разработка, тестирование и комплексирование новых технологических решений для обеспечения глобальной конкурентоспособности отечественных компаний в высокотехнологичных отраслях промышленности и на рынках будущего – один из приоритетов дорожной карты принятого недавно к реализации направления «Технет» Национальной технологической инициативы РФ.

В поисках инновационных решений в сфере плазменной резки необходимо обратить внимание на то, что фактически все производимые в России плазмтроны для резки используют однотипную систему однопоточной газовихревой стабилизации дугового разряда, разработанную в 70–80-е гг. XX в. [8–11]. Как показали исследования авто-

ров [12], разработку технологий высокоточной плазменной резки необходимо проводить с учетом газодинамических особенностей течения плазмообразующего газа (ПОГ) [13], которые определяют эффективность, качество и безопасность работы плазмтрона. По результатам проведенного авторами анализа газодинамических особенностей протекания ПОГ по газовоздушному тракту (ГВТ) плазмтронов была разработана методика оценки эффективности систем газовихревой стабилизации плазменной дуги [14], опирающаяся на применение автоматизированных процедур для определения критерия равномерности распределения скоростей потока ПОГ по сечению каналов ГВТ. Данная методика позволяет выявлять недостатки конструкции ГВТ, влияющие на неравномерность распределения скоростей ПОГ по сечению ГВТ. Однако представленные ранее результаты применения данной методики [15] были получены с учетом минимального влияния нагрева плазменной дугой газодинамического потока в сопловом узле плазмтрона. Подобная гипотеза сформулирована в предположении, что нагрев газового потока происходит в основном в сопловом канале плазмтрона, где повлиять на равномерность распределения потока по сечению канала конструктивными методами практически невозможно, а равномерность распределения ПОГ должна быть обеспечена уже на входе в сопловую камеру. Однако определенное влияние плазменной дуги на скорости ПОГ в выбранном на входе в сопловый канал плазмтрона контрольном сечении должно присутствовать. В этой связи авторами была поставлена задача оценить степень данного влияния и применимость предложенной ранее методики. Дополнительной задачей стало уточнение критериев эффективности газовихревой стабилизации, полученных с использованием автоматизированных процедур газодинамического анализа.

Как известно, типичная конструкция ГВТ дугового металлорежущего плазмтрона (рис. 1) включает в себя участок подачи газа в плазмтрон, успокоительную (расширительную) камеру и систему газовихревой стабилизации (ГВС), обеспечивающей тангенциальную подачу ПОГ из завихрителя (вихревой камеры) в сопловый узел (электродуговую камеру). В основе методики лежит

определение равномерности распределения скоростей ПОГ по сечению ГВТ в электродуговой камере плазмотрона в качестве одного из главных факторов, влияющих на качество и надежность работы плазмотрона. Данное условие, как было показано ранее [12], определяется конструктивными особенностями ГВТ плазмотронов с однопоточной схемой течения ПОГ и, как правило, не выполняется из-за асимметричной и неравномерной подачи газа в расширительную камеру плазмотрона. Геометрия отдельных участков ГВТ в целом однотипна для большинства известных отечественных плазмотронов (ПВР-402, ВПР-410), включая и взятый в качестве базового для исследований плазмотрона ПМВР-М.

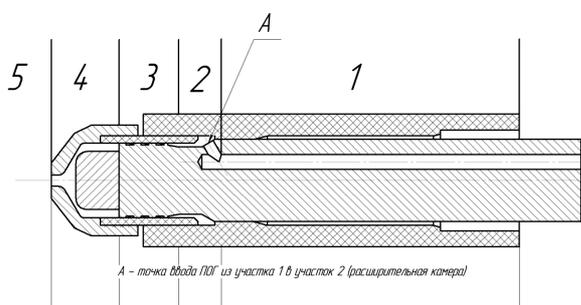


Рис. 1. Схема газовой трубки металлорежущего плазмотрона ПМВР-М. Участки ГВТ: 1 – ввод ПОГ в плазмотрон; 2 – расширительная камера; 3 – завихритель; 4 – сопловой узел; 5 – выход плазмы

Для повышения равномерности распределения скоростей потока ПОГ авторами было предложено несколько конструктивных решений. Одно из них было реализовано в плазмотроне ПМВР-2М (рис. 2) за счет применения системы газодинамических фильтров (дополнительных сплошной и перфорированных стенок в расширительной камере) [16], а также оптимизированных по газодинамическим критериям геометрии расширительной камеры и завихрителя (рис. 3) [17].



Рис. 2. ПМВР-2М – новый одноконтурный плазмотрон для высокоточной резки металлов средних и больших толщин с улучшенной системой газовой стабилизации

Другим эффективным решением стала разработка конструкции ГВТ с симметричной подачей ПОГ в расширительную камеру, 2 завихрителями

(формирующим и стабилизирующим) и 2 расширительными камерами (рис. 4). Применение методов газодинамического анализа позволило найти оптимальные размеры и расположение камер расширения и завихрителей и показать эффективность газовой стабилизации при использовании данной конструкции на «холодном» (без учета нагрева плазменной дугой) потоке ПОГ. Подобный метод выравнивания скоростей может быть применен в плазмотронах как с двух-, так и с однопоточной схемой организации течения ПОГ. В 1-м случае рассматриваемая технология ГВС предполагает использование в формирующем струю канале плазмотрона, работающего по принципу двойного сопла и в отечественном исполнении получившего название «узкоструйная плазма». Во 2-м варианте она может быть использована в качестве дополнительной меры повышения эффективности ГВС в традиционных плазмотронах в целях обеспечения прецизионного качества резки металлов.

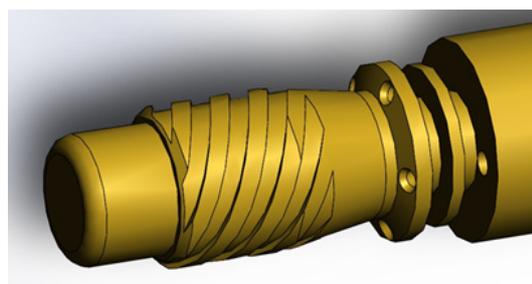


Рис. 3. Схема газовой трубки плазмотрона ПМВР-2М с системой выравнивающих фильтров (сплошной и перфорированной стенками в расширительной камере)

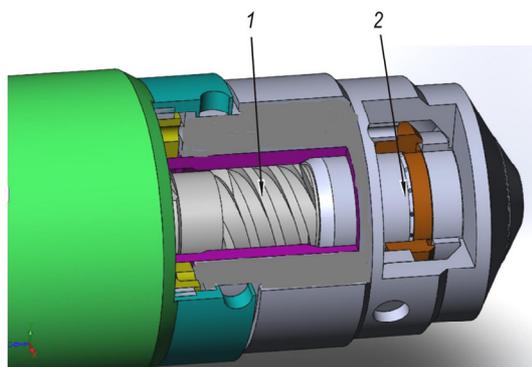


Рис. 4. Конструктивная схема плазмотрона с 2 завихрителями в системе газовой стабилизации: 1 – предварительный завихритель; 2 – основной завихритель

Для оценки равномерности распределения динамических характеристик газового потока авторами было предложено 2 способа, зависящих от аппаратных возможностей применения программного комплекса и требуемой точности вычислений. Упрощенный вариант оценки (при ограниченных

ресурсах) подразумевает расчет скоростей потока ПОГ в 4 симметричных точках в выбранном сечении плазматрона, причем одна из точек выбирается напротив точки ввода газа в расширительную камеру (рис. 5 и 6). В этом случае в качестве критерия степени неравномерности по сечению ГВТ плазматрона можно ввести коэффициент отношения скоростей $X_i = V_1/V_2 = V_1/V_3 = V_1/V_4$ (см. рис. 6) [15]. Однако при этом возникает погрешность оценки, обусловленная вероятностью пропустить максимальные и минимальные отклонения от средних значений скорости в данном сечении при ее вероятном неравномерном распределении. В этой связи более объективной представляется оценка неравномерности, сделанная расчетным путем по всему заданному периметру контрольной плоскости. Очевидно, что в этом случае для корректности сравнения необходимо производить расчет скоростей по кольцевой траектории на равноудаленном от оси плазматрона расстоянии (по средней линии проходного сечения). При этом, однако, возникает проблема выбора критерия оценки неравномерности газового потока.

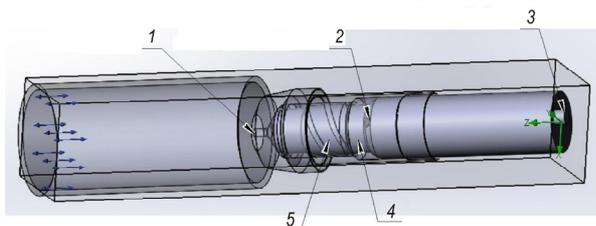


Рис. 5. Схема расчета скоростей потока ПОГ в ГВТ плазматрона: 1 – выход из сопла; 2 – ввод газа на участок; 3 – точка ввода газа; 4 – расширительная камера; 5 – завихритель

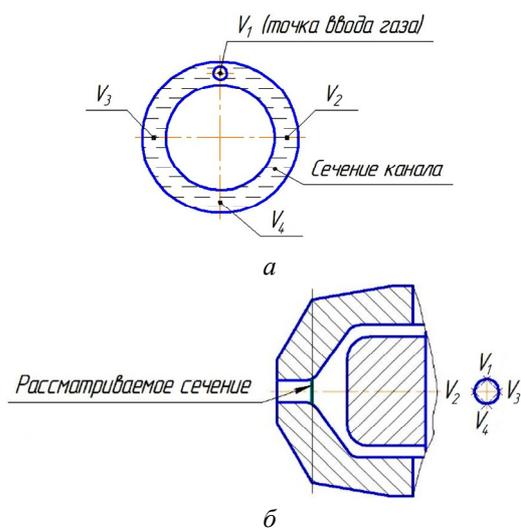


Рис. 6. Расположение точек расчета скорости потока ПОГ по сечению каналов ГВТ (а) и расположение контрольной плоскости (б)

В целях решения поставленных задач были проведены исследования распределения скоростей потока ПОГ в контрольных сечениях 3 плазматронов – базового ПМВР-М, модернизированного одноточечного ПМВР-2М и плазматрона ПМВР-5.3 с 2 завихрителями в системе газовихревой стабилизации. Расчеты производились при одинаковых технологических условиях (давление ПОГ на входе в плазматрон $P = 5$ атм, расход ПОГ $Q = 0,011$ кг/с) в программной среде SolidWorks с приложением Flow Simulation. Расчет скоростей выполнялся по средней линии контрольного сечения, диаметр которой определялся размером выходного отверстия сопла плазматрона. Количество расчетных точек по периметру зависело от параметров расчетной сетки, которые определялись автоматически программной средой (от 40 до 200 точек в зависимости от задач анализа). Для оценки влияния плазменной дуги на равномерность распределения потока ПОГ был выполнен сравнительный расчет скоростей в контрольной плоскости плазматронов при отсутствии дуги и в условиях нагрева соплового канала плазменной дугой. Оценка температуры воздушной дуги была произведена по данным [18] и методике [19] (для воздушно-плазменной резки в расчетах была принята среднемассовая температура дуги ~ 7000 К при диаметре дуги 2 мм).

Результаты расчетов скоростей в контрольных сечениях представлены на рис. 7–12. Они подтверждают сделанные ранее авторами выводы о влиянии конструкции ГВТ на газодинамические параметры потока ПОГ в электродуговой камере плазматрона. При одинаковых условиях на входе в плазматрон фиксируемые скорости в контрольном сечении у плазматрона ПМВР-2М на 20 %, а у ПМВР-5.3 на 70 % ниже, чем у базового ПМВР-М. Подобный результат обусловлен, по всей видимости, 2 причинами. Первая связана с конструктивными различиями используемого сопла у рассматриваемых конструкций плазматронов (величина выходного диаметра, длина цилиндрической части выходного канала сопла). Вторая причина – газодинамические потери по ГВТ плазматрона, в которые наибольший вклад вносит завихритель (до 40 % от суммарного количества потерь давления [2]). Следует в этой связи заметить, что наиболее эффективная работа каждого из плазматронов происходит при некоторых режимах, определяемых экспериментальным путем, а следовательно, представленные результаты должны свидетельствовать об объективных различиях диапазонов оптимальной работы для каждого из анализируемых плазматронов.

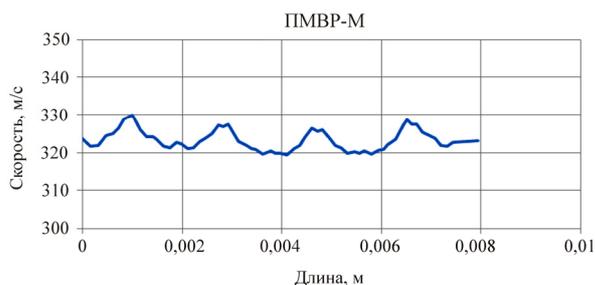


Рис. 7. Распределение скорости в контрольной плоскости плазмотрона ПМВР-М без нагрева плазменной дугой (64 точки с дискретизацией $h = 0,15$ мм)

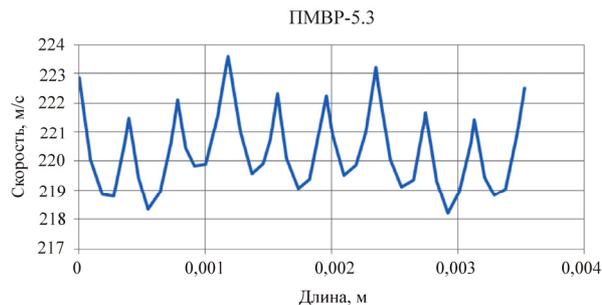


Рис. 11. Распределение скорости в контрольной плоскости плазмотрона ПМВР-5.3 без нагрева плазменной дугой (48 точек, $h = 0,09$ мм)

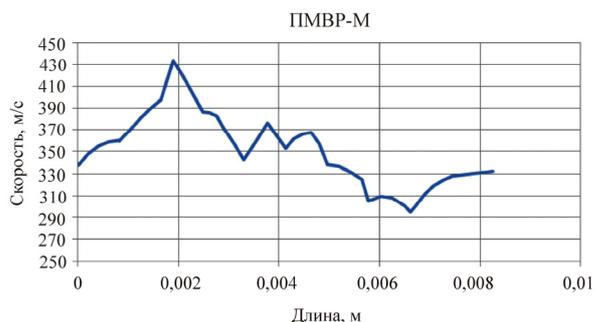


Рис. 8. Распределение скорости в контрольной плоскости плазмотрона ПМВР-М при нагреве плазменной дугой (41 точка, $h = 0,2$ мм)

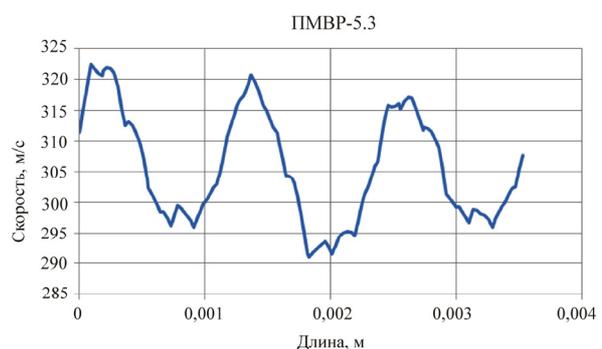


Рис. 12. Распределение скорости в контрольной плоскости плазмотрона ПМВР-5.3 при нагреве плазменной дугой (123 точки, $h = 0,03$ мм)

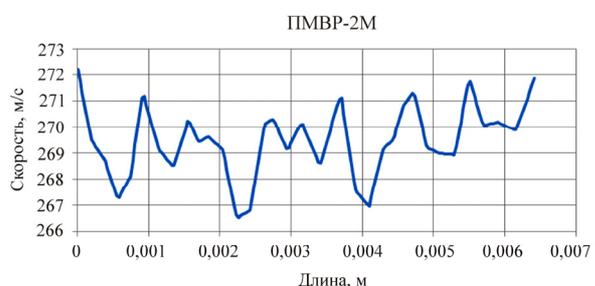


Рис. 9. Распределение скорости в контрольной плоскости плазмотрона ПМВР-2М без нагрева плазменной дугой (200 точек, $h = 0,03$ мм)

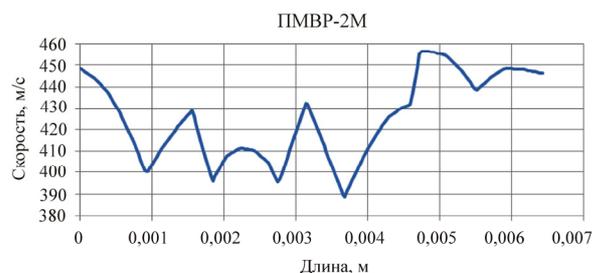


Рис. 10. Распределение скорости в контрольной плоскости плазмотрона ПМВР-2М при нагреве плазменной дугой (200 точек, $h = 0,03$ мм)

Другим важным следствием анализа полученных результатов является выявленное влияние плазменной дуги на скорости ПОГ в контрольном сечении. Очевидно, что при скорости 150–300 м/с в сопловом узле время пребывания газа на участке горения дуги от торца катода до входа в сопловый канал составляет от 10 до 100 мкс, что явно недостаточно для нагрева всего потока (данный эффект используется для защиты стенок канала от теплового воздействия). Тем не менее результаты свидетельствуют о небольшом нагреве газа на входе в канал и обусловленном этим нагревом увеличении скоростей в расчетных точках контрольного сечения (в плазмотроне ПМВР-М – примерно на 15 %, в ПМВР-2М – на 55 %, в ПМВР-5.3 – на 40 %). Подобные различия, очевидно, также обусловлены конструктивными особенностями сопловых узлов анализируемых плазмотронов, влияющими на характер взаимодействия ПОГ с плазменной дугой. Следует заметить, что представленные на рис. 13 результаты расчетов скоростей в сопловом канале и на выходе из плазмотрона ПМВР-5.3 свидетельствуют об эффективном нагреве газа в сопловом канале и получении на выходе высокоэнергетического потока со скоростью 500–600 м/с для кинетического воздействия на разрезаемый металл.

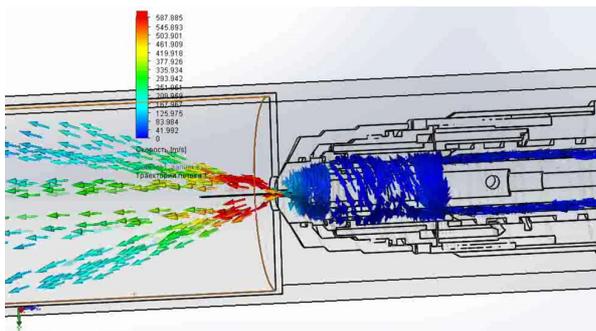


Рис. 13. Распределение скоростей по ГВТ и плазменной струе плазматрона ПМВР-5.3

В целях поиска критерия оценки степени равномерности распределения потока при анализе большого числа контрольных точек статистическими методами [20] было проанализировано полученное распределение скоростей для различных плазматронов. На рис. 14 представлены рассчитанные гистограммы значений частоты распределения скоростей в контрольных сечениях плазматронов ПМВР-М и ПМВР-2М (объемы выборок равны числу контрольных точек, отмеченных на рис. 7–12). Была выдвинута статистическая гипотеза, что представленные зависимости скорости подчиняются либо нормальному, либо равномерному закону распределения случайных величин. Однако проверка гипотезы по критерию Пирсона χ^2 не дала ее статистически значимого подтверждения. Не подтвердилась она и при анализе другого распределения скоростей и при изменении интервалов расчета значений частоты. По этой причине при обработке представленных на рис. 7–12 результатов в качестве критериев были рассмотрены часто употребляемые при обработке больших массивов случайных величин параметры:

1. Размах вариации $R = V_{\max} - V_{\min}$.
2. Отношение вариации $L = V_{\max}/V_{\min}$.
3. Среднее линейное отклонение (СЛО)

$$a = \sum_{i=1}^n |V_i - \bar{V}| / n.$$

4. Среднее квадратическое отклонение (СКО)

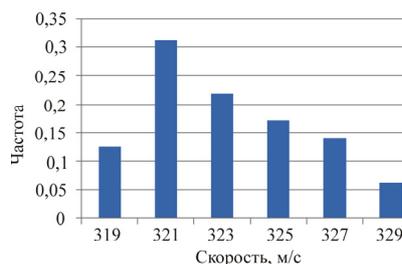
$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2 / n}.$$

5. Коэффициент вариации $F = S / \bar{V}$.

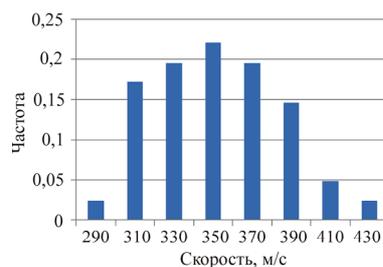
При больших объемах выборки (в нашем случае $n > 40$) $S \approx \sigma$, где σ – дисперсия случайной величины. Результаты расчетов данных параметров представлены в таблице.

Анализ представленных в таблице результатов статистической обработки распределения скоростей в контрольных сечениях плазматронов свидетельствует о статистически значимом увеличении эффективности газвихревой стабилизации (равномерности распределения скорости), достигну-

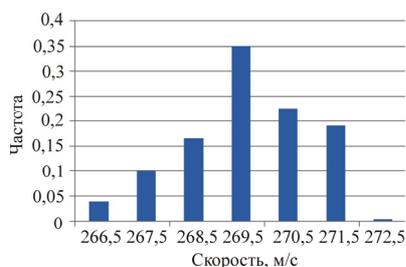
той в модернизированных плазматронах ПМВР-2М и ПМВР-5.3 по сравнению с базовым плазматроном ПМВР-М. Данный вывод подтверждается сравнением всех представленных для анализа параметров (R , L , a , S и F). При выборе единственного критерия эффективности ГВС, на взгляд авторов, следует остановиться на коэффициенте вариации F , дающем выраженное в процентах отношение СКО (дисперсии) скорости к ее среднему значению в анализируемой выборке. Данный параметр легко вычисляется, например, в Excel, где имеется встроенная функция расчета СКО.



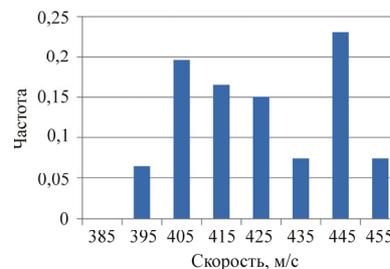
a – ПМВР-М без плазменной дуги



б – ПМВР-М с плазменной дугой



в – ПМВР-2М без плазменной дуги



г – ПМВР-2М с плазменной дугой

Рис. 14. Гистограммы частот распределения скоростей в контрольных сечениях плазматронов ПМВР-М и ПМВР-2М

Результаты статистической обработки распределения скоростей в контрольных сечениях плазмотронов

Тип плазмотрона	Условия нагрева	Статистические параметры							
		V_{max} , м/с	V_{min} , м/с	\bar{V} , м/с	$R = V_{max} - V_{min}$, м/с	$L = V_{max}/V_{min}$	a (СЛО), м/с	S (СКО), м/с	F , %
ПМВР-М	Без дуги	323,4	319,6	330,0	10,4	1,03	2,3	2,8	0,9
	С дугой	353,0	295,0	433,0	138,0	1,47	26	33	9,3
ПМВР-2М	Без дуги	269,4	266,6	272,2	5,6	1,02	0,9	1,2	0,4
	С дугой	425,0	389,0	457,0	68,0	1,02	17	19	4,5
ПМВР-5.3	Без дуги	220,5	218,2	223,6	5,4	1,18	1,2	1,4	0,6
	С дугой	306,1	290,9	322,2	21,3	1,11	7,8	8,8	2,9

Анализ выбранного критерия F свидетельствует о повышении эффективности ГВС в 1,5–2 раза на «холодном» газе (без нагрева плазменной дугой) и в 2–3 раза при нагреве плазменной дугой в новых плазмотронах по сравнению с базовым (рис. 15). Представленные результаты расчетов показывают, помимо закономерного увеличения скорости, влияние температуры плазменной дуги на равномерность распределения потока ПОГ. У плазмотронов ПМВР-М и ПМВР-2М наблюдается увеличение коэффициента вариации примерно в 10 раз, а у ПМВР-5.3 – в 5 раз, что также свидетельствует о конструктивных преимуществах предложенной системы газовой стабилизации дуги для плазмотронов, работающих по технологии узкоструйной плазмы.

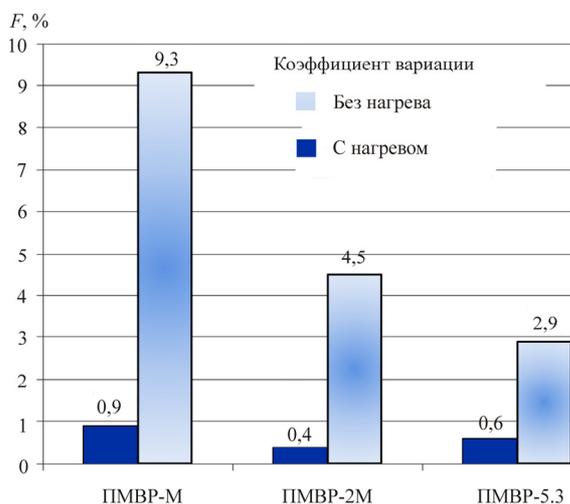


Рис. 15. Коэффициенты вариации скорости в контрольном сечении плазмотронов

Статья опубликована по результатам работ, выполненных по госзаданию Министерства образования и науки № 13.10317.2018/11.12.

Список литературы

1. Шалимов М.П., Панов В.И., Вотина Е.Б. Сварка вчера, сегодня, завтра...: учеб. пособие / Урал. фед. ин-т им. первого Президента России Б.Н. Ельцина. – 2-е изд. – Екатеринбург, 2015. – 310 с.
2. Кайдалов А.А. Современные технологии термической и дистанционной резки конструкционных материалов. – Киев: Экотехнология, 2007. – 456 с.
3. Лашенко Г.И. Плазменная резка металлов и сплавов. – Киев: Экотехнология, 2003. – 64 с.
4. Wegmann H. Сравнительный технико-экономический анализ плазменной резки // Welding and Cutting. – 2005. – № 4. – Р. 191–194.
5. Пыкин Ю.А., Анахов С.В. Эффективность и энергосбережение – критерии выбора электроплазменных технологий // УрФО: Строительство. ЖКК. – 2010. – № 1. – С. 22–23.
6. Потапов В.А. Опыт эксплуатации лазерных и плазменных установок для резки на американских заводах [Электронный ресурс]. – URL: www.stankoinform.ru (дата обращения: 30.08.2018).
7. Анахов С.В. Принципы и методы проектирования в электроплазменных и сварочных технологиях: учеб. пособие / С.В. Анахов, под ред. А.С. Боруховича. – Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2014. – 144 с.
8. Жуков М.Ф., Анышаков А.С. Основы расчета плазмотронов линейной схемы / Ин-т теплофизики Сибир. отд-ния Рос. акад. наук СССР. – Новосибирск, 1979. – 146 с.
9. Чердниченко В.С., Анышаков А.С., Кузьмин М.Г. Плазменные электротехнологические установки. – Новосибирск: Изд-во Новосибир. гос. техн. ун-та, 2011. – 602 с.
10. Электродуговые генераторы термической плазмы. Т. 17. Низкотемпературная плазма / М.Ф. Жуков, И.М. Засыпкин, А.Н. Тимошевский [и др.]. – Новосибирск: Наука, 1999. – 712 с.
11. Клименко А.А., Ляпин Г.К. Конструкции электродуговых плазмотронов. – М.: Изд-во Моск. гос. техн. ун-та им. Баумана, 2010. – 56 с.
12. Анахов С.В., Пыкин Ю.А. Плазмотроны: проблема акустической безопасности. Теплофизические и газодинамические принципы проектирования малошумных плазмотронов / Урал. отд-ние Рос. акад. наук. – Екатеринбург, 2012. – 224 с.

13. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. – М.: Наука, 1991. – Ч. 1. – 597 с.; ч. 2. – 301 с.

14. Анахов С.В., Пыкин Ю.А., Матушкин А.В. Методические основы автоматизированного газодинамического проектирования в электроплазменных технологиях // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение. Материаловедение. – 2018. – Т. 20, № 1. – С. 62–70.

15. Оценка эффективности газовихревой стабилизации в плазматронах для резки металлов / М.П. Шалимов, С.В. Анахов, Ю.А. Пыкин, А.В. Матушкин, И.Ю. Матушкина // Сварка и диагностика. – 2018. – № 2. – С. 57–61.

16. Анахов С.В., Пыкин Ю.А., Матушкин А.В. Газовихревая стабилизация в плазматронах: новые решения // Сварочное производство. – 2015. – № 5. – С. 49–53.

17. Анахов С.В., Пыкин Ю.А., Матушкин А.В. Исследование систем газовихревой стабилизации плазматронов // Сварочное производство. – 2015. – № 4. – С. 20–24.

18. Донской А.В., Клубникин В.С. Электроплазменные процессы и установки в машиностроении. – Л.: Машиностроение, 1979. – 221 с.

19. Дресвин С.В., Иванов Д.В. Основы математического моделирования плазматронов: учеб. пособие. Ч. 1. Уравнение баланса энергии. Метод контрольного объема. Расчет температуры плазмы. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2004. – 227 с.

20. Годин А.М. Статистика: учеб. для вузов. – М.: Дашков и К°, 2005. – 470 с.

References

1. Shalimov M.P., Panov V.I., Votnova E.B. Svarka vchera, segodnia, zavtra...: uchebnoe posobie [Welding yesterday, today, tomorrow]. Ural'skii federal'nyi universitet imeni pervogo Prezidenta Rossii B.N. El'tsina, 2nd ed. Ekaterinburg, 2015, 310 p.

2. Kaidalov A.A. Sovremennye tekhnologii termicheskoi i distantsionnoi rezki konstruktsionnykh materialov [Modern technologies of thermal and remote cutting of constructional materials]. Kiev: Ekotekhnologiya, 2007, 456 p.

3. Lashchenko G.I. Plazmennaya rezka metallov i splavov [Plasma cutting of metals and alloys]. Kiev: Ekotekhnologiya, 2003, 64 p.

4. Wegmann H. Sravnitel'nyi tekhniko-ekonomicheskii analiz plazmennoi rezki. *Welding and Cutting*, 2005, no. 4, pp. 191–194.

5. Pykin Iu.A., Anakhov S.V. Effektivnost' i energosberezhenie – kriterii vybora elektroplazmennyykh tekhnologii [Efficiency and energy saving – criteria of the choice of electroplasma technologies]. *UrFO: Stroitel'stvo. ZhKK*, 2010, no. 1, pp. 22–23.

6. Potapov V.A.. Opyt ekspluatatsii lazernyykh i plazmennyykh ustanovok dlia rezki na amerikanskikh zavodakh [Operating experience of laser and plasma machines for cutting at the American plants]. URL: www.stankoinform.ru (accessed 30 August 2018).

7. Anakhov S.V. Printsipy i metody proektirovaniia v elektroplazmennyykh i svarochnykh tekhnologiakh: ucheb. posobie [The principles and design methods in electroplasma and welding technologies]. Ed. A.S. Borukhovicha. Ekaterinburg: Izdatel'stvo Rossiiskogo gosudarstvennogo professional'no-pedagogicheskogo universiteta, 2014, 144 p.

8. 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 Rossiiskoi akademii nauk SSSR, Novosibirsk, 1979, 146 p.

9. Cherednichenko V.S., An'shakov A.S., Kuz'min M.G. Plazmennye elektrotekhnologicheskie ustanovki [Plasma electrotechnological installations]. Novosibirsk: Izdatel'stvo Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2011, 602 p.

10. Zhukov M.F., Zasyplin I.M., Timoshevskii A.N. Elektrodugovye generatory termicheskoi plazmy. T. 17. Nizkotemperaturnaia plazma [Arc generators of thermal plasma]. Novosibirsk: Nauka, 1999, 712 p.

11. Klimenko A.A., Liapin G.K. Konstruktsii elektrodugovykh plazmotronov [Designs of arc plasmotrons]. Moscow: Izdatel'stvo Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni Baumana, 2010, 56 p.

12. Anakhov S.V., Pykin Iu.A. Plazmotrony: problema akusticheskoi bezopasnosti. Teplofizicheskie i gazodinamicheskie printsipy proektirovaniia maloshumnykh plazmotronov [Plasmotrons: problem of acoustic safety. Heat-physical and gasdynamic principles of design of quiet plasmotrons]. Ural'skoe otdelenie Rossiiskoi akademii nauk. Ekaterinburg, 2012, 224 p.

13. Abramovich G.N. Prikladnaia gazovaya dinamika [Applied gas dynamics]. Moscow: Nauka, 1991, ch. 1, 597 p., ch. 2, 301 p.

14. Anakhov S.V., Pykin Iu.A., Matushkin A.V. Metodicheskie osnovy avtomatizirovannogo gazodinamicheskogo proektirovaniia v elektroplazmennyykh tekhnologiakh [Methodical bases of the automated gasdynamic design in electroplasma technologies]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie. Materialovedenie*, 2018, vol. 20, no. 1, pp. 62–70.

15. Shalimov M.P., Anakhov S.V., Pykin Iu.A., Matushkin A.V., Matushkina I.Iu. Otsenka effektivnosti gazovikhrevoi stabilizatsii v plazmotronakh dlia rezki metallov [Assessment of efficiency of gas-vortex stabilization in plasmotrons for cutting of metals]. *Svarka i diagnostika*, 2018, no. 2, pp. 57–61.

16. 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.

17. 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.

18. Donskoi A.V., Klubnikin V.S. Elektroplazmennyye protsessy i ustanovki v mashinostroenii [Electroplasma processes and installations in mechanical engineering]. Leningrad: Mashinostroenie, 1979, 221 p.

19. Dresvin S.V., Ivanov D.V. Osnovy matematicheskogo modelirovaniia plazmotronov: ucheb. Posobie [Bases of mathematical modeling of plasmatrons]. Ch. 1. Uravnenie balansa energii. Metod kontrol'nogo ob"ema. Raschet temperatury plazmy. Saint-Petersburg, Izdatel'stvo Politehnicheskogo universiteta, 2004, 227 p.

20. Godin A.M. Statistika: uchebnik dlia vuzov [Statistics]. Moscow: Dashkov i K°, 2005, 470 p.

Получено 06.06.2018

Об авторах

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

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

Матушкин Анатолий Владимирович (Екатеринбург, Россия) – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры технологий сварочного производства Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина; e-mail: 227433@yandex.ru.

About the authors

Sergei V. Anahov (Ekaterinburg, Russian Federation) – Ph.D. in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Head, Department of Mathematical and Natural Sciences, Russian State Vocational Professional University, Director of LLC "TERUS"; e-mail: sergej.anahov@rsvpu.ru.

Yurii A. Pykin (Ekaterinburg, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Physico-Chemical Technologies to Protect the Biosphere, Ural State Forest Engineering University, Gen. Director of LLC NPO "Polygon"; e-mail: yappoligon@mail.ru.

Anatolii V. Matushkin (Ekaterinburg, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Senior Lecturer, Department Welding Technology, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltzin; e-mail: 227433@yandex.ru.