

УДК 533.9.07

ЭФФЕКТИВНЫЙ ГЕНЕРАТОР НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ АРГОНА С РАСШИРЯЮЩИМСЯ КАНАЛОМ ВЫХОДНОГО ЭЛЕКТРОДА

© 2020 г. М. Х. Гаджиев^{1,*}, Ю. М. Куликов¹, Э. Е. Сон¹,
А. С. Тюфтяев¹, М. А. Саргсян¹, Д. И. Юсупов¹

¹ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

*E-mail: makhach@mail.ru

Поступила в редакцию 03.07.2019 г.

После доработки 06.09.2019 г.

Принята к публикации 22.10.2019 г.

Для исследования теплофизических, электрофизических и оптических свойств аргона, а также осуществления различных плазмохимических реакций создан генератор постоянного тока высокоэнтальпийной плазменной струи аргона с самоустанавливающейся длиной дуги и расширяющимся каналом выходного электрода. Проведен сопоставительный анализ электрофизических характеристик (ВАХ, КПД) в расширяющемся и цилиндрическом каналах постоянного сечения. Электрические, калориметрические и спектральные исследования показали, что созданный генератор низкотемпературной плазмы обеспечивает формирование на выходе из газоразрядного канала слабо расходящаяся ($2\alpha = 12^\circ$, α – угол полураствора) плазменную струю аргона диаметром 5–8 мм с энтальпией 5–10 кДж/г и среднемассовой температурой 5–12 кК, с концентрацией электронов в приосевой плазме 10^{17} см⁻³ при полной электрической мощности дугового разряда 2–10 кВт и расходе плазмообразующего газа 1.5–3 г/с. В зависимости от начальных условий на расстоянии 0–30 мм от среза сопла генератора низкотемпературной плазмы скорость потока плазмы меняется в пределах от 990 до 300 м/с.

DOI: 10.31857/S0040364420010068

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время низкотемпературная плазма широко используется для решения не только разнообразных научных, но и прикладных производственных и технических задач. Наиболее привлекательные аспекты применения низкотемпературной плазмы связаны с тем, что по сравнению с традиционными химико-технологическими процессами плазменные процессы не требуют использования каких-либо жидких растворов (потенциально являются экологически чистыми), а также более экономичны. Особый интерес представляет исследование интенсивного разрушающего воздействия высокоэнтальпийного плазменного потока на теплозащитные материалы, сопровождающегося протеканием сложных теплофизических, электромагнитных и химических процессов [1]. Из всех типов генераторов низкотемпературной плазмы (ГНП) [2–6] наибольшую рабочую температуру может обеспечить ГНП постоянного тока, являющийся одним из наиболее простых источников низкотемпературной плазмы ($T < 25000$ К). Многообразие механических и теплофизических процессов, протекающих в высокоскоростных потоках термической плазмы, определяет повышенные требования к уровню

теоретических исследований и измерительному оборудованию. Моделирование процессов тепло-массообмена в высокоскоростных потоках горячего газа представляет собой проблему, часто возникающую при проведении различных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в энергетике, двигателестроении, авиации и космонавтике. Поэтому использование инертного аргона в качестве плазмообразующего газа на первом этапе работы позволяет наблюдать только продукты химического разложения исследуемого образца и упрощает численное моделирование. Кроме того, большой цикл исследований свойств аргоновой плазмы стабилизированной дуги (электропроводности, вязкости, теплопроводности, оптических свойств) был проведен еще в начале 1960-х гг. на экспериментальной установке, разработанной в ИВТАН [7], и имеется большое количество данных при температуре плазмы до 30000 К [6].

Таким образом, начальный этап подобных исследований целесообразно проводить в потоке химически неактивной плазмы. При этом необходимо иметь надежный ГНП, в разрядном промежутке которого создается высокоэнтальпий-

ный плазменный поток инертных газов (аргона) с температурой от тысяч до десятков тысяч градусов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

В разработку основ таких плазмотронов могут быть положены ГНП с самоустанавливающейся длиной дуги для плазмообразующего газа азота с расширяющимся каналом выходного электрода [8, 9]. Впервые ГНП с расширяющимся каналом газоразрядного тракта был предложен Исакаевым в конце 1970-х гг., где электрический разряд полностью горел в расширяющемся канале [10]. Выбор в пользу этого типа плазмотрона связан с тем, что такая конструкция обеспечивает горение дуги в ламинарном потоке при высокой скорости газа на входе в сопло, а также эффективность нагрева рабочей среды при малых тепловых потерях в водоохлаждаемые части устройства [8]. Ранее проведенные экспериментальные исследования генератора плазмы азота с расширяющимся каналом выходного электрода показали, что оптимальный угол раскрытия по направлению потока с углом 6° между образующей и осью канала приводит к повышению устойчивости дуги по сравнению с цилиндрическим каналом постоянного сечения [9]. При этом длина дуги уменьшается, а тепловые потоки в стенки становятся более равномерными. В расширяющемся канале при относительно больших скоростях газа дуговой столб вблизи анодной привязки дуги может занимать значительную часть поперечного сечения, и протекание тока в этом случае осуществляется посредством коротких дуг между анодом и электропроводным ядром потока. Значительное уменьшение плотности тока и удельного теплового потока на анод способствуют уменьшению эрозии выходного электрода.

Отличительной особенностью данной плазмы является ее движение в канале с дозвуковыми скоростями, распределение которых имеет параболический вид, достигающий максимума на оси $\sim 10^3$ м/с [11]. При этом радиальное распределение давления потока плазмы в канале ($I = 160$ А, $G = 1.25$ г/с) также имеет параболическую форму со значением полного напора в центре до 100 Па, спадающего на периферии до 10 Па [12]. Ранее проведенные эксперименты [13] в широких диапазонах изменений тока разряда (150–500 А), расхода плазмообразующего газа (аргона и азота атмосферного давления с расходом 1 г/с), входного диаметра канала (3–6 мм) позволили установить, что около 95% полного тока (до 500 А) отводится начальной (обращенной к катоду) поверхностью анода длиной 1 см, а оставшаяся часть анода отводит 5% тока дуги (анод был секционированным). Такой характер токоотбора обусловлен тем, что в переходном слое между токопроводящим плазменным шнуром и водоохлаждаемой

стенкой анода имеется поперечное (по отношению к стабилизирующему дугу вихревому потоку) электрическое поле напряженностью ~ 30 В/см, обеспечивающее дрейфовую скорость электронов $\sim 10^6$ м/с, значительно превышающую среднюю скорость поперечного тока газового потока [14]. При этом режим течения стабилизирующего вихревого потока на входном участке расширяющегося анода – ламинарный, а в зоне преимущественного токоотбора (длиной 1–2 входных диаметра анода) – переходный (от ламинарного к турбулентному), с характерными числами Пекле $\sim 10^3$. Это обеспечивает гидродинамически устойчивое, без развития крупномасштабной турбулентности течение плазмы в области замыкания основного (~ 90 – 96%) тока дуги на поверхности анода. Наличие поперечного электрического поля и тока в переходной области плазма–стенка анода, по-видимому, является дополнительным ламинаризирующим фактором воздействия электрического тока на поток газа в токопроводящем канале [15, 16]. Диффузному характеру токоотбора на входном участке анодного канала способствуют как наличие значительной (соизмеримой с осевой) тангенциальной составляющей скорости вихревого потока (при скорости ~ 500 м/с частота вращения 5–25 кГц), так и объемная фотоионизация нейтрального газа на границе плазменного шнура потоком распространяющегося в радиальном направлении вакуумного ультрафиолетового излучения (ВУФ-излучения), генерируемого сильноионизованным ядром дуги с температурой 20–30 кК [14]. Достигшее границы плазмы ВУФ-излучение осуществляет фотоионизацию холодного пристеночного слоя и последующий (в процессах фото- и тройной или диссоциативной рекомбинации) его нагрев. Вследствие высокой оптической плотности ВУФ-излучения его энергия не достигает стенки и полностью расходуется на нагрев газа. Таким образом, ВУФ-излучение и обеспечивает плазмотронам данного типа энергетически выгодный режим работы, без развития колебаний и турбулизации плазмы на коротком (2–3 входных диаметра анода) самоустанавливаемом участке дуги: лишь четверть энергии джоулева нагрева попадает на охлаждаемую стенку. Остальные три четверти энергии затрачиваются на повышение энтальпии (среднемассовой температуры) рабочего газа [13]. Анализ картин радиальных распределений интенсивности свечения плазмы в сечении анода показывает, что при расходе плазмообразующего газа $G < 3$ г/с наблюдается цилиндрическая симметрия этого распределения, нарушаемая при увеличении расхода, возможно, вследствие появления отрывных течений и турбулизации потока [13]. Согласно [6, 13], исследуемая плазма аргона находится в состоянии частичного локального термодинамического равновесия с температурой и концентрацией

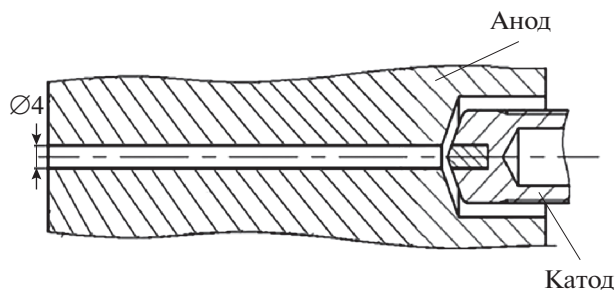


Рис. 1. ГНП с цилиндрическим газоразрядным каналом.

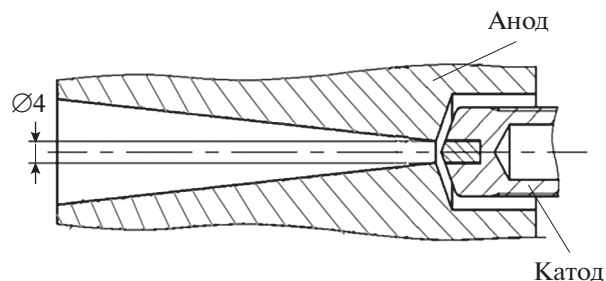


Рис. 2. ГНП с расширяющимся газоразрядным каналом.

электронов на оси дуги $T_e = 2.5\text{--}2.9 \times 10^4 \text{ K}$, $n_e \sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$. В переходной области “электродуговая плазма—охлаждающий газовый поток” температура электронов и концентрация составляют $T_e \sim 10^4 \text{ K}$, $n_e \sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$. При этой температуре вязкость аргоновой плазмы достигает максимальных значений $\mu \approx 2.5 \times 10^{-4} \text{ Па}\cdot\text{с}$. В результате возрастания вязкости на периферии дуги в переходном слое происходит интенсивное демпфирование возникающих в газовом потоке турбулентных пульсаций. Кроме этого, уменьшение концентрации электронов на периферии приводит к уменьшению эффективности электрон-атомных столкновений, частота столкновений падает, что ведет к отрыву электронной температуры от температуры тяжелых частиц [6, 13].

Кроме этого, недостатками большинства ГНП с продольным потоком газа и самоустанавливающейся длиной дуги является падающий характер вольт-амперной характеристики (ВАХ), так как с увеличением силы тока уменьшается длина дуги, что приводит к снижению напряжения горения [2, 3]. Вследствие этого мощность дуги увеличивается гораздо медленнее, чем сила тока, в то время как ресурс ГНП во многом определяется величиной силы тока дуги. Падающая ВАХ влечет за собой также жесткие требования к источнику электрического питания для стабилизации дуги. В таких генераторах для стабилизации дуги и термоизоляции ее от стенок канала применяются пористый вдув, аксиальные потоки или закрутка газа [3–5], а также создаются различные полости, уступы, диафрагмы, межэлектродные вставки, что усложняет общую конструкцию. Кроме того, каждая схема имеет преимущество только в определенном диапазоне параметров силы тока и расхода газа.

Поэтому было проведено исследование ВАХ и КПД ГНП с цилиндрическим диаметром 4 мм (рис. 1) и расширяющимся (рис. 2) каналами длиной 35 мм. В последнем угол раскрытия 6° между образующей и осью канала, диаметр критического сечения — 4 мм.

Подбор диаметра цилиндрического канала произведен экспериментально из условия исключения теплового заклинивания канала при данных режимах работы ГНП. Наличие и значения тока и напряжения определяются с помощью системы, основанной на использовании аналого-цифровых плат L-Card L761, L783 с возможностью одновременного опроса 16 измерительных каналов (частота опроса — до 3000 кГц), позволяющей измерять как мгновенные значения токов и напряжений, так и усредненные значения по времени с цифровым и графическим отображением информации. Оценка КПД плазмотрона η проводилась калориметрическим методом: автоматизированным измерением расходов и температуры воды на входах и выходах автономно охлаждаемых частей узлов плазмотрона.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 представлены электрофизические характеристики электрической дуги в цилиндрическом и расширяющемся газоразрядных трактах длиной 35 мм, где G — расход плазмообразующего газа, I — сила тока, U — напряжение горения дуги, Q — тепловой поток в охлаждаемые части ГНП, P — мощность, вкладываемая в дугу, η — КПД плазмотрона.

Расширяющийся канал обеспечивает стабильную работу ГНП во всем диапазоне изменения тока и расхода плазмообразующего газа.

Горение дуги в цилиндрическом канале при малых токах и расходах плазмообразующего газа (см. Примечания в табл. 1) сопровождается периодическими кратковременными пульсациями напряжения, обусловленными крупномасштабным шунтированием [5].

Эксперимент показал, что расширяющийся канал лишен вышеуказанных недостатков цилиндрического канала, способствует стабильности работы ГНП во всем диапазоне изменения тока и расхода газа, при этом уровень кратковременных пульсаций напряжения на всех режимах работы не более 0.5 В.

Таблица 1. Электрофизические характеристики электрической дуги в длинном цилиндрическом и расходящемся газоразрядных трактах

Длинный цилиндрический анод, диаметр – 4 мм						Длинный расширяющийся анод, критический диаметр – 4 мм, выходной – 9.8 мм (стабильный, пульсации $U + 0.5$ В)					
G , г/с	I , А	U , В	Q , кВт	P , кВт	η , %	Примечания	I , А	U , В	Q , кВт	P , кВт	η , %
1.5	100	25	1.45	2.5	42	Нестабильный, пульсации $U + 4$ В	100	28	1.35	2.8	52
	150	24	2.2	3.6	38	$U + 3$ В	150	27	2.1	4.05	48
	200	18	3.1	3.6	14	Стабильный, $U + 1$ В	200	26	3	5.2	42
	250	19	3.95	4.75	17	$U + 1$ В	250	23	3.7	5.75	36
	300	20	4.8	6	20		300	21	4.5	6.3	29
2	100	28	1.5	2.8	46	Нестабильный, $U + 3$ В	100	29	1.4	2.9	52
	150	29	2.2	4.35	49	$U + 2$ В	150	29	2	4.35	54
	200	29	3	5.8	48		200	30	2.7	6	55
	250	23	3.8	5.75	34		250	31	3.5	7.75	55
	300	22	4.9	6.6	26	Стабильный, $U + 1$ В	300	31	4.4	9.3	53
2.5	100	34	1.55	3.4	54		100	30	1.45	3	52
	150	35	2.2	5.25	58		150	31	2.1	4.65	55
	200	36	3.2	7.2	56		200	31.5	2.9	6.3	54
	250	35	4.1	8.75	53		250	32	3.7	8	54
	300	33	4.8	9.9	52	300	32.5	4.4	9.75	55	
3	100	37	1.7	3.7	54	100	31	1.5	3.1	52	
	150	38	2.7	5.7	53	150	31.5	2.3	4.725	51	
	200	39	3.6	7.8	54	200	32	3.1	6.4	52	
	250	40	4.7	10	53	250	32.5	4	8.125	51	
	300	37	5.3	11.1	52	300	33	4.8	9.9	52	

Единственный недостаток исследуемого расширяющегося канала – это необходимость при больших токах ($I > 250$ А) повышать расход газа для увеличения длины дуги и соответственно напряжения горения, о чем свидетельствует уменьшение напряжения горения при 300 А (табл. 1).

Анализ зоны максимальной привязки дуги в аноде показал, что при данных режимах работы для горения дуги в аргоне нет необходимости в такой длине газоразрядного тракта. Длина газо-

разрядного тракта была уменьшена до 15 мм. Дальнейшее уменьшение ухудшало охлаждение анода из-за конструктивных особенностей ГНП, хотя анализ показывает возможность уменьшения анода до ~ 10 мм. В табл. 2 приведены электрофизические характеристики электрической дуги в цилиндрическом и расширяющемся газоразрядных трактах длиной 15 мм.

Из данных табл. 2 видно, что в расширяющемся канале ВАХ слабо возрастающая, кроме режи-

Таблица 2. Электрофизические характеристики электрической дуги в цилиндрическом и расходящемся газоразрядных трактах длиной 15 мм

Короткий цилиндрический анод							Короткий расширяющийся анод (стабильный, пульсации $U + 0.5$ В)				
G , г/с	I , А	U , В	Q , кВт	P , кВт	η , %	Примечания	I , А	U , В	Q , кВт	P , кВт	η , %
1.5	100	24	1.3	2.4	46	Нестабильный, пульсации $U + 4$ В	100	28	1.2	2.8	57
	150	23	1.8	3.45	48	$U + 3$ В	150	27	1.7	4.05	58
	200	20	2.5	4	38	Стабильный, $U + 1$ В	200	24	2.4	4.8	50
	250	18	3.2	4.5	29		250	23	3	5.75	49
	300	18	3.8	4.4	30		300	21	3.5	6.3	44
2	100	27	1.3	2.7	52	Нестабильный, $U + 3$ В	100	29	1.3	2.9	55
	150	26	1.8	3.9	54	Нестабильный, $U + 2$ В	150	29	1.8	4.35	59
	200	26	2.5	5.2	52		200	30	2.4	6	60
	250	26	3.3	6.5	49		250	30.5	2.9	7.625	63
	300	23	4.2	6.9	39	Стабильный, $U + 1$ В	300	31	3.7	9.3	60
2.5	100	35	1.4	3.5	57		100	30	1.3	3	57
	150	36	2.1	5.4	61		150	30	1.9	4.5	58
	200	36	2.7	7.2	63		200	30.5	2.4	6.1	61
	250	35	3.45	8.75	61		250	31	3	7.75	61
	300	34	4.25	10.2	58		300	31.5	3.7	9.45	61
3	100	38	1.4	3.8	63		100	31	1.2	3.1	61
	150	39	2	5.85	66		150	31	1.7	4.65	63
	200	40	2.7	8	66		200	31.5	2.2	6.3	65
	250	39	3.4	9.75	65		250	32.5	2.8	8.125	66
	300	38	4.2	11.4	63		300	33	3.4	9.9	66

ма работы при расходе 1.5 г/с, что связано с уменьшением длины дуги при увеличении тока и невозможности его выдувания. На более высоких расходах газа (≥ 2 г/с), как и с длинным анодом, лучшими характеристиками обладает расширяющийся канал во всем диапазоне изменения тока и расхода плазмообразующего газа. Укорачивание длины газоразрядного тракта привело к увеличению КПД плазмотрона в среднем на 10–15%.

На основе проведенных исследований и подбора оптимальной конфигурации узлов был создан генератор низкотемпературной плазмы аргона постоянного тока с самоустанавливающейся

дугой и расширяющимся каналом газоразрядного тракта, конструкция которого приведена на рис. 3.

На следующем этапе с помощью спектральных методов анализировался состав высокоэнтальпийного плазменного потока [8, 17]. Исследования проводились с использованием трехканального оптоволоконного спектрометра AvaSpec 2048 со спектральным разрешением 0.2–0.5 нм, который выполнял мониторинг излучения (с периодичностью 3–4 спектр/с) вдоль оси потока плазмы в спектральном диапазоне 240–1000 нм. Наличие в исследуемых спектрах плазмы аргона большого числа линий атомарного аргона ArI, позволяет использовать метод “больцмановской

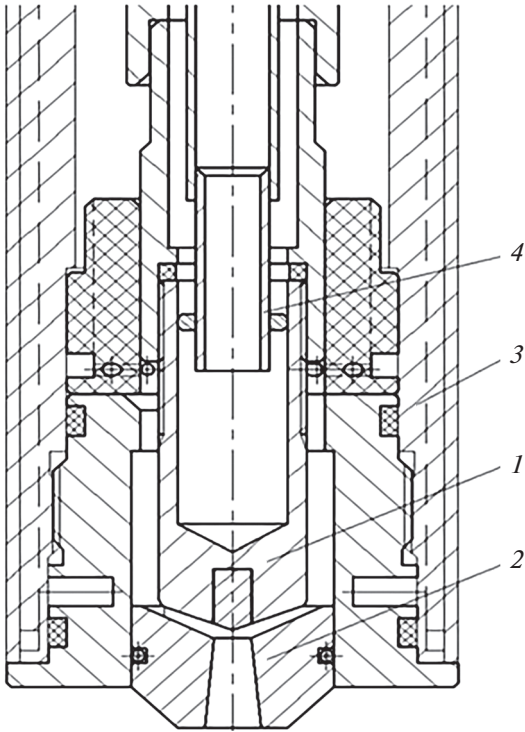


Рис. 3. Конструкция плазматрона (рабочий газ – аргон): 1 – катод, 2 – сопло-анод, 3 – корпус, 4 – трубка охлаждения катода.

экспоненты” для определения T_e [18–20]. Концентрацию электронов в приосевой области плазменной струи можно оценить по полуширине линий H_α и H_β . Так, например, на срезе сопла при токе 250 А и расходе газа 2.5 г/с температура и концентрация электронов в приосевой плазме аргона $T_e \sim 12$ кК, $n_e \sim 10^{17}$ см⁻³.

Скорость плазменного потока определялась измерением полного давления с помощью трубки Пито, представлявшей собой изогнутую капиллярную трубку, заключенную в медный корпус,

Таблица 3. Зависимость температуры от расстояния от среза сопла

200 А		250 А	
Z, м	T, К	Z, м	T, К
0.001	13003.21	0.001	13498.91
0.0012	13001.43	0.0012	12916.18
0.0014	12645.56	0.0014	12034.78
0.0016	12233.3	0.0016	12188.93
0.0018	11800.88	0.0018	12564.45
0.002	11944.86	0.002	10695.67
0.0022	11002.34	0.0022	10882.34
0.0024	11498.81	0.0024	11908.96

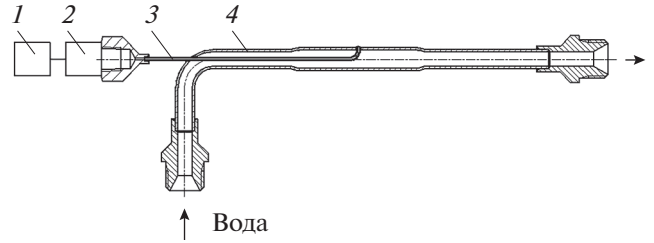


Рис. 4. Трубка Пито: 1 – источник питания, 2 – токовый датчик, 3 – измерительная трубка, 4 – водоохлаждающая трубка.

который охлаждался проточной водой (рис. 4). Конструкция закреплялась на стальной координатной рампе с тремя степенями свободы с точностью позиционирования $\delta x = \delta y = \delta z = 0.1$ мм в декартовой системе координат. Непосредственно давление измерялось токовым датчиком Nonuewell Eclipse OEM Pressure Transducer с рабочим диапазоном $P = 0–20.413$ атм с холостым током $i_0 = 4$ мА и линейной зависимостью перепада давления от тока $dP/di = 1.2927 \times 10^8$ Па/А. Сила тока измерялась цифровым микроамперметром с точностью $\delta i = 1$ мкА.

Измерение полного давления при расходе аргона 2.5 г/с производилось вдоль оси струи с шагом $\Delta x = 10 \pm 1$ мм, при двух различных значениях тока $I_1 = 200$ А и $I_2 = 250$ А. По полученным данным на основе линейной зависимости тока датчика от давления и данным спектроскопических измерений температуры определялась плотность потока $\rho = \frac{p\mu(T)}{RT}$ (p – статическое (атмосферное) давление, T – температура, $\mu = \mu(T)$ – средняя молярная масса смеси по данной температуре, R – универсальная газовая постоянная) и скорость потока $v = \left[2 \frac{p_0 - p}{\rho} \right]^{1/2}$, где $p_0 - p$ измеряется токовым датчиком [21]. При расчете погрешностей измеряемых и рассчитываемых величин учитывалось, что точность установки положения (абсолютная погрешность) по оси z составляет $\delta z = 1$ мм, остальные погрешности определяются из следующих соотношений:

$$\left. \begin{aligned} p_0 - p &= \frac{\rho(T)v^2}{2}, \\ i \left(\frac{dp}{di} \right) &= \frac{\rho(T)v^2}{2}, \\ \delta i \left(\frac{dp}{di} \right) &= \frac{p\delta T}{RT} \left(\mu'(T) - \frac{\mu(T)}{T} \right) + \rho(T)v\delta v \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \sigma_v = \frac{\delta v}{v} = \frac{1}{2} \left[\frac{\delta i}{i} + \delta T \left(\frac{\mu'(T)}{\mu(T)} - \frac{1}{T} \right) \right],$$

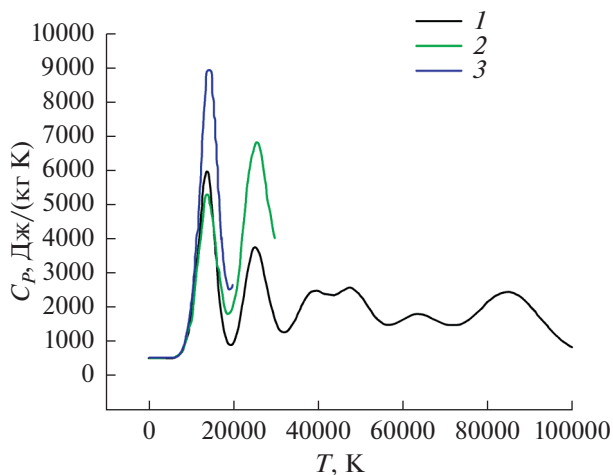


Рис. 5. Зависимость теплоемкости аргона от температуры по данным различных авторов: 1 – [22], 2 – [23], 3 – [24].

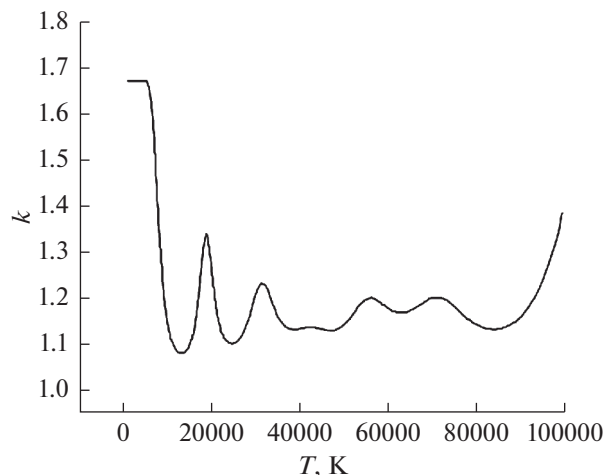


Рис. 6. Зависимость показателя адиабаты аргона при атмосферном давлении от температуры по данным [14].

где штрихом обозначена производная по температуре, а σ_v – относительная погрешность скорости.

В табл. 3 приведены полученные спектральными методами зависимости температуры от расстояния от среза сопла в плазме аргона при расходе 2.5 г/с.

При расчете температуры на различных расстояниях для значения тока 200 А использовалось значение температуры $T_1 = 11902 \pm 497$ К, осредненное по области вблизи выходного сечения сопла; для значения тока 250 А – осредненное аналогичным образом значение температуры $T_2 = 11983 \pm 941$ К.

Следует обратить внимание на то, что из-за малой зоны измерения температуры невозможно выполнить линейную экстраполяцию температуры на дальние расстояния от сопла (происходит переход через ноль). Вследствие больших температурных погрешностей были выбраны следующие данные, полученные по оцифрованным кривым (рис. 5–7) и приведенные в табл. 4.

На рис. 5 показаны зависимости теплоемкости аргона от температуры по данным различных авторов [22–24]. На рис. 6 и 7 представлены зависимости показателя адиабаты аргона при атмосферном давлении от температуры и зависимость скорости звука от температуры по данным работы [22].

В табл. 5 и 6 и рис. 8 представлены результаты измерений скорости плазменного потока для двух значений тока.

Измерения показали, что в зависимости от начальных условий на расстоянии 0–30 мм от среза сопла скорость потока плазмы изменяется от 990 до 300 м/с (рис. 8).

Оценка погрешностей:

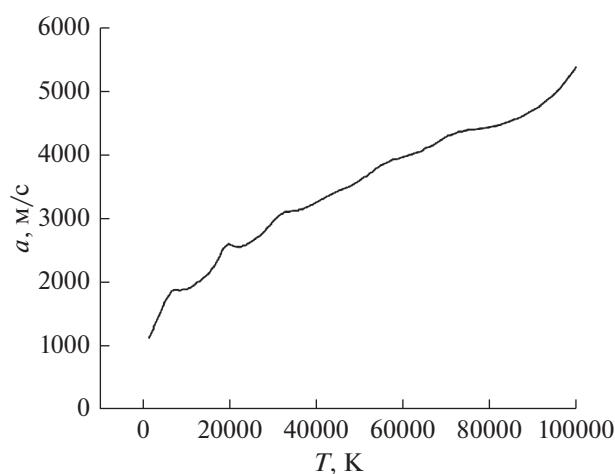


Рис. 7. Зависимость скорости звука от температуры при атмосферном давлении по данным [14].

Таблица 4. Обобщенные данные по выбранным температурам

I, A	200	250
T, K	11815.7	12181.1
$c_p, Дж/(моль K)$	163.1	182.1
$C_p, Дж/(кг K)$	4082.9	4559.9
$c_v, Дж/(моль K)$	154.8	173.8
k (показатель адиабаты)	1.053	1.047
$a, м/с$ (скорость звука)	1608.6	1628.7
Плотность, $кг/м^3$	0.0412	0.04002
$\ln(k)$	0.052	0.04669
Первая производная от $\ln(k)$	0.000021648	0.000014873

Таблица 5. Измерения для $I = 200$ А

Z, м	i, mA	$i - i_0$, 10^{-5} А	$P_0 - P$, Па	v, м/с	lambda*
0.027	4.07	4.00	5103.25	351.689	0.21862
0.0255	4.07	4.00	5103.25	351.689	0.21862
0.024	4.08	5.00	6379.063	393.2003	0.24443
0.0225	4.09	6.00	7654.875	430.7293	0.26776
0.021	4.1	7.00	8930.688	465.2408	0.28921
0.0195	4.11	8.00	10206.5	497.3634	0.30918
0.018	4.12	9.00	11482.31	527.5335	0.32793
0.0165	4.14	11.0	14033.94	583.2103	0.36254
0.015	4.15	12.0	15309.75	609.1433	0.37866
0.0135	4.16	13.0	16585.56	634.0164	0.39413
0.012	4.18	15.0	19137.19	681.0429	0.42336
0.0105	4.21	18.0	22964.63	746.0451	0.46377
0.009	4.22	19.0	24240.44	766.4885	0.47647
0.0075	4.22	19.0	24240.44	766.4885	0.47647

Примечание: lambda* – скорость, приведенная к скорости звука.

$$a^2 = \frac{k(T)RT}{\mu}$$

$$\sigma_a = \frac{\delta a}{a} = \frac{1}{2} \left(\frac{\delta k(T)}{k} + \frac{\delta T}{T} \right) =$$

$$= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{k} \frac{dk(T)}{dT} + \frac{1}{T} \right) \delta T = \frac{1}{2} \left(\frac{d \ln(k(T))}{dT} + \frac{1}{T} \right) \delta T,$$

$$\sigma_{a1} = 0.0155, \quad \sigma_{a2} = 0.0323,$$

$$v^2 = 2 \frac{P_0 - P}{\rho}, \quad \sigma_v = \frac{\delta v}{v} = \frac{1}{2} \left(\frac{\delta i}{i} + \frac{\delta T}{T} \right),$$

$$\sigma_{v1} = 0.021, \quad \sigma_{v2} = 0.040.$$

Погрешность установки осевой координаты составила 10^{-4} м.

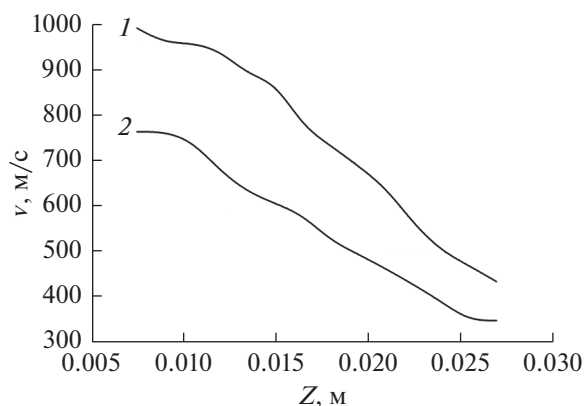


Рис. 8. Зависимость скорости потока плазмы аргона от расстояния от среза сопла при токах: 1 – 250, 2 – 200 А.

Таблица 6. Измерения для $I = 250$ А

Z, м	i, mA	$i - i_0$, 10^{-5} mA	$P_0 - P$, Па	v, м/с	lambda*
0.027	4.1	6.00	7654.875	437.3514	0.26851
0.0255	4.11	7.00	8930.688	472.3935	0.29003
0.024	4.12	8.00	10206.5	505.0099	0.31005
0.0225	4.14	10.0	12758.13	564.6182	0.34665
0.021	4.17	13.0	16585.56	643.7638	0.39524
0.0195	4.19	15.0	19137.19	691.5133	0.42456
0.018	4.21	17.0	21688.81	736.1721	0.45198
0.0165	4.23	19.0	24240.44	778.2725	0.47782
0.015	4.28	24.0	30619.5	874.7028	0.53703
0.0135	4.29	25.0	31895.31	892.7398	0.5481
0.012	4.32	28.0	35722.75	944.787	0.58006
0.0105	4.33	29.0	36998.56	961.5102	0.59032
0.009	4.33	29.0	36998.56	961.5102	0.59032
0.0075	4.35	31.0	39550.19	994.113	0.61034

На основе калориметрических измерений были определены тепловые потоки, отводимые водой при охлаждении цилиндрических торцов калориметра из меди (рис. 9), где площади секций 1, 2, 3 соответствуют $S_1 = 1$ см², $S_2 = 3$ см², $S_3 = 9$ см² при изменении расстояния h от среза сопла от 15 до 30 мм.

Результаты измерений приведены в табл. 7 и рис. 10.

Из рис. 10 видно, что при мощности плазмотрона $P \approx 5-10$ кВт и расстояния от среза сопла 15–30 мм плазменная струя при нормальном ее падении на калориметр обеспечивает удельные тепловые потоки в пределах 0.02–0.41 кВт/см². С увеличением расстояния тепловой поток на все секции калориметра становится практически равномерным из-за слабо расходящейся струи, благодаря углу раскрытия канала газоразрядного тракта.

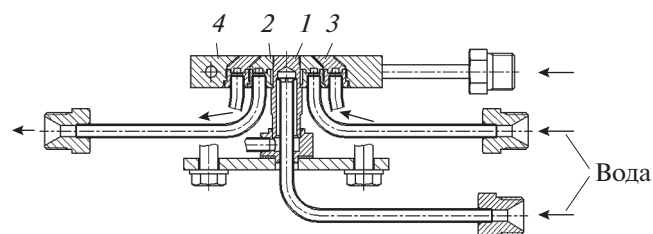


Рис. 9. Многосекционный калориметр: 1 – центральная секция, 2 – вторая секция, 3 – третья секция, 4 – корпус калориметра.

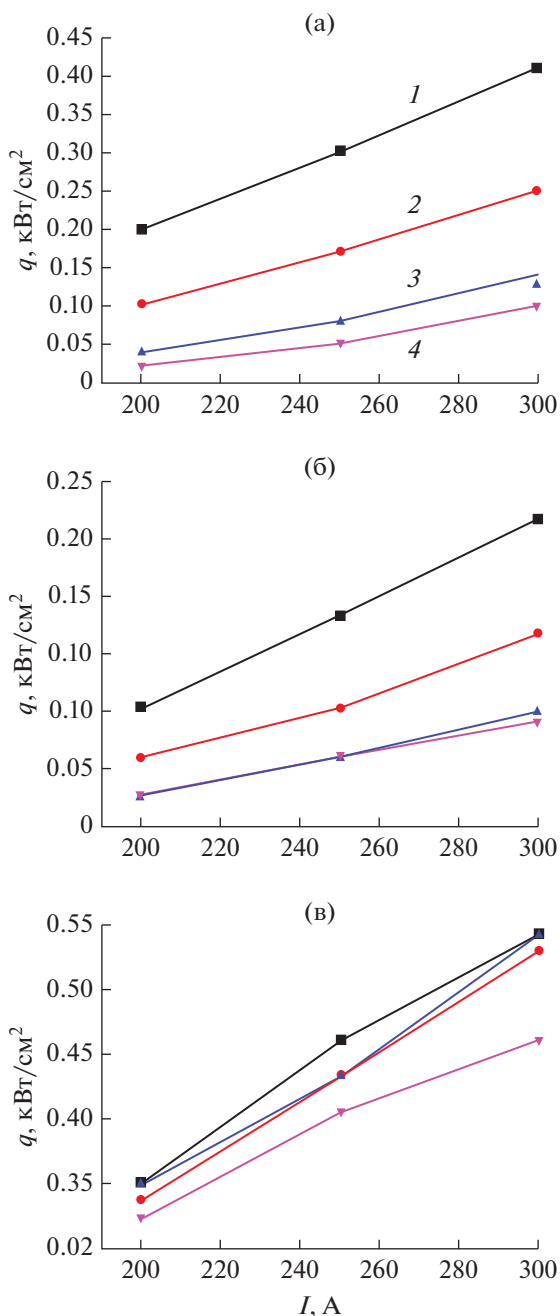


Рис. 10. Удельные тепловые потоки в первой – (а), второй – (б), третьей – (в) секциях: 1 – 15, 2 – 20, 3 – 25, 4 – 30 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для исследования теплофизических, электродинамических и оптических свойств аргона, а также осуществления различных плазмохимических реакций создан генератор постоянного тока высокоэнтальпийной плазменной струи аргона с самоустанавливающейся длиной дуги и расширяющимся каналом выходного электрода. ГНП позволяет получать на выходе слабосходящуюся

Таблица 7. Калориметрические измерения

$G, \text{ г/с};$ $h, \text{ мм}$	$I, \text{ А}$	$U, \text{ В}$	$q_1,$ кВт/см^2	$q_2,$ кВт/см^2	$q_3,$ кВт/см^2
2.5; 30	200	30.3	0.02	0.0233333	0.0232203
	250	31	0.05	0.05	0.0348304
	300	31.8	0.1	0.0766667	0.0425705
2.5; 25	200	30.3	0.04	0.0233333	0.0270903
	250	31.1	0.08	0.05	0.0387005
	300	31.7	0.14	0.0833333	0.0541806
2.5; 20	200	30.5	0.1	0.05	0.0251553
	250	31.2	0.17	0.0866667	0.0387005
	300	31.8	0.25	0.14	0.0522456
2.5; 15	200	30.5	0.2	0.0866667	0.0270903
	250	31.2	0.3	0.1533333	0.0425705
	300	31.7	0.41	0.2233333	0.0541806

ся плазменную струю аргона (с углом раскрытия $2\alpha = 12^\circ$) 5–8 мм с энтальпией 5–10 кДж/г и среднemasсовой температурой 5–12 кК, с концентрацией электронов в приосевой плазме 10^{17} см^{-3} , при полной электрической мощности дугового разряда 2–10 кВт и расходе плазмообразующего газа 1.5–3 г/с. В зависимости от начальных условий на расстоянии 0–30 мм от среза сопла скорость потока плазмы меняется в пределах от 990 до 300 м/с. При этом обеспечиваются удельные тепловые потоки на расстоянии от среза сопла 15–30 мм в пределах 0.02–0.41 кВт/см². Увеличить тепловую мощность и удельные тепловые потоки плазменной струи при данных значениях тока и расхода плазмообразующего газа можно увеличением длины дуги (соответственно и напряжения горения), что возможно осуществить, например, вводом в конструкцию плазмотрона дополнительной межэлектродной вставки.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 18-29-24203 мк.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sanlisoy A., Carpinlioglu M.O. A Review on Plasma Gasification for Solid Waste Disposal // Int. J. Hydrogen Energy. 2017. V. 42. P. 1361.
2. Жуков М.Ф., Коротеев А.С., Урюков Б.А. Прикладная динамика термической плазмы. Новосибирск: Наука, 1975. 298 с.
3. Глебов И.А., Рутберг Ф.Г. Мощные генераторы плазмы. М.: Энергоатомиздат, 1985. 264 с.
4. Коротеев А.С., Миронов В.М., Свирчук Ю.С. Плазмотроны: конструкции, характеристики, расчет. М.: Машиностроение, 1993. 296 с.
5. Жуков М.Ф., Засыткин И.М., Тимошевский А.Н. и др. Электродуговые генераторы термической плазмы.

- Низкотемпературная плазма. Т. 17. Новосибирск: Наука, СП РАН, 1999. 712 с.
6. *Асиновский Э.И., Кириллин А.В., Низовский В.Л.* Стабилизированные электрические дуги и их применение в теплофизическом эксперименте. 2-е изд. испр. и доп. М.: Физматлит, 2008. 264 с.
 7. *Шейндлин А.Е., Асиновский Э.И., Батулин В.А., Батенин Б.М.* Установки для получения плазмы и изучения ее свойств // ЖТФ. 1963. Т. 33. № 10. С. 1169.
 8. *Исакаев Э.Х., Синкевич О.А., Тюфтяев А.С., Чиннов В.Ф.* Исследование генератора низкотемпературной плазмы с расширяющимся каналом выходного электрода и некоторые его применения // ТВТ. 2010. Т. 48. № 1. С. 105.
 9. *Исакаев Э.Х., Тюфтяев А.С., Гаджиев М.Х.* // ФХОМ. 2016. № 3. С. 27.
 10. *Башкатов В.А., Исакаев Э.Х., Крешин М.Б. и др.* Электродуговой плазматрон. А. с. № 814250 СССР. 1979. МКИ НО 5В 7/22.
 11. *Асиновский Э.И., Пахомов Е.П., Ярцев И.М.* Определение вязкости плазмы аргона с помощью стабилизированной электрической дуги // ТВТ. 1978. Т. 16. № 1. С. 28.
 12. *Асиновский Э.И., Пахомов Е.П., Ярцев И.М.* Исследование характеристик течения плазмы в канале дуги // ТВТ. 1971. Т. 9. № 6. С. 1119.
 13. *Чиннов В.Ф.* Экспериментальное исследование термической и неравновесной плазмы инертных и молекулярных газов. Дис. докт. физ.-мат. наук. М., 2002. 261 с.
 14. *Белевцев А.А., Исакаев Э.Х., Маркин А.В., Чиннов В.Ф.* Спектроскопический анализ пространственных распределений параметров плазмы в высокоэнтальпийных потоках аргона и азота // ТВТ. 2002. Т. 40. № 1. С. 21.
 15. Низкотемпературная плазма / Под ред. Энгельшта В.С., Урюкова Б.А. Т. 1. Теория столба электрической дуги. Новосибирск: Наука, 1990. 376 с.
 16. *Артемов В.И., Левитан Ю.С., Синкевич О.А.* Неустойчивости и турбулентность в низкотемпературной плазме. М.: Изд-во МЭИ, 1994. 402 с.
 17. *Gadzhiyev M. Kh., Sargsyan M.A., Tereshonok D.V., Tyuftyaev A.S.* Investigation of the Argon Arc Binding to the Lanthanated Tungsten Cathode // EPL. 2015. V. 111. 25001.
 18. *Очкин В.Н.* Спектроскопия низкотемпературной плазмы. М.: Физматлит, 2006. 472 с.
 19. *Биберман Л.М., Воробьев В.С., Якубов И.Т.* Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы. М.: Наука, 1982. 378 с.
 20. *Чиннов В.Ф.* Излучательные свойства и спектроскопия низкотемпературной плазмы М.: ИД МЭИ, 2012. 168 с.
 21. *Gadzhiyev M.Kh., Kulikov Y.M., Panov V.A., Son E.E., Tyuftyaev A.S.* Supersonic Plasmatron Nozzle Profiling with the Real Properties of High Temperature Working Gas // High Temp. 2016. V. 54. № 1. P. 38.
 22. *Eisazadeh-Far K., Metghalchi H., Keck J.C.* Thermodynamic Properties of Ionized Gases at High Temperatures // J. Energy Resources Technology. 2011. V. 133. 022201-1.
 23. *Дресвин С.В., Иванов Д.В.* Физика плазмы. Учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. 544 с.
 24. *Tanaka M., Tashiro S., Satoh T., Murphy A.B., Lowke J.J.* Influence of Shielding Gas Composition on Arc Properties in TIG Welding // Science and Technology of Welding and Joining. 2008. V. 13. № 3. P. 225.