

Исследование параметров газа в газоразрядном тракте генератора низкотемпературной плазмы при холодной продувке

Ю. М. Куликов, М. Х. Гаджиев и Д. И. Юсупов

Объединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., д. 13, стр. 2, Москва, Россия

E-mail: kulikov-yurii@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 26 июня 2026 г.

Аннотация. Для генератора низкотемпературной плазмы с анодом, представляющим собой полый конус, сопряженный с цилиндром, экспериментально и численно исследовано распределение давления при холодной продувке для различных расходов газа. Получено удовлетворительное согласие для профилей давления у стенки. С помощью численного моделирования установлены параметры газа в межэлектродном зазоре, важные для зажигания дежурной дуги. Обсуждается влияние больших расходов на параметры газа в тракте плазмотрона.

1. ВВЕДЕНИЕ

Генератор низкотемпературной плазмы (ГНП) [1] — это устройство, в котором электрическая дуга нагревает плазмообразующий газ до высоких температур. По способу возбуждения разряда ГНП делятся на дуговые, высокочастотные и сверхвысокочастотные. Кроме того, ГНП различаются устройством газового тракта, типом плазмообразующего газа и мощностью.

Устройство тракта плазмотрона решающим образом влияет на устойчивость дуги, срок службы электродов и характеристики плазменной струи. Во многих ГНП используется начальная закрутка поступающего потока газа: при тангенциальной подаче газа образуется высокоскоростной вихрь, создающий область разрежения на оси канала. Это позволяет стабилизировать положение дуги, а также сообщить движение частям дуги, располагающимся ортогонально основному потоку (ножка дуги). В плазмотронах с вихревой стабилизацией исходящая струя газа является завихренной (турбулентной). В ГНП с малой мощностью возможно создание ламинарных плазменных струй, отличающихся большой устойчивостью.

Расположение и форма электродов также могут быть весьма разнообразными. Могут использоваться стержневые электроды, катод при этом имеет заостренную форму и оснащается специальной вставкой из вольфрама или гафния. Электроды могут иметь и цилиндрическую форму [2]. Она является предпочтительной в ГНП для плазменного напыления. В мощных промышленных установках (например, в очистке сточных вод или металлургии) могут использоваться три или более электродов (плазмотроны типа “Звезда” [3]). Такая конструкция значительно увеличивает срок службы электродов и позволяет достичь очень высоких уровней мощности (мегаватт).

Уровень мощности ГНП может отличаться на несколько порядков: плазмтроны малой мощности (до 1 кВт) используются в точной сварке (например, в производстве медицинских изделий), зубных протезах и аналитических приборах (спектрометры с индуктивно связанной плазмой). К устройствам средней мощности (от 1 кВт до 200 кВт) относятся промышленные устройства для плазменной резки и напыления. ГНП высокой мощности (от 200 кВт до нескольких МВт) используются при стекловании опасных отходов, газификации твердых бытовых отходов, восстановлении руды, производстве ферросплавов и порошка диоксида титана (TiO_2).

По условиям эксплуатации плазмтроны делятся на работающие в атмосфере воздуха или в инертной среде (среде с контролируемым газовым составом). По способу запуска дежурной дуги: высокочастотная искра или контактное зажигание. Последний метод надежнее и не создает электромагнитных помех.

Цель настоящей работы — экспериментально и численно исследовать распределение статического давления в газоразрядном тракте ГНП постоянного тока при холодной продувке азотом в диапазоне расходов 1.25–2.25 г/с, установить влияние расхода на параметры газа в межэлектродном зазоре и оценить условия, важные для зажигания дежурной дуги.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Задача в экспериментальной части ставится следующим образом. Через систему подводящих каналов в основной тракт ГНП подается азот со статической температурой, равной температуре окружающей среды ($T = 298$ К). Система подводящих каналов ориентирует газ таким образом, чтобы он двигался в радиальном или осевом направлении, без азимутального движения (закрутка отсутствует). Общий вид газового тракта с положением дренажных отверстий представлен на рисунке 1.

При расходах $G = 1.25, 1.5, 1.75, 2.0, 2.25$ г/с выполняется измерение статического давления в точках со следующими координатами относительно выходного сечения плазмтрона (в радиальной системе координат) (z, r), мм: (1) — (45, 2.15), (2) — (41, 2.55), (3) — (37, 2.95), (4) — (17, 4.5), (5) — (7, 4.5).

В основе измерительной системы лежит токовый датчик Honeywell Eclipse OEM Pressure Transducer с рабочим диапазоном $p = 0\text{--}20.413$ атм с холостым током $i_0 = 4$ мА и линейной зависимостью перепада давления от тока $dP/di = 1.2927 \times 10^8$ Па/А. Ток измерялся цифровым микроамперметром с точностью $\delta i = 1$ мкА. Полное описание диагностического комплекса представлено в работе [2].

3. МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Численное моделирование плазмтронов является сложной задачей [4], которая находится на стыке нескольких дисциплин: физики плазмы, газовой

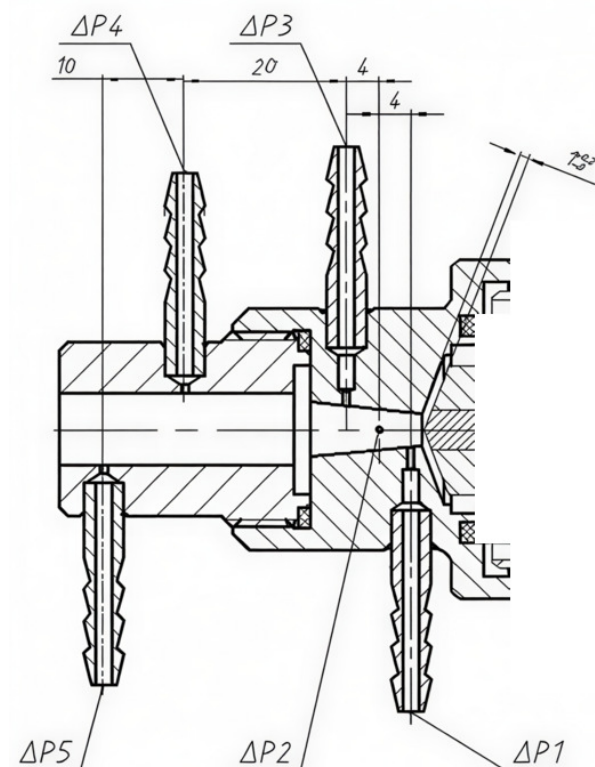


Рисунок 1. Конический и цилиндрический участки газового тракта плазматрона с расположением дренажных отверстий, ΔP_1 — точки подключения датчика давления.

динамики, электродинамики, теплофизики и материаловедения. Ее сложность обусловлена несколькими связанными процессами, происходящими в устройстве. Вблизи электродов (катода и анода) формируются приэлектродные слои, в которых происходит основное падение потенциала. Их толщина составляет порядка десятков длин Дебая (микроны или нанометры), тогда как размер всей расчетной области составляет десятки сантиметров. Прямое разрешение этих слоев в трехмерной модели невозможно, а использование эмпирических граничных условий часто приводит к ошибкам в предсказании распределения тепловых потоков и эрозии электродов.

В зависимости от целей, в инженерных расчетах могут применяться модели различной сложности (чистый тепло- и массообмен, учет МГД-эффектов, излучения) и пространственной размерности (нульмерные, осесимметричные, трехмерные).

Расчетная геометрия представлена на рисунке 2. Она дополнительно рассекается двумя плоскостями: поперек оси симметрии на выходном срезе сопла ($z = 0$), а также параллельной плоскостью, проходящей через острие катода. Обе плоскости определяют контрольные сечения, в которых измеряется расход. Сетка с ячейками различного размера генерируется на основе геометрического параметра h , задаваемого относительно диаметра выходного сечения сопла $D = 9$ мм как $h = D/32$. В области, занятой затопленной струей, строятся ячейки с характерным размером $2h$, в газовом тракте плазматрона — с размером $h/2$, в окрестности

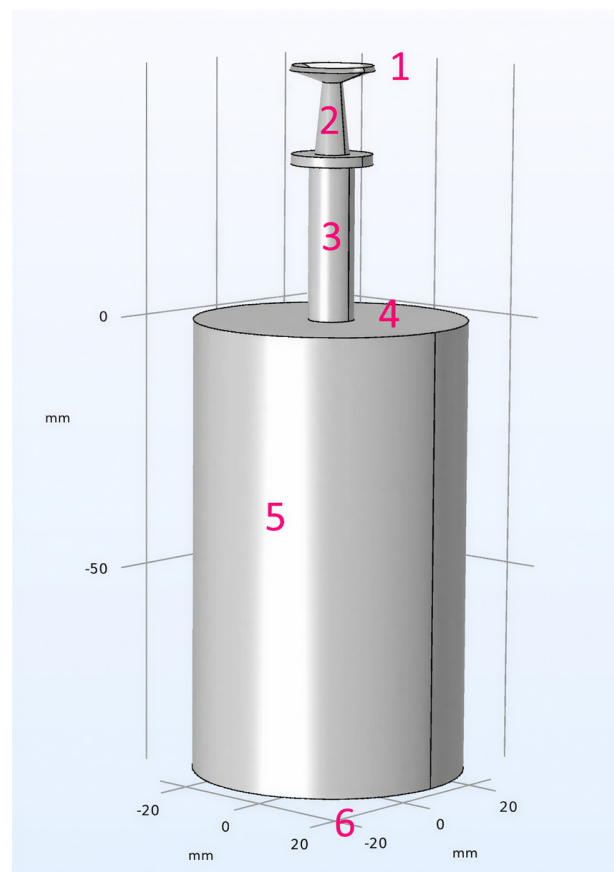


Рисунок 2. Области расчетной геометрии: 1 — межэлектродный зазор, 2 — конический участок сопла, 3 — цилиндрический участок сопла, 4 — стенка, через которую изливается затопленная струя, 5, 6 — свободная поверхность.

острия катода, а также по круглым границам ниже по потоку до среза сопла — с размером $h/4$. Во всей расчетной области строится сетка из тетраэдров. На границах с условием прилипания внутри тракта плазматрона формируются пограничные слои из треугольных призм, число пограничных слоев — 9, толщина первого слоя 0.005 мм, толщина каждого последующего слоя увеличивается в 1.2 раза. На внешней границе межэлектродного зазора (1) задается условие дозвукового входа с параметрами: $p = 98000$ Па — статическое давление на входе, $G = 1.25, 1.5, 1.75, 2.0, 2.25$ г/с — массовый расход, $T = 293.15$ К — статическая температура на входе, $R_g = 296.8$ Дж/(кг·К) — газовая постоянная для азота. На основе этих величин рассчитываются параметры газа на границе: плотность ρ , нормальная скорость на границе (скорость втекания) V_n , скорость звука c , а также число Маха M . На поверхности газового тракта плазматрона (межэлектродный зазор 1, коническая и цилиндрическая части 2, 3), а также на границе, смежной с затопленной струей 4, задавалось условие типа “стенка” (теплоизоляция, прилипание жидких частиц). На боковых и нижней границах (7, 8, 9) — условие свободного выхода для дозвукового потока.

Для работы стационарного решателя уравнение для закона сохранения массы записываются в дивергентной форме, а уравнения для энергии и импульса — в недивергентной, без производной по времени. Для уравнения состояния используется модель

совершенного газа. Предполагается, что зависимость коэффициентов переноса (теплопроводности и вязкости) от температуры описывается законом Сазерленда [5]. В качестве начальных условий во всей расчетной области задается неподвижная среда с параметрами окружающей среды (давление $p = 101325$ Па и температура $T = 293.15$ К). Материальные параметры газа (газовая постоянная, теплоемкость, коэффициенты переноса) соответствуют азоту.

Для заданного значения расхода G расчет выполняется в следующей последовательности. Сначала решается стационарная задача, итерации продолжаются до достижения критерия сходимости (число итераций — 12), что позволяет получить начальное приближение для всех неизвестных. Полученные распределения используются в качестве начальных данных для нестационарного решателя. Нестационарная задача решается на интервале до $t = 2$ с с шагом выдачи результатов $t = 1$ мс. Для сравнения с экспериментальными данными проводится усреднение по времени поля скорости по полученному дискретному набору контрольных точек. Переход к нестационарной задаче может привести к тому, что первоначальное стационарное решение может оказаться неустойчивым относительно возмущений, развивающихся в потоке, и разрушиться. В этом случае часть результатов в начале расчета (не более 500 точек) исключается из процесса усреднения.

Для сопоставления результатов экспериментальных и численных исследований проводится сравнение данных для давления. По усредненным полям давления строятся профили вдоль конической и цилиндрической секций газового тракта плазматрона. В конической части сопла визуализация проводится на отрезке, ограниченном точками с координатами (46.6, 2)–(32.5, 3.4) мм, в цилиндрической — с координатами (30.499, 4.4824)–(0, 4.4802) мм, точкой отсчета является пересечение плоскости среза сопла плазматрона и оси газового тракта.

На рисунке 3 представлено распределение статического давления в тракте плазматрона. Форма тракта плазматрона оказывает решающее влияние на давление: в конической части сопла оно превышает референсное, в то время как в цилиндрической, наоборот, ниже. Повышение давления в верхней части конической секции связано со столкновением струй газа при центростремительном движении в межэлектродном зазоре. В дальнейшем площадь сечения увеличивается, что приводит к уменьшению давления. Соответственно, в цилиндрической части давление является почти постоянным, однако оно ниже референса вследствие сохранения высокой скорости газа. Увеличение расхода приводит к повышению давления в конической части и к его одновременному уменьшению в цилиндрической. Результаты численного моделирования согласуются с экспериментом: профиль давления в зависимости от расхода ведет себя аналогично. Наибольшие различия приходятся на диффузорную часть сопла и, возможно, связаны с различиями в величине межэлектродного зазора, т.к. данный параметр недоступен для непосредственного измерения.

На рисунке 4 представлены осевые профили модуля скорости при различных расходах газа. Видно, что в окрестности катода ($z \approx 44$ мм) происходит резкое

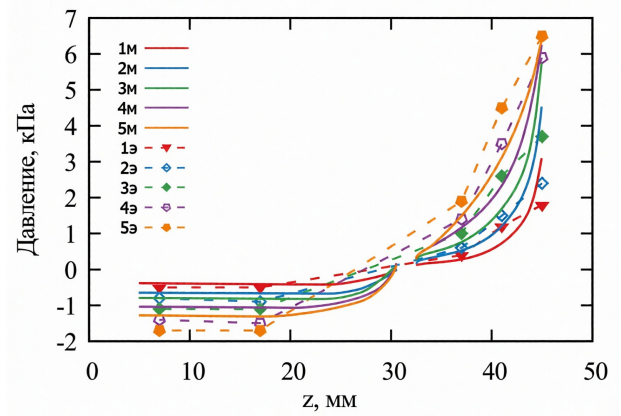


Рисунок 3. Сравнение значений статического давления, полученных в экспериментах (э) и моделировании (м) при различных расходах G (г/с): 1 — 1.5, 2 — 1.75, 3 — 1.75, 4 — 2.0, 5 — 2.25.

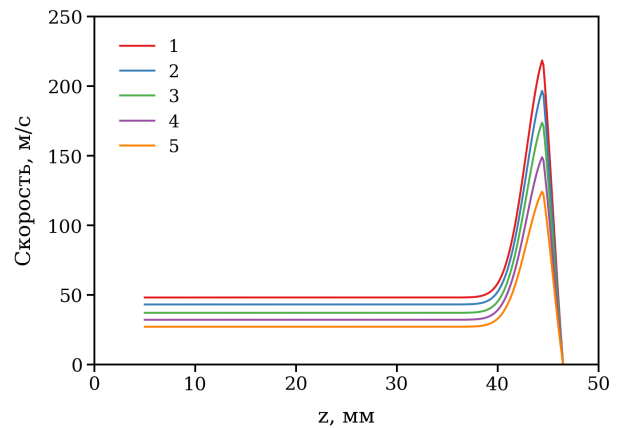


Рисунок 4. Распределение усредненной продольной скорости на оси канала при различных значениях расхода G (г/с): 1 — 1.5, 2 — 1.75, 3 — 1.75, 4 — 2.0, 5 — 2.25. Результаты расчетов.

ускорение потока, при этом число Маха может достигать $M \approx 0.7$. Струя является дозвуковой и, в отсутствии других факторов, увеличение скорости является следствием уменьшения площади проходного сечения при приближении к катоду. Дальнейшее увеличение расхода приведет к возникновению трансзвукового режима в окрестности катода, т.е. возможно запирание межэлектродного зазора по расходу, что в свою очередь приведет к повышению давления в межэлектродном зазоре и ухудшению условий работы источника питания, обеспечивающего пробой и зажигание дежурной дуги.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на основе сравнения экспериментальных данных о распределении давления по длине газового тракта ГНП с результатами численного моделирования установлено влияние расхода на параметры газа при холодной продувке. Увеличение расхода вызывает повышение давления в межэлектродном зазоре, что в дальнейшем может привести к запиранию межэлектродного зазора по расходу и ухудшению условий работы источника питания, осуществляющего пробой.

Профили давления у стенки, полученные численно, находятся в удовлетворительном согласии с результатами экспериментов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Государственное задание № 075-00269-25-00).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жуков М Ф, Засыпкин И М, Тимошевский А Н, Михайлов Б И и Десятков Г А 1999 *Электродуговые генераторы термической плазмы (Низкотемпературная плазма т. 17)* (Новосибирск: Наука, СО РАН)
2. Сон Э Е, Гаджиев М Х и Куликов Ю М 2020 *TBT* **58** 536–562
3. Коротеев А С, Миронов В М и Свирчук Ю С 1993 *Плазмотроны: конструкции, характеристики, расчет* (Москва: Машиностроение)
4. Boulos M I, Fauchais P L and Pfender E 2017 *Handbook of Thermal Plasmas* (Cham: Springer)
5. Sutherland W 1893 *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* **36** 507–531