

## Высоковольтный плазмотрон переменного тока: динамика плазмообразующего газа

© Н.Ю. Быков<sup>1,2</sup>, Н.В. Образцов<sup>1,2</sup>, А.В. Суров<sup>2</sup>, А.А. Дьяченко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: nbykov2006@yandex.ru, obratzovnikita@yandex.ru

Поступило в Редакцию 2 мая 2024 г.

В окончательной редакции 1 июля 2024 г.

Принято к публикации 30 октября 2024 г.

Развита математическая модель мультифизических процессов, протекающих в плазмотроне переменного тока. Проведено численное исследование динамики плазмообразующего газа (воздуха) для однофазного плазмотрона, разработанного в ИЭЭ РАН, работающего при атмосферном давлении. Выполнено сравнение результатов расчета с экспериментальными данными. Предложенная модель и вычислительный алгоритм могут использоваться для оценки параметров газа в каналах плазмотрона и области реактора при разработке современных технологий синтеза/деструкции материалов.

**Ключевые слова:** плазмотрон переменного тока, компьютерное моделирование, динамика плазмообразующего газа, процессы теплопереноса.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.23.59395.6529k

Высоковольтные электродуговые плазмотроны переменного тока, разработанные в ИЭЭ РАН для работы на воздухе и нейтральных газах, имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционными плазмотронами постоянного тока, которые заключаются в продолжительном ресурсе непрерывной работы и высоком термическом КПД [1]. Для генерирования низкотемпературной плазмы в ИЭЭ РАН представлен ряд установок: однофазные плазмотроны (мощностью 5–15 kW), трехфазные плазмотроны со стержневыми электродами (30–75 kW) и мощные трехфазные плазмотроны с полыми электродами (150–500 kW).

Актуальные плазмохимические приложения предполагают применение таких устройств для получения водорода, синтеза новых материалов, повышения эффективности использования углеводородных топлив и переработки отходов. Разработка указанных технологий требует надежного инструмента определения газодинамических параметров плазмообразующего газа в „рабочем“ объеме, который в общем случае включает как внутренние каналы плазмотрона, так и область расширения струи плазмы в реакторе. В последнее десятилетие в качестве такого инструмента выступает компьютерное моделирование, базирующееся на математических моделях мультифизических процессов. Несмотря на существенный прогресс в области разработки моделей и вычислительных сценариев расчета для коммерческих пакетов [2–4], основным барьером на пути их широкого использования является отсутствие их надежной верификации.

Настоящая работа преследует три цели: 1) развить подход, предложенный в [4] для расчета мультифизических процессов в реальном плазмотроне; 2) выполнить численное исследование динамики плазмооб-

разующего газа и установить характерные значения параметров, критических для разработки технологий синтеза/деструкции материалов; 3) выполнить сравнение полученных данных с результатами специально проведенного эксперимента.

Рассматривается однофазный плазмотрон переменного тока с двумя цилиндрическими каналами диаметра  $d = 32$  mm, работающий при атмосферном давлении (рис. 1). Плазмообразующий газ — воздух. Начальные секции каналов содержат отверстия для тангенциальной подачи газа с заданным расходом  $G$  ( $G/2$  — в расчете на один канал) и стержневые электроды. Между электродами горит дуга, захватывая как области каналов, так и область за их пределами. Амплитудные значения тока в дуге находятся в пределах 5–20 А. Частота тока  $f = 50$  Hz. Слабоионизированная плазма истекает в открытое пространство, нагревая окружающий газ.

Модель динамики плазмообразующего газа предполагает совместное решение системы уравнений Навье–Стокса для сжимаемого теплопроводного газа и уравнения для потенциала электрического тока. Подробное описание модели приведено в [4].

Основным отличием нашего исследования является полностью трехмерная постановка задачи, позволяющая рассматривать несоосное расположение каналов и моделировать тангенциальную подачу плазмообразующего газа. Дополнительно в уравнении баланса энергии учитываются потери на излучение. Вычислительный сценарий реализован в коммерческом пакете Comsol Multiphysics.

Нестационарный характер изменения тока обуславливает 1) осциллирующий характер изменения параметров плазмообразующего газа; 2) различия в пространственных распределениях параметров в зависимости от

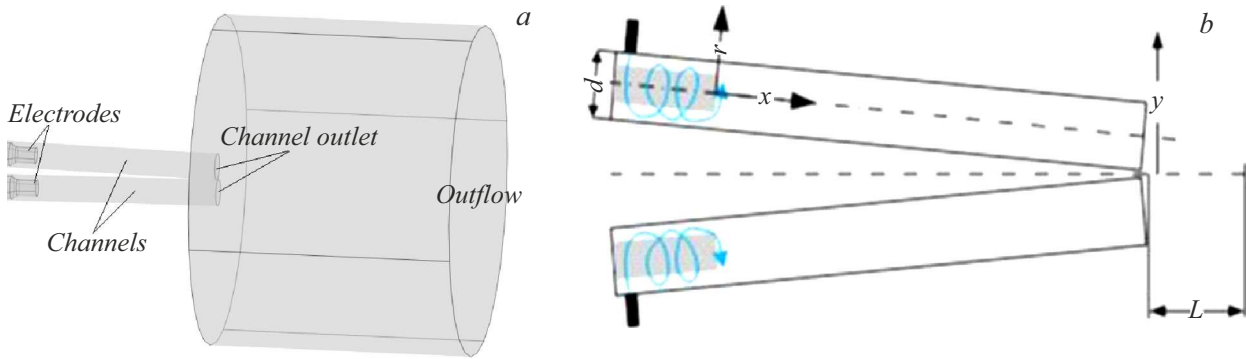


Рис. 1. Схема установки. *a* — общий вид расчетной области; *b* — геометрия каналов.

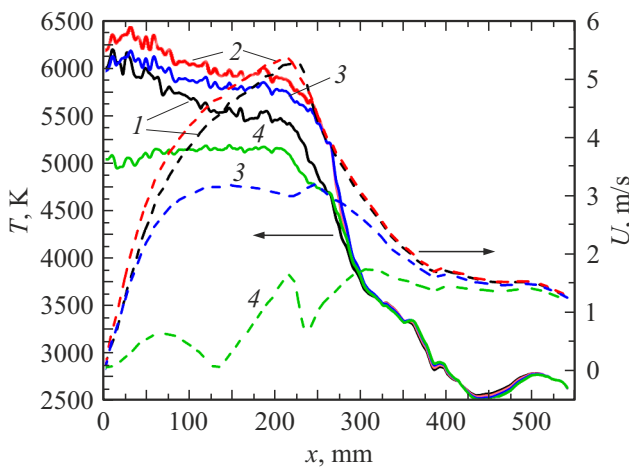


Рис. 2. Распределение скорости (штриховые линии) и температуры (сплошные линии) плазмообразующего газа вдоль оси канала (координата  $x$ ;  $x = 0$  соответствует торцу электрода) в различные моменты времени: 1 —  $1/(8f)$ , 2 —  $1/(4f)$ , 3 —  $3/(8f)$ , 4 —  $1/(2f)$ .

времени (рис. 2). При этом распределения параметров носят установившийся характер и зависят только от фазы напряжения.

Наличие тангенциальной подачи газа и процесса тепловыделения в поток приводит к сложной картине течения в каналах плазмотрона и за его пределами. В каналах тангенциальная скорость максимальна на начальном участке и снижается вниз по потоку. Распределение скорости на оси течения для  $G = 1 \text{ g/s}$  приведено на рис. 2 (расстояние отсчитывается от торца электрода вдоль оси, координата среза канала  $x/d \cong 6.9$ ). Продольная скорость возрастает вдоль канала до  $5.5 \text{ m/s}$  на срезе (для момента времени, соответствующего максимальному току дуги ( $t = 1/(4f)$ )). Далее в области открытого пространства скорость уменьшается и затем остается практически постоянной и не зависящей от времени.

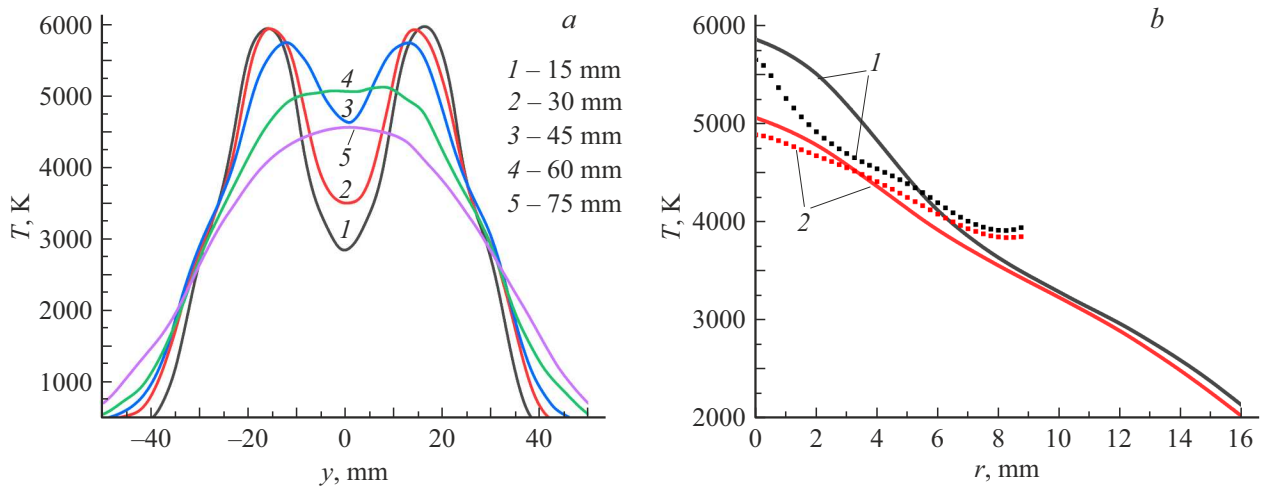
Для всех моментов времени температура слабо меняется по длине канала (рис. 2). Максимальная температура наблюдается при максимуме тока в дуге и составляет

порядка  $6000 \text{ K}$ . Минимальная температура  $5000 \text{ K}$  соответствует минимуму тока (момент времени  $t = 1/(2f)$ ). За пределами каналов температура плазмообразующего газа резко падает.

Струи истекают из каналов плазмотрона под углом друг к другу. На некотором расстоянии формируется единый плазменный факел. Данный эффект демонстрируется данными рис. 3, *a*, на котором приведено распределение поперечных температур на разных расстояниях  $L$  от плоскости, указанной на рис. 1, *b*. Расстояние, на котором струя характеризуется „общим“ профилем температуры с одним максимумом, равно примерно  $L/d = 2.3$ .

Одной из основных целей представленного исследования была проверка достоверности вычислительной модели путем сравнения с экспериментальными данными о распределении температуры в струе в непосредственной близости от выхода из канала. Экспериментальные данные (рис. 3, *b*) для нескольких пространственных точек и различных моментов времени получены с помощью оптической системы, включающей спектрограф Shamrock DV420-FK. Для определения температуры плазмы использовался автоматизированный алгоритм, оценивающий соотношение интенсивностей линий  $510.554$ ,  $515.324$ ,  $521.82$ ,  $570.024$  и  $578.213 \text{ nm}$  меди (содержащейся в малой концентрации в объеме струи из-за эрозии материала электродов и недостаточной для определения температуры при  $r > 9 \text{ mm}$ , рис. 3, *b*). На рисунке приведено распределение температуры по радиусу на расстоянии  $x/d \cong 7.8$  по оси струи (локация вне канала) для моментов времени, соответствующих максимуму и минимуму тока в струе. Видно, что поперечные распределения температуры довольно хорошо согласуются между собой. Имеющиеся различия объясняются упрощенной постановкой задачи, особенностями и погрешностью метода измерений и обработки данных.

В результате проведенного исследования разработаны математическая модель и соответствующий вычислительный алгоритм для расчета пространственного нестационарного течения плазмообразующего газа в плазмотроне переменного тока со стержневыми электрода-



**Рис. 3.** Поперечные распределения температуры. *a* — на разном расстоянии  $L$  от указанной на рис. 1, *b* плоскости. *b* — на расстоянии  $x/d \cong 7.8$  в различные моменты времени: 1 —  $1/(4f)$  (максимум тока), 2 —  $1/(2f)$  (нуль тока). Точки — экспериментальные данные.

ми для пакета Comsol Multiphysics. По имеющимся у авторов данным в рассмотренной постановке впервые выполнен расчет течения для реальной конфигурации однофазного плазмотрона, проанализированы особенности возникающего течения. Модель и вычислительный алгоритм валидированы путем сравнения с полученными для рассматриваемой конструкции экспериментальными данными. Модель позволяет предсказывать распределение температур в каналах плазмотрона и в области реактора, тем самым упрощая разработку перспективных технологий синтеза/деструкции материалов и нанесения покрытий.

## Благодарности

Результаты работы получены с использованием вычислительных ресурсов суперкомпьютерного центра Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого ([www.spbstu.ru](http://www.spbstu.ru)).

## Финансирование работы

Работа выполнена в рамках фундаментальных научных исследований по государственному заданию ИЭЭ РАН (регистрационный номер темы 122042000135-8).

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

[1] A.V. Surov, S.D. Popov, V.E. Popov, D.I. Subbotin, E.O. Serba, V.A. Spodobin, G.V. Nakonechny, A.V. Pavlov, *Fuel*, **203**, 1007 (2017). DOI: 10.1016/j.fuel.2017.02.104

- [2] S. Takali, V.J. Rohani, Y. Cressault, F. Fabry, F. Cauneau, L. Fulcheri, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **44** (6), 996 (2016). DOI: 10.1109/TPS.2016.2556720
- [3] M. Shigeta, *Plasma Chem. Plasma Process.*, **40** (3), 775 (2020). DOI: 10.1007/s11090-020-10060-8
- [4] N.Y. Bykov, N.V. Obratsov, A.A. Kobelev, A.V. Surov, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **49** (3), 1017 (2021). DOI: 10.1109/TPS.2020.3040845