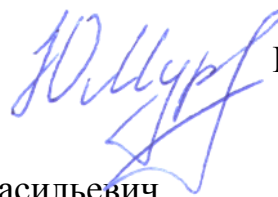


Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»



На правах рукописи

Мурашов Юрий Васильевич

**РАЗРАБОТКА ДУГОВОГО ПЛАЗМОТРОНА ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ
ПОКРЫТИЙ С УЧЕТОМ ЯВЛЕНИЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ
ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА**

Специальность 05.09.10 – Электротехнология

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор Фролов В. Я.

Санкт-Петербург – 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. Анализ состояния современных теории и практики технологии плазмотермического нанесения покрытий.....	13
1.1 Возникновение турбулентности в потоках термической плазмы.....	16
1.2 Методы стабилизации плазменного потока.....	20
1.3 Характеристики плазмотрона ПН-В1	22
1.4 Выводы и постановка задачи исследования.....	26
ГЛАВА 2. Разработка математической модели с отдельным алгоритмом решения уравнений описывающих работу дугового плазмотрона с осевой и вихревой стабилизациями плазменного потока	28
2.1 Постановка задачи и основные уравнения математической модели плазмотрона.....	29
2.2 Дифференциальные уравнения и алгоритмы решения в среде Comsol Multiphysics.....	31
2.3 Дискретизация расчетной области для численного моделирования плазмотрона.....	34
2.4 Обоснование выбора свойств воздушной плазмы.....	34
2.5 Математическая модель дугового плазмотрона с осевой подачей плазмообразующего газа	38
2.6 Результаты численного моделирования работы дугового плазмотрона с осевой подачей плазмообразующего газа.....	40

2.7 Моделирование вихревой стабилизации дугового плазмотрона в прикатодной области	47
2.8 Математическая модель дугового плазмотрона с вихревой стабилизацией столба электрической дуги и струи плазменного потока.....	52
2.9 Теплообменные процессы в струе плазмы дугового плазмотрона у поверхности частицы при ламинарном и турбулентном потоках	56
2.10 Выводы по главе.....	64
ГЛАВА 3. Экспериментальные исследования режимов работы плазмотрона ПН-В1	67
3.1 Разработка методики проведения экспериментальных исследований	67
3.2 Методика обработки результатов экспериментального исследования	75
3.3 Результаты экспериментальных исследований	78
3.4 Спектроскопический анализ плазмотрона ПН-В1	82
3.5 Выводы по главе.....	86
ГЛАВА 4. Сравнительный анализ результатов численного моделирования и экспериментального исследования дугового плазмотрона с межэлектродными вставками.....	87
4.1 Верификация математической модели по характеристики напряжения на дуге.....	87
4.2 Верификация математической модели по результатам спектрального анализа.....	88
4.3 Выводы по главе.....	92
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	93

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	96
Приложение 1. FFT анализ (MATLAB)	104
Приложение 2. Паспортные данные платформы Arduino Mega 2560.....	108

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы диссертации. Применение устройств, генерирующих низкотемпературную плазму, получило широкое распространение в промышленности. Основными примерами применения дугового разряда являются плазменное напыление, дуговая сварка и плазменная резка металлов, где в качестве рабочего инструмента используется плазменный поток, генерируемый плазмотроном. Технология плазменного напыления заключается в плавлении напыляемого материала в плазменном потоке для нанесения на рабочую поверхность и используется для нанесения восстанавливающих, жаростойких, антикоррозионных, износостойких и антифрикционных покрытий. Основными критериями качества напыляемого покрытия являются пористость и адгезия. Эффективность технологии плазменного напыления и качество наносимого покрытия зависят от свойств наносимых материалов и характеристик плазменного потока. Именно поэтому главной технологической задачей при разработке новых конструкций плазмотронов для напыления является получение оптимальных параметров плазменного потока и режимов работы плазмотрона, обеспечивающих эффективность технологического процесса, качество наносимого покрытия и высокий рабочий ресурс конструктивных элементов плазмотрона. Научные исследования, направленные на повышение эффективности технологии плазменного напыления, проводятся во всем мире, при этом можно выявить основные школы, разрабатывающие теории физических процессов низкотемпературной плазмы. В Российской Федерации выделяются Новосибирская школа, где становление основ экспериментальных исследований электродуговых генераторов плазмы осуществлялось действительным членом РАН Жуковым М.Ф., Московская школа, возглавляемая академиком РАН Цветковым Ю.В., и школа Санкт-Петербургского политехнического университета (СПбПУ), где у истоков стоял Клубникин В.С.

Московская школа сосредоточена на вопросах плазмохимии и материаловедения в технологии плазменного напыления.

Новосибирская школа рассматривает общие вопросы газовой динамики и базируется на экспериментальных исследованиях плазмогенерирующих устройств, решая прикладные задачи.

Современные программные продукты позволяют осуществлять численное моделирование физических процессов в плазмотроне, тем самым снижая затраты и время при проектировании новых типов устройств для технологии плазменного напыления, а также дают возможность оптимизации геометрии и характеристик плазмотрона, позволяя отойти от эмпирического характера разработки. Математическое моделирование и экспериментальные исследования легли в основу школы СПбПУ.

Школа СПбПУ, ныне возглавляемая Фроловым В.Я., на протяжении последних 40 лет занимается разработкой высокотехнологичного оборудования для технологического процесса напыления (разработано более сотни технологий в области плазмотермического нанесения покрытий), осуществляя сотрудничество с INP Greifswald (Германия) на протяжении многих лет, проводя совместные экспериментальные исследования. Комплексный подход в изучении плазменных технологий школы СПбПУ, включающий в себя как экспериментальные, так и теоретические исследования (в том числе численные методы) позволил стать признанным в мире центром по разработке, исследованию и численному моделированию плазмотронов, плазменных технологий и процессов.

Исследованию явлений неустойчивости плазменного потока и разработке дугового плазмотрона для нанесения покрытий и посвящена настоящая диссертация.

Цель и задачи диссертационной работы. Целью диссертационной работы является разработка дугового плазмотрона для нанесения покрытий с учетом явлений неустойчивости плазменного потока с установлением закономерности турбулизации потока на участках конструкции плазмогенерирующего устройства.

Задачи исследований

1. Анализ состояния современных теории и практики технологии плазменного нанесения покрытий.
2. Анализ физических явлений неустойчивости плазменного потока на стадиях генерирования плазмы.
3. Анализ явлений неустойчивости плазменного потока на выходе плазмотрона с учетом турбулизации генерируемого потока плазмы.
4. Разработка нестационарной математической модели дугового плазмотрона с осевой подачей плазмообразующего газа.
5. Разработка нестационарной математической модели дугового плазмотрона с вихревой стабилизацией.
6. Исследование устойчивости плазменного потока.
7. Экспериментальные исследования дугового плазмотрона с межэлектродными вставками для нанесения покрытий.

Научная новизна

1. Разработаны нестационарные математические модели дугового плазмотрона с межэлектродными вставками для нанесения покрытий с осевой подачей плазмообразующего газа и с вихревой стабилизацией электрической дуги в канале плазмотрона с учетом явлений неустойчивости плазменного потока в программном продукте Comsol Multiphysics.
2. Разработана трехмерная нестационарная математическая модель формирования вихревой подачи газа в катодном узле плазмотрона, получены полиномиальные зависимости распределения составляющих скорости на выходе катодного узла в программном продукте Comsol Multiphysics.
3. Разработана математическая модель теплообменных процессов у поверхности частицы в ламинарном и турбулентном течениях.
4. Произведено уточнение критического числа Рейнольдса для существующей конструкции дугового плазмотрона с межэлектродными вставками.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке:

- математических моделей плазмотрона с межэлектродными вставками, позволяющих минимизировать экспериментальные исследования при разработке новых конструкций плазмотронов, обеспечивающих стабильность плазменного потока с целью повышения эффективности процесса плазменного нанесения покрытий;
- требований к конструкции плазмотрона для обеспечения стабильности плазменного потока и эффективного теплоотведения от элементов плазмотрона с целью повышения эксплуатационного ресурса;
- требований к характеристикам источника питания, используемых в технологии плазмотермического нанесения покрытий.

Объектом исследования является плазмотрон с межэлектродными вставками.

Методы исследования. Теоретические исследования основаны на разработке нестационарных математических моделей дугового плазмотрона для нанесения покрытий, осуществления численного моделирования в лицензируемом программном обеспечении Comsol Multiphysics, основанном на использовании метода конечных элементов и анализе полученных результатов. Экспериментальные исследования режимов работы дугового плазмотрона, регистрация данных во времени об основных характеристиках плазмотрона с использованием АЦП при работе от различных источников питания, анализ полученных результатов. Сравнительный анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Обоснованность и достоверность научных положений, изложенных в диссертации, базируется на применении общеизвестных положений магнитогидродинамики и термодинамики, методов численного моделирования с привлечением специализированного программного обеспечения для моделирования физических процессов Comsol Multiphysics, основанном на

использовании метода конечных элементов, и согласованности результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Практическая значимость работы заключается в применении результатов при проектировании новых и модернизации существующих установок плазмотермического нанесения покрытий с целью повышения эффективности процесса плазменного нанесения покрытий и увеличения эксплуатационного ресурса применяемого оборудования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Анализ явлений неустойчивости плазменного потока дугового плазмотрона.
2. Создание нестационарных математических моделей дугового плазмотрона с межэлектродными вставками для нанесения покрытий с осевой подачей плазмообразующего газа и с вихревой стабилизацией электрической дуги в канале плазмотрона в программном продукте Comsol Multiphysics, позволяющих идентифицировать флуктуации плазменного потока.
3. Результаты теоретических исследований влияния геометрии анодной части плазмотрона и характеристик источника питания на стабильность плазменного потока.
4. Методика проведения экспериментальных исследований: принципиальные схемы проведения экспериментальных исследований, идентификация флуктуаций плазменного потока, определение радиального распределения температуры методами спектрального анализа.
5. Сравнение и анализ теоретических и экспериментальных результатов исследований.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены на следующих научных конференциях:

1. XXI Международная конференция «Physics of Switching Arcs» (Чехия, Нове-Место-на-Мораве, 2015).
2. Международная конференция «2016 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference» (Россия, Санкт-Петербург, 2016).

3. XII Международная конференция «Плёнки и покрытия - 2015» (Россия, Санкт-Петербург, 2015).
4. XLII Научный форум с международным участием «Неделя науки СПбПУ» (Россия, Санкт-Петербург, 2013).
5. XLIV Научный форум с международным участием «Неделя науки СПбПУ» (Россия, Санкт-Петербург, 2015).
6. Международная конференция, посвященная 150-летию со дня рождения Михаила Андреевича Шателена.

Личный вклад. Автор на всех этапах работы непосредственно участвовал в постановке задачи, разработке математической модели работы дугового плазмотрона, выборе методик расчётов теоретических параметров, разработке схемы экспериментального исследования и методов диагностики, монтаже экспериментального оборудования, разработке алгоритма регистрации данных, обработке результатов численного моделирования и экспериментального исследования, а также формировании выводов по выполненной работе.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 75 наименований, и двух приложений. Полный объем диссертации – 95 страниц, в том числе рисунков – 75, таблиц – 8.

Список публикаций автора по теме диссертации:

1. Murashov I. Numerical simulation of DC air plasma torch modes and plasma jet instability for spraying technology / Frolov V., Ivanov D. // 2016 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIConRusNW). – 2016. – pp.625-628. (рекомендовано ВАК, индексируется в базе SCOPUS)
2. Мурашов Ю.В. Моделирование вихревой стабилизации дугового плазмотрона. Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2016. №2(243). Т. 1. С. 53–61. (рекомендовано ВАК)

3. Мурашов Ю.В. Численное моделирование работы дугового воздушного плазмотрона для нанесения покрытий и влияние параметров источника питания на стабильность плазменного потока. / Фролов В.Я., Иванов Д.В. // ЖТФ. (в печати) (рекомендовано ВАК, индексируется в базе SCOPUS)
4. Frolov V. Special aspects of dc air plasma torch's operating modes under turbulent flow conditions. / Murashov I., Ivanov D. // Proc. 21st Symposium on Physics of Switching Arc (Nové Město na Moravě, Czech Republic, Sept. 7.-11., 2015) Plasma Physics and Technology Journal, Volume 2, pp. 129-133. (рекомендовано ВАК, индексируется в базе SCOPUS)
5. Мурашов Ю.В. Численное моделирование нестационарных процессов в дуговом плазмотроне с межэлектродными вставками / Фролов В.Я., Кадыров А.А. // Неделя Науки СПбГПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. – Санкт-Петербург, 2015. – Часть II. – С. 137–139.
6. Мурашов Ю.В. Исследование неустойчивости и турбулентности потока плазмы в дуговом плазмотроне для нанесения покрытий. / Фролов В.Я. // Неделя науки СПбГПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. – Санкт-Петербург, 2013. – Часть I. – С. 102–104.
7. Мурашов Ю.В. Моделирование тиристорного источника питания с замкнутой системой управления в Simulink. / Смородинов В.В. // Неделя науки СПбГПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. – Санкт-Петербург, 2013. – Часть I. – С. 105–107.
8. Мурашов Ю.В. Описание возможностей платформы arduino.применение в системах промышленной автоматизации. / Голобоков А.А., Фролов В.Я. // Неделя науки СПбГПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. – Санкт-Петербург, 2013. – Часть I. – С. 108–110.
9. Фролов В.Я. Особенности режимов работы плазмотронов постоянного тока для нанесения покрытий в условиях турбулизации потока / Иванов Д.В., Мурашов Ю.В. // Пленки и покрытия – 2015: труды 12-й Международной конференции. – Санкт-Петербург, 2015.

Список смежных публикаций:

1. Фролов В.Я. Расчет состава плазмы дугового импульсного разряда в мультикамерном разряднике. / Иванов Д.В., Мурашов Ю.В., Сиваев А.Д. // Письма ЖТФ. 2015. Т. 41, в. 7. С. 8-14.
2. Kozakov R. Investigation of a multi-chamber system for lightning protection at overhead power lines. / Khakpour A., Gorchakov S., Uhrlandt D., Ivanov D., Murashov I., Podporkin G., Frolov V. // Proc. 21st Symposium on Physics of Switching Arc (Nové Město na Moravě, Czech Republic, Sept. 7.-11., 2015) Plasma Physics and Technology Journal, Volume 2, pp. 150-154.
3. Frolov V. Mathematical simulation of processes in discharge chamber of multi-chamber system for lightning protection at overhead power lines. / Ivanov D., Murashov I., Sivaev A. // 2016 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIConRusNW). – 2016. – pp.562-565.
4. Чусов А.Н. Моделирование разряда в мультикамерных системах. / Подпоркин Г.В., Пинчук М.Э., Иванов Д.В., Мурашов Ю.В., Фролов В.Я. // V Российская конференция по молниезащите. Сборник докладов – Санкт-Петербург, 2016. – С. 351-357.
5. Фролов В.Я. Численное моделирование плазменных процессов в разрядной камере мультикамерного разрядника для молниезащиты. / Иванов Д.В., Мурашов Ю.В., Чусов А.Н. // V Российская конференция по молниезащите. Сборник докладов – Санкт-Петербург, 2016. – С. 334-3337.
6. Фролов В.Я. Численное моделирование работы разрядной камеры мультикамерного разрядника для молниезащиты. / Иванов Д.В., Мурашов Ю.В., Чусов А.Н. // Известия РАН. Энергетика (в печати).

ГЛАВА 1. Анализ состояния современных теории и практики технологии плазмотермического нанесения покрытий

Плазменная техника и технология – это отрасль промышленности, которая разрабатывает методы получения низкотемпературной плазмы, где плазма используется в технологических процессах в качестве высокоинтенсивного источника тепла [1].

Классификация плазменных устройств по принципу работы и конструктивным признакам включает в себя дуговые устройства постоянного тока, переменного тока (однофазные, трехфазные), в различных средах, импульсные, а также безэлектродные высокочастотные, работающие на частоте от единиц килогерц до десятков мегагерц [1,2].

Покрyтия, нанесенные термической плазмой, отличаются высокой плотностью и отличным сцеплением (адгезией) с поверхностью заготовки, а также широкая область применения покрытий обуславливает интерес к данной технологии. Повышению эффективности плазменного напыления посвящены работы М.Ф. Жукова, Ю.В. Цветкова, В.С. Клубникина, В.Я. Фролова, J.V.R. Heberlein, R.S. Lima [3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14]. Детальное внимание изучению вопросов стабильности плазменного потока и численному уделено в работах J.P. Trelles, V. Rat, Z. Duan, J. F. Coudert, J.J. Gonzales, C. Baudry [15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25]. В данных работах учёные сходятся в том, что стабильность плазменного потока зависит от движения точки привязки электрической дуги (см. рис. 1.1) и развитию неустойчивостей, приводящих к турбулизации течения.

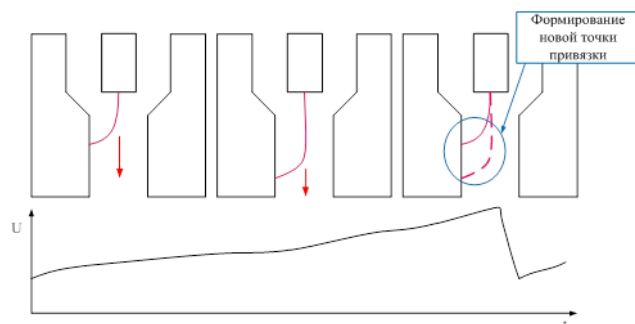


Рисунок 1.1. Изменение падения напряжение на дуге за счет движения точки привязки

Температура рабочего газа на входе плазмотрона, как правило, соответствует температуре окружающей среды (приблизительно 293 К) и при взаимодействии с электрической дугой значительно возрастает (до 25...30 тыс. К) за малый временной интервал ($10^{-5} \dots 10^{-3}$ с) со скоростью порядка 10^4 К/мм [26], что приводит к моментальному расширению газа и его ускорению. При этом изменение скорости составляет до двух порядков. Значительное ускорение, температурный градиент внутри канала плазмотрона и электромагнитная сила Лоренца являются основными причинами развития неустойчивости потока, приводящей к турбулентности. Турбулентность усиливается на выходе плазмотрона, где плазменный поток взаимодействует с «холодной» (значит, и более плотной) средой (приблизительно 293 К).

Согласно анализу, подробно описанному в [27], неустойчивости плазменного потока, возникающие в низкотемпературной плазме с электрическим током, можно разделить на две категории: силовые, связанные с флуктуацией импульса, и тепловые, связанные с флуктуацией джоулева тепловыделения и числа частиц.

Флуктуации импульса соответствует случай, когда флуктуация проводимости, а, следовательно, и джоулева тепловыделения, приводит к флуктуациям давления, регистрация которых осуществлялась в экспериментальных исследованиях, описанных в главе 3.

Рационально начинать анализ неустойчивости плазменного потока с неустойчивости простейшей модели – газодинамической [28].

Уравнения газодинамической модели (1.1, 1.2) неустойчивы для течений с ускорением границы раздела двух сред с высоким градиентом температуры, а как следствие, плотности плазмы (неустойчивость Релея-Тейлора) и относительно сдвиговых течений (неустойчивость Кельвина-Гельмгольца).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1.1)$$

$$\rho d\vec{v}/dt = -grad(p) \quad (1.2)$$

Неустойчивость Кельвина-Гельмгольца обусловлена существованием сдвиговых перемещений. Кратко механизм неустойчивости можно описать следующим образом: рост поперечной скорости границы раздела $v \rightarrow$ сужение трубок тока (газовая динамика) $\rightarrow$ снижение давления $\rightarrow$ рост скорости v .

Инкремент начальной стадии развития неустойчивости Кельвина-Гельмгольца (1.3) пропорционален сдвиговой скорости v , т.е. колебания для каждого элемента массы возрастают с увеличением v .

$$\gamma = \sqrt{\rho_1 \cdot \rho_2} / (\rho_1 + \rho_2) kv, \quad (1.3)$$

где ρ_1, ρ_2 – плотности; v – относительная сдвиговая скорость.

Неустойчивость Релея-Тейлора обусловлена разницей плотностей и инкремент неустойчивости имеет вид:

$$\gamma = \sqrt{\frac{gk(\rho_2 - \rho_1)}{(\rho_2 + \rho_1)}} \quad (1.4)$$

В случае одновременного развития неустойчивости Релея-Тейлора с неустойчивостью Кельвина-Гельмгольца инкремент имеет вид:

$$\gamma = \left[\frac{g}{k} \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} + \frac{\rho_1 \rho_2}{(\rho_1 + \rho_2)^2} v^2 \right] k^2 \quad (1.5)$$

Также выделяют конвективную неустойчивость, которая связана с неравномерностью нагретого слоя, и возникает из-за разницы плотностей зависящих от температуры. Т.е. данный механизм развития неустойчивости аналогичен механизму неустойчивости Релея-Тейлора.

Стабилизация гидродинамической неустойчивости возможна в плазме с магнитным полем при движении проводника в поперечном направлении к линиям индукции магнитного поля, т.к. возникают тормозящие пондеромоторные силы (магнитная вязкость). Условие существенного влияния магнитного поля на стабильность плазменного потока имеет вид:

$$\text{Re}_m \gg 1, \text{Re}_m = v_0 L_0 \mu_0 \sigma, \quad (1.6)$$

где v_0 – характерная скорость; L_0 – характерный размер; $1/\mu_0 \sigma$ – магнитная вязкость.

Другой механизм развития колебаний давления связан с флуктуацией амперовой силы за счет проводимости или за счет флуктуаций параметра Холла.

В средах с переменной проводимостью $\sigma = \sigma(T)$ возникает перегревная неустойчивость, связанная с флуктуацией внутренней энергии (температуры), приводящей к возмущению джоулева тепловыделения, усиливающего флуктуацию внутренней энергии. Эта неустойчивость может возникать в отсутствии магнитного поля и проявляться как при растущей, так и при падающей зависимостях проводимости от температуры.

Углубленные исследования развития перегривной неустойчивости в рамках краевой задачи показывают, что критерии возникновения перегривной неустойчивости зависят от характера изменения проводимости в зависимости от температуры плазмы и граничных условий.

Существует широкий класс неустойчивостей в низкотемпературной плазме более подробно описание данных явлений представлено в работе [29].

Несмотря на весьма продолжительную историю технологии плазменного напыления, которая произрастает из электротехники и впервые была использована для переработки материалов в 1950 г. [30], вопрос проектирования конструкции плазмотрона, обеспечивающей высокие производительность и коэффициент полезного действия, остается открытым. Необходимость разработки новых конструкций плазмотронов, обеспечивающих более равномерное и последовательное плавление и ускорение напыляемого материала, требует совершенствования методов численного моделирования плазменных процессов и организации дополнительных экспериментальных исследований по выявлению природы физических явлений процесса генерирования термической плазмы.

1.1 Возникновение турбулентности в потоках термической плазмы

Приведенный выше анализ развития неустойчивостей, развивающихся в низкотемпературной плазме, демонстрирует, что в отличие от течений сред с постоянными свойствами, нестационарные процессы в плазме самого различного происхождения являются скорее правилом, чем исключением. Указанное

обстоятельство значительно усложняет поиск критерия (или критериев), характеризующего переход от ламинарного течения к турбулентному.

Основные признаки возникновения турбулентности, являющиеся общими для вязкой жидкости и плазмы [27,31,32]:

- спектры пульсационных полей различных величин: скорости, температуры, давления, потенциала и др. – непрерывные;
- коэффициенты корреляций пульсаций любых величин в двух точках потока, или в одной точке, но в разные моменты времени, стремятся к нулю при увеличении пространственного или временного сдвига;
- характеристики течения обнаруживают чувствительную зависимость от малого изменения начальных условий.

В лаборатории Санкт-Петербургского Политехнического Университета имени Петра Великого были получены зависимости пульсаций напряжения от времени (см. рис. 1.2) для дугового плазмотрона с межэлектродными вставками, из которой так же можно убедиться в наличии турбулентных пульсаций, которые носят квазипериодический характер.

Придерживаясь статистического описания турбулентности, более подробное описание представлено в книге [33], пульсации в плазме можно разделить на поперечные и продольные, что является главным отличием от описания турбулентности в жидкости, где из-за не сжимаемости последней возможно лишь наличие поперечных (вихревых) пульсаций.

Наличие теплового поля с большим градиентом температуры и свойств материала, типично для взаимодействия дуговых разрядов с окружающей средой, приводят к различным типам гидродинамических, тепловых и электромагнитных неустойчивостей. Эти неустойчивости влияют на динамику дуги, а также на развитие струи (например, поперечную неустойчивость потока на периферии струи).

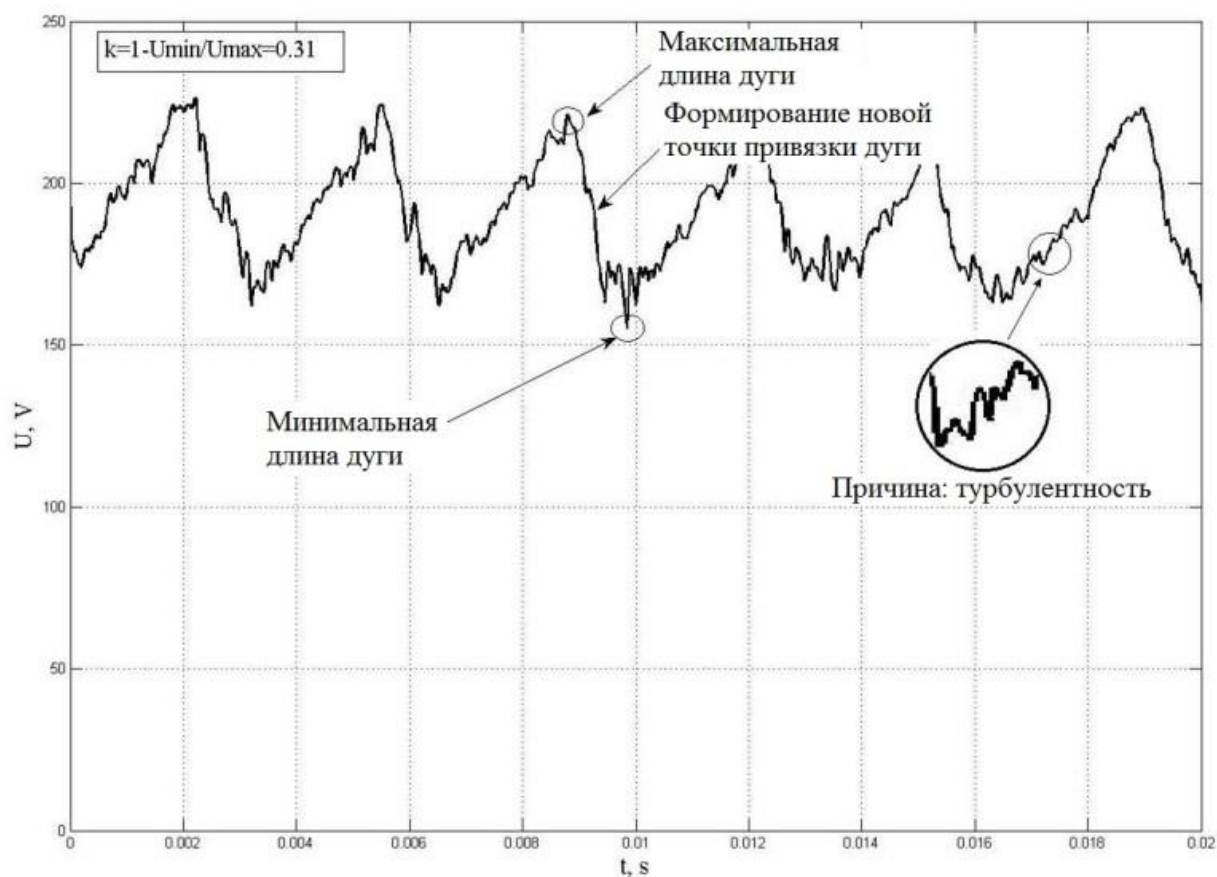


Рисунок 1.2. Зависимость падения напряжения на дуге от времени

Таким образом, для адекватного анализа динамики потока струи дуги постоянного тока требуется сочетание описания не только области находящейся за плазмотроном, но и дуги внутри горелки.

Турбулентность потока часто является прямым следствием эволюции неустойчивости жидкости/газа.

Наиболее важным фактором возникновения турбулентности в струе плазмотрона постоянного тока является возникновение поперечных потоков (Кельвина-Гельмгольца) неустойчивости, которые появляются на границе раздела между параллельными потоками газа с заметно отличающимися скоростями и/или свойствами плазмы (например, плотность и/или вязкость), как в случае плазменной струи на границе выхода из сопла плазмотрона в окружающую среду, что подтверждается результатами экспериментальных исследований (см. главу 3) при анализе данных с емкостного микрофона.

Плазма, генерируемая в плазмотронах постоянного тока, является примером термической плазмы, которая характеризуется, кроме прочего, высокой

плотностью электронов ($10^{21} \dots 10^{24} \text{ м}^{-3}$) и высокой частотой столкновения составляющих (молекул, атомов, ионов и электронов) [26]. Высокая частота столкновений приводит к состоянию близкому к локальному термодинамическому равновесию (ЛТР). Необходимо отметить, что состояние ЛТР нарушается вблизи границ взаимодействия плазмы со стенками плазмотрона (вблизи катода и анода), а также при взаимодействии с холодным рабочим или/и атмосферным газом.

Термическая плазма из-за относительно высоких плотностей и давлений, а, следовательно, малой длины свободного пробега частиц, описывается надлежащим образом жидкостными моделями.

Наиболее часто используемые модели термической плазмы зависят от приближения ЛТР и моделирования плазменного потока, как потока с изменяющимися свойствами, соответствующими электромагнитному реактивному потоку, находящемуся в химическом равновесии, в котором внутренняя энергия характеризуется единой температурой.

Точное моделирование турбулентных течений осложняется из-за полуэмпирических моделей, характеризующихся большим диапазоном масштабов длины и времени, что и представляет собой наиболее серьезную проблему. Наиболее точным подходом при численном описании турбулентных течений является подход прямого численного моделирования (ПЧМ).

Использование моделей турбулентности для моделирования плазменных потоков значительно сложнее, чем для большинства других промышленных применений из-за присущих им характеристик.

Точное описание турбулентности потока добавляет значительно более высокую степень сложности для моделирования потока плазмы. Существует достаточное количество статей об использовании осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса моделей турбулентности для анализа тепловых струй потока плазмы, такие как работа Хуанг [34] и др. в двумерном моделировании струи с использованием двухжидкостной модели для описания захвата холодного газа из окружающей среды в плазменную струю, так же имеется работа Ли и Чен

[35] трехмерного моделировании соударения плазменной струи с использованием k - ε модели турбулентности (которое достаточно хорошо описывает турбулентность в открытом пространстве). Нестационарные трехмерные модели больше подходят для описания сути и динамики трехмерного потока струи плазмотрона постоянного тока.

1.2 Методы стабилизации плазменного потока

Широкое применение технологии плазмотермического нанесения покрытий привело к интенсивному изучению физических процессов стабилизации электрической дуги. В результате разработано множество способов стабилизации, которые можно разбить на три основные группы: газовая, магнитная и водяная. Одной из наиболее распространенных и простых в реализации является газовая стабилизация, при которой наружный «холодный» слой плазмообразующего газа захлаживает в пристеночной области столб дуги и сжимает его. При этом в зависимости от направления подачи газа различают аксиальную и вихревую стабилизации. Схемы наиболее распространенных типов стабилизации электрической дуги в канале плазмотрона представлены на рис. 1.3.

Как было отмечено ранее, наложение магнитного поля может оказывать существенное влияние на стабильность плазменного потока, т.к. турбулентность становится анизотропной из-за выделенного направления индукции магнитного поля поперечному движению проводников, что приводит к омической диссипации и возникновению пондеромоторных тормозящих сил. Данное обстоятельство привело к идее использования метода магнитной стабилизации плазменного потока. И так, метод магнитной стабилизации основан на взаимодействии направленного магнитного поля, расположенного в поперечном направлении перемещению электрической дуги. Данный метод стабилизации имеет самую низкую эффективность из представленных в данной работе методов стабилизации, а соленоид, встраиваемый в конструкцию плазмотрона, значительно её усложняет.

Методы газовой стабилизации (аксиальная и вихревая стабилизации) являются одними из наиболее эффективных, охлаждая и одновременно сжимая плазменный поток. Наиболее эффективным методом стабилизации является вихревая стабилизация, наиболее часто используемая в технологиях плазменного напыления и резки металлов, которая впервые была применена в 1909 г. Шенхером [3]. Дуга Шенхера горела в трубке, в которую по касательной к трубке подавался стабилизирующий газ – воздух.

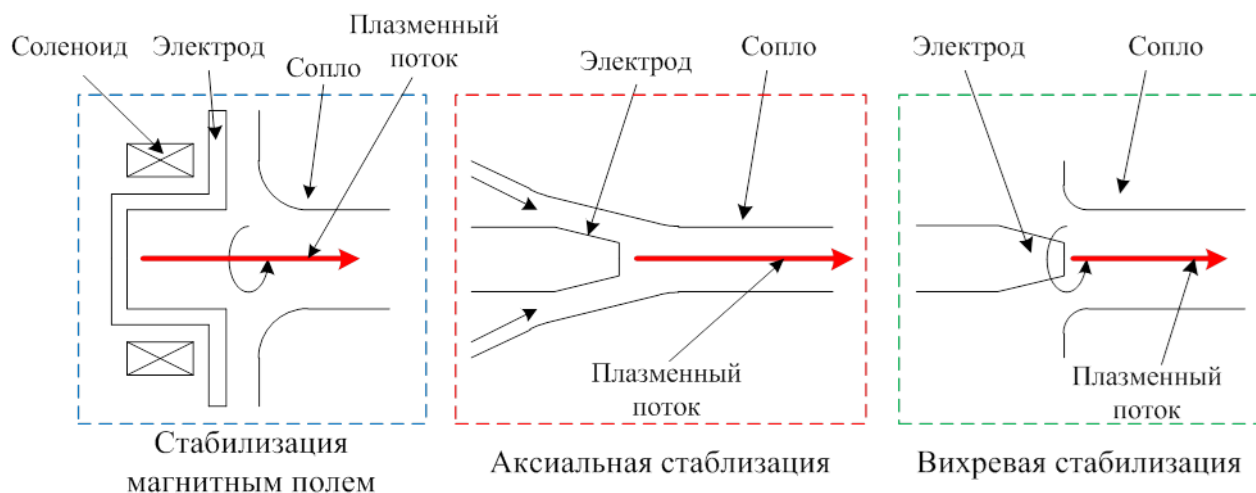


Рисунок 1.3. Схемы стабилизации электрической дуги

Отдельно стоит выделить конструкцию гибридного газо-водяного плазмотрона (см. рис. 1.4) с вынесенным анодом, вращение которого повышает эксплуатационные характеристики плазмотрона, однако, отдельного рассмотрения данная конструкция заслуживает за счет обеспечения наиболее стабильных характеристик электрической дуги, снижая коэффициент пульсаций напряжения на дуге до 0,1 [36, 37]. Применительно к данной конструкции, кроме вынесенного анода, используется метод водяной стабилизации, который заключается в применении завихренных потоков жидкости, образуя при этом пар.

Впервые данный метод стабилизации был использован Гердиеном и Лотцем в 1922 г., где в электрическую дугу в узкой диафрагме осуществлялась тангенциальная подача воды [3].

Несмотря на явное преимущество данной конструкции, обеспечивающей стабильность характеристик плазменного потока, существенным недостатком данного метода стабилизации является интенсивная эрозия катода.

Плазмотроны с подобной водяной стабилизацией характеризуются высокими значениями напряжения на дуге, высокой температурой и скоростью плазменного потока [38]. Таким образом, основная область применения подобных плазмотронов – напыление покрытий с большой площадью обрабатываемой поверхности, обработка порошка и напыление материалов с высокой температурой плавления.

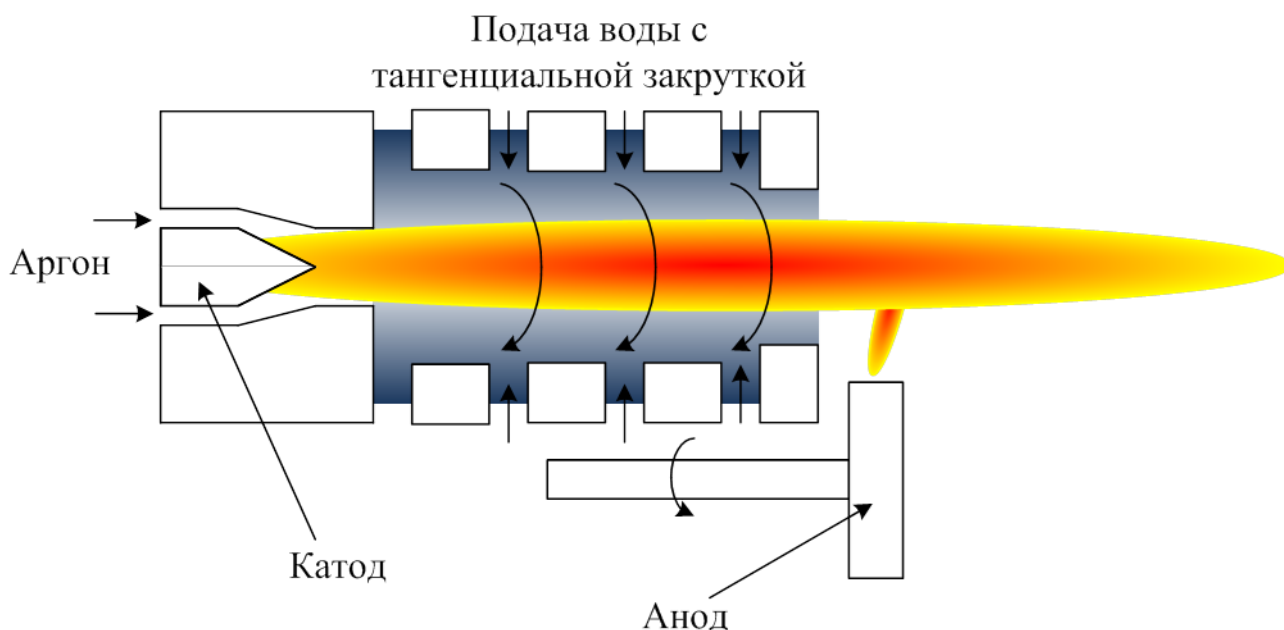


Рисунок 1.4. Гибридный газ-водяной плазмотрон

1.3 Характеристики плазмотрона ПН-В1

В лаборатории Санкт-Петербургского политехнического университета с целью стабилизации длины дуги в канале разработан плазмотрон с межэлектродными вставками ПН-В1. Внешний вид плазмотрона представлен на рис. 1.4.

Плазматрон выполнен по схеме электродугового плазменного устройства с секционированными межэлектродными вставками. На входе плазматрона установлен катод с гафниевой вставкой, а на выходе цилиндрический анод. Между ними установлены секции межэлектродной вставки. Сжатый воздух подается со стороны катода тангенциально. Это обеспечивает стабильное горение плазменной струи. На выходе анода в струю подаются металлические либо керамические гранулы. Изначально при холостом ходе источника питания между

катодом и входной секцией плазматрона включается устройство поджига дуги и возбуждается вспомогательная дуга постоянного тока между катодом и входным соплом. Она предназначена для образования основной дуги.

Поджиг дежурной (вспомогательной) электрической дуги осуществляется с помощью осциллятора.

Основная дуга (между катодом и анодом) возбуждается при касании факела вспомогательной дуги поверхности анода. После зажигания основной дуги подается транспортирующий газ в количестве, необходимом для нормального ведения процесса, устанавливается требуемый ток дуги, подается порошковый материал и производится напыление покрытий. Окончание процесса напыления покрытий производят в следующей последовательности:

- прекращают подачу исходного порошкового материала;
- выключают источник питания;
- прекращают подачу транспортирующего газа;
- отключают плазмообразующий газ.

Конструкция плазматрона состоит из: термохимического катода с устройством тангенциальной подачи плазмообразующего газа в нашем случае воздуха, входную секцию, секции межэлектродной вставки, анод и устройство ввода порошка в плазменную струю. Путем изменения геометрии и числа секции межэлектродной вставки обеспечивают различные мощности плазматронов.

Воздушно – дуговой плазматрон выполнен в виде цилиндрической конструкции с устройствами ввода охлаждающей воды, плазмообразующего газа и порошкового материала, подаваемого вместе с транспортирующим газом. Он состоит из трех основных блоков: катодного, дугового и анодного, соединенных между собой накидными гайками. На выходе плазматрона можно крепить до трех устройств ввода порошка, что позволяет вводить разные материалы одновременно и увеличивать производительность процесса напыления.

Катодный блок плазматрона состоит из электродного узла, корпуса, входной секции. Крепление катодного узла осуществляется накидной гайкой. На катодном блоке установлены два штуцера. Штуцер, установленный в корпусе,

предназначен для ввода плазмообразующего газа. Штуцер электродного узла служит для отвода охлаждающей воды из плазматрона и подачи электропитания на катод плазматрона. Клемма, выполненная на корпусе необходима для подключения высоковольтного провода, необходимого для зажигания электрической дуги.



Рисунок 1.4. Плазматрон ПН-В1

Электродный узел состоит из: катододержателя, изолятора, завихрителя, катода и катодной гайки. Герметизация электродного узла осуществляется специальными прокладками. Основным элементом электродного узла является катод, представляющий собой сменную деталь. Для увеличения срока службы катода предусмотрено его интенсивное охлаждение сильно турбулизированным

потоком охлаждающей воды. Для этого в катододержателе установлена разделительная втулка. Конструктивно зазор между торцевыми поверхностями катода и разделительной втулки составляет 1...1,5 мм. Через каждые сто часов работы плазматрона этот зазор необходимо контролировать, и при необходимости закручивать разделительную втулку. Эксплуатация катода допускается до величины линейного износа гафниевой вставки, данный режим работы соответствует времени непрерывной работы плазматрона на токе до 200 А (соответствует номинальному режиму работы дугового плазматрона) не менее 6 часов, либо числу включений, которое составляет не менее 250 включений.

Блок дугового канала состоит из кожуха межэлектродной вставки (МЭВ), накидных гаек, секций МЭВ, шайб, и специальных уплотнительных резиновых колец. На кожухе МЭВ имеется также посадочное место под наружное уплотнительное кольцо. Изоляция секций МЭВ друг от друга осуществляется путем установки специальных уплотнительных колец и изоляционных шайб. Сборку блока дугового канала целесообразно проводить в совокупности со сборкой всего плазматрона. Сменными деталями блока дугового канала являются секции МЭВ, шайбы, а так же уплотнительные прокладки. Срок службы секций МЭВ составляет не менее 200 часов работы, прокладок - не менее 150 часов [39].

Анодный блок с устройством ввода порошка конструктивно состоит из анода, анодного корпуса, устройства ввода порошка и специального уплотнительного резинового кольца. Штуцер, расположенный на анодном корпусе, предназначен для подключения шланга подачи охлаждающей воды и электропитания, подключаемого к анодной части плазматрона.

Надежность и долговечность воздушно-дугового плазматрона зависит от условий охлаждения. Обычно применяют водяное охлаждение под давлением 0,01...0,2 МПа. Наиболее предпочтительно охлаждение очищенной водой по замкнутому циклу, с применением компрессорной станции и теплообменника.

Технические характеристики дугового плазматрона с межэлектродными вставками ПН-В1 представлены в таблице 1.1. В таблице представлены характеристики для номинального режима работы дугового плазматрона.

Рабочие параметры плазматрона ПН-В1

Параметр	Значение
Номинальная мощность, кВт	40
Ток дуги, А	200
Вид тока	постоянный
Плазмообразующий газ	воздух
Расход плазмообразующего газа, г/с	0,5...2
Охлаждение	водяное принудительное
Расход охлаждающей воды, г/с	100
Давление транспортирующего газа, МПа	0,01...0,2
Расход транспортирующего газа, г/с	0,1
Расход порошковых материалов не более,	3...12 кг/ч
Скорость плазменной струи, м/с	До 500
Число вводов порошка	1
Количество межэлектродных вставок	6
диаметр плазматрона, мм	54
длина плазматрона, мм	220
радиус катода, мм	16
диаметр гафниевой вставки, мм	3

1.4 Выводы и постановка задачи исследования

Выполненное исследование в области технологии плазменного нанесения покрытий показало, что в представленных выше работах физико-математическое описание процесса осуществлялось с привлечением программных продуктов: ANSYS CFX, Fluent, Tport, OpenFOAM и т.д., моделирование плазматрона постоянного тока с МЭВ в программном пакете Comsol Multiphysics реализовано не было. Приведенные материалы об устойчивости плазменного потока, факторов на неё влияющих (их взаимное влияние) и возможности компенсации для

стабилизации детально не рассмотрены. Влияние теплообменных процессов при ламинарном и турбулентном потоках на конструктивные элементы плазмотрона и обрабатываемый материал не указаны.

Расширение области применения технологии плазмотермического нанесения покрытий приводит к необходимости разработки принципиально новых конструкций плазмотронов, способных обеспечивать генерацию плазменного потока с устойчивыми характеристиками для улучшения качества наносимого покрытия и повышению коэффициента полезного действия технологического процесса. Развитие вычислительных ресурсов позволяет осуществлять численное моделирование мультифизических задач.

В связи с вышеизложенным была выбрана цель исследования: разработка дугового плазмотрона для нанесения покрытий с учетом явлений неустойчивости плазменного потока с установлением закономерности турбулизации потока на участках конструкции плазмогенерирующего устройства.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Анализ состояния современных теории и практики технологии плазменного нанесения покрытий.
2. Анализ физических явлений неустойчивости плазменного потока на стадиях генерирования плазмы.
3. Анализ явлений неустойчивости плазменного потока на выходе плазмотрона с учетом турбулизации генерируемого потока плазмы.
4. Разработка нестационарной математической модели дугового плазмотрона с осевой подачей плазмообразующего газа.
5. Разработка нестационарной математической модели дугового плазмотрона с вихревой стабилизацией.
6. Исследование устойчивости плазменного потока.
7. Экспериментальные исследования дугового плазмотрона с межэлектродными вставками для нанесения покрытий.

ГЛАВА 2. Разработка математической модели с отдельным алгоритмом решения уравнений описывающих работу дугового плазматрона с осевой и вихревой стабилизациями плазменного потока

Развитие современных вычислительных систем кардинально изменило направление вектора разработки новейших технологий в промышленности в сторону численного моделирования с целью снижения временных и денежных затрат, тем самым перейдя от эмпирических методов к теоретическим, значительно уменьшая, а иногда и исключая вообще, экспериментальные исследования.

Разработка математической модели дугового плазматрона представляет собой сочетание задач электромагнетизма, газовой динамики и теплопередачи [40,41,42,43,44,45], тем самым представляя собой мультифизическую задачу, где соответствующие уравнения связаны термодинамическими и транспортными свойствами в неявном виде и в явном виде через джоулев нагрев в случае уравнения баланса энергии и системы уравнений Максвелла [46].

Численное моделирование дуговых плазматронов осуществляется в таких программных продуктах, как ANSYS, Comsol Multiphysics, представляющих собой программное обеспечение широкого назначения, а также в специализированных программных средах, например, TPORT.

Численное моделирование дугового плазматрона для технологии плазмотермического нанесения покрытий реализовано с применением программного обеспечения пакета Comsol Multiphysics, который позволяет моделировать физические процессы, описанные в виде дифференциальных уравнений в частных производных. Решение данных уравнений аналитически не представляется возможным, поэтому для их решения применяются численные методы. Наиболее распространенными являются методы контрольного объема и метод конечных элементов, получивший широкое распространение в современных программных продуктах. Стоит отметить, что метод контрольного

объема, сформулированный Pantakar S. [47], развитый в работах С.В. Дресвина и Д.В. Иванова [48,49, 50], лег в основу численного моделирования школы СПбПУ.

Численное моделирование, реализуемое в Comsol Multiphysics, основано на использовании метода конечных элементов [51].

2.1 Постановка задачи и основные уравнения математической модели плазмотрона

Разработанные нестационарные математические модели в программном продукте Comsol Multiphysics основаны на расчете уравнений баланса энергии (УБЭ), движения (УД), дополненного уравнением неразрывности (УН), и системы уравнений Максвелла.

Основные допущения математической модели:

1. Плазма находится в состоянии локального термодинамического равновесия, откуда следует:
 - все компоненты плазмы распределены по скоростям в соответствии с распределением Максвелла;
 - концентрация частиц в возбуждённом состоянии определяется распределением Больцмана;
 - температуры компонентов плазмы равны;
 - концентрация может быть определена по закону действующих масс (формула Саха) [52];
2. Поток является ламинарным;
3. Плазма является оптически тонкой;
4. Работа давления и вязкой диссипации не учитывается;
5. Приэлектродные [53] процессы не учитываются.

Конструкция дугового плазмотрона для напыления имеет цилиндрическую форму, обладающую осевой симметрией, что позволяет упростить геометрию расчетной области и рассматривать двухмерную осесимметричную задачу.

Уравнение баланса энергии является одним из основных уравнений при теоретическом описании и численном моделировании математической модели теплообменных процессов в плазме и при нестационарном случае имеет следующий вид:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \vec{v} \cdot \nabla T - \lambda \nabla T = Q_s - Q_{rad}, \quad (2.1)$$

где T – температура плазмы; ρ – плотность плазмы, зависящая от температуры; C_p – теплоемкость плазмы, зависящая от температуры; v – скорость потока плазмы; λ – теплопроводность плазмы, зависящая от температуры; Q_s – функция источника; Q_{rad} – удельная мощность излучения, зависящая от температуры.

Функция источника Q_s определяет удельную мощность джоулевого нагрева, согласно выражению (2.2).

$$Q_s = \sigma E^2 \quad (2.2)$$

Расчет электромагнитного поля осуществляется с использованием системы уравнений Максвелла:

$$\begin{cases} \vec{J} = \left(\sigma + \varepsilon_0 \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} \right) \vec{E} \\ \vec{E} = -\nabla V \\ \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \nabla \times \vec{H} = \vec{J} \\ \vec{B} = \nabla \times \vec{A} \end{cases}, \quad (2.3)$$

где J – плотность тока; σ – электропроводность плазменного потока, зависящая от температуры; ε – диэлектрическая проницаемость воздуха; E – напряженность электрического поля; V – разность потенциалов; A – векторный потенциал магнитного поля; H – напряженность магнитного поля; B – магнитная индукция.

Распределение скорости может быть получено из решения уравнения движения для ламинарного потока:

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = \vec{F} + \nabla \cdot \left[-pI + \mu \left(\nabla \vec{v} + (\nabla \vec{v})^T \right) \right], \quad (2.4)$$

где I – единичная матрица; F – силы, действующие на поток (сила Лоренца); μ – вязкость потока плазмы, зависящая от температуры; p – давление.

Сила Лоренца определяется согласно выражению (2.5).

$$F_L = \vec{J} \times \vec{B}, \quad (2.5)$$

Уравнение движения дополняется уравнением неразрывности (2.6), образуя разрешенную систему дифференциальных уравнений.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (2.6)$$

2.2 Дифференциальные уравнения и алгоритмы решения в среде Comsol Multiphysics

Программный продукт Comsol Multiphysics позволяет решать дифференциальные уравнения второго порядка общий вид в коэффициентной форме записи можно записать следующим образом:

$$e_a \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + d_a \frac{\partial u}{\partial t} - \nabla \cdot (c \nabla u + \alpha u - \gamma) + \beta \cdot \nabla u + \alpha u = f \quad (2.7)$$

Comsol Multiphysics представляет собой совокупность физических интерфейсов, заключающих в себе основные уравнения из областей физики (электромагнетизм, гидродинамика, теплопередача и т.д.), кроме того, для реализации моделирования физических систем, не включенных в предустановленные физические интерфейсы, возможно задание уравнений пользователя (например, линейных и нелинейных дифференциальных уравнений второго).

Алгоритмы подхода к решению системы дифференциальных уравнений можно разделить на две основные группы: взаимосвязанный и отдельный подходы.

Пример алгоритма взаимосвязанного подхода представлен на рис. 2.1.

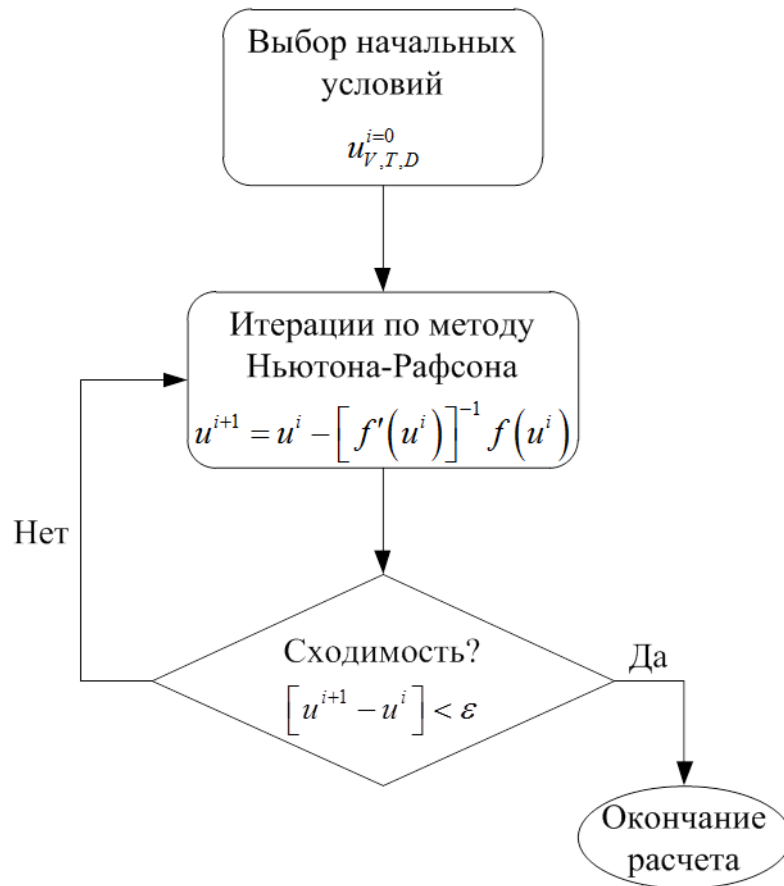


Рисунок 2.1. Алгоритм взаимосвязанного подхода

Решение мультифизической задачи при использовании взаимосвязанного подхода начинается с начального приближения, а итерационный процесс основан на методе Ньютона-Рафсона (метод касательных), который может быть выражен следующим соотношением:

$$u^{i+1} = u^i - \frac{f(u^i)}{[f'(u^i)]} \quad (2.8)$$

Данный метод находит широкое применение для решения систем нелинейных уравнений высокого порядка, однако, применительно к мультифизическим задачам требует более ресурсоемкого решателя.

Взаимосвязанный подход является более ресурсоемким в сравнении с раздельным подходом [54].

Раздельный подход представляет собой расчет каждого физического процесса последовательно до достижения сходимости [54]. Алгоритм раздельного подхода представлен на рис. 2.2.

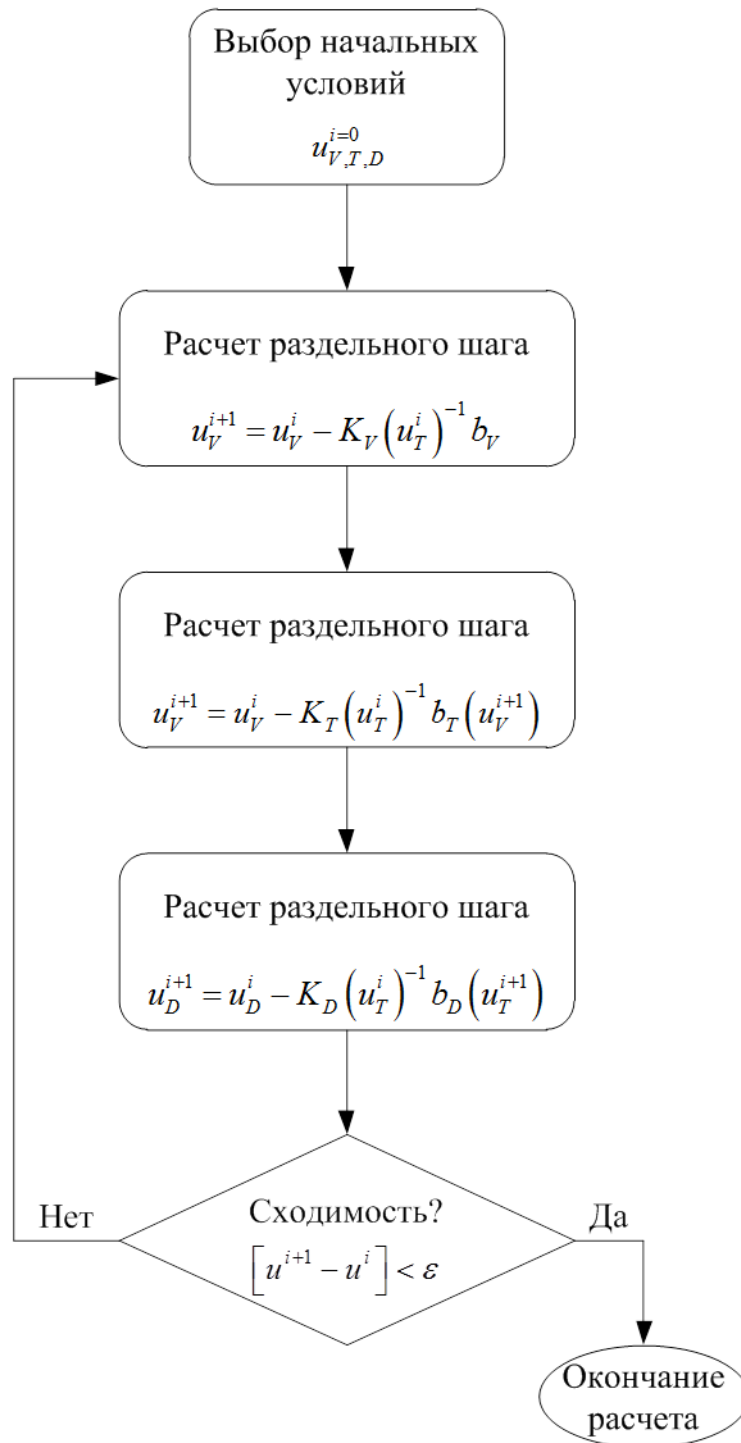


Рисунок 2.2. Алгоритм раздельного подхода

В данном подходе для решения задачи может потребоваться значительно больше итераций, чем в методе взаимосвязанного подхода, однако, каждый цикл решения внутри раздельного подхода производится со значительно более высокой скоростью, чем шаг метода касательных (Ньютона-Рафсона) для взаимосвязанного подхода, при этом не оказывая существенного влияния на результат численного моделирования.

В качестве алгоритма расчета математической модели дугового плазмотрона был выбран отдельный подход, предъявляющий более низкие требования к вычислительным характеристикам компьютера и обеспечивающий устойчивую сходимость решения.

2.3 Дискретизация расчетной области для численного моделирования плазмотрона

Решение мультифизических задач с корректно поставленными условиями и правильным методом решения может не сойтись из-за грубой или неверной расчетной сетки, поэтому определение оптимальных параметров расчетной сетки является одной из ключевых задач при численном моделировании физических процессов. Таким образом, расчетная сетка нелинейной нестационарной конечно-элементной задачи напрямую связана с вопросом сходимости решения [55].

Расчетная область с нанесенной неравномерной расчетной сеткой представлена на рис. 2.3. Расчетная область соответствует реальной геометрии плазмотрона и состоит из 4271 элемента.

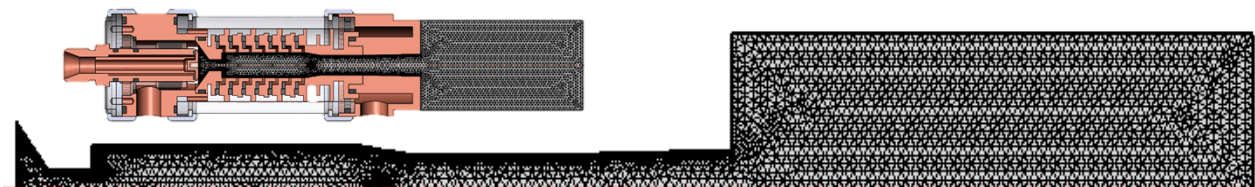


Рисунок 2.3. Расчетная область с расчетной сеткой

2.4 Обоснование выбора свойств воздушной плазмы

Корректность численного моделирования напрямую связана с выбором свойств материалов, используемых при расчетах. Верифицированные свойства воздушной плазмы в зависимости от температуры, позволяющие снизить погрешность вычислений, включены в математическую модель из работы [56].

График зависимости теплоемкости воздушной плазмы от температуры представлен на рис. 2.4.

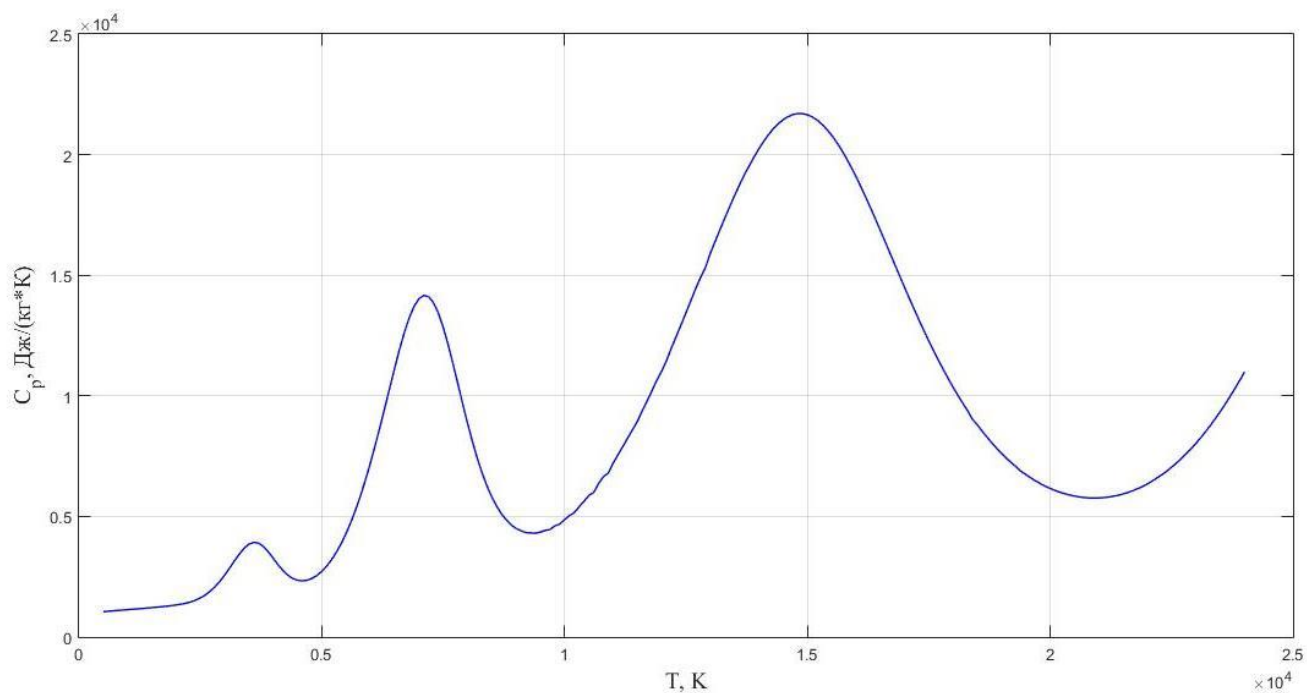


Рисунок 2.4. График зависимости теплоемкости плазмы от температуры

График зависимости теплопроводности воздушной плазмы от температуры представлен на рис. 2.5.

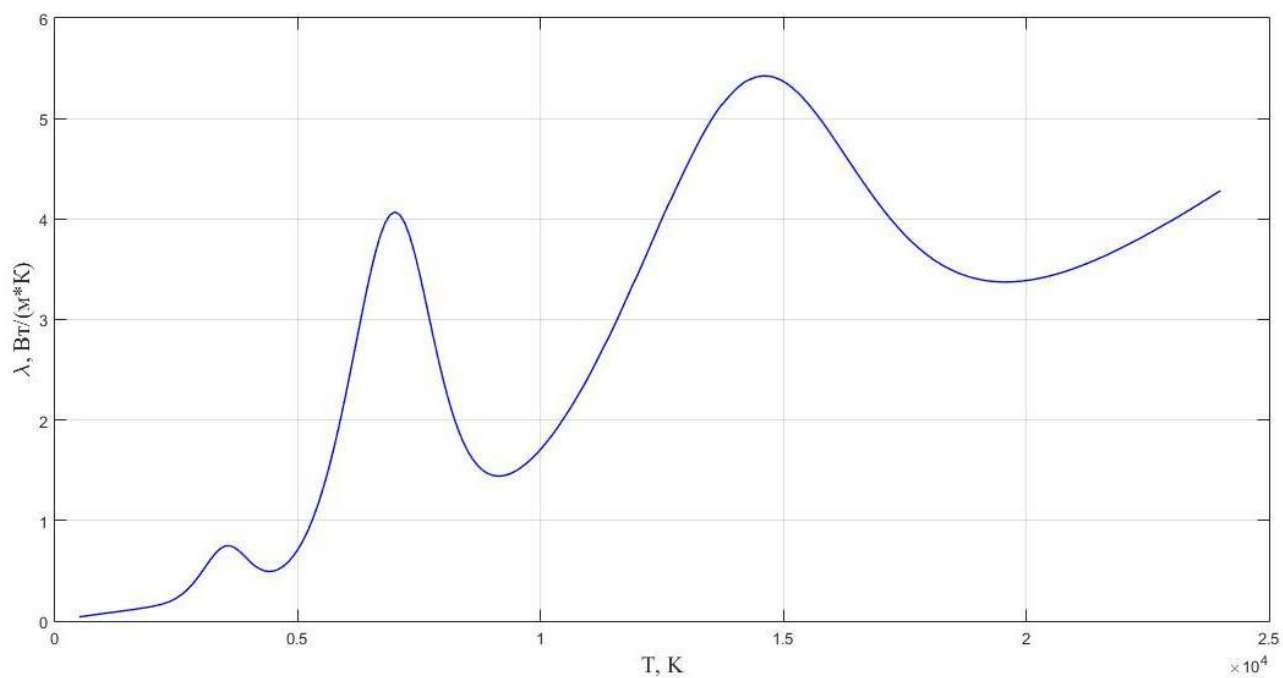


Рисунок 2.5. График зависимости теплопроводности плазмы от температуры

График зависимости динамической вязкости воздушной плазмы от температуры представлен на рис. 2.6.

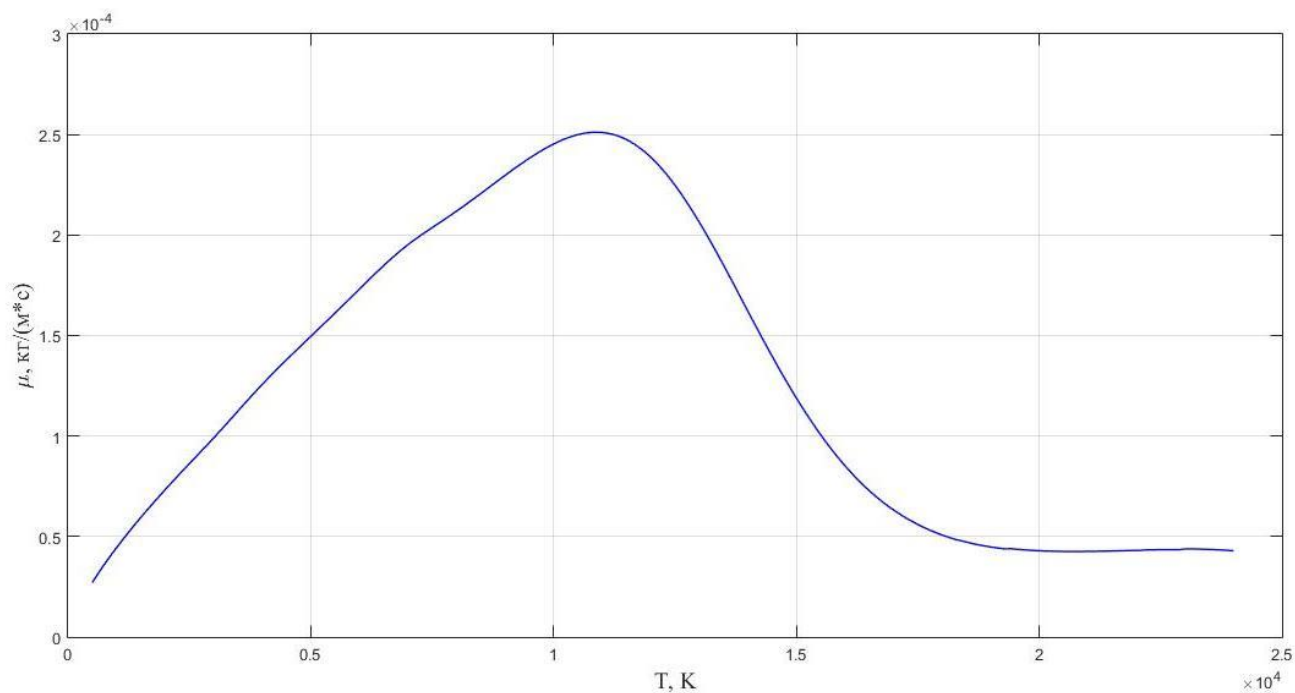


Рисунок 2.5. График зависимости динамической вязкости плазмы от температуры

График зависимости плотности воздушной плазмы от температуры представлен на рис. 2.7.

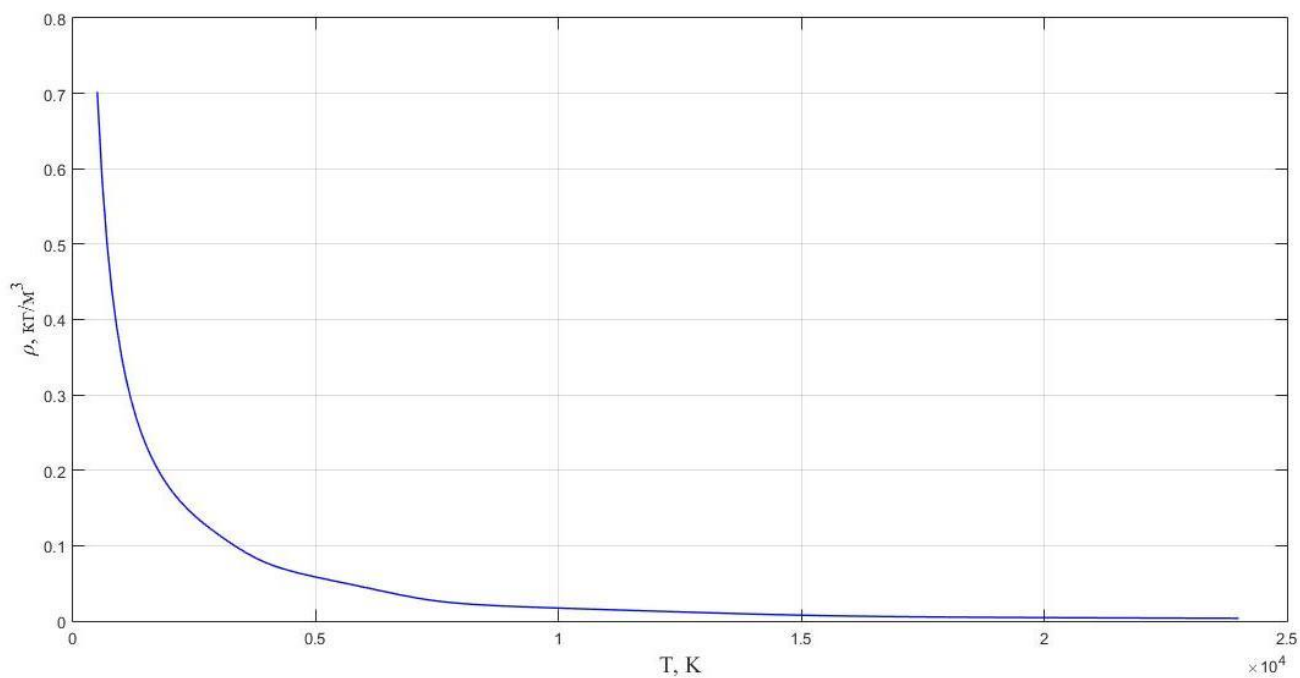


Рисунок 2.7. График зависимости плотности плазмы от температуры

График зависимости электропроводности воздушной плазмы от температуры представлен на рис. 2.8.

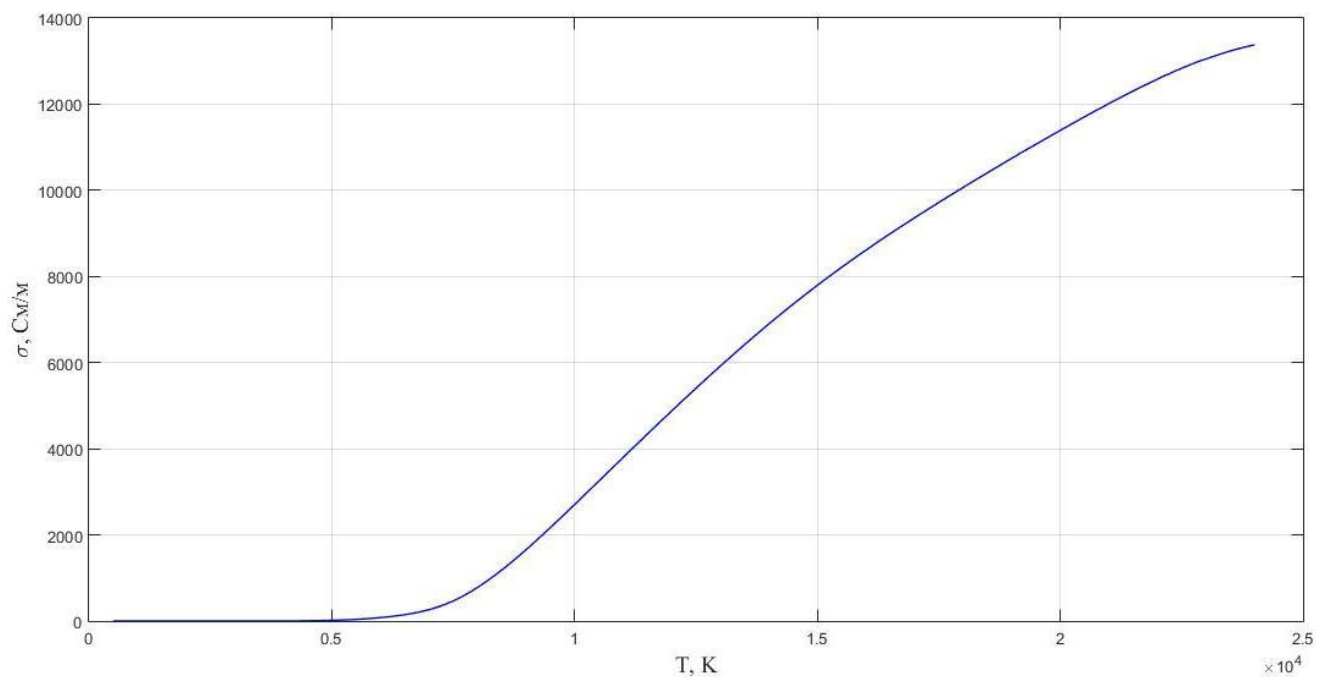


Рисунок 2.8. График зависимости электропроводности плазмы от температуры

График зависимости удельной мощности излучения воздушной плазмы от температуры представлен на рис. 2.9.

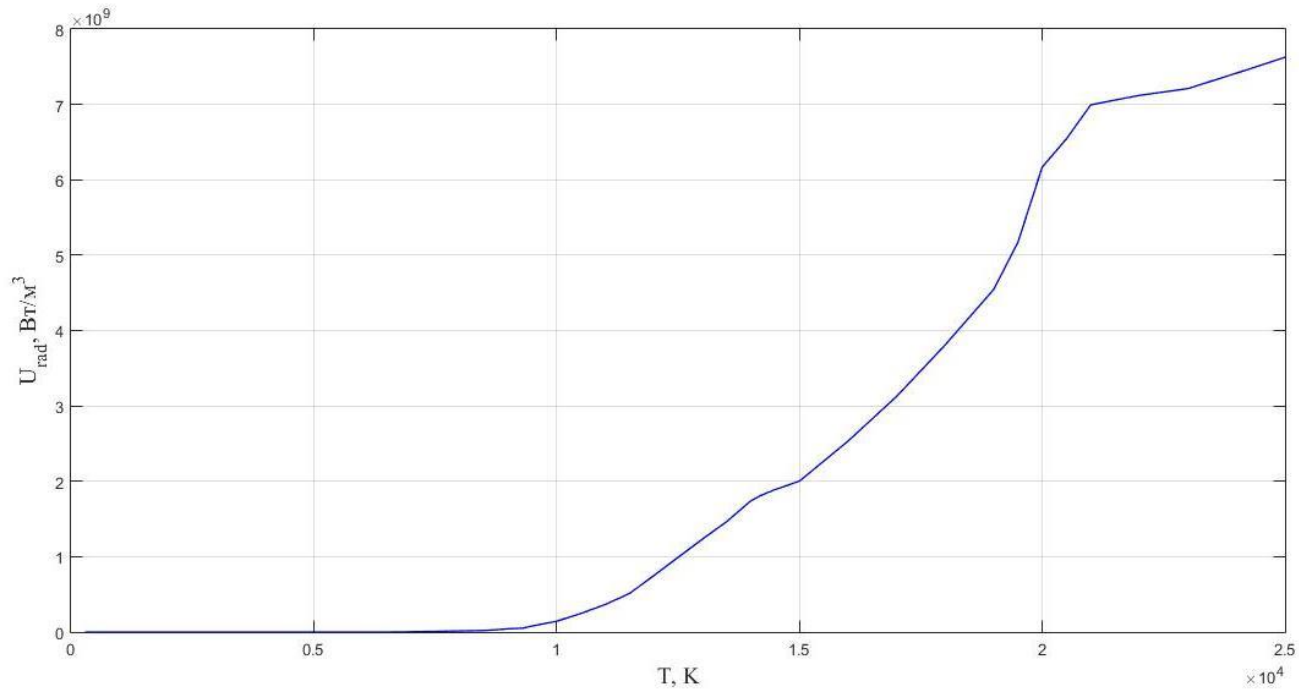


Рисунок 2.9. График зависимости удельной мощности излучения плазмы от температуры

2.5 Математическая модель дугового плазмотрона с осевой подачей плазмообразующего газа

В основу математической модели плазмотрона с осевой подачей плазмообразующего газа для технологии плазмотермического нанесения покрытий легли уравнения, описанные в пункте 2.1. Геометрия расчетной области с обозначением граничных условий представлена на рис. 2.10. В качестве алгоритма расчета используется метод раздельного подхода. Граничные условия, соответствующие обозначениям, представленным на рис. 2.10, помещены в таблицу 2.1.

Скорость осевой подачи газа, используемая в качестве граничного условия первого рода на входе расчетной области, определяется массовым расходом плазмообразующего газа согласно выражению (2.9) и является равномерно распределенной по границе входа.

$$m = - \int_{\partial\Omega} \rho(\nu \cdot n) d_{bc} dS \quad (2.9)$$

Из выражения 2.9 определяется значение скорости на входе расчетной области.

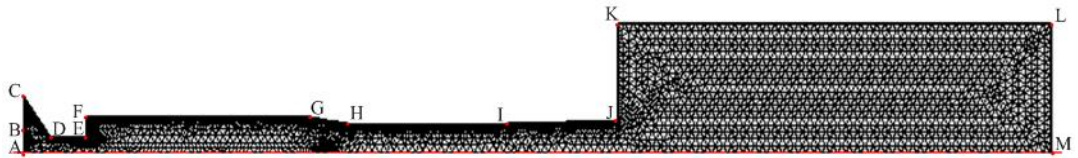


Рисунок 2.10. Обозначение границ расчетной области

Таблица 2.1

Граничные условия

А-В (катод)	В-С (вход)	С-Г (стенка)	Г-Н (анод)	Н-К (стенка)	К-М (выход)	М-А
T_{cath}	T_{inlet}	$q = h(T_{ext} - T)$	T_{anode}	$q = h(T_{ext} - T)$	$T_n = 0$	Ось симметрии
$\nu = 0$	$\nu = \nu_{in}$	$\nu = 0$	$\nu = 0$	$\nu = 0$	$p_n = 0$	
$-\sigma\phi_n = J_{cath}$	$\phi_n = 0$	$\phi_n = 0$	$\phi = 0$	$\phi_n = 0$	$\phi_n = 0$	
$A_n = 0$	$A = 0$	$A_n = 0$	$A_n = 0$	$A_n = 0$	$A_n = 0$	

Разработанная нестационарная математическая модель позволяет учесть в качестве входного параметра характеристику тока, тем самым учесть влияние источника питания на стабильность плазменного потока. Кроме того, математическая модель позволяет осуществить варьирование расхода плазмообразующего газа и учесть влияние конструктивных особенностей плазмотрона.

В качестве характеристики тока источника питания АПР-404 были взяты результаты математического моделирования в среде Simulink см. рис. 2.11 [57].

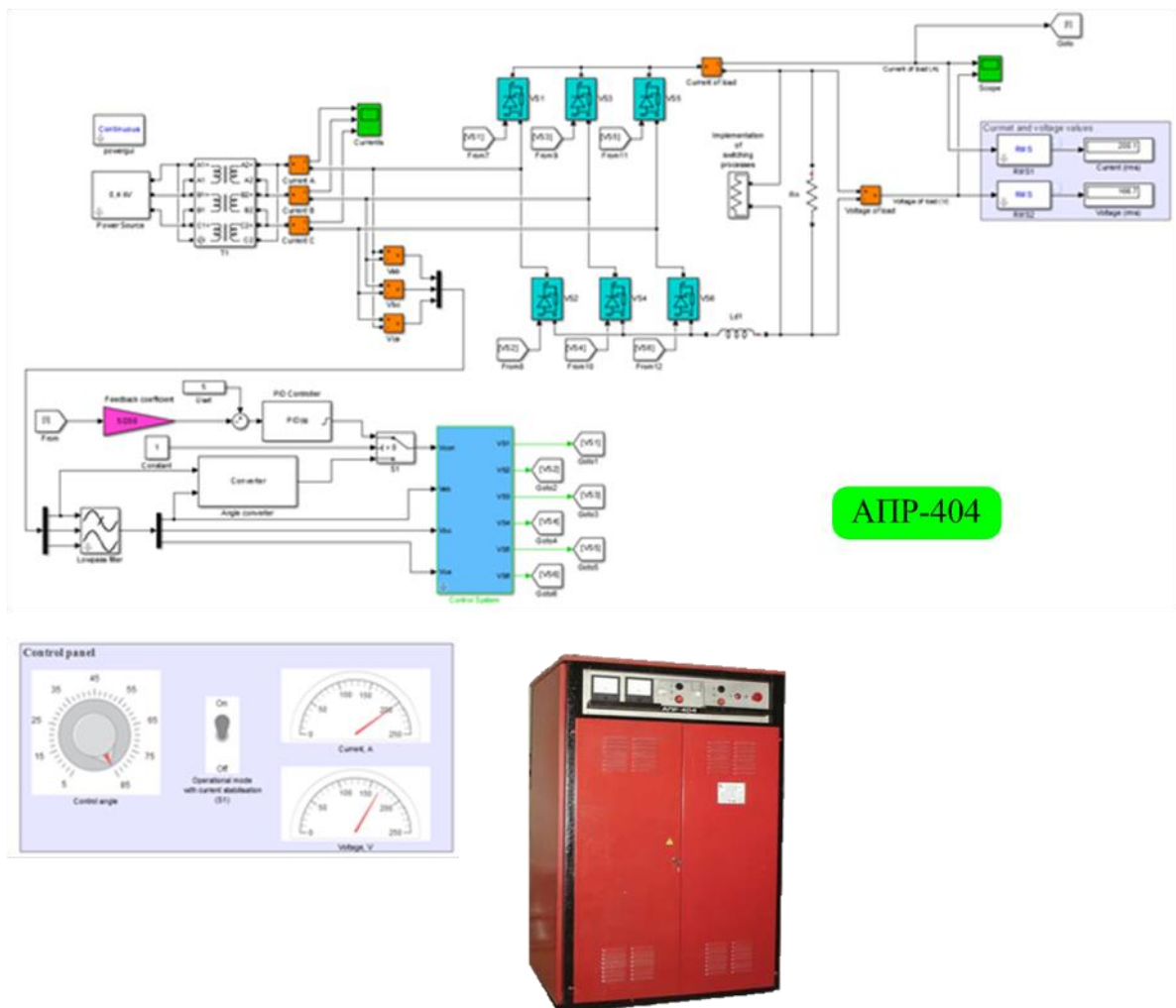


Рисунок 2.11. Модель трехфазного двухполупериодного тиристорного источника питания (АПР-404) в среде Simulink

Характеристики тока представлены на рис. 2.12.

С целью оценки влияния характеристик источника питания на стабильность плазменного потока реализована модель с идеализированной характеристикой тока ($I = const$).

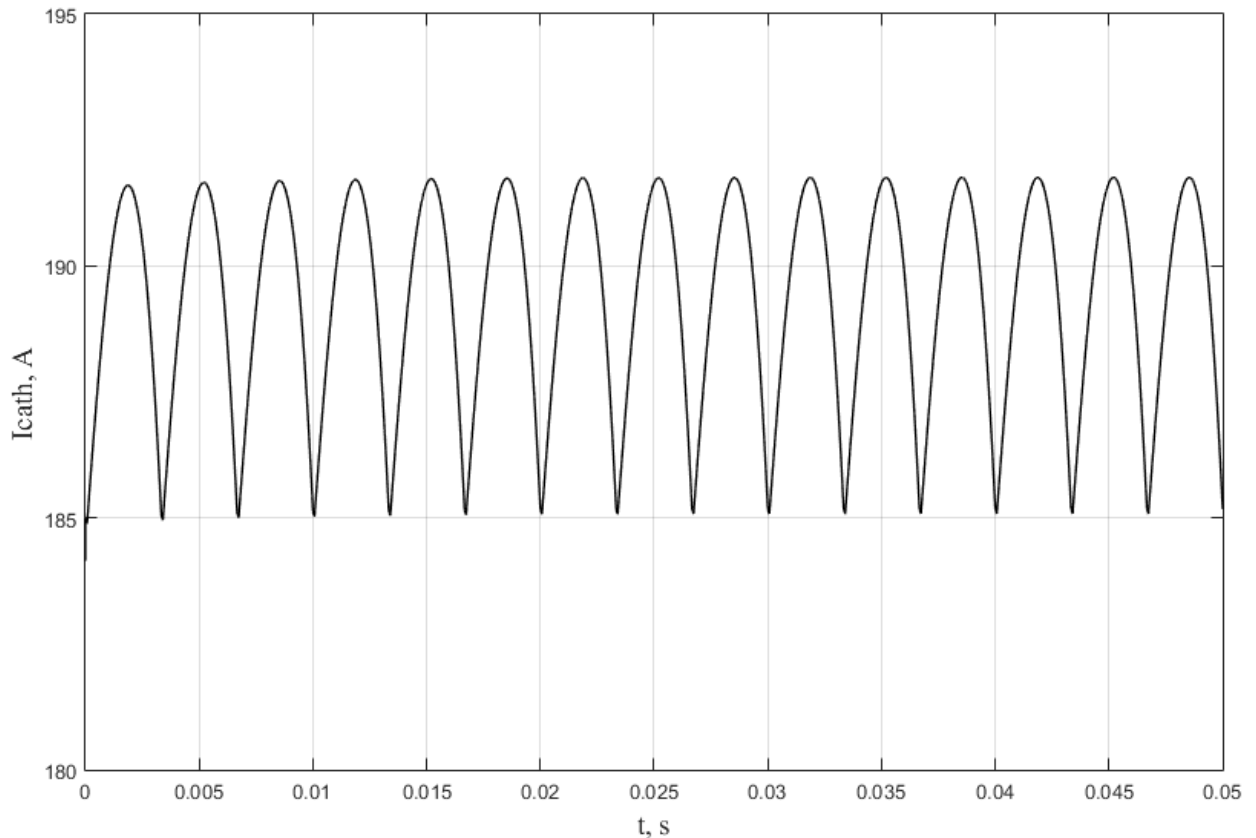


Рисунок 2.12. График зависимости $I_{cath} = f(t)$

2.6 Результаты численного моделирования работы дугового плазмотрона с осевой подачей плазмообразующего газа

Моделирование осуществлялось с использованием следующих вычислительных ресурсов:

- процессор Intel Core i7-4770K;
- оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) DDR3 16GB (2×8GB) G.Skill F3-1600C9D-16GXM.

В зависимости от расхода плазмообразующего газа время расчета составляло от 7 минут до 27 часов. Данная разница во времени расчета объясняется развитием неустойчивости плазменного потока с увеличением расхода плазмообразующего газа, что приводит к ухудшению сходимости расчета и уменьшению шага дискретизации по времени.

Одним из основных результатов численного моделирования работы дугового плазмотрона является распределение температуры, которое позволяет идентифицировать флуктуации потока плазмы. Распределение температуры при расходе плазмообразующего газа 0,55 г/с в различные моменты времени в случае с характеристикой тока, приведенной на рис. 2.12, представлено на рис. 2.13.

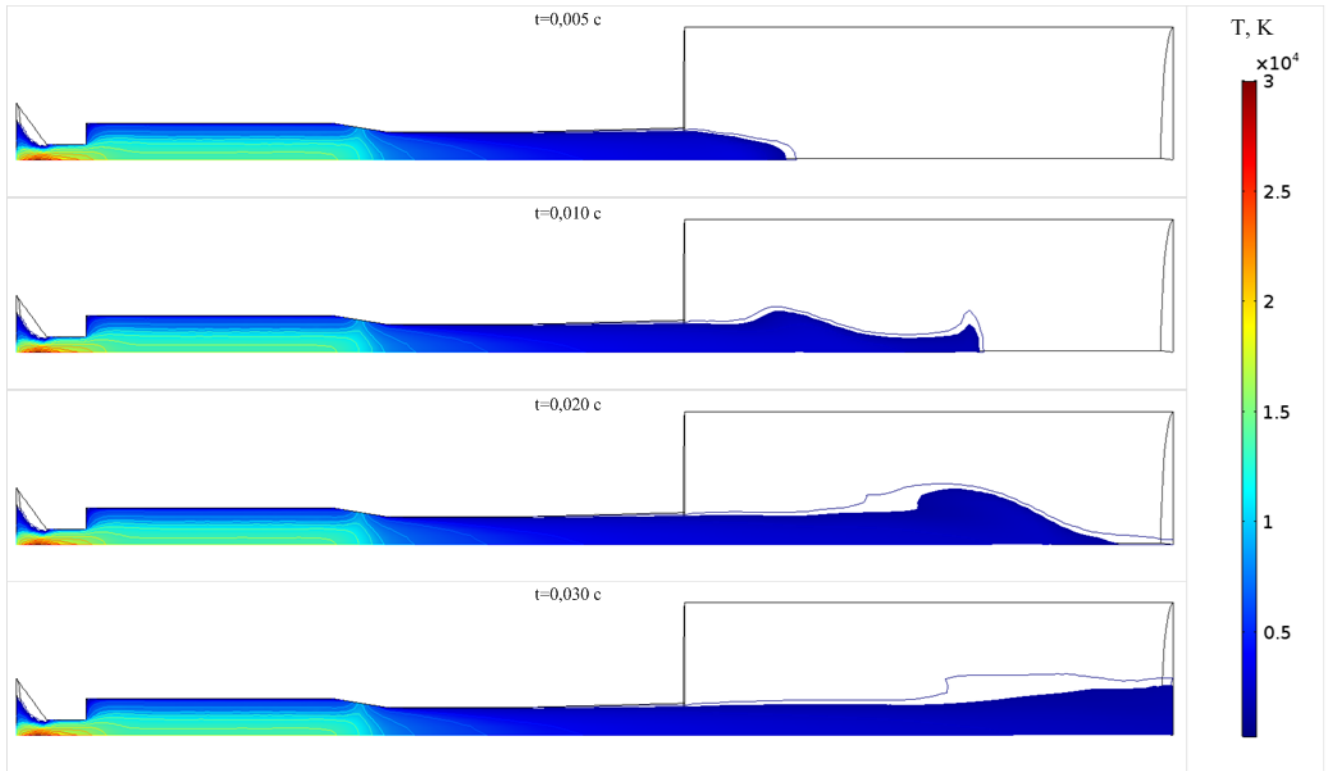


Рисунок 2.13. Распределение температуры ($I = f(t)$; $G = 0,55 \text{ г/с}$)

Согласно результатам численного моделирования работы дугового плазмотрона при режиме с расходом плазмообразующего газа 0,55 г/с и характеристикой тока, соответствующей источнику питания АПР-404 (см. рис. 2.12) время формирования установившегося плазменного потока составляет примерно 0,026 с, а число Рейнольдса – 72.

Распределение температуры при расходе плазмообразующего газа 0,55 г/с в различные моменты времени в случае с характеристикой тока $I = \text{const}$ представлено на рис. 2.14. Из результатов моделирования видно, что при малых расходах плазмообразующего газа влияние характеристики тока источников питания на стабильность плазменного потока является не значительным. Время формирования установившегося потока и число Рейнольдса в случае питания

плазмотрона от источника питания с идеализированным током совпадает с результатами для случая с применением в качестве источника питания АПР-404.

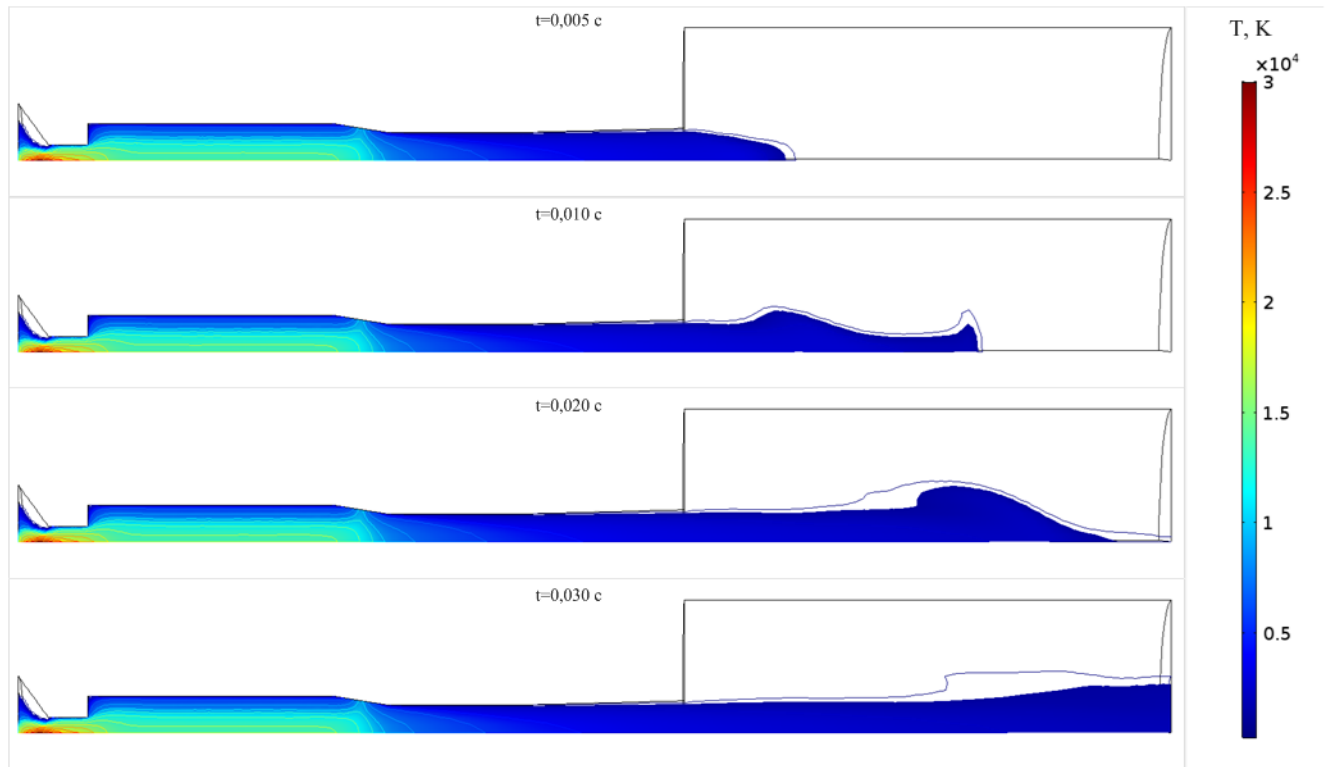


Рисунок 2.14. Распределение температуры ($I = const$; $G = 0,55 \text{ г/с}$)

Влияние источника питания (т.е. развитие неустойчивости, обусловленной джоулевым тепловыделением) на стабильность плазменного потока начинает проявляться при развитии силовой неустойчивости, связанной с флуктуацией импульса при увеличении расхода плазмообразующего газа. Данное явление особенно отчетливо проявляется при численном моделировании работы дугового плазмотрона с расходом плазмообразующего газа 2 г/с. Распределение температуры при расходе плазмообразующего газа 2 г/с в различные моменты времени в случае с характеристикой тока, приведенной на рис. 2.12, представлено на рис. 2.15. Согласно результатам численного моделирования работы дугового плазмотрона при режиме с расходом плазмообразующего газа 2 г/с и $I = f(t)$ время формирования установившегося плазменного потока составляет примерно 0,004 с, а число Рейнольдса – 474. Распределение температуры при расходе плазмообразующего газа 2 г/с в различные моменты времени в случае с характеристикой тока $I = const$ представлено на рис. 2.16.

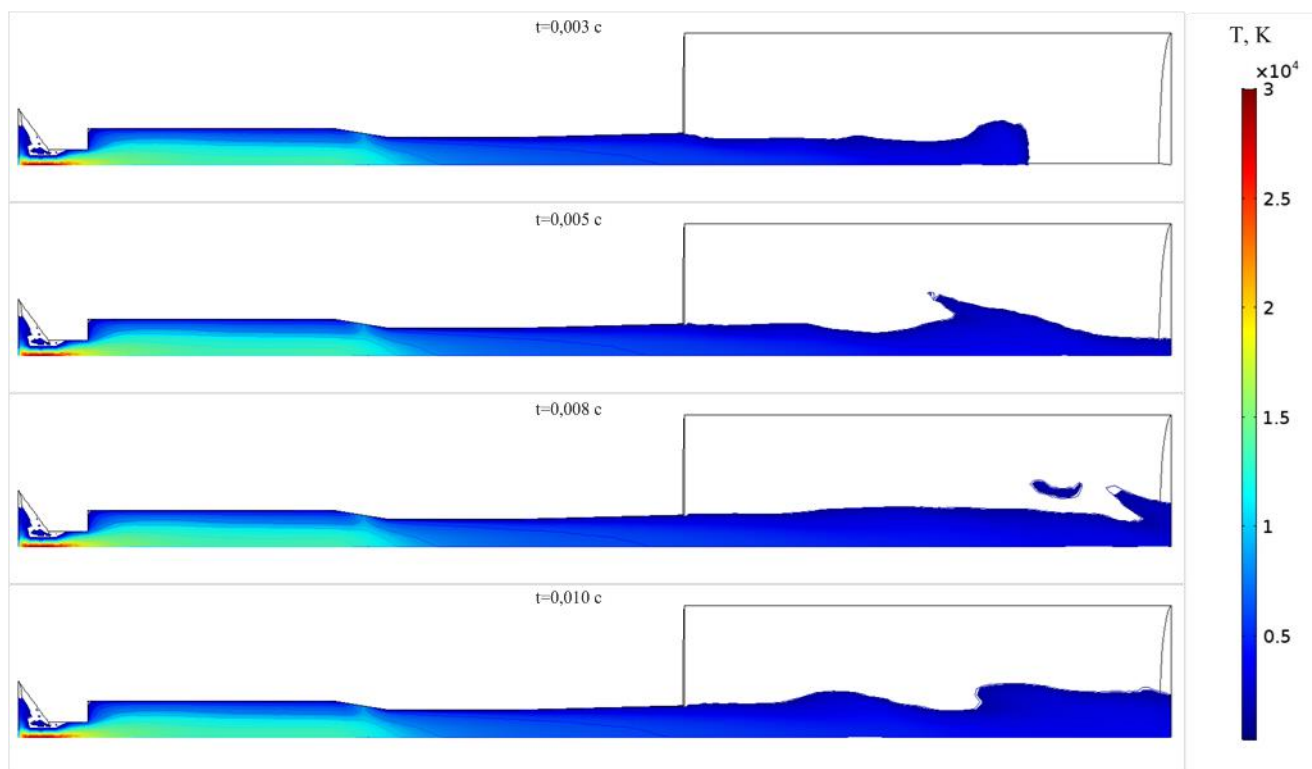


Рисунок 2.15. Распределение температуры ($I = f(t)$; $G = 2 \text{ г/с}$)

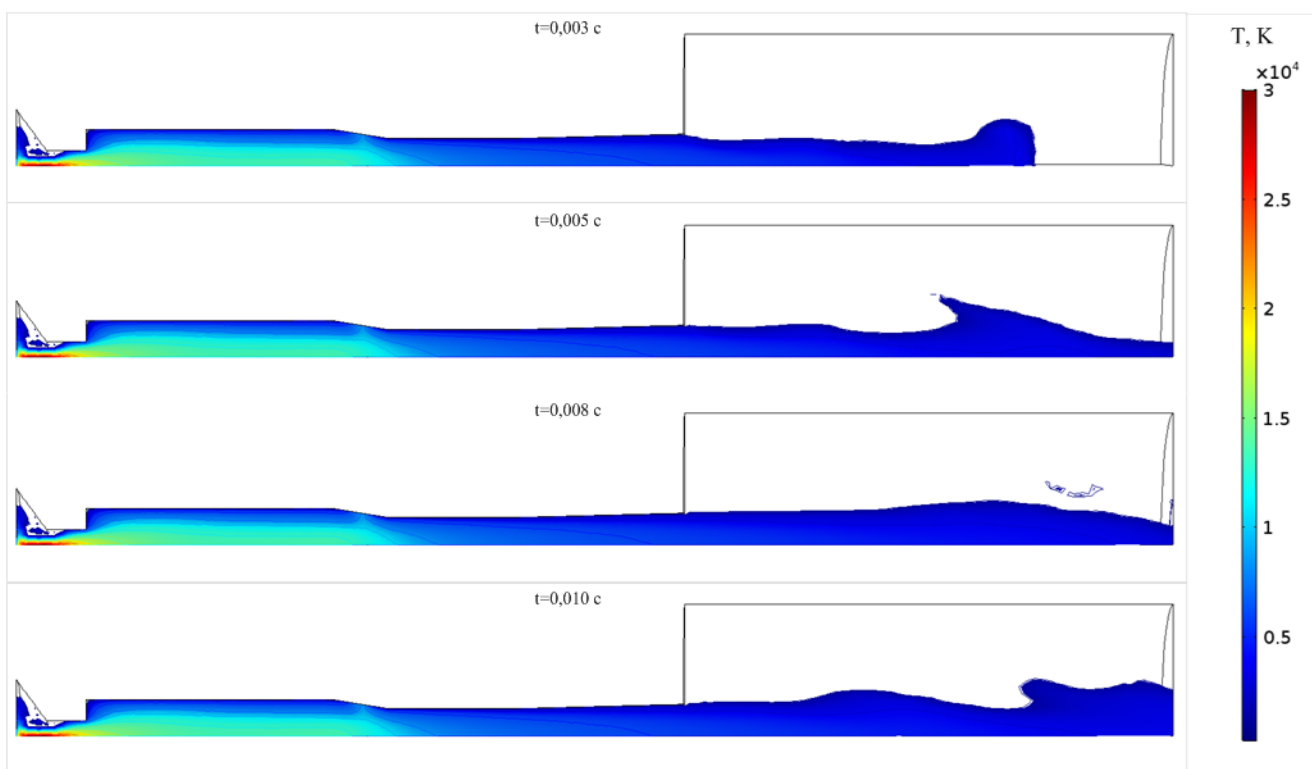


Рисунок 2.16. Распределение температуры ($I = \text{const}$; $G = 2 \text{ г/с}$)

Согласно результатам численного моделирования работы дугового плазмотрона при режиме с расходом плазмообразующего газа 2 г/с и $I = \text{const}$

время формирования установившегося плазменного потока составляет примерно 0,004 с, а число Рейнольдса – 476.

Несмотря на незначительные различия во времени становления установившегося потока и числа Рейнольдса стабильность плазменных потоков рассматриваемых случаев значительно различается, о чем свидетельствует построение изотермической поверхности (см. рис. 2.17).

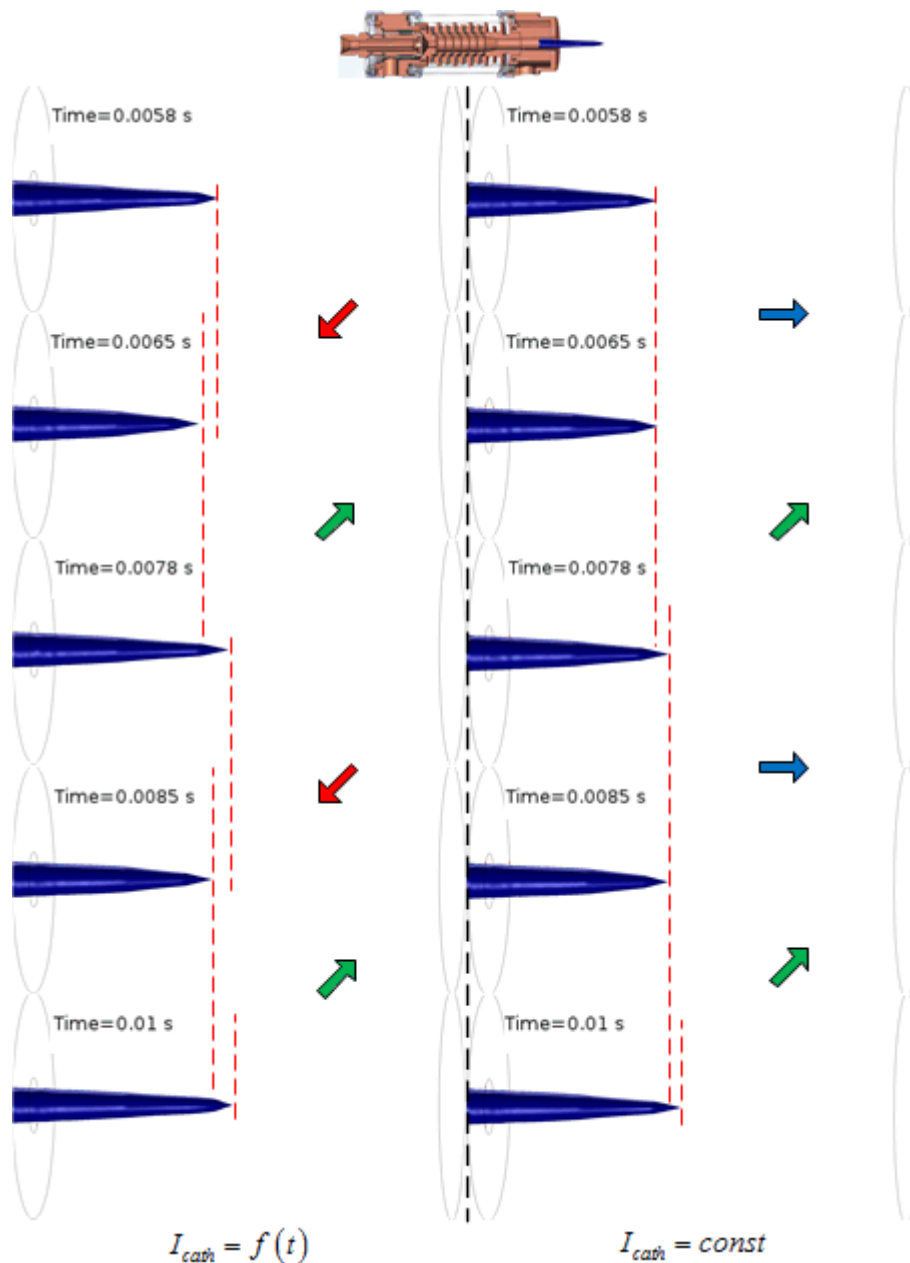


Рисунок 2.17. Флуктуация изоповерхности ($T=4800$ К) во времени для различных параметров моделирования при $I = f(t)$ и $I = const$

Одной из причин развития неустойчивости являются геометрические характеристики плазматрона. В этой связи было реализовано численное

моделирование при варьировании угла диффузора анодной части плазмотрона (см. рис. 2.18).

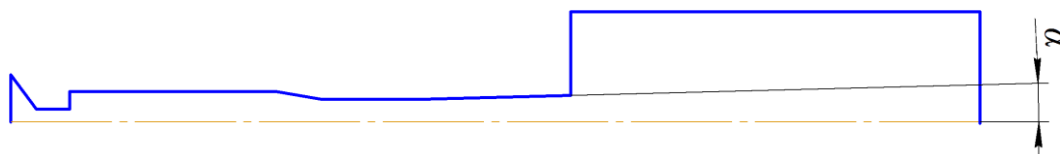


Рисунок 2.18. Расчетная область для идентификации влияния конструкции плазмотрона на стабильность плазменного потока

Результаты численного моделирования при различных углах диффузора представлены на рис. 2.19.

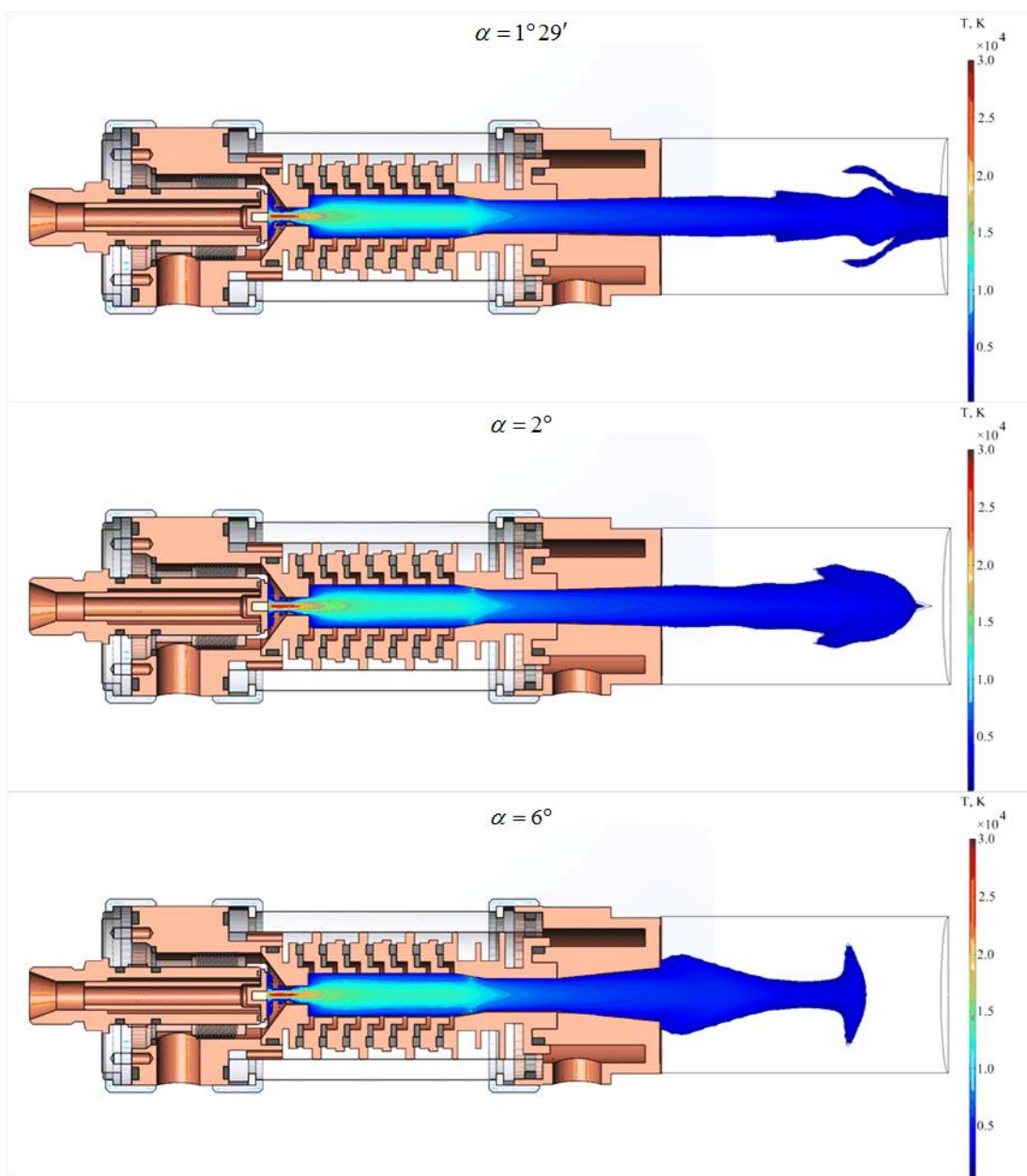


Рисунок 2.19. Распределение температуры при различных углах диффузора анодной части плазмотрона

Согласно результатам моделирования установлено, что при угле диффузора 2° действие источника питания компенсируется, и плазменный поток стабилизируется, что отчетливо видно при анализе падения напряжения на дуге (см. рис. 2.20).

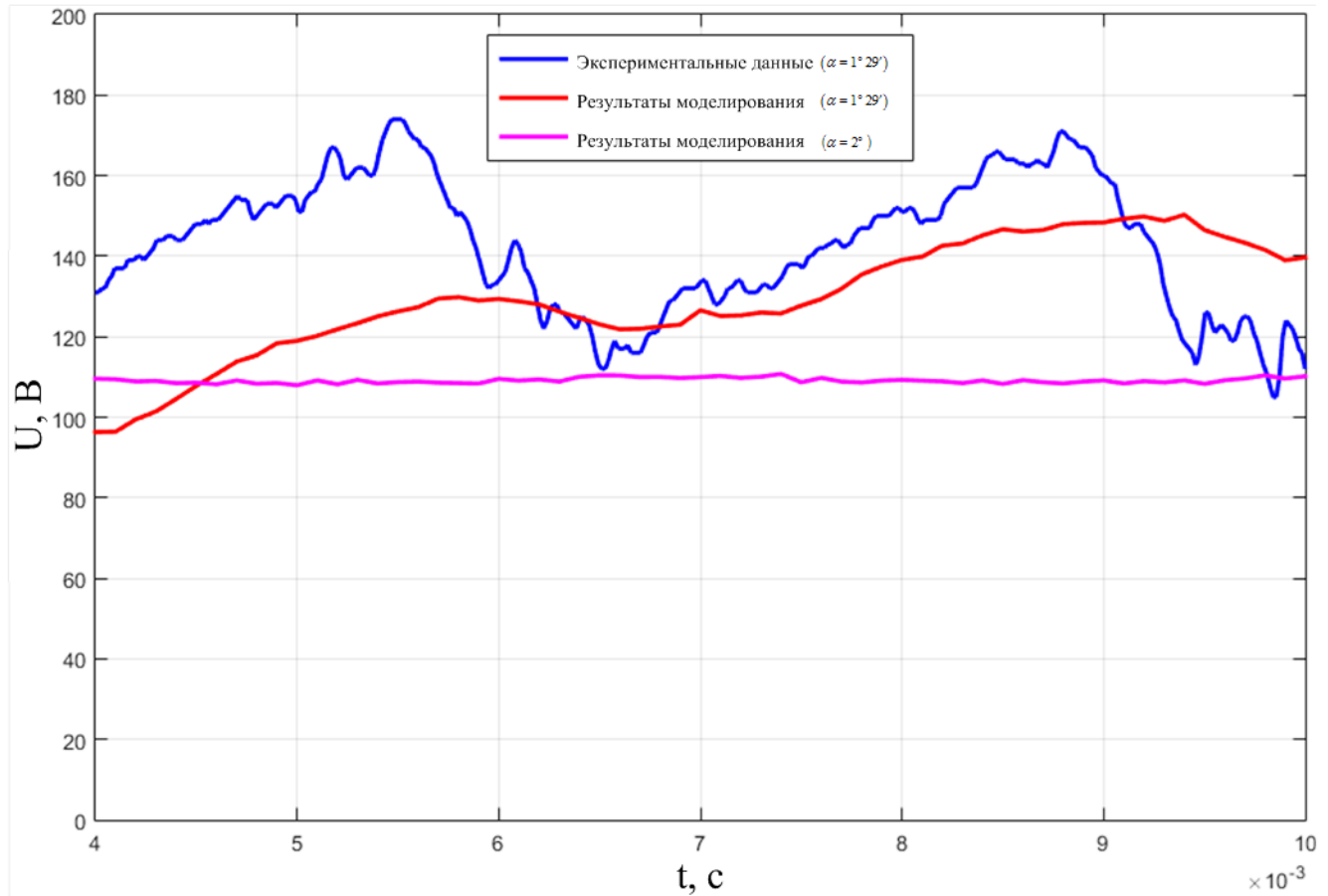


Рисунок 2.20. Падение напряжения на дуге при различных углах диффузора анодной части плазмотрона

Увеличение угла диффузора до 6° приводит к сильному укорачиванию плазменного потока, что является негативным фактором для технологии плазменного напыления. Кроме того, при угле более 5° на стенках сопла плазмотрона начинают формироваться отрывные течения [58,59,60,61], что приводит к турбулизации потока плазмы. На основе изложенного, оптимальное значение угла диффузора плазмотрона находится в диапазоне от 2° до 5° .

Согласно [62] коэффициент температуропроводности определяется согласно выражению (2.10).

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d} \quad (2.10)$$

Числа Нуссельта при ламинарном и турбулентном потоках определяются согласно выражениям (2.11) и (2.12) соответственно.

$$Nu_{laminar} = 0,664 \left(\frac{Re}{\varepsilon} \right)^{1/2} Pr^{1/3} \quad (2.11)$$

$$Nu_{turbulence} = \frac{0,037 \left(\frac{Re}{\varepsilon} \right)^{0.8} Pr}{1 + 2,443 \left(\frac{Re}{\varepsilon} \right)^{-0.1} (Pr^{2/3} - 1)} \quad (2.12)$$

Анализ выражений (2.11) и (2.12) демонстрирует более интенсивный нагрев в случае турбулентного характера течения, что является негативным фактором, приводящим к снижению эксплуатационного ресурса составляющих элементов конструкции плазмотрона.

2.7 Моделирование вихревой стабилизации дугового плазмотрона в прикатодной области

Одним из широко применяемых способов стабилизации электрической дуги и управления характеристиками плазменного потока является применение вихревой стабилизации. Конструктивные особенности плазмотрона ПН-В1 не позволяют с малой степенью погрешности перейти к решению двухмерной осесимметричной задачи, а реализация трехмерной задачи требует высоких вычислительных ресурсов. Оптимальным выходом является создание трех мерной нестационарной математической модели прикатодного узла, где происходит формирование вихревой подачи плазмообразующего газа, с целью получения распределения скоростей для задания их в качестве граничных условий первого рода в двухмерной осесимметричной задаче.

Конструкция прикатодного узла представлена на рис. 2.21. Формирование тангенциальной закрутки плазмообразующего газа осуществляется посредством четырехзаходной резьбы в прикатодной части плазмотрона. Расчетная область, ограниченная стенками катодного узла плазмотрона, представлена на рис. 2.22.

Исследование модели произведено при варьировании расхода плазмообразующего газа в диапазоне от 0,4 г/с до 2,4 г/с.

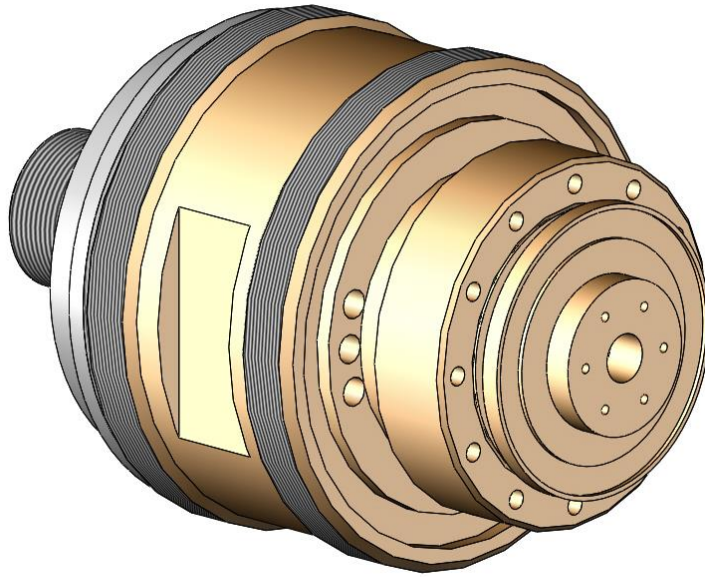


Рисунок 2.21. Катодный узел плазмотрона ПН-В1

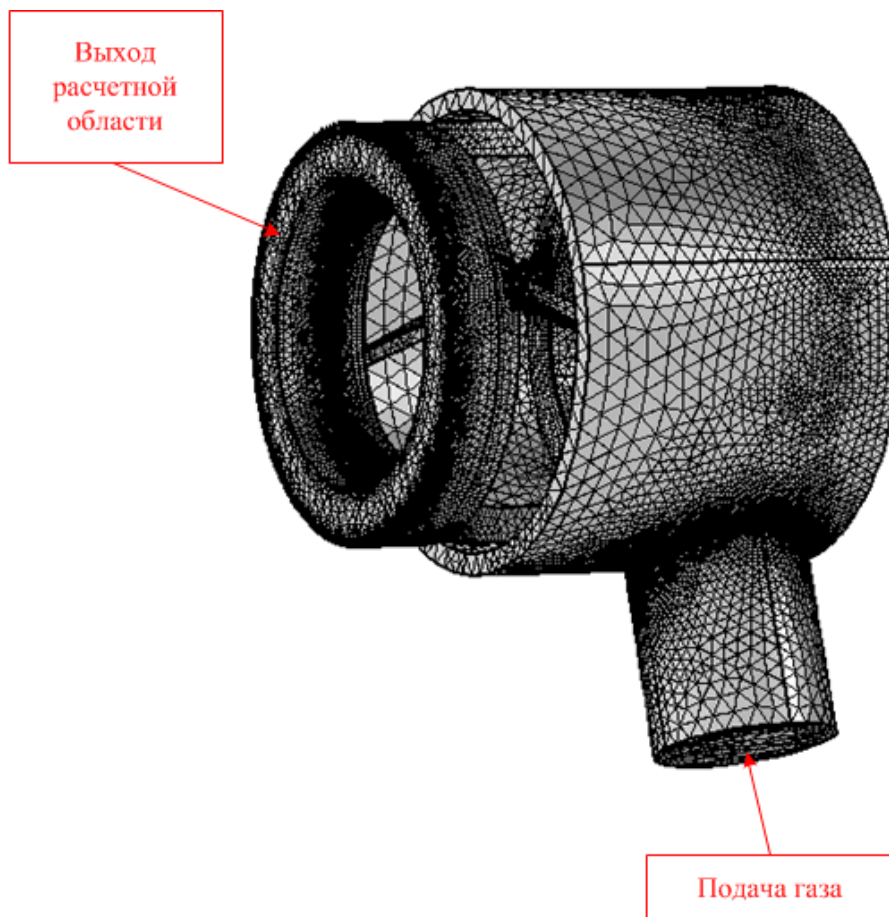


Рисунок 2.22. Геометрия расчетной области с дискретизацией расчетной области

Математическая модель основана на решении уравнения Навье-Стокса для ламинарного потока. Применимость модели ламинарного потока обусловлена

малым значением числа Рейнольдса, которое является меньше критических значений $Re_{кр}$ [63,64].

С целью подтверждения корректности выбора математической модели ламинарного потока была получена зависимость числа Рейнольдса от времени при различных значениях расхода плазмообразующего газа (см. рис. 2.23).

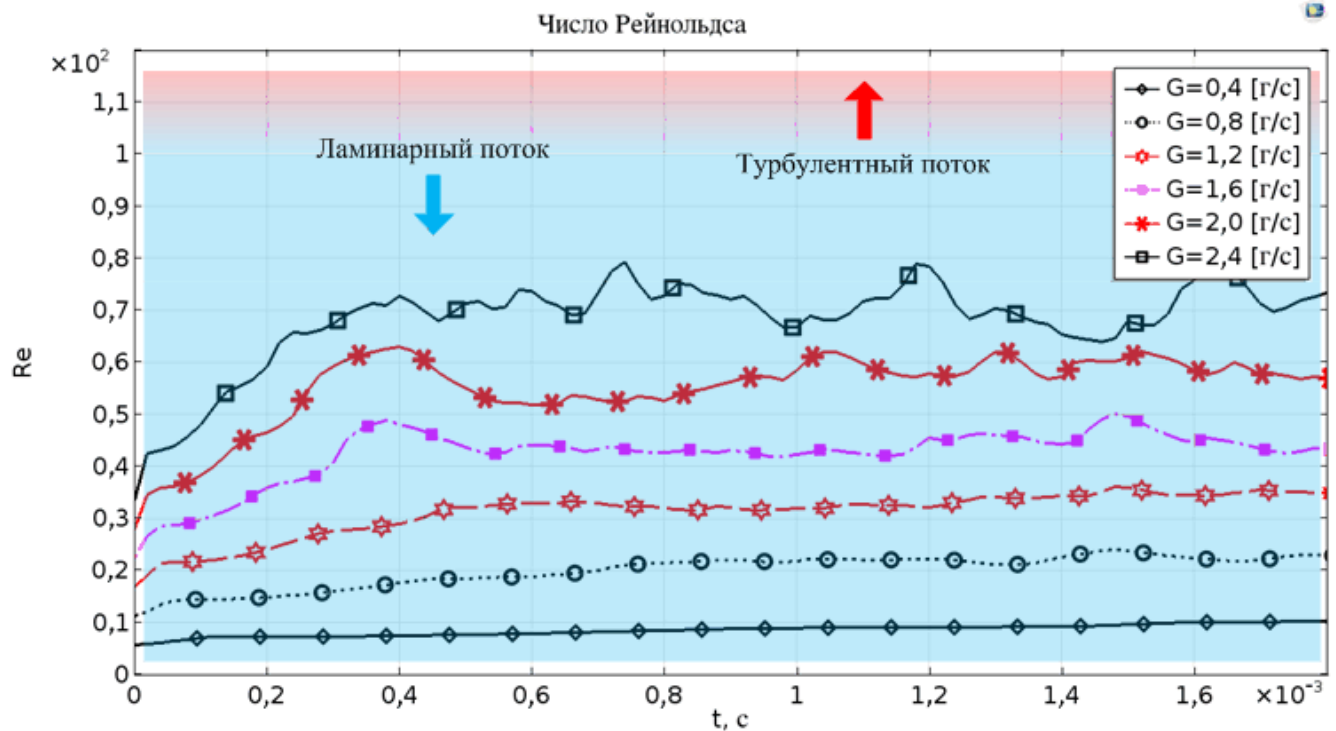


Рисунок 2.23. Зависимость числа Рейнольдса от времени при различном расходе плазмообразующего газа

Время формирования установившегося потока является одним из важнейших параметров для создания автоматизированной системы поджига.

Анализ зависимости максимальной скорости на выходе расчетной области от времени (см. рис. 2.24) позволяет идентифицировать момент времени, при котором поток можно считать установившемся, которое при минимальном расходе газа составляет 0,1 мс.

Основной задачей моделирования является получение распределений осевой и радиальных скоростей для задания граничных условий двумерной осесимметричной задачи, где осевая скорость плазмотрона в рамках трехмерной математической модели катодного узла соответствует скорости v_z , а радиальная скорость – v_y .

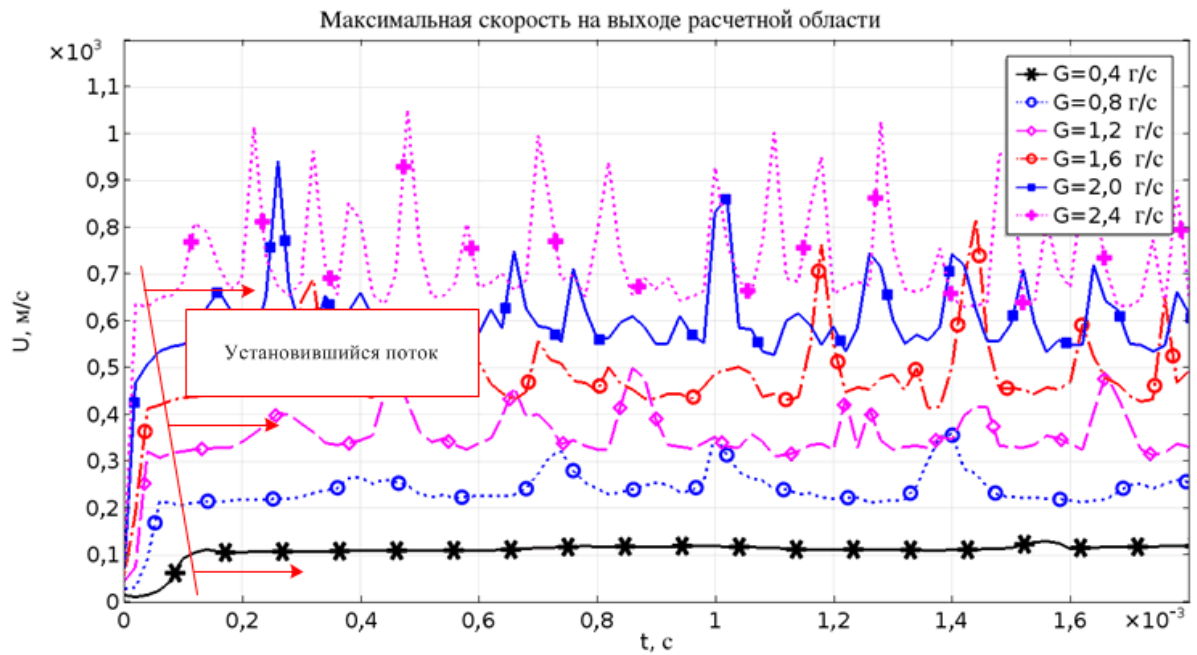


Рисунок 2.24. Зависимость максимальной скорости на выходе расчетной области при различных расходах плазмообразующего газа

Распределения скорости v_z вдоль линии распределения (см. рис. 2.24) в зависимости от координаты x и времени при расходе плазмообразующего газа 0,4 г/с представлен на рис. 2.25.

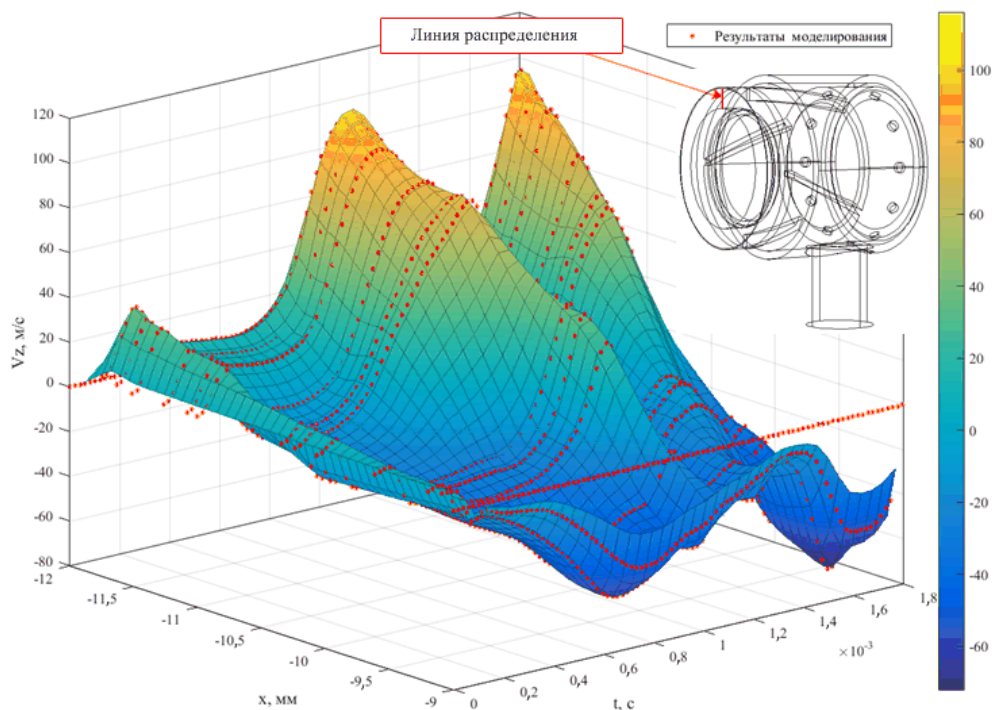


Рисунок. 2.25. График распределения скорости v_z при расходе плазмообразующего газа 0,4 г/с

Использование полученных результатов моделирования возможно при усреднении полученных распределений скорости по времени. Результаты усреднения скоростей представлены на рис. 2.26.

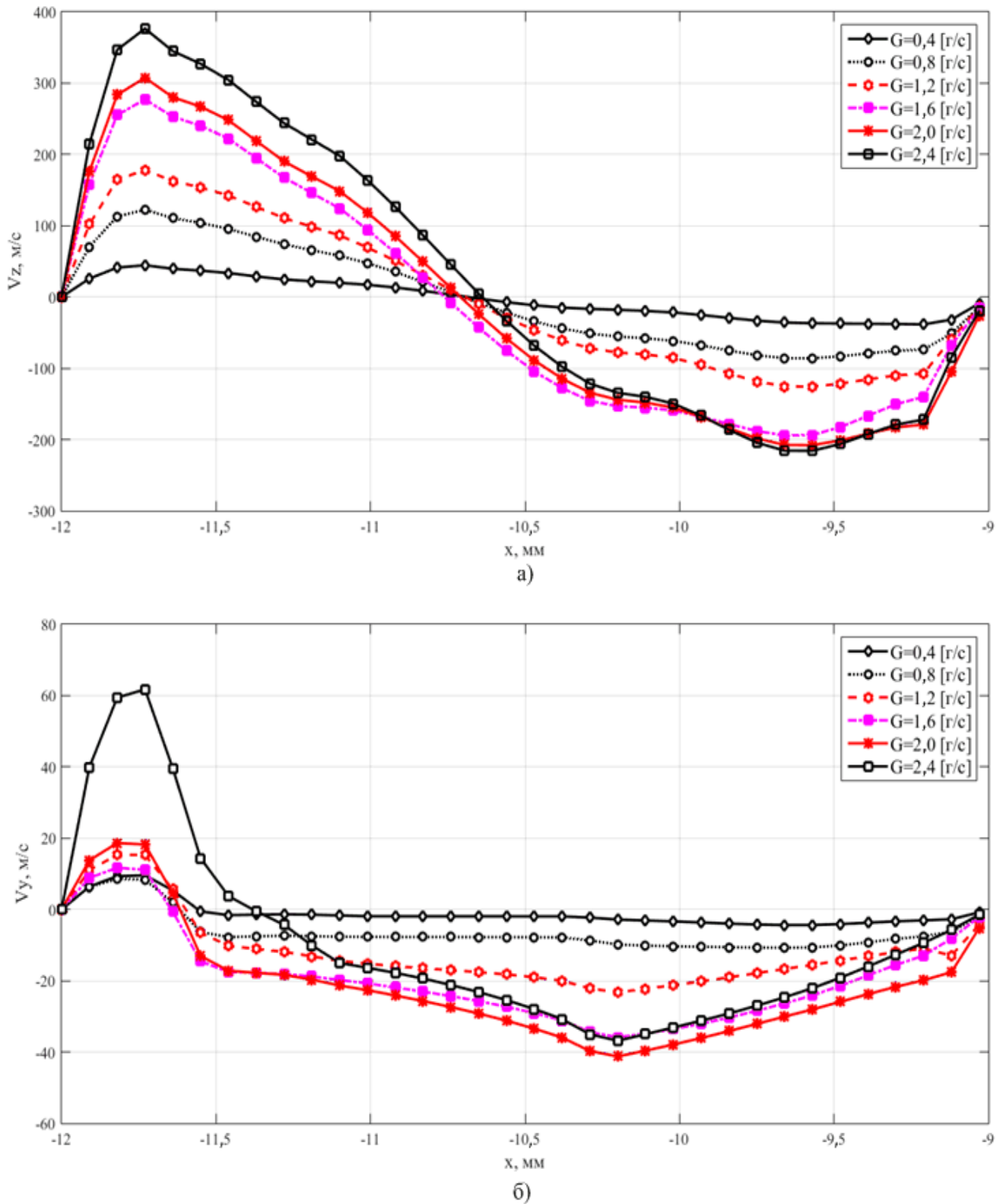


Рисунок 2.26. Графики распределения при разных расходах газа: а – скорости v_z ; б – скорости v_y

2.8 Математическая модель дугового плазмотрона с вихревой стабилизацией столба электрической дуги и струи плазменного потока

Математическая модель плазмотрона с вихревой стабилизацией дуги для технологии плазмотермического нанесения покрытий основаны на применении уравнений, описанный в пункте 2.1. Геометрия расчетной области и алгоритм расчета совпадают с математической моделью плазмотрона с осевой подачей плазмообразующего газа. Главным отличием данной математической модели является задание граничных условий.

Распределение осевой скорости v_z задано полиномом пятой степени:

$$v_z = a_1x^5 + a_2x^4 + a_3x^3 + a_4x^2 + a_5x + a_6 \quad (2.13)$$

Коэффициенты полинома для скорости v_z с учетом центровки оси абсцисс представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2

Коэффициенты полинома для скорости v_z

$G, \text{ г/с}$	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
0,4	32,07	24,51	38,30	13,75	-31,45	-12,95
0,8	64,70	28,38	-70,56	28,69	-82,90	-43,97
1,2	96,14	46,06	-101,50	36,81	-123,10	-61,24
1,6	124,40	21,21	-123,80	155,80	-186,40	-130,50
2,0	157,80	60,50	-168,60	95,43	-208,10	-114,80
2,4	173,30	48,99	-187,00	132,20	-234,70	-104,60

Зависимость коэффициентов полинома для скорости v_z от расхода газа может быть описана полиномом второй степени:

$$a_n = b_1G^2 + b_2G + b_3, \quad (2.14)$$

где G – расход газа, г/с.

Коэффициенты полинома для выражения (2.14) представлены в таблице 2.3.

Полиномиальная форма записи распределения скоростей позволяет осуществлять варьирование расхода плазмообразующего газа при численном

моделировании работы дугового плазмотрона с вихревой стабилизацией в широком диапазоне значений.

Таблица 2.3

Коэффициенты полинома для выражения (2.14)

	b_1	b_2	b_3
a_1	-4,86	54,19	112,10
a_2	0,60	10,36	37,78
a_3	0,87	-56,66	-115,7
a_4	-18,89	56,07	88,28
a_5	12,39	-77,78	-154,80
a_6	21,12	-39,55	-95,61

По аналогии со скоростью v_z скорость v_r задана полиномом седьмой степени:

$$v_r = c_1 x^7 + c_2 x^6 + c_3 x^5 + c_4 x^4 + c_5 x^3 + c_6 x^2 + c_7 x + c_8 \quad (2.15)$$

Коэффициенты полинома для скорости v_r с учетом центровки оси абсцисс представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4

Коэффициенты полинома для скорости v_r

$G, \text{ г/с}$	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8
0,4	14,64	5,84	-46,91	-6,15	45,44	-0,61	-13,77	-1,65
0,8	21,31	11,13	-67,03	-13,98	65,78	2,65	-19,73	-7,91
1,2	38,57	27,69	-115,10	-53,49	101,60	34,53	-25,25	-20,99
1,6	38,20	24,33	-123,30	-47,77	125,00	39,93	-36,93	-32,13
2,0	54,48	42,92	-162,20	-85,48	149,30	60,01	-42,43	-37,28
2,4	70,11	25,32	-225,10	-43,27	208,50	44,73	-57,69	-31,14

Зависимость коэффициентов полинома для скорости v_r от расхода газа по аналогии со скоростью v_z может быть описана полиномом первой степени:

$$c_n = e_1 G + e_2 \quad (2.16)$$

Коэффициенты полинома для выражения (2.16) представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5

Коэффициенты полинома для выражения (2.16)

	e_1	e_1
c_1	20,12	39,55
c_2	10,12	22,87
c_3	-63,32	-123,30
c_4	-21,08	-41,69
c_5	58,22	115,90
c_6	21,60	30,21
c_7	-16,00	-32,63
c_8	-13,19	-21,85

Наличие уступа в прикатодной области (см. рис. 2.27) приводит к развитию неустойчивости, обусловленной геометрией плазмотрона, что требует значительных вычислительных ресурсов даже при малых величинах расхода плазмообразующего газа.

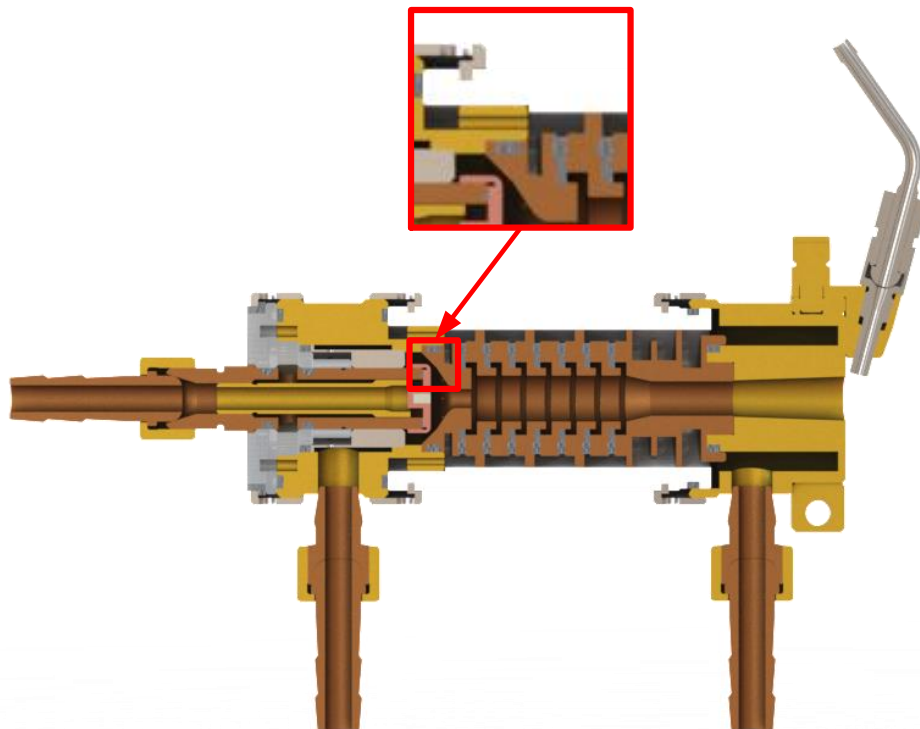


Рисунок 2.27. Плазмотрон ПН-В1 в разрезе

Расчетное время работы 0,01 с дугового плазмотрона с вихревой стабилизацией при расходе плазмобразующего газа 0,5 г/с составило 4 дня 3 часа, что значительно превышает время расчета при осевой подаче плазмобразующего газа, которое составляет около 7 минут.

Сравнение результатов численного моделирования работы дугового плазмотрона с осевой подачей плазмобразующего газа и плазмотрона с вихревой стабилизацией дуги представлено на рис. 2.28.

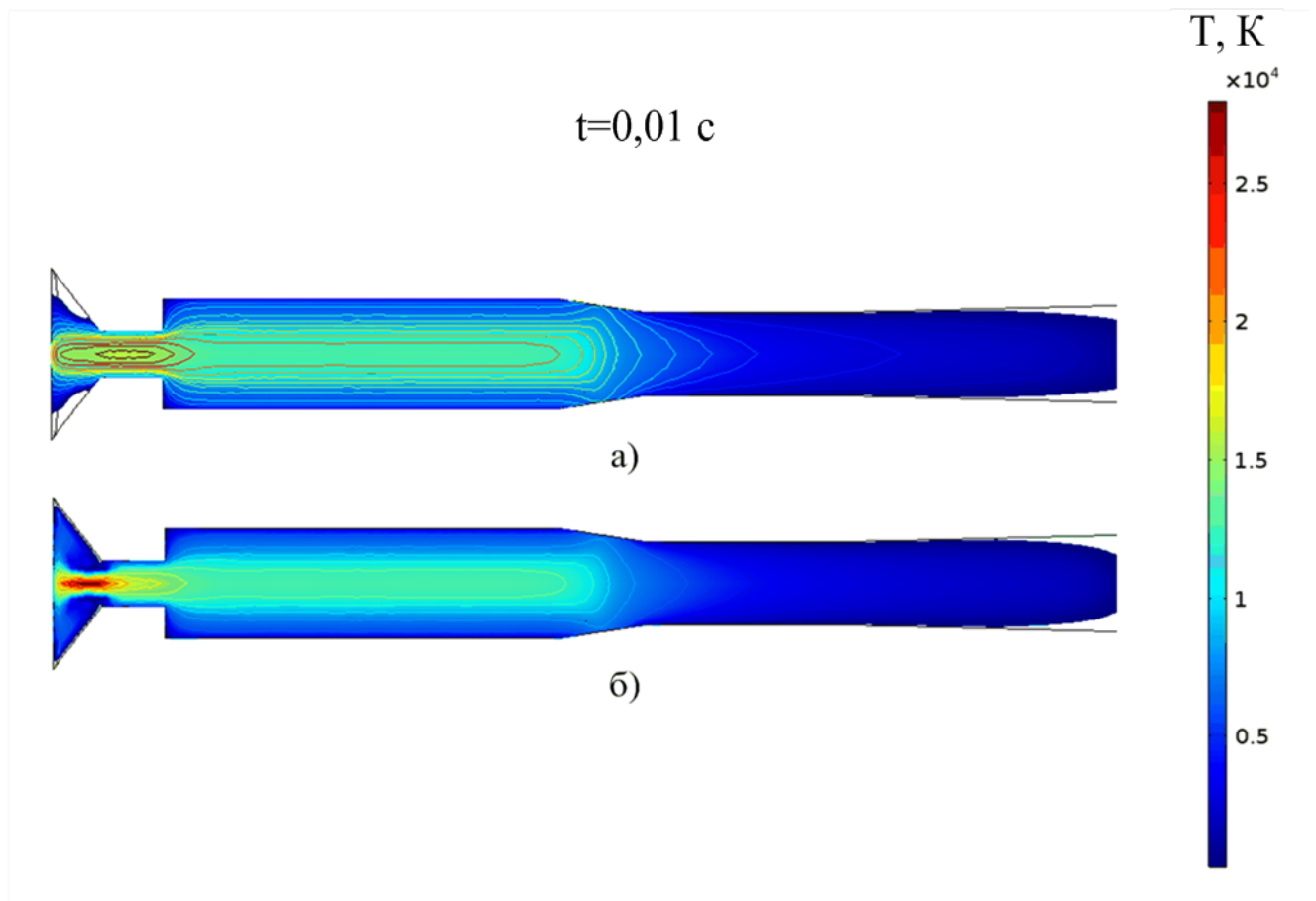


Рисунок 2.28. Распределение температуры: а – математическая модель с осевой подачей плазмобразующего газа; б – математическая модель с вихревой стабилизацией дуги

Анализ результатов моделирования показал, что вихревая стабилизация дуги оказывает сильное влияние на распределение температуры в прикатодной области – дуга становится более сжатой, что приводит к развитию перегревной неустойчивости, однако, разница между распределениями температуры за прикатодным сужением в направлении анода при вихревой стабилизации дуги и осевой подаче плазмобразующего газа минимальна, что позволяет сделать

допущение при реализации математической модели о равномерной подаче плазмообразующего газа в случае изучения плазменного потока на выходе плазмотрона, тем самым значительно сократить время, требуемое для численного моделирования.

Из результатов моделирования видно, что в случае плазмотрона с вихревой стабилизацией температура в пристеночной области прикатодной части плазмотрона значительно ниже, чем у плазмотрона с осевой подачей газа, что позволяет увеличить эксплуатационный ресурс оборудования.

2.9 Теплообменные процессы в струе плазмы дугового плазмотрона у поверхности частицы при ламинарном и турбулентном потоках

При газодинамическом взаимодействии, сопровождаемом теплообменными процессами между средой (плазмой) и телом, наблюдается сильный градиент температуры у поверхности частицы – тепловой пограничный слой. Толщина теплового пограничного слоя превышает толщину динамического пограничного слоя. Существенное влияние на теплообмен тела со средой оказывают толщина пограничного слоя и характер потока плазмы. При ламинарном характере потока плазмы теплообмен осуществляется преимущественно за счет механизма теплопроводности. Коэффициент теплопроводности воздушной плазмы не превышает $6 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, то тепловой пограничный слой является значительным термическим сопротивлением. При переходе от ламинарного характера потока к турбулентному значение термического сопротивления уменьшается за счет активного перемешивания среды внутри пограничного слоя.

С целью оценки влияния характера потока на теплообменные процессы разработана упрощенная математическая модель, представляющая собой неизотермические ламинарное и турбулентное течения, с помещенным внутрь твердым телом.

Расчетная область для анализа теплообменных процессов при ламинарном потоке представлена на рис. 2.29.

В качестве начальных условий задается значение температуры 5000 К. На входе расчетной области задаются граничные условия первого рода для УБЭ и УД: температура на входе, равная 5000 К, и распределение скорости.

Начальная температура твердого тела составляет 318 °С.

В качестве граничного условия на выходе расчетной области для УД задается граничное условие первого рода: $p=1 \text{ атм.}$

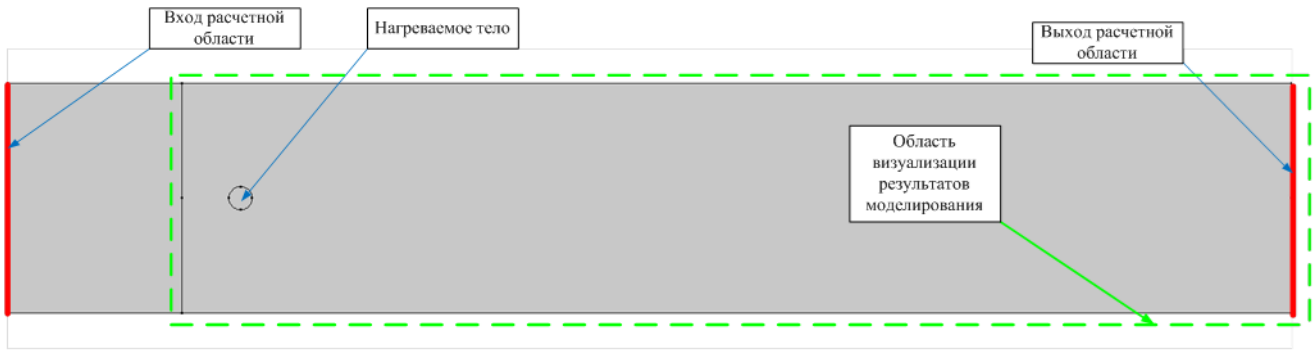


Рисунок 2.29. Расчетная область (ламинарный поток)

Расчетная область для математической модели с неізотермическим турбулентным течением (см. рис. 2.30) отличается от расчетной области, представленной на рис. 2.29, наличием объекта, образующего турбулентное течение плазменного потока.

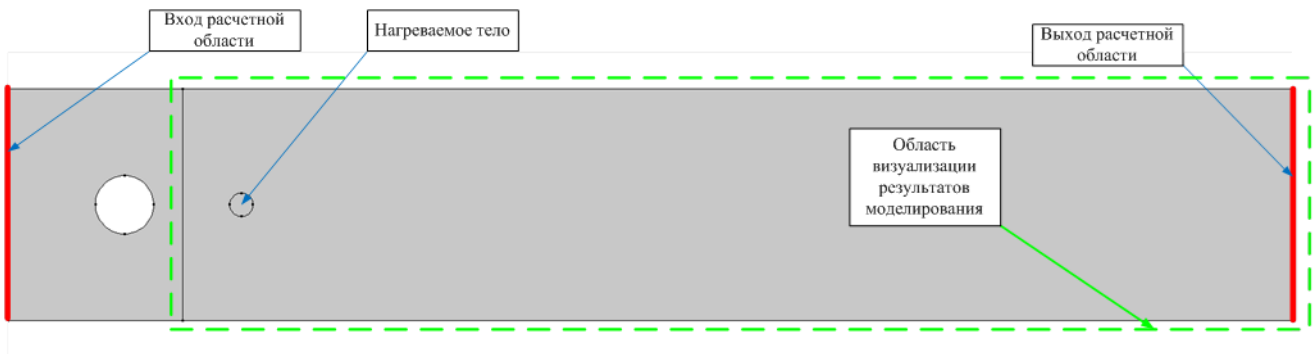


Рисунок 2.30. Расчетная область (турбулентный поток)

УД представляет собой SST модель турбулентности [65, 66] и описывается следующими выражениями:

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = \nabla \cdot \left[-pI + (\mu + \mu_T) (\nabla \vec{v} + (\vec{v})^T) \right] + \vec{F} \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (2.18)$$

$$\rho \frac{\partial \vec{k}}{\partial t} + \rho (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{k} = \nabla \cdot [(\mu + \mu_T \sigma_k) \nabla \vec{k}] + \vec{P} - \beta_0^* \rho \vec{\omega} \vec{k} \quad (2.19)$$

$$\rho \frac{\partial \vec{\omega}}{\partial t} + \rho (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{\omega} = \nabla \cdot [(\mu + \mu_T \sigma_\omega) \nabla \vec{\omega}] + \frac{\gamma}{\mu_T} \rho \vec{P} - \rho \beta_0 \vec{\omega} \vec{\omega} + \dots \quad (2.20)$$

$$+ 2(1 - f_{V1}) \frac{\sigma_\omega 2\rho}{\vec{\omega}} \nabla \vec{k} \cdot \nabla \vec{\omega}$$

$$\nabla G \cdot \nabla G + \sigma_w G (\nabla \cdot \nabla G) = (1 + 2\sigma_w) G^4 \quad (2.21)$$

$$I_w = \frac{1}{G} - \frac{I_{ref}}{2} \quad (2.22)$$

$$\mu_T = \rho \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, S f_{v2})} \quad (2.23)$$

$$S = \sqrt{2S' : S'} \quad (2.24)$$

$$S' = \frac{1}{2} (\nabla v + (\nabla v)^T) \quad (2.25)$$

$$P = \min(P_k, 10\beta_0^* \rho \omega k) \quad (2.26)$$

$$P_k = \mu_T \left[\nabla v : (\nabla v + (\nabla v)^T) - \frac{2}{3} (\nabla \cdot v)^2 \right] - \frac{2}{3} \rho k \nabla \cdot v \quad (2.27)$$

$$\phi = f_{v1} \phi_1 + (1 - f_{v2}) \phi_2 \quad (2.28)$$

$$\phi = \beta, \gamma, \sigma_k, \sigma_\omega \quad (2.29)$$

В качестве среды используется воздух, свойства приведены в пункте 2.4.

В качестве исследуемого тела алюминий. Свойства представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.6

Свойства твердого тела

№	Наименование величины	Значение	Единицы измерения
1	Теплоемкость, C_p	900	Дж/(кг·К)
2	Теплопроводность, λ	238	Вт/(м·К)
3	Плотность, ρ	2700	кг/м ³

Распределения температуры и скорости для ламинарного неизоэтермического плазменного потока представлены на рис. 2.31, 2.32, 2.33, 2.34, 2.35, 2.36, 2.37.

Результаты численного моделирования нестационарной математической модели демонстрируют формирование термического и динамического пограничных слоев, препятствующих эффективному прогреву частицы.

Распределения температуры и скорости для турбулентного неизоэтермического плазменного потока представлены на рис. 2.38, 2.39, 2.40, 2.41, 2.42, 2.43, 2.44.

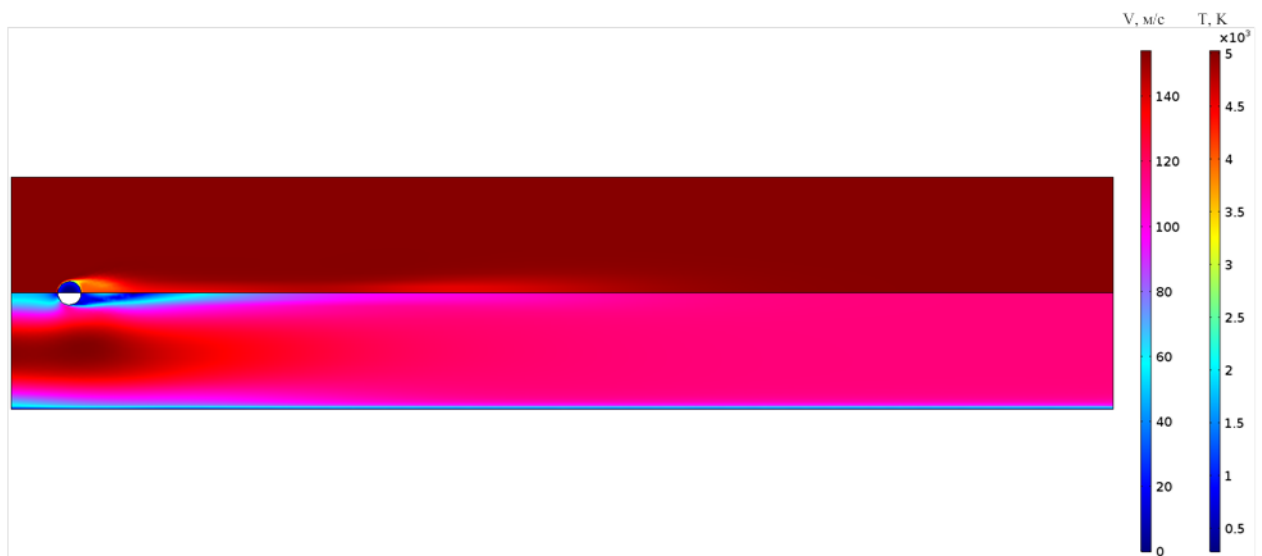


Рисунок 2.31. Распределения температуры и скорости в момент времени t_1 (ламинарный поток)

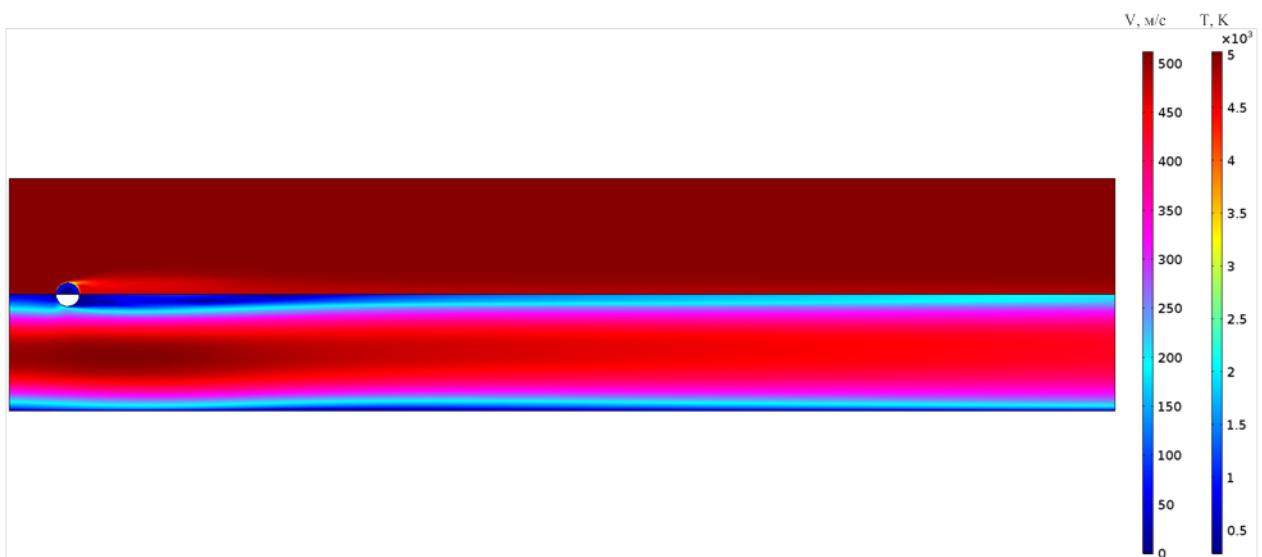


Рисунок 2.32. Распределения температуры и скорости в момент времени t_2 (ламинарный поток)

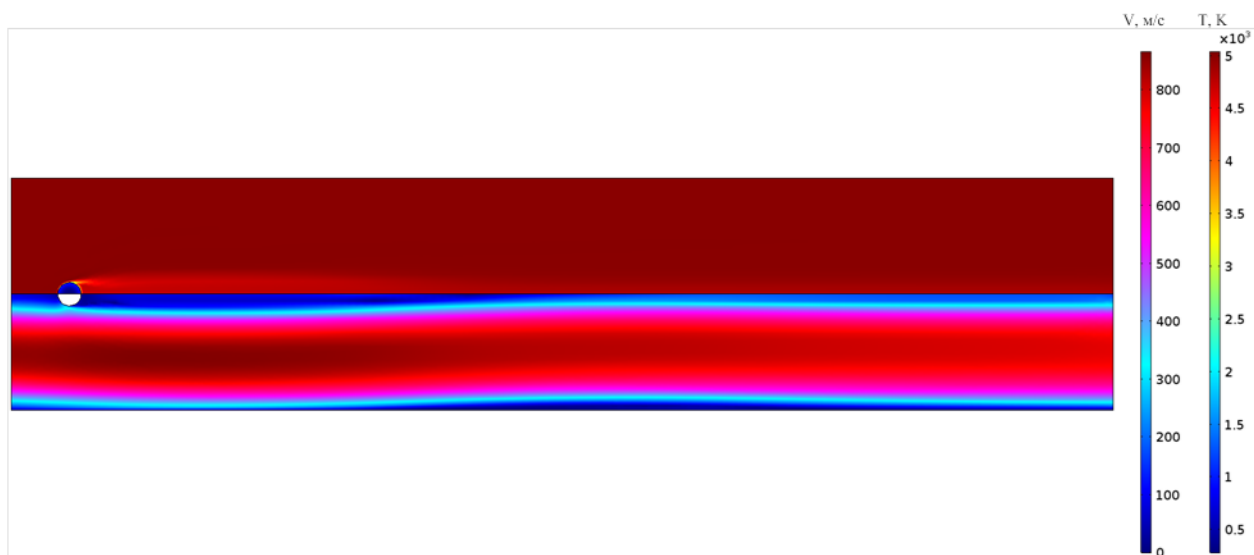


Рисунок 2.33. Распределения температуры и скорости в момент времени t_3 (ламинарный поток)

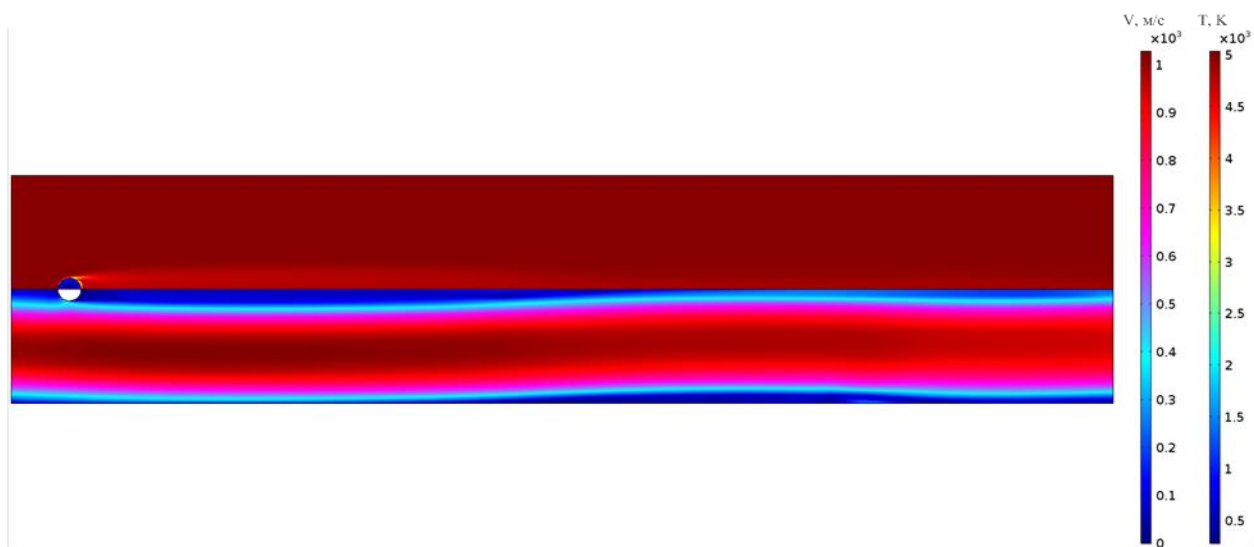


Рисунок 2.34. Распределения температуры и скорости в момент времени t_4 (ламинарный поток)

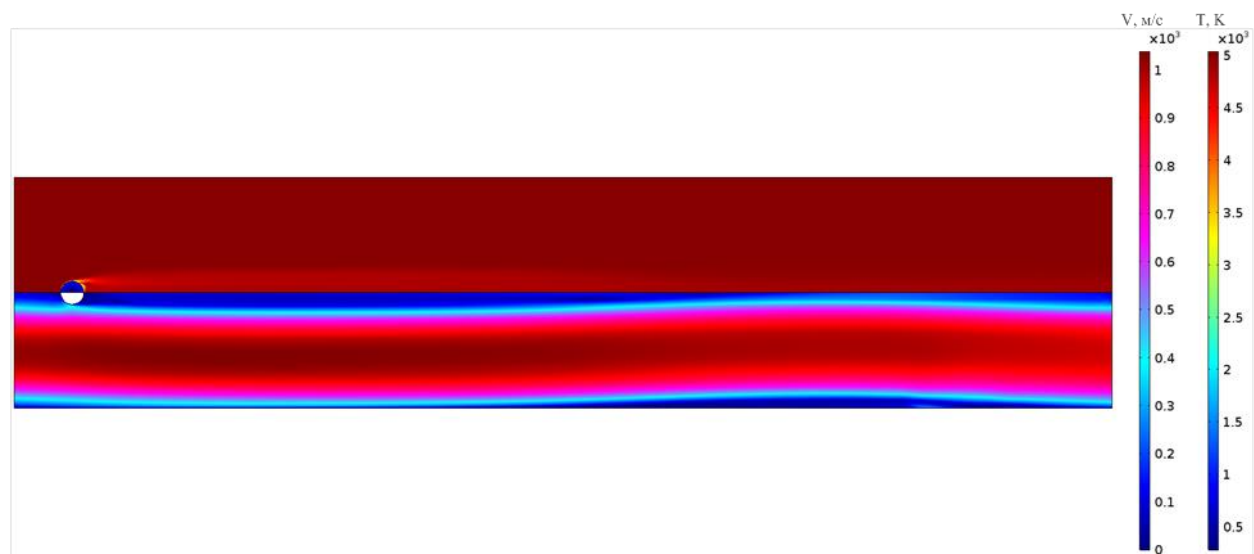


Рисунок 2.35. Распределения температуры и скорости в момент времени t_5 (ламинарный поток)

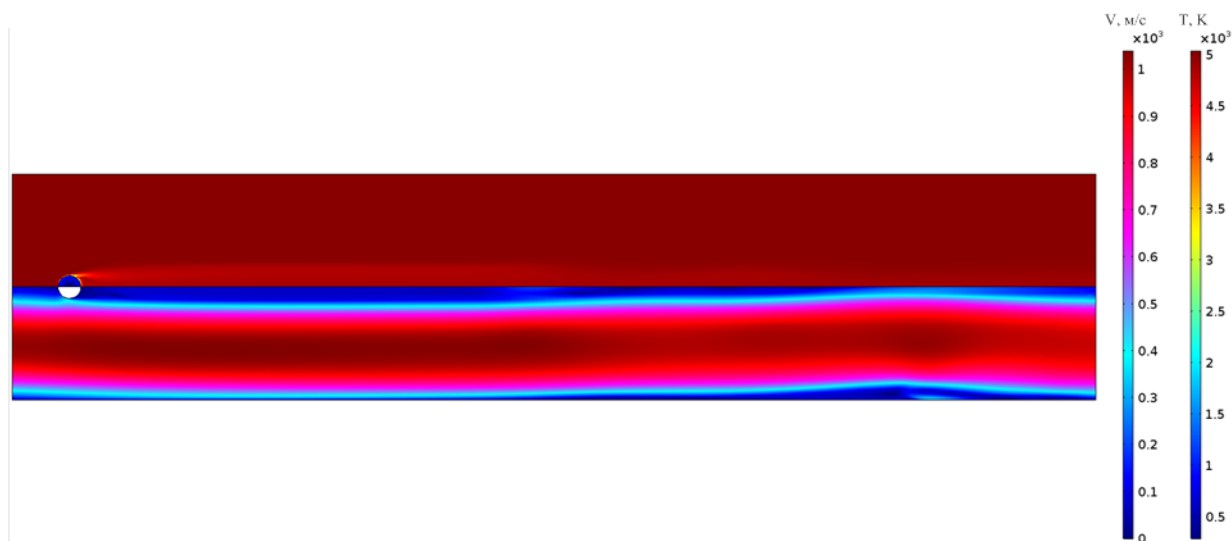


Рисунок 2.36. Распределения температуры и скорости в момент времени t_6 (ламинарный поток)

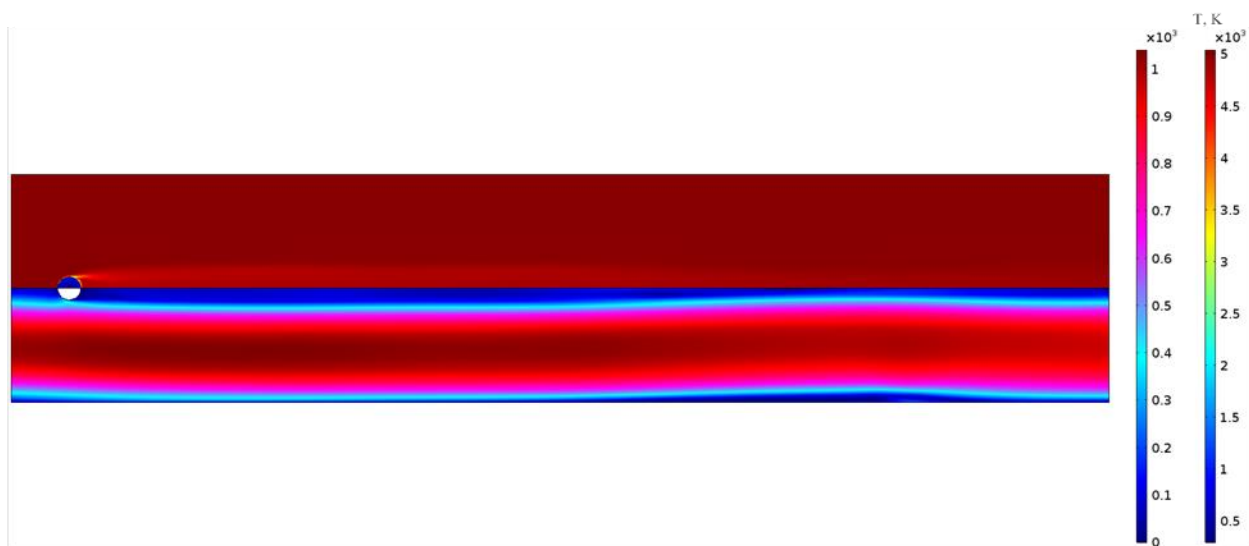


Рисунок 2.37. Распределения температуры и скорости в момент времени t_7 (ламинарный поток)

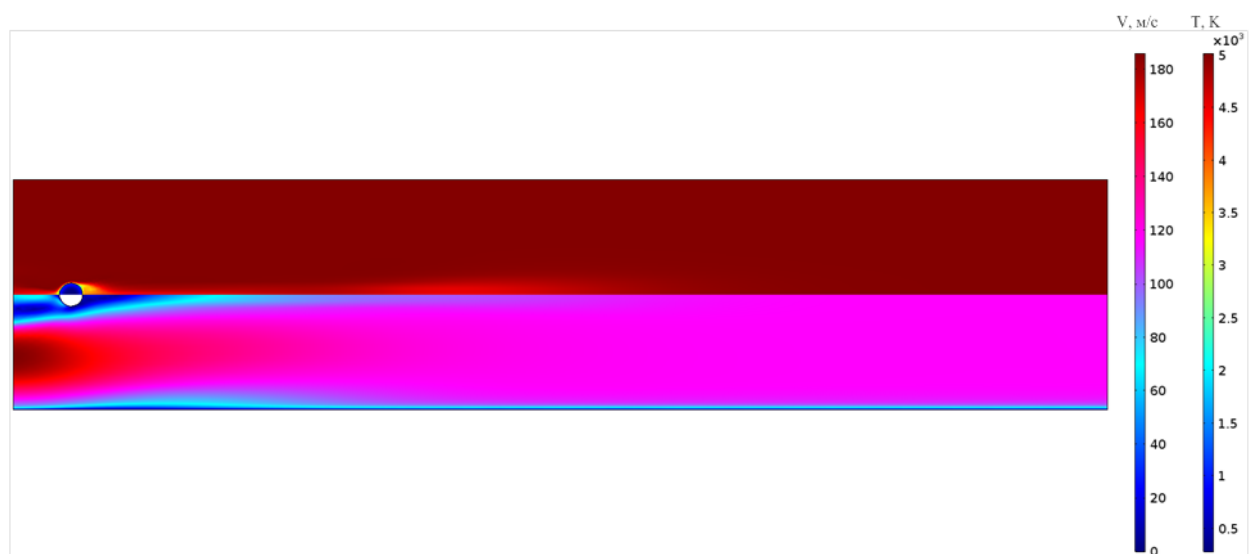


Рисунок 2.38. Распределения температуры и скорости в момент времени t_1 (SST модель)

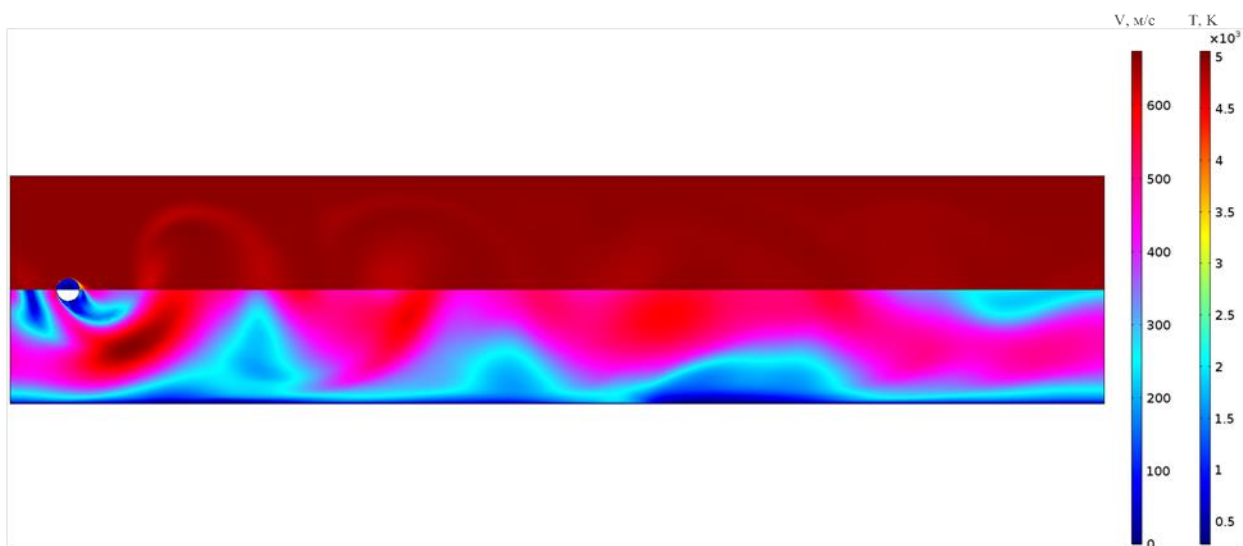


Рисунок 2.39. Распределения температуры и скорости в момент времени t_2 (SST модель)

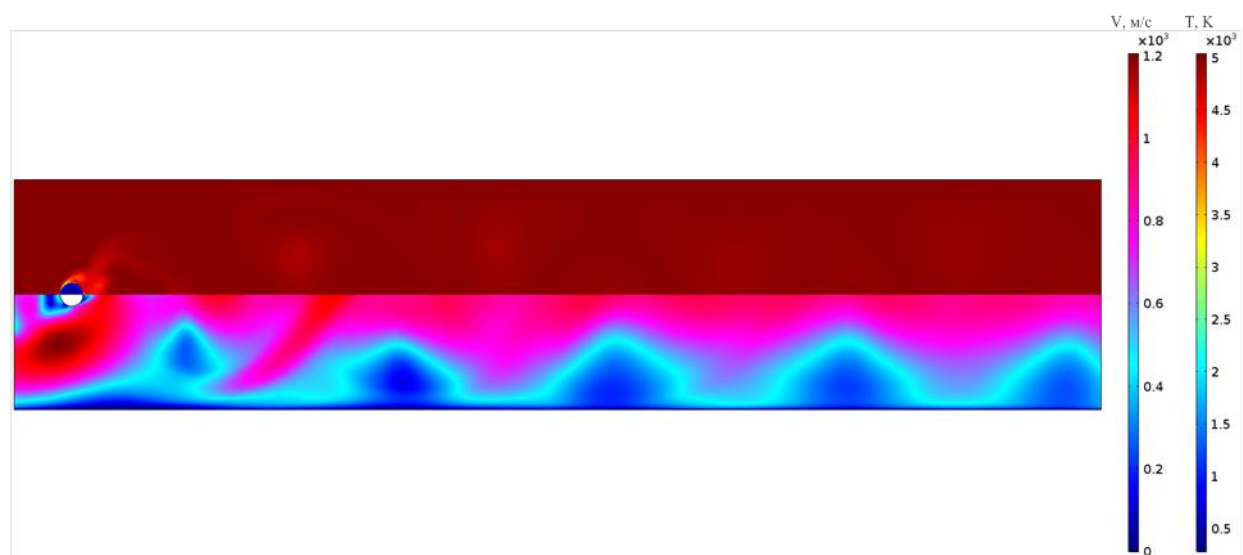


Рисунок 2.40. Распределения температуры и скорости в момент времени t_3 (SST модель)

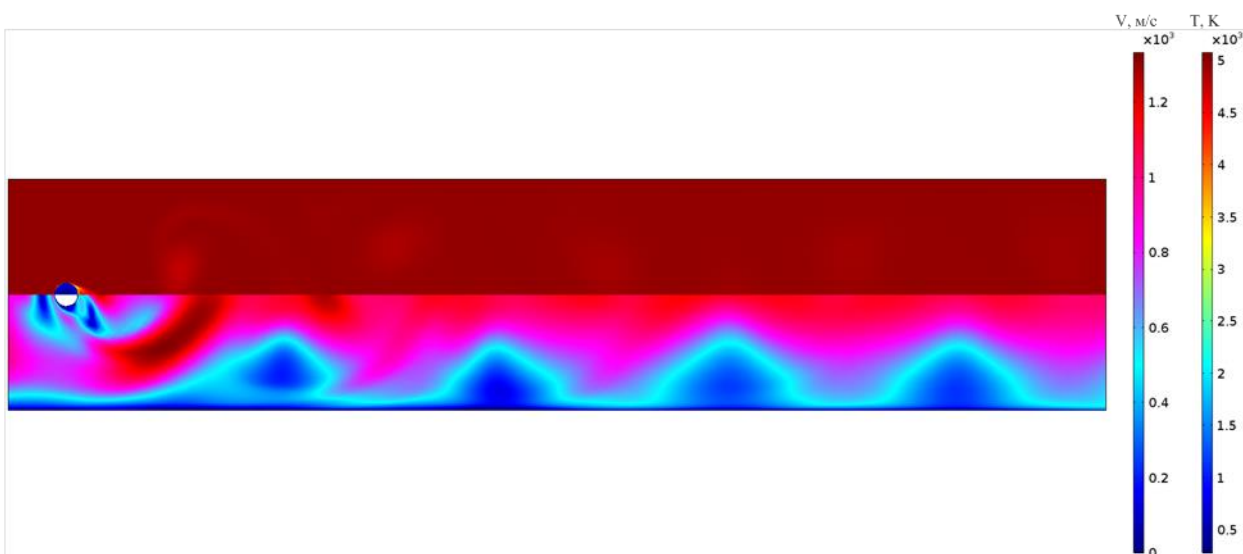


Рисунок 2.41. Распределения температуры и скорости в момент времени t_4 (SST модель)

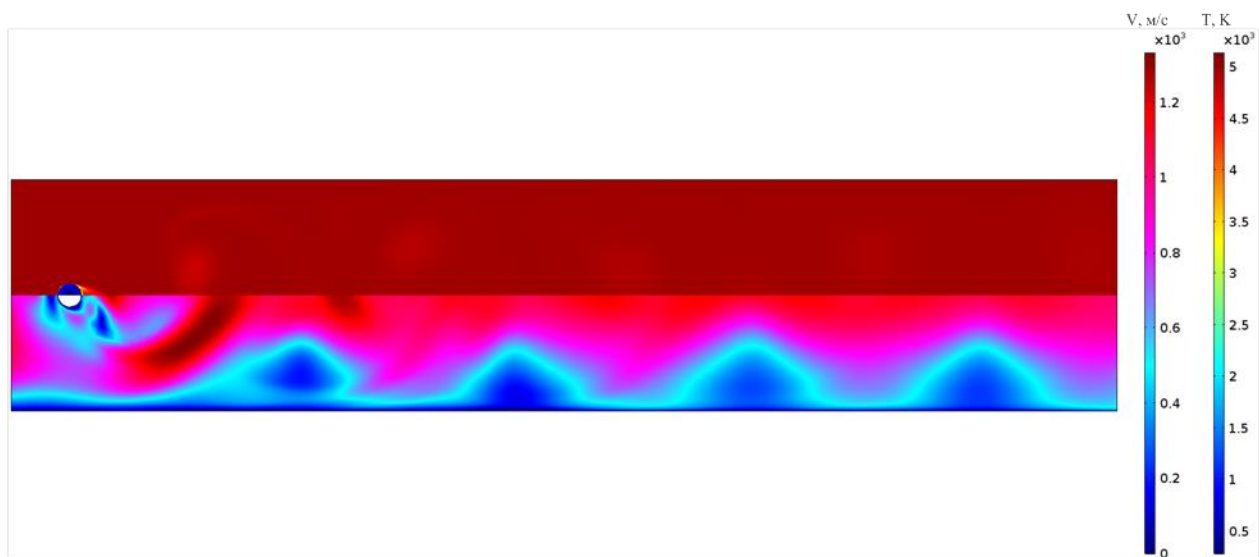


Рисунок 2.42. Распределения температуры и скорости в момент времени t_5 (SST модель)

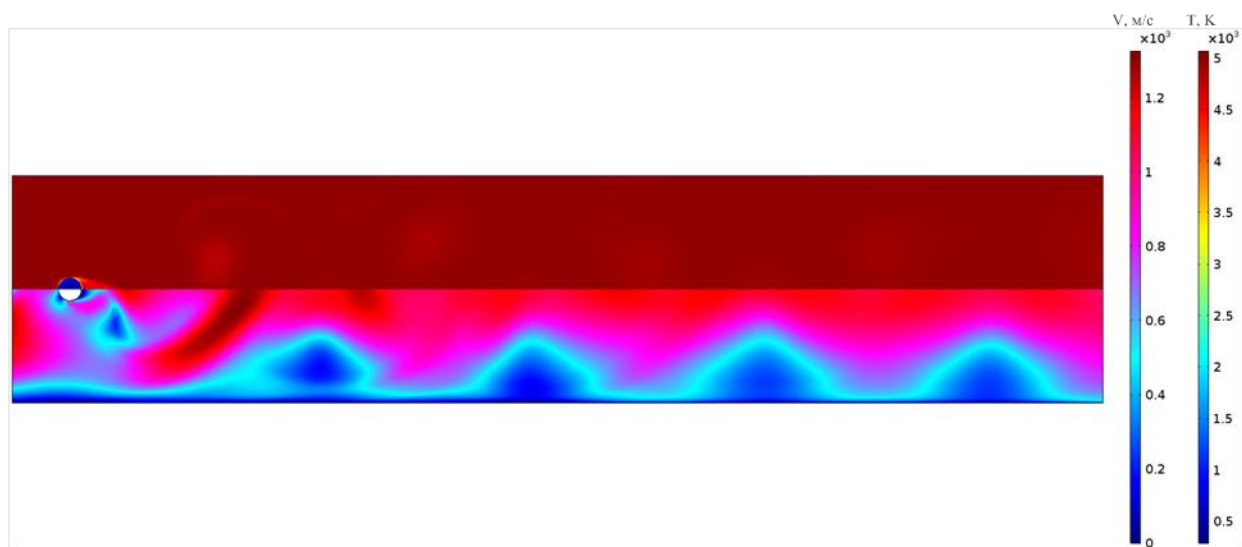


Рисунок 2.43. Распределения температуры и скорости в момент времени t_6 (SST модель)

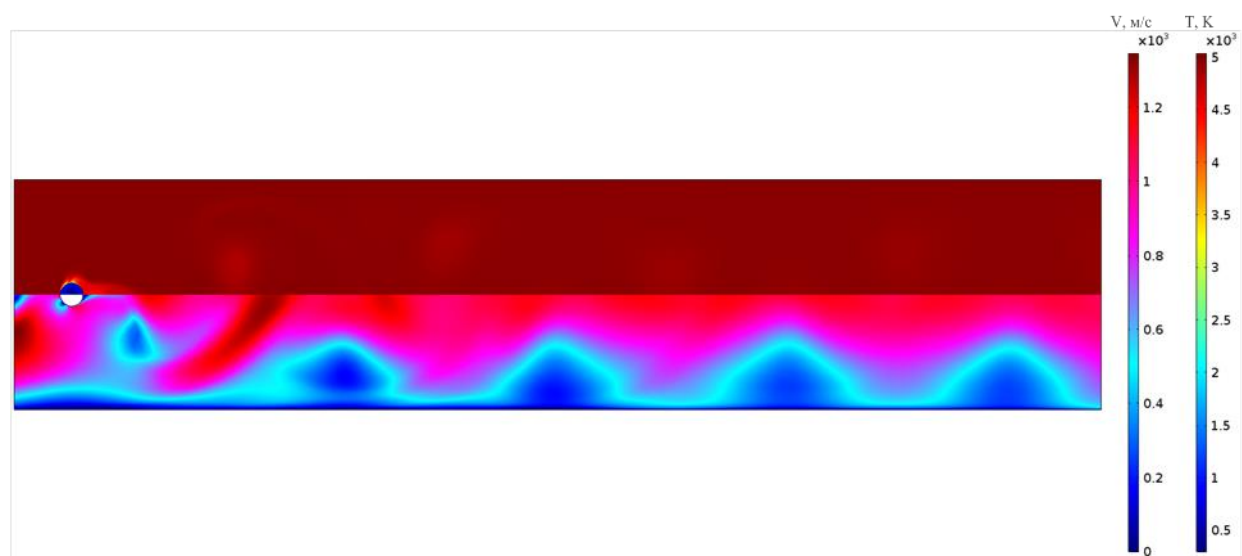


Рисунок 2.44. Распределения температуры и скорости в момент времени t_7 (SST модель)

Анализ результатов численного моделирования математической модели турбулентного неизо термического течения демонстрирует хаотически возникающие пульсации скорости и давления, что приводит к интенсивному смешиванию среды и более эффективному теплообмену. Об эффективности теплообменных процессов частицы в ламинарном и турбулентном потоках можно судить по средней температуре нагреваемого тела (см. рис. 2.45).

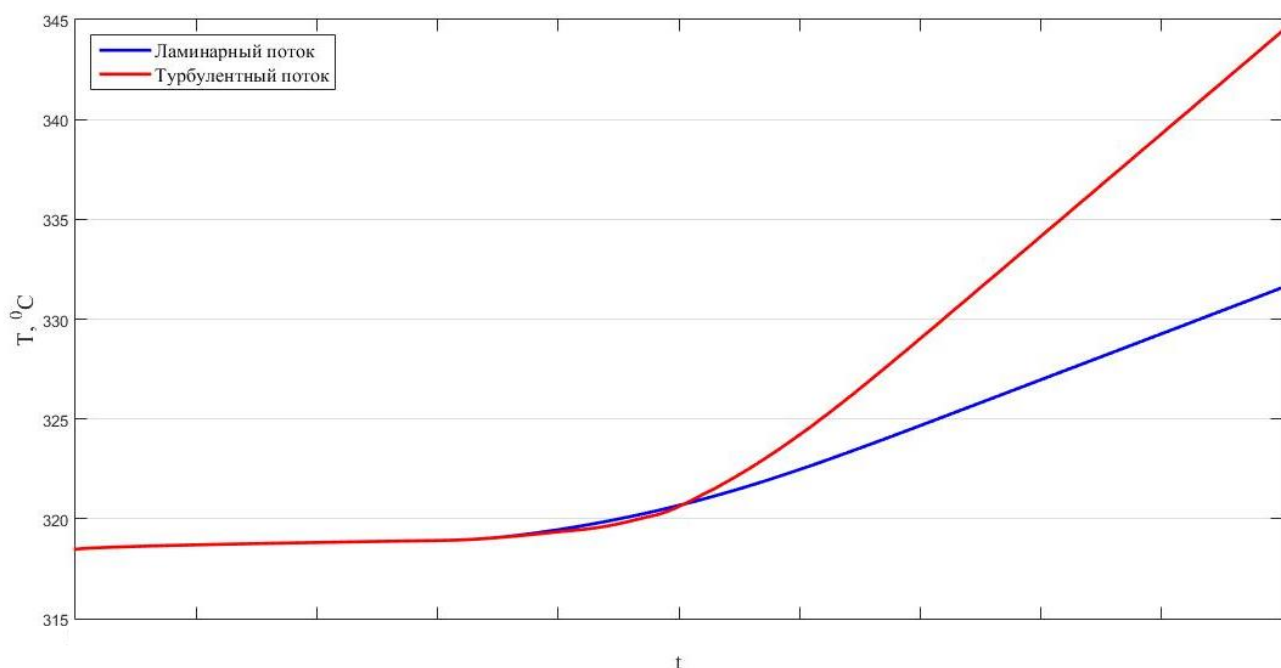


Рисунок 2.45. Графики зависимости средней температуры нагреваемого тела от времени

За время нагрева средняя температура нагреваемого тела в ламинарном неизо термическом плазменном потоке выросла на $13,1 ^\circ\text{C}$, а в турбулентном потоке на $25,9 ^\circ\text{C}$, что свидетельствует о более эффективном теплообмене для турбулентного потока.

2.10 Выводы по главе

На основе общепринятых законов физики разработана нестационарная математическая модель дугового плазмотрона (с осевой подачей плазмообразующего газа и вихревой стабилизацией) с межэлектродными вставками для плазмотермического нанесения покрытий, детально представлены факторы, влияющие на стабильность плазменного потока.

Произведен анализ влияния характеристик источника питания на стабильность плазменного потока, по результатам которого сделан следующий вывод: при использовании существующей конструкции дугового плазмотрона ПН-В1 для стабилизации плазменного потока необходимо использовать источник питания с максимально сглаженной характеристикой тока.

Представлен анализ влияния элементов конструкции дугового плазмотрона с межэлектродными вставками на стабильность плазменного потока. Из результатов анализа следует, что для компенсации характеристик источника питания возможно путем варьирования угла диффузора анодной части плазмотрона, из результатов численного моделирования следует, что угол должен быть более, чем 2° , в существующей конструкции плазмотрона ПН-В1 угол составляет $1^\circ 24'$, при этом необходимо отметить, что увеличение угла ведет к «укорачиванию» плазменного потока и формированию отрывных течений при угле более 6° .

Анализ отдельных конструктивных элементов плазмотрона ПН-В1 демонстрирует развитие неустойчивости плазменного потока, приводящей к турбулизации течения (см. рис. 2.46).

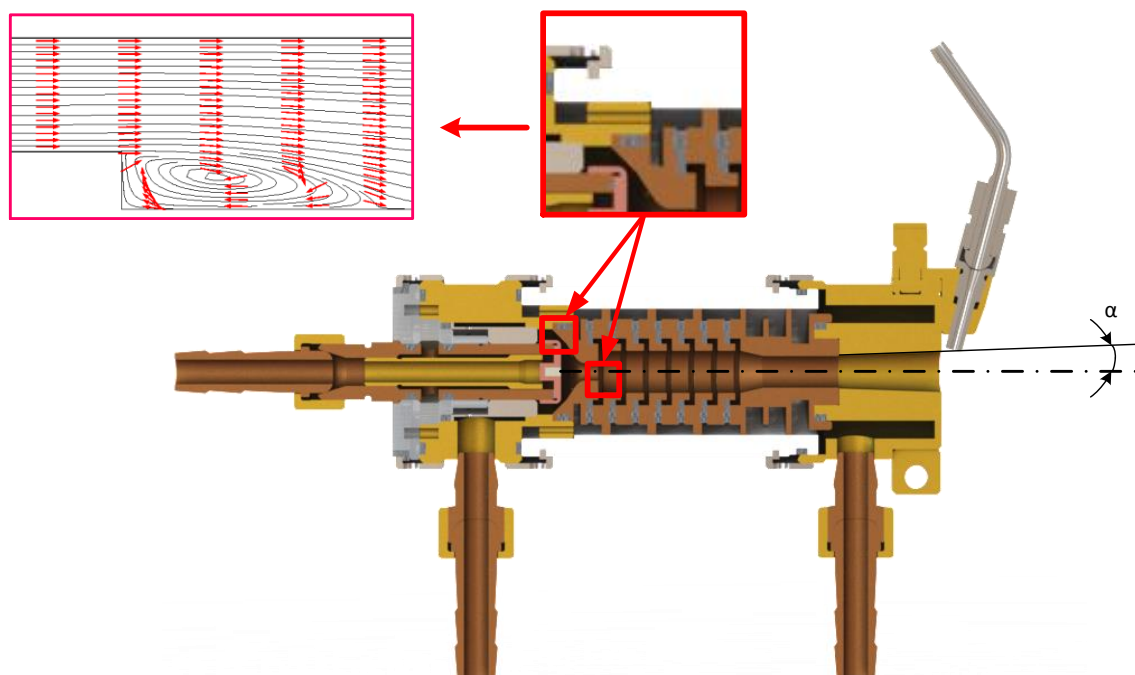


Рисунок 2.46. Конструктивные элементы плазмотрона ПН-В1, влияющие на развитие неустойчивости плазменного потока

Анализ нестационарных математических моделей дугового плазмотрона с осевой подачей плазмообразующего газа и вихревой стабилизацией показал, что, несмотря на развитие неустойчивости плазменного потока при использовании вихревой стабилизации, плазменный поток является более «сжатым» в направлении оси плазмотрона, что обеспечивает менее интенсивное термическое воздействие на элементы конструкции плазмотрона, тем самым увеличивая его рабочий ресурс.

Анализ математической модели нагрева частицы в ламинарном и турбулентном плазменных потоках демонстрирует, что более интенсивный прогрев частицы осуществляется в турбулентном потоке за счет разрушения пограничного слоя путем импульсного воздействия и активной теплопередачи из-за перемешивания слоев течения, что является важным фактором при использовании тугоплавких материалов в технологии плазмотермического нанесения покрытий. Кроме того, результаты данного анализа свидетельствуют о необходимости создания ламинарного потока внутри плазмотрона (для увеличения эксплуатационного ресурса) и турбулентного течения на выходе плазмотрона для более интенсивного прогрева частиц.

ГЛАВА 3. Экспериментальные исследования режимов работы плазмотрона ПН-В1

3.1 Разработка методики проведения экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования режимов работы дугового плазмотрона ПН-В1 для технологии плазмотермического нанесения покрытий направлены на выявление причин развития неустойчивости плазменного потока и оценке применимости разработанных математических моделей включают в себя исследования режимов работы плазмогенерирующего устройства с использованием стандартных источников питания АПР-403 (трехфазный источник питания с дроссельным управлением) и АПР-404 (трехфазный двухполупериодный тиристонный источник питания). Основными характеристиками при оценке стабильности плазменного потока являются падение напряжения на электрической дуге и мощность излучения [67,68,69,70,71]. Регистрация данных во времени аналоговых характеристик с последующей цифровой обработкой результатов позволяет оценить стабильность плазменного потока и идентифицировать неустойчивость, вызванную флуктуацией электрических параметров, и как следствие, изменение параметров тепловой энергии в столбе электрической дуги плазмотрона, для регистрации силовой неустойчивости, связанной с флуктуацией импульса реализована регистрация данных градиента давления при помощи емкостного микрофона. Принципиальная схема экспериментального стенда для снятия характеристик представлена на рис. 3.1. Разработанное оборудование для регистрации данных во времени базируется на применении платформы Arduino Mega 2560, построенной на микроконтроллере ATmega2560. Платформа имеет 16 аналоговых входа, 54 цифровых входа/выхода, 4 последовательных порта UART, кварцевый генератор 16 МГц [72]. Разрядность двоичного АЦП платформы 10 бит, что соответствует 1024 уровням квантования. Паспортные данные и принципиальная электрическая схема платформы Arduino Mega 2560 представлены в приложении 2.

Организация связи для записи данных осуществлена через универсальный асинхронный приёмопередатчик (УАПП, англ. UART) с привлечением программного продукта MATLAB пакета Simulink для синхронизации платформы Arduino Mega 2560 с компьютером.

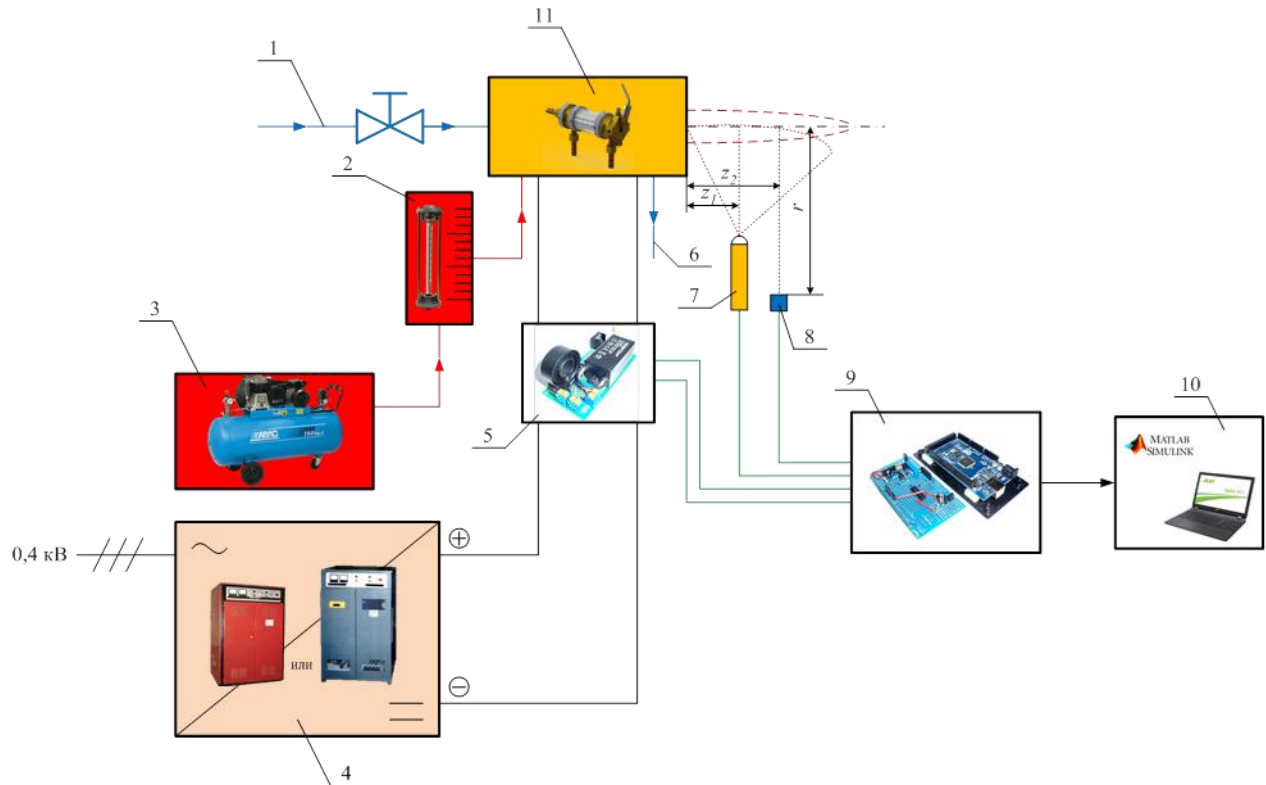


Рисунок 3.1. Принципиальная схема экспериментального стенда для снятия характеристик плазмотрона ПН-В1: 1 – подача водяного охлаждения, 2 – ротаметр, 3 – воздушный компрессор, 4 – источник питания (АПР-403 или АПР-404), 5 – аналоговый модуль для снятия характеристик тока и напряжения на дуге, 6 – отвод охлаждающей жидкости, 7 – оптический датчик (фототранзистор L-610MP4BT/BD), 8 – электретный микрофон (ЕСМ-10D), 9 – модуль расширения преобразования аналоговых сигналов в цифровые и передачи данных по интерфейсу связи USB device, 10 – компьютер с предустановленным программным обеспечением, 11 – исследуемый объект (плазмотрон ПН-В1)

Принципиальная схема согласования модуля расширения для снятия характеристик тока и напряжения на дуге, оптического датчика и электретного микрофона с модулем расширения преобразования аналоговых сигналов в цифровые на базе платформы Arduino Mega 2560 и элементов питания датчиков представлена на рис. 3.2. Дополнительно реализована возможность синхронизации и сопряжения с внешним экспериментальным оборудованием.

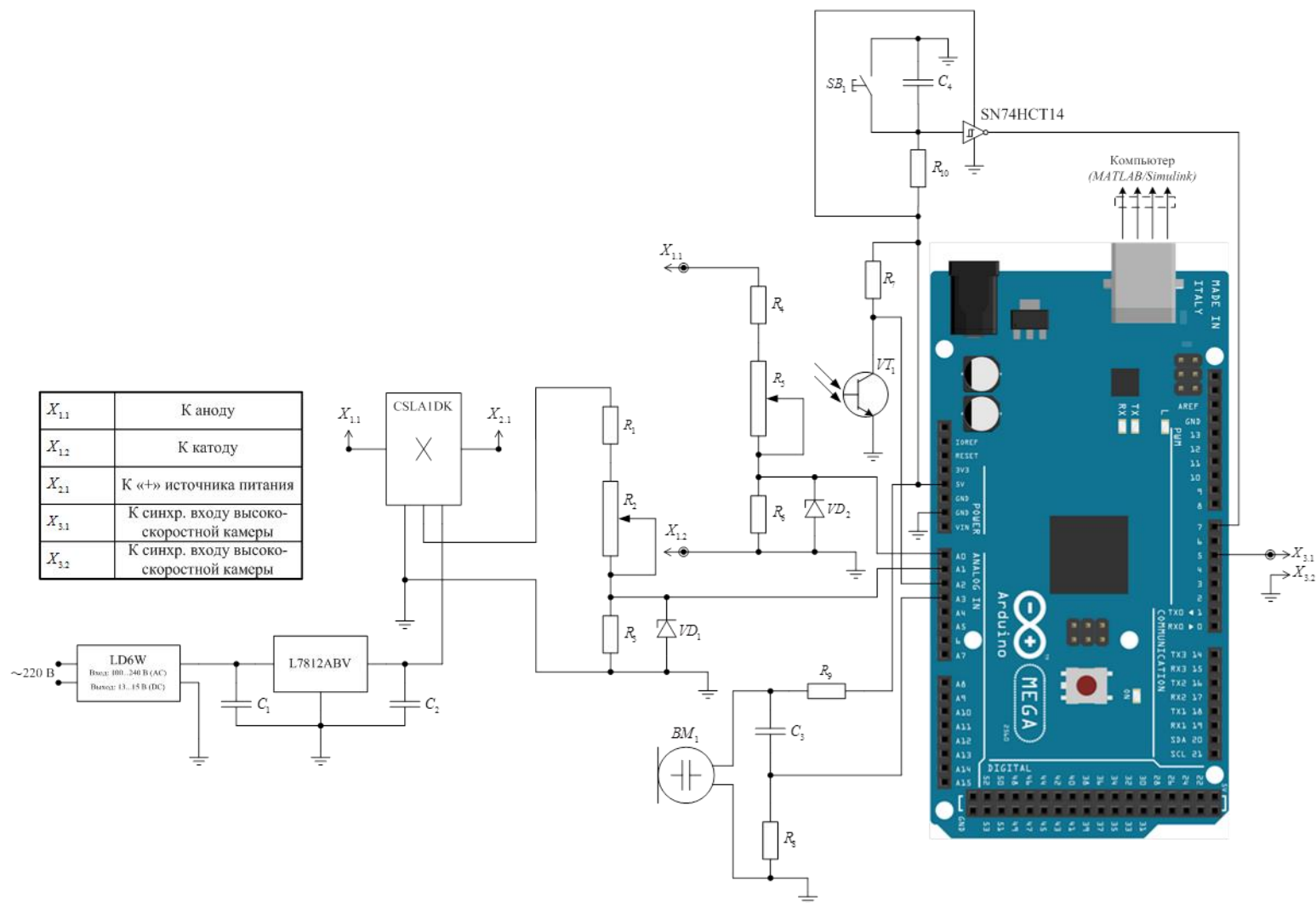


Рисунок 3.2. Принципиальная схема экспериментального оборудования для регистрации данных

Спецификация элементов экспериментального оборудования для регистрации данных представлена в таблице 3.1.

Таблица 3.1

Спецификация элементов экспериментального оборудования

№	Наименование элемента	Описание	№	Наименование элемента	Описание
1	R_1	Резистор 0,25 Вт, 560 Ом, 1%	10	VD_1	Стабилитрон 5,1В, 1Вт
2	R_2	Резистор подстроечный 100 Ом	11	VD_2	Стабилитрон 5,1В, 1Вт
3	R_3	Резистор 0,25 Вт, 390 Ом, 1%	12	VT_1	Фототранзистор L-610MP4BT/BD
4	R_4	Резистор 0,25 Вт, 91 кОм, 1%	13	C_1	Конденсатор керамический выводной , 0,1 мкФ, 10%
5	R_5	Резистор подстроечный 10 кОм	14	C_2	Конденсатор керамический выводной , 0,33 мкФ, 10%
6	R_6	Резистор 0,25 Вт, 2 кОм, 1%	15	C_3	Конденсатор керамический выводной , 0,1 мкФ, 10%
7	R_7	Резистор 0,5 Вт, 220 Ом, 5%	16	C_4	Конденсатор электролитический алюминиевый 10 мкФ, 16 В
8	R_8	Резистор 0,25 Вт, 4,7 кОм, 1%	17	BM_1	Микрофон электретный ЕСМ-10D
9	R_9	Резистор 0,25 Вт, 10 кОм, 1%	18	SB_1	Кнопка без фиксации, PBS-10B-2

Синхронизация платформы Arduino Mega 2560 с компьютером осуществлена с использованием схемы, реализованной в среде Simulink (см. рис. 3.3) с предустановленным пакетом поддержки Arduino «Simulink Support Package for Arduino Hardware», работающей в режиме внешнего взаимодействия в реальном времени «External mode». В данном режиме используется Simulink® Coder™ в динамической связи сгенерированного кода блоков входов/выходов с входами/выходами устройства (Arduino Mega 2560). Полученный файл исполнения работает в режиме ядра операционной системы на хост-компьютере и обменивается данными с помощью Simulink через общий интерфейс памяти. Внешний режим полностью синхронизирован с часами реального времени. Основной ролью Simulink является чтение и отображение результатов моделирования, возвращенных от файла исполнения. Диаграмма, поясняющая работу режима «External mode» представлена на рис. 3.4. Настройки UART соединения в режиме «External mode» позволяют регистрировать 151 значение каждого сигнала с 4-х синхронизированных аналоговых входов с частотой дискретизации 15,4 кГц. Данная частота дискретизации позволяет идентифицировать основные флуктуации плазменного потока, частота которых составляет 300 Гц [70,73].

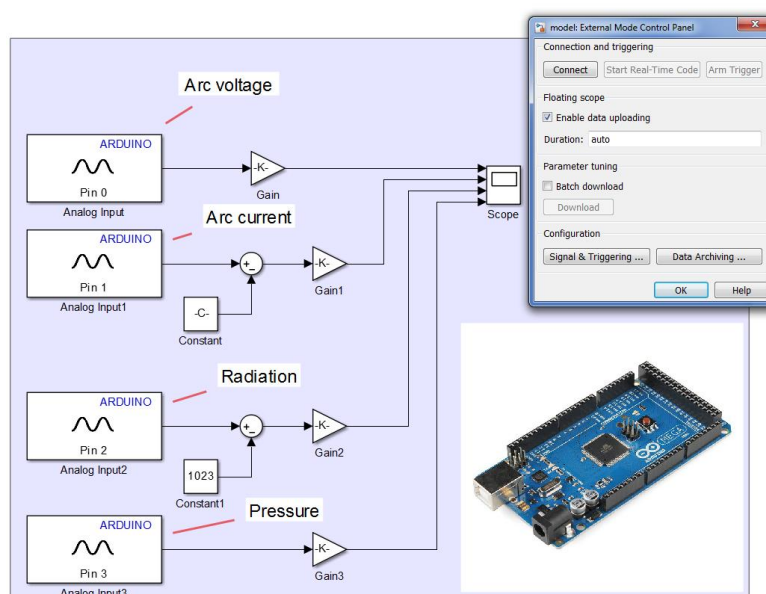


Рисунок 3.3. Алгоритм регистрации данных в режиме «External mode» с использованием платформы Arduino Mega 2560 (реализация в среде Simulink)

Снятие данных падения напряжения на электрической дуге осуществляется посредством делителя напряжения, собранном на резистивных элементах $R_4... R_6$ (см. рис. 3.2) с коэффициентом передачи 250/5, для защиты платформы от значений напряжения превышающих значение максимально допустимого на аналоговом входе используется стабилитрон VD_2 . Внешний вид смонтированного на плату делителя напряжения представлен на рис. 3.5. Разрешение двоичного АЦП платформы Arduino Mega 2560 с учетом делителя напряжения для регистрации падения напряжения на дуге составляет 0,2 В, что свидетельствует о высокой точности измерений.

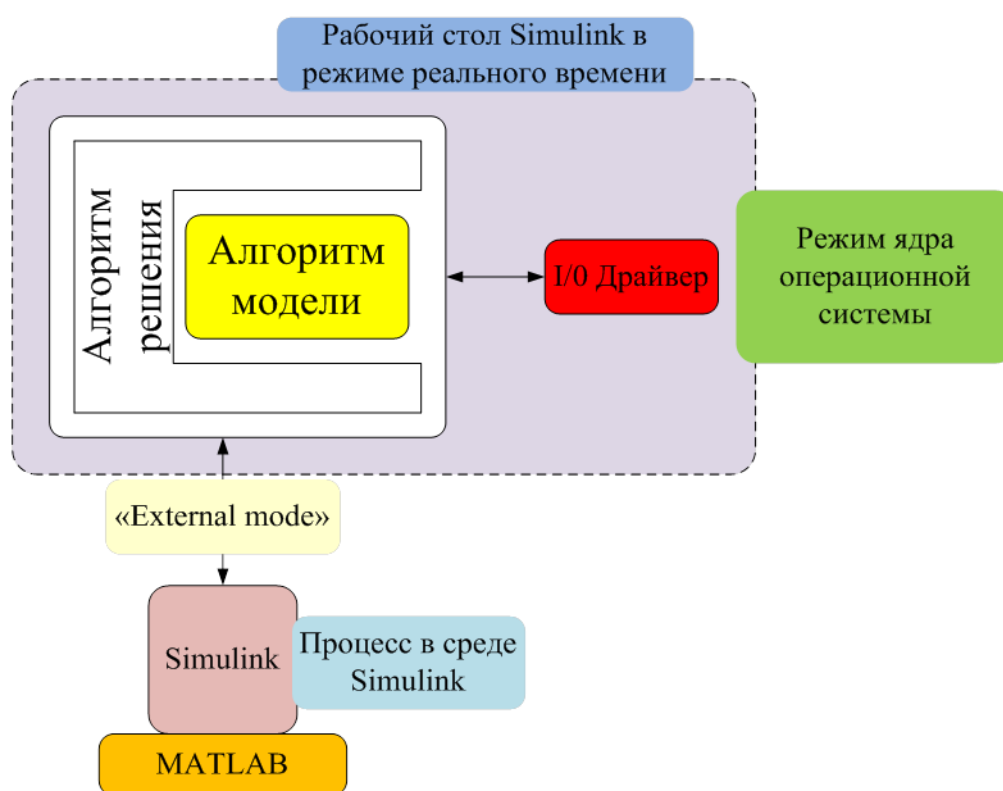


Рисунок 3.4. Диаграмма, поясняющая сопряжение MATLAB с внешним устройством в режиме «External mode»

Регистрация тока электрической дуги реализована на основе применения датчика Холла CSLA1DK, внешний вид которого представлен на рис. 3.5. Разрешение двоичного АЦП платформы Arduino Mega 2560 для регистрации тока дуги позволяет получать значение тока с абсолютной точностью 0,6 А. Данное разрешение позволяет произвести измерения тока дуги с достаточно высокой точностью (погрешность менее 0,3% в номинальном режиме).

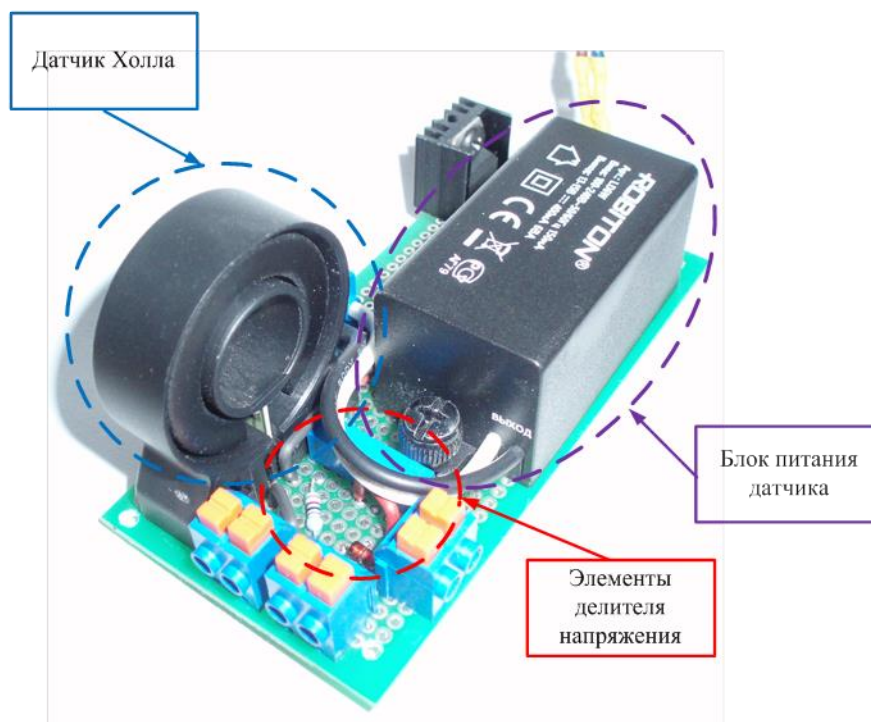


Рисунок 3.5. Внешний вид силовой части экспериментального стенда для снятия характеристик падения напряжения и тока дуги

Флуктуация плазменного потока регистрируется при помощи оптического датчика (фототранзистор L-610MP4BT/BD), измеряющего мощность излучения и размещенного на выходе плазмотрона (см. рис. 3.1). Исполнение датчика представлено на рис. 3.6.

Характеристики фототранзистора позволяют проводить экспериментальные исследования с частотой регистрации сигнала до 30 кГц.



Рисунок 3.6. Внешний вид оптического датчика

Регистрация флуктуации импульса основана на применении электретного микрофона, принцип действия которого базируется на применении тонкой плёнки из гомоэлектрета, выполняющей роль мембраны, при деформации которой на поверхности возникают разноименные заряды, тем самым можно провести параллель с мембранными датчиками для измерения давлений.

Электретные микрофоны имеют повышенные электроакустические и технические характеристики:

- низкие нелинейные искажения;
- низкие переходные искажения;
- низкий уровень собственных шумов;
- высокая чувствительность;
- широкий частотный диапазон;

В качестве электретного микрофона для записи данных флуктуации давления применен микрофон ЕСМ-10D. Чувствительность микрофона составляет -68 ± 3 дБ ($0 \text{ дБ} = 1 \text{ В/мкБар}$, 1 кГц , $V_{cc} = 1,5 \text{ В}$, $R_L = 2 \text{ кОм}$), предельное звуковое давление составляет 120 дБ. Внешний вид датчика звука на основе электретного микрофона представлен на рис. 3.7.

Схема включения микрофона ЕСМ-10D представлена на рис. 3.2.

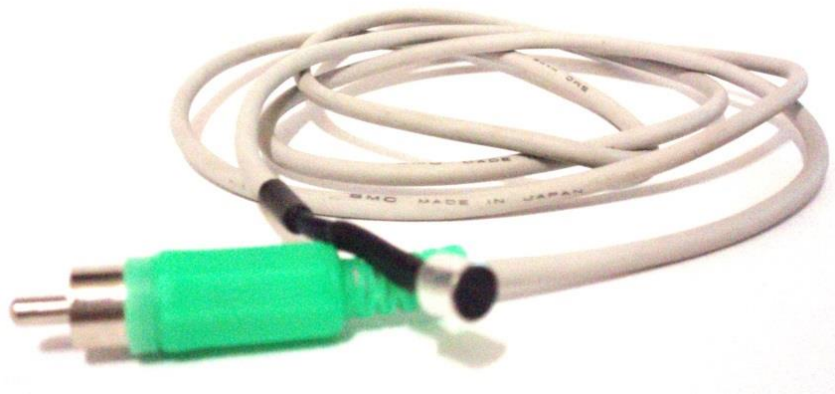


Рисунок 3.7. Внешний вид датчика звука для регистрации флуктуаций давления

Общий вид экспериментального стенда для проведения исследований режимов работы дугового плазмотрона ПН-В1 согласно принципиальной схеме проведения исследований (см. рис. 3.5) с корпусным исполнением измерительного оборудования для снятия характеристик падения напряжения на

дуге, флуктуации мощности излучения и давления, тока дуги представлен на рис. 3.8.

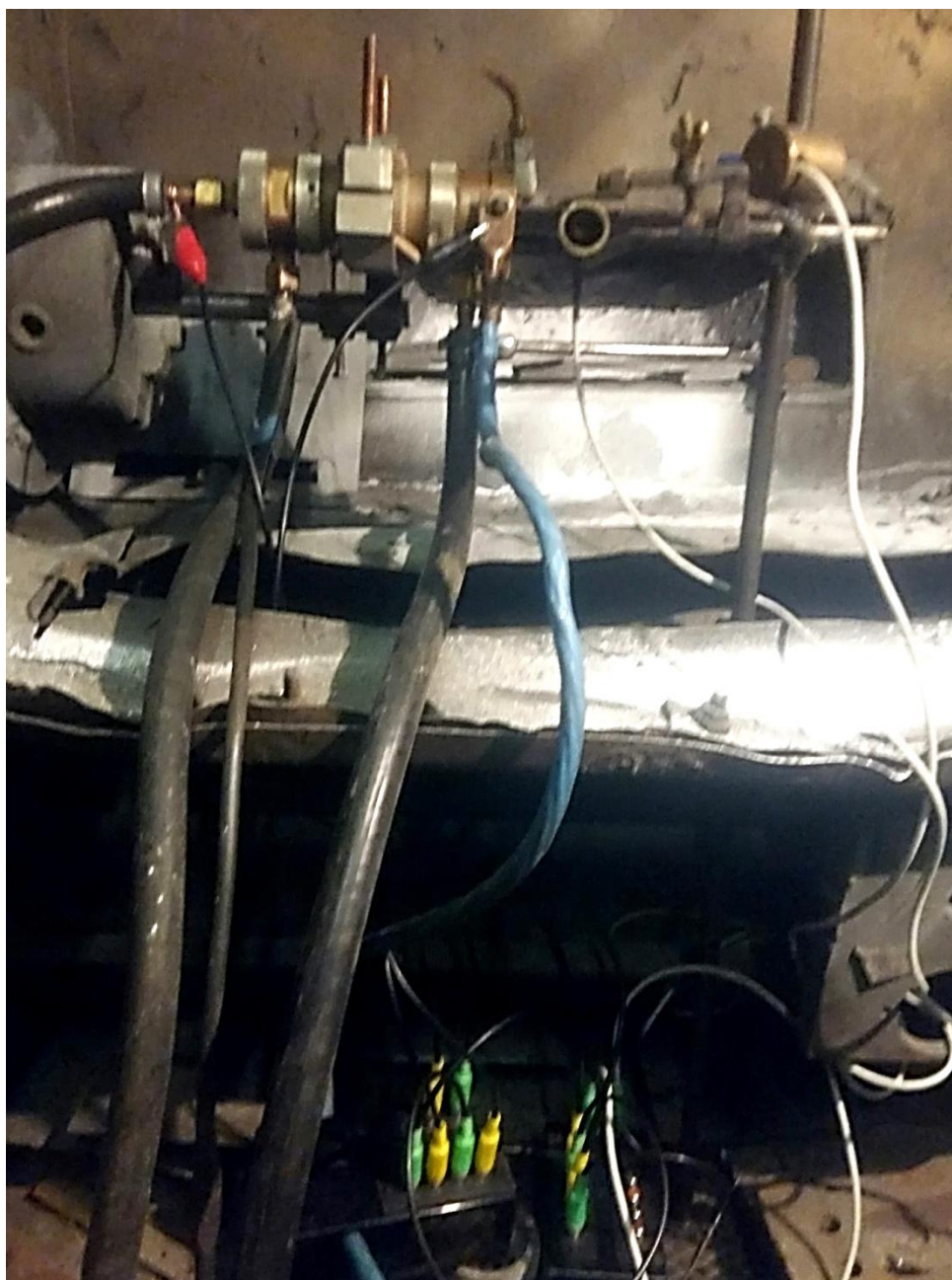


Рисунок 3.8. Внешний вид экспериментального стенда для исследования режимов работы дугового плазмотрона ПН-В1

3.2 Методика обработки результатов экспериментального исследования

Результаты экспериментального исследования регистрируются на компьютере в цифровом виде, принимая значения в числовом диапазоне от 0 до 1023. В ходе проведения экспериментального исследования режимов работы дугового плазмотрона ПН-В1 с применением в качестве источников питания

АПР-403 (см. рис. 3.9) и АПР-404(см. рис. 3.10) были получены следующие характеристики:

- падение напряжения на дуге;
- флуктуации мощности излучения;
- ток дуги;
- флуктуации давления.

Стабильность плазменного потока, генерируемого плазмотроном постоянного тока, подразумевает отсутствие гармонических составляющих характеристик падения напряжения на дуге и флуктуации мощности излучения. Таким образом, оценка стабильности плазменного потока производится при помощи алгоритма одномерного дискретного преобразования Фурье.

Линейная фильтрация и преобразование Фурье являются одними из наиболее фундаментальных операций в обработке цифрового сигнала[74].

Дискретные прямое и обратное преобразования Фурье для одномерного массива x длины N определяются следующим образом:

$$X(k) = \sum_{j=1}^N x(j) \omega_N^{(j-1)(k-1)} \quad (3.1)$$

$$x(j) = (1/N) \sum_{k=1}^N X(k) \omega_N^{-(j-1)(k-1)} \quad (3.2)$$

$$\omega_N = e^{(-2\pi i)/N} \quad (3.3)$$

Предварительная подготовка результатов включает себя исключение фоновых помех сигналов и идентификация частоты дискретизации вектора данных. Постобработка включает в себя нормировку спектра по амплитуде и постоянной составляющей в спектре, графическое отображение полученных результатов. Алгоритм обработки результатов (программный код) экспериментальных исследований в программном продукте MATLAB представлен в приложении 1.

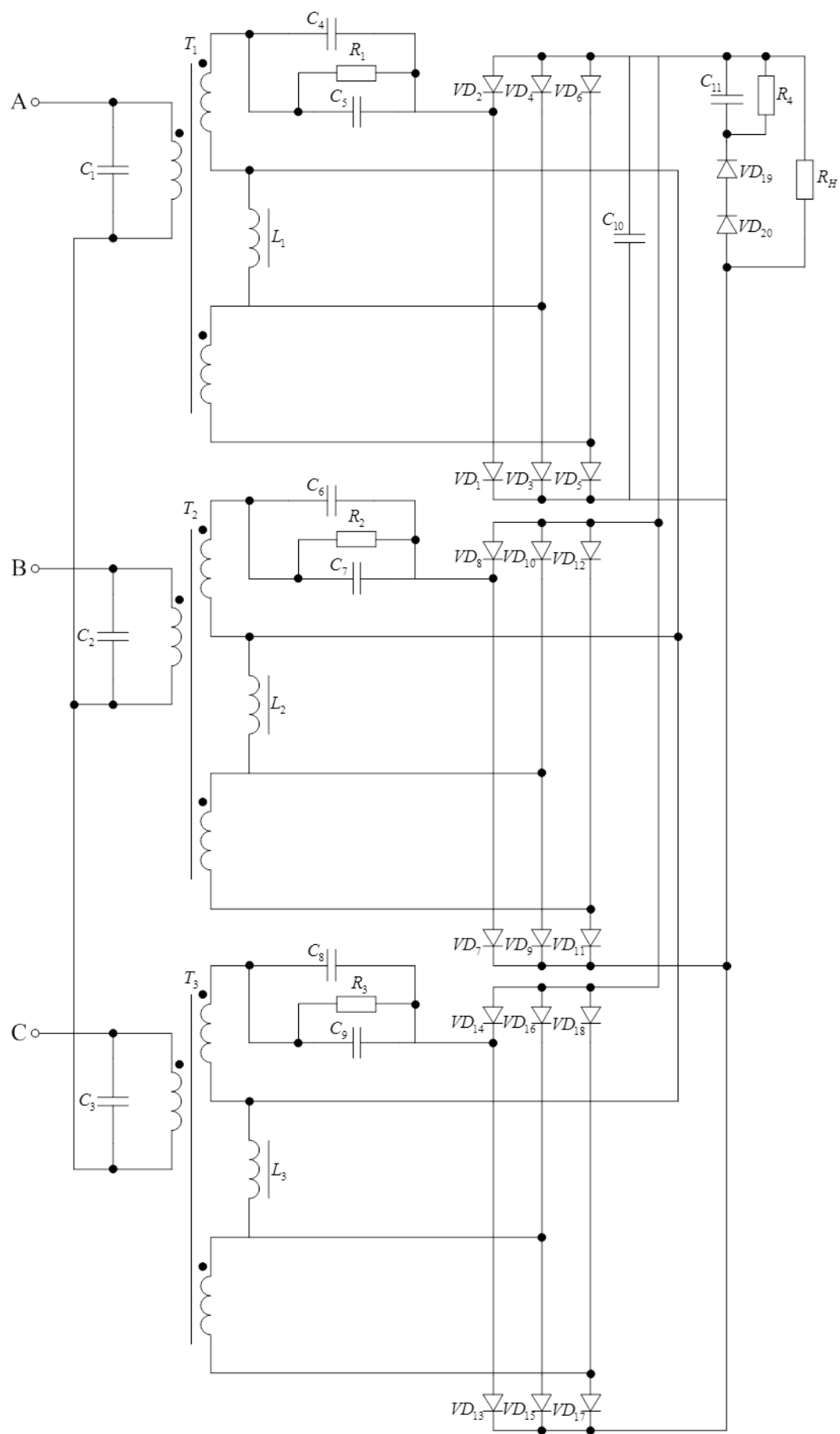


Рисунок 3.9. Принципиальная электрическая схема источника питания АПР-403

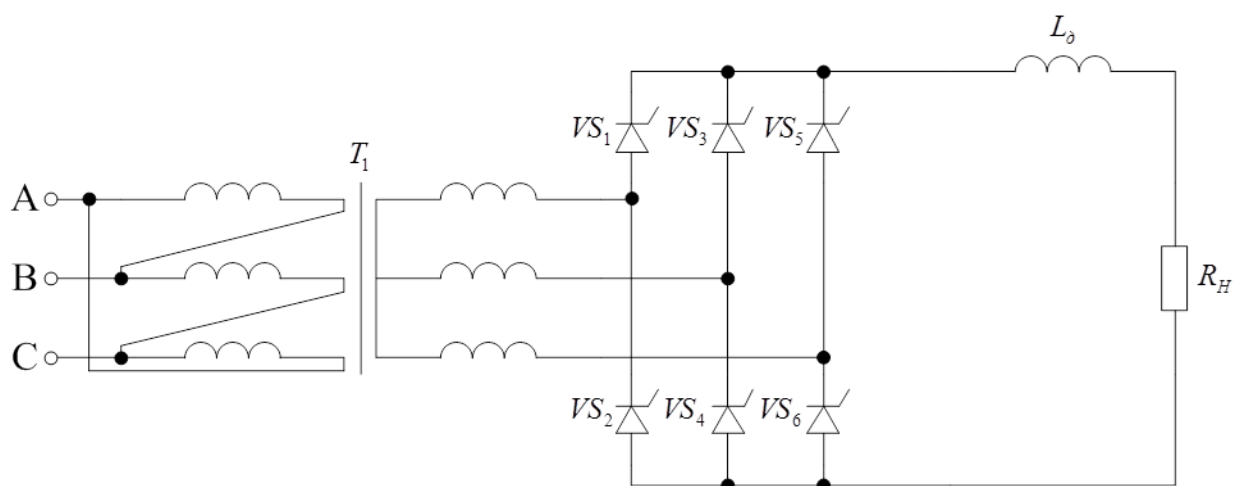


Рисунок 3.10. Принципиальная электрическая схема источника питания АПР-404

3.3 Результаты экспериментальных исследований

Одной из основных целей проведения экспериментальных исследований является оценка влияния характеристик источника питания на стабильность плазменного потока. В результате были проведены исследования идентичных режимов работы плазмотрона при питании от разных источников питания. Выявлено, что при питании от источника питания АПР-403, обладающего более сглаженной характеристикой тока в сравнении с АПР-404, пульсации падения напряжения на дуге значительно ниже, чем в случае с источником питания АПР-404 (см. рис. 3.11). Для количественной оценки пульсаций падения напряжения используется коэффициент пульсаций, вычисляемый согласно выражению (3.4).

$$k = 1 - \frac{U_{\min}}{U_{\max}} \quad (3.4)$$

Коэффициент пульсаций падения напряжения на дуге для источника питания АПР-403 составляет 0,16, а для источника питания АПР-404 – 0,49 при расходе плазмообразующего газа 0,55 г/с. Представленные выше значения коэффициента пульсаций демонстрируют, что при работе от источника питания АПР-403 плазменный поток является более стабильным. Согласно результатам исследования для технологии плазмотермического напыления целесообразно применять в качестве источника питания АПР-403, обеспечивающий стабильный плазменный поток, что подтверждает и анализ Фурье (см. рис. 3.12).

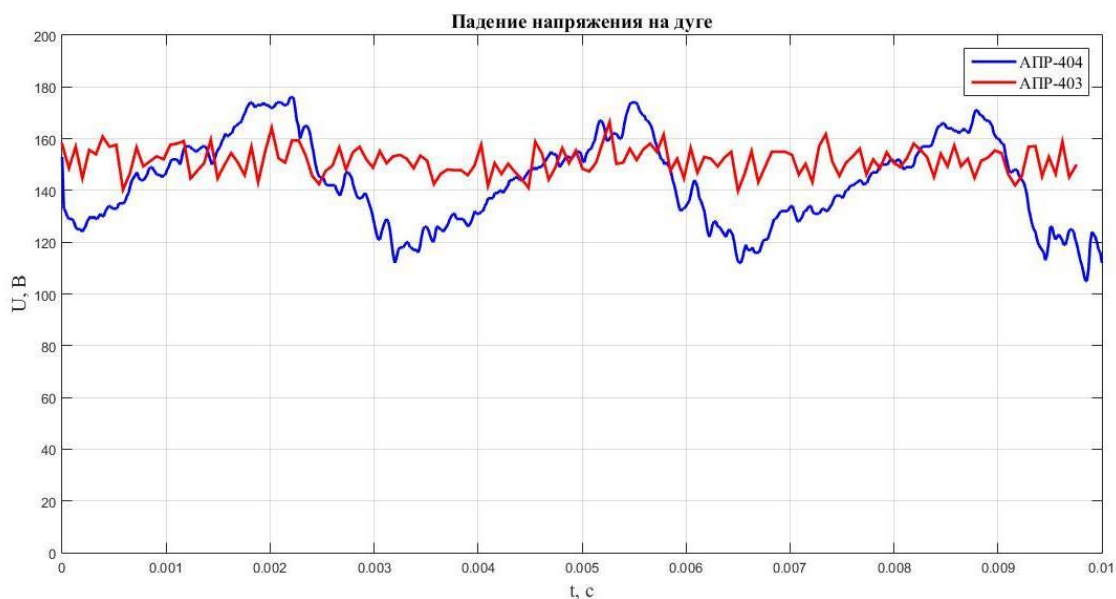


Рисунок 3.11. Временные зависимости падения напряжения на дуге при использовании источников питания АПР-403 и АПР-404

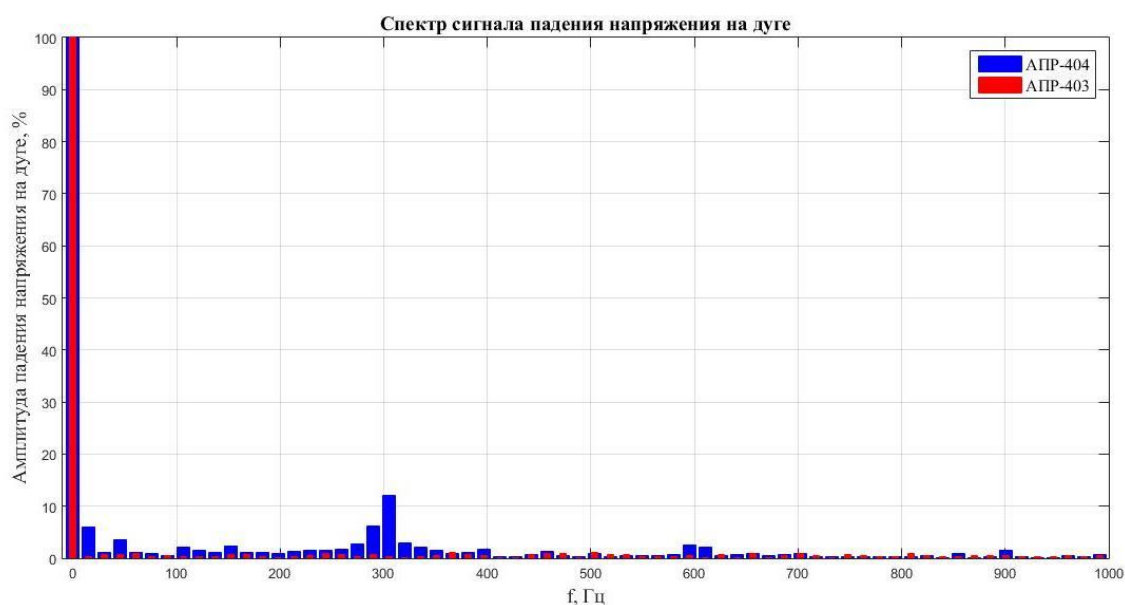


Рисунок 3.12. Спектр сигнала падения напряжения на дуге при использовании источников питания АПР-403 и АПР-404

Основная часть исследований была сфокусирована на изучении влияния режимов работы дугового плазмотрона и идентификации развития неустойчивости плазменного потока. На рис. 3.13, 3.14, 3.15, 3.16 представлены результаты экспериментального исследования по устойчивости плазменного потока при изменении расхода плазмообразующего газа плазмотрона ПН-В1 (источник питания: АПР-403).

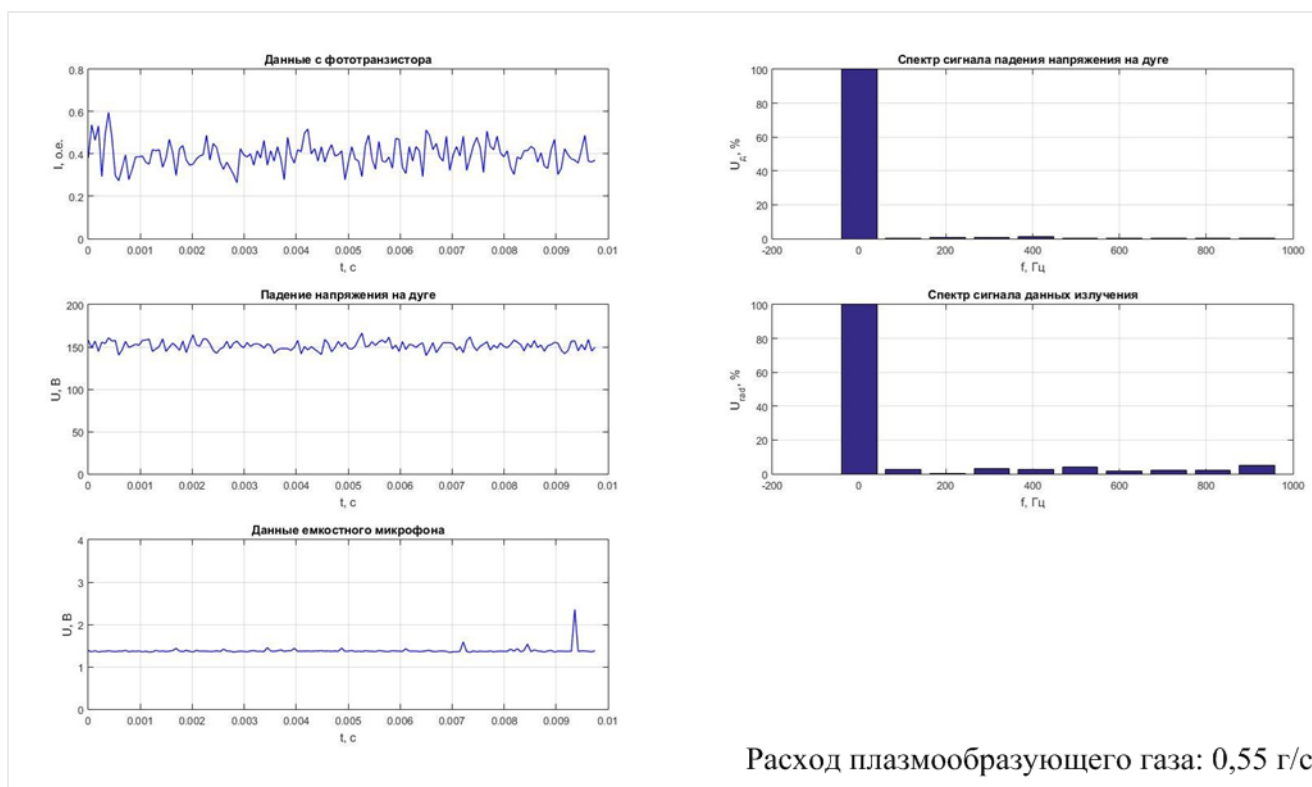


Рисунок 3.13. Результаты экспериментального исследования плазматрона ПН-В1 при расходе плазмообразующего газа 0,55 г/с

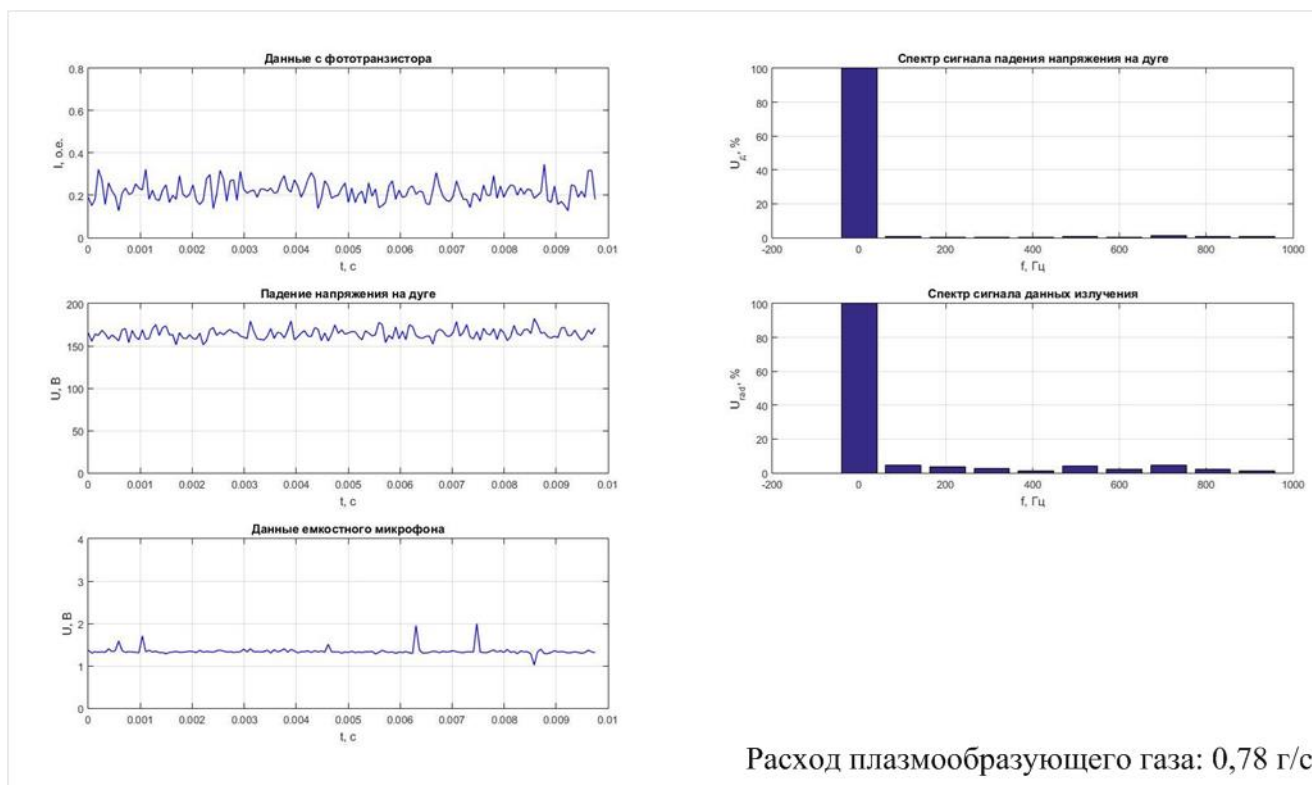


Рисунок 3.14. Результаты экспериментального исследования плазматрона ПН-В1 при расходе плазмообразующего газа 0,78 г/с

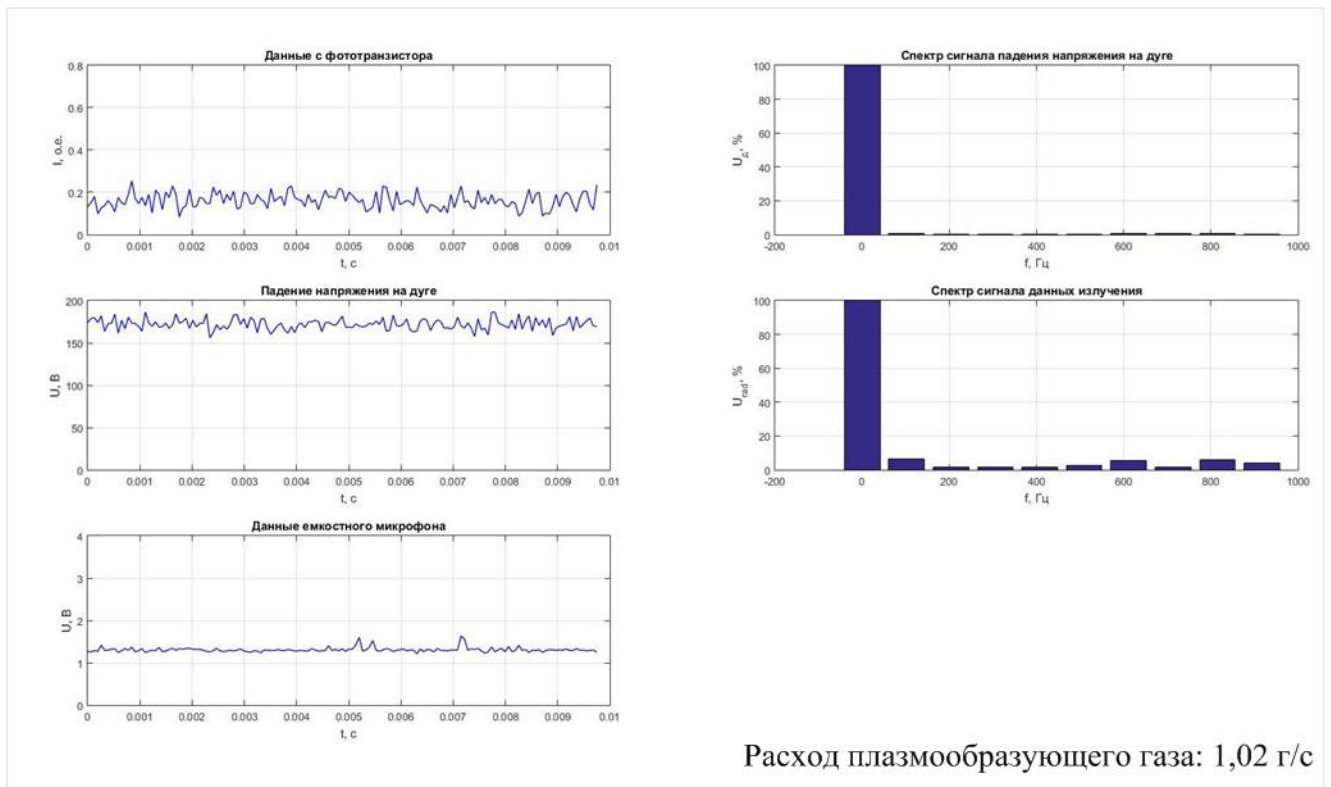


Рисунок 3.15. Результаты экспериментального исследования плазматрона ПН-В1 при расходе плазмообразующего газа 1,02 г/с

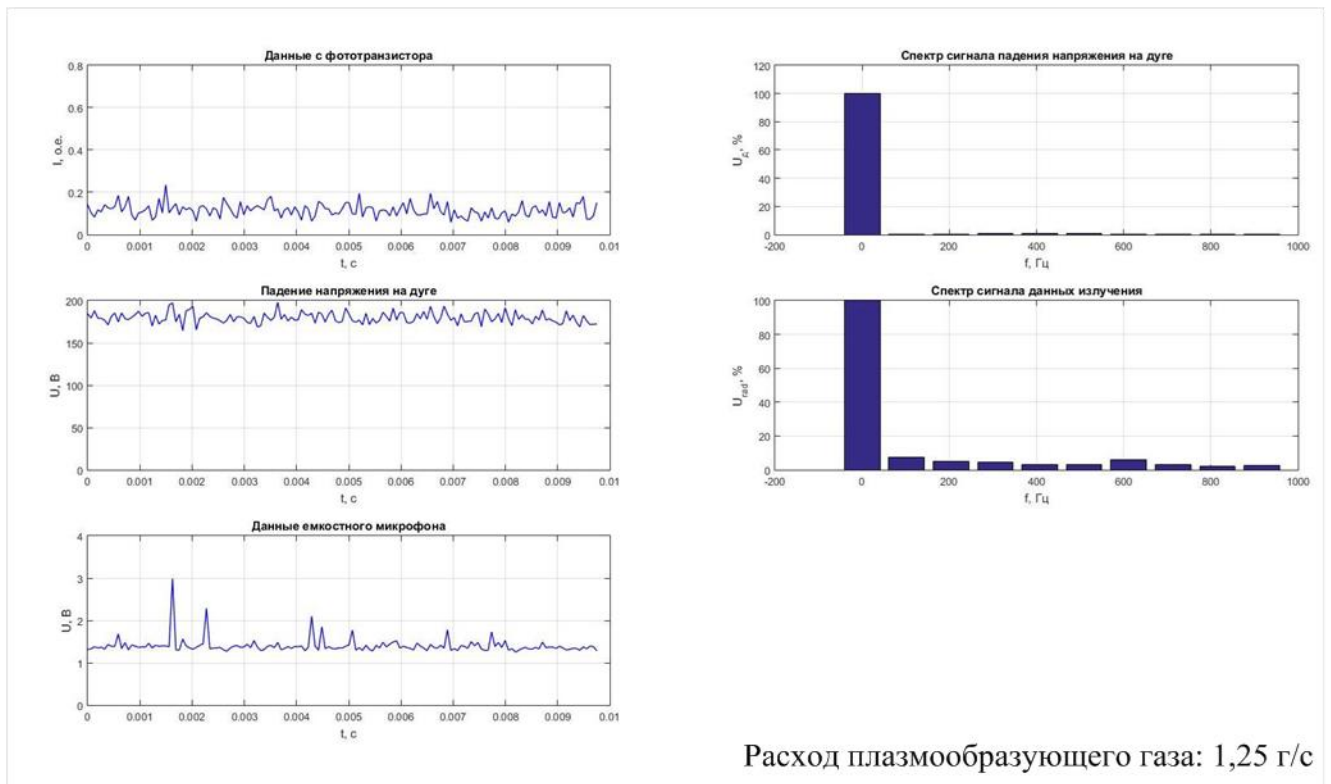


Рисунок 3.16. Результаты экспериментального исследования плазматрона ПН-В1 при расходе плазмообразующего газа 1,25 г/с

Представленные результаты исследований плазмотрона ПН-В1 при различных расходах плазмообразующего газа свидетельствуют о стабильности электрической дуги внутри канала плазмотрона, что подтверждается отсутствием гармонической составляющей высших гармоник в спектрах сигнала падения напряжения на дуге (см. рис. 3.13, 3.14, 3.15, 3.16). При этом из спектра данных излучения на выходе плазмотрона видно, что при увеличении расхода плазмообразующего газа увеличиваются в процентном отношении гармонические составляющие высших гармоник, что свидетельствует о развитии неустойчивости плазменного потока на выходе плазмотрона, приводящей к турбулизации потока. Из рис. 3.16 видно, что при расходе плазмообразующего газа 1,25 г/с сильно увеличивается флуктуация данных с емкостного микрофона, что свидетельствует о турбулентном характере потока плазмы.

3.4 Спектроскопический анализ плазмотрона ПН-В1

Спектроскопический анализ плазмотрона ПН-В1 осуществлен совместно с лабораторией Лейбницкого института плазменной науки и технологии INP Greifswald с целью получения радиального распределения температуры на различном расстоянии от выходного отверстия сопла плазмотрона. Экспериментальные исследования проводились в соответствии со схемой, представленной на рис. 3.17.

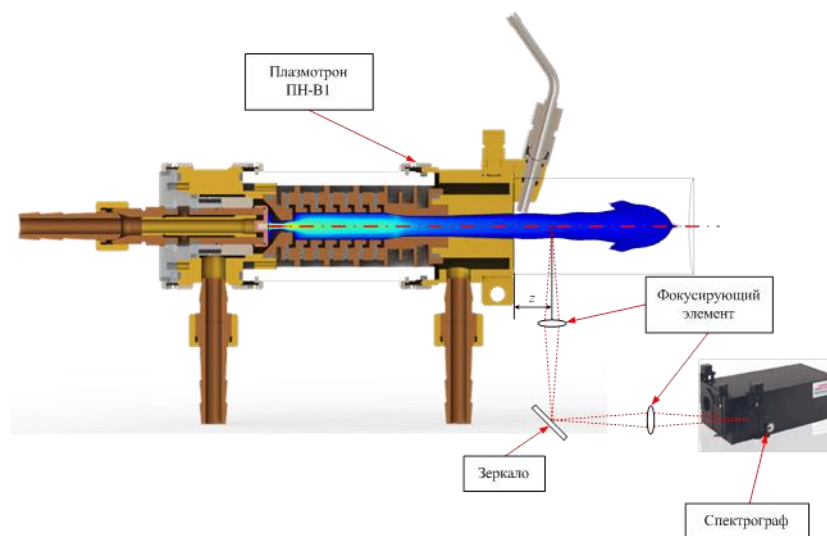


Рисунок 3.17. Схема проведения спектроскопического исследования

Методы оптической атомной спектроскопии, основаны на измерении интенсивности электромагнитного излучения, испускаемого или поглощаемого атомами определяемого элемента, которые находятся в газо- или парообразном состоянии. Эти методы являются многоэлементными и широко используются для установления микроэлементного состава самых разнообразных объектов.

Спектральные линии можно характеризовать частотой излучения ν , которая соответствует квантовому переходу между уровнями энергии E_i и E_k атома согласно соотношению (3.5).

$$h\nu = E_i - E_k, \quad (3.5)$$

где h – постоянная Планка, а также длиной волны $\lambda = c/\nu$ (c – скорость света).

Интенсивность спектральной линии – это мощность электромагнитного излучения, спонтанно испускаемого единицей объёма вещества и обусловленного определенным квантовым переходом в атомах исследуемого элемента [74]. Из определения, приведенного выше, следует, что интенсивность спектральной линии, соответствующей переходу атома из возбужденного состояния с энергией E_m в состояние с меньшей энергией E_k , связана с числом фотонов $\tilde{n}$, которые испускает источник за время Δt , и энергией фотона $h\nu$:

$$I = \frac{\tilde{n}h\nu}{\Delta t} \quad (3.6)$$

Число фотонов с энергией $h\nu$, испускаемых единицей объема газа, содержащего определяемый элемент, связано с числом атомов, которые находятся в возбужденном состоянии N_m , и вероятностью спонтанного излучения A_{mk} по Эйнштейну (число переходов, происходящих за 1 секунду с уровня m на уровень k) [74].

$$\tilde{n} = N_m A_{mk} \Delta t \quad (3.7)$$

Интенсивность спектральной линии можно представить в виде выражения (3.8).

$$I = N_m A_{mk} h\nu \quad (3.8)$$

Число атомов, которое находится в возбужденном состоянии N_m , зависит от температуры T и описывается распределением Больцмана [74].

Если атом определяемого элемента может находиться в основном состоянии с энергией $E_0 = 0$ и в возбужденных состояниях с энергиями $E_1, E_2, E_3, \dots, E_m, E_k$ справедливо выражение (3.9) [8].

$$\frac{N_m}{N} = \frac{g_m \exp\left(-\frac{E_m}{kT}\right)}{Z} \quad (3.9)$$

При логарифмировании выражения (3.9) получим выражение (3.10).

$$\ln(N_m) = \ln\left(\frac{Ng_m}{Z}\right) - \frac{E_m}{kT} \quad (3.10)$$

График зависимости $\ln(N_m) = f(E_m)$ (см. рис. 3.18) позволяет определить температуру плазменного потока.

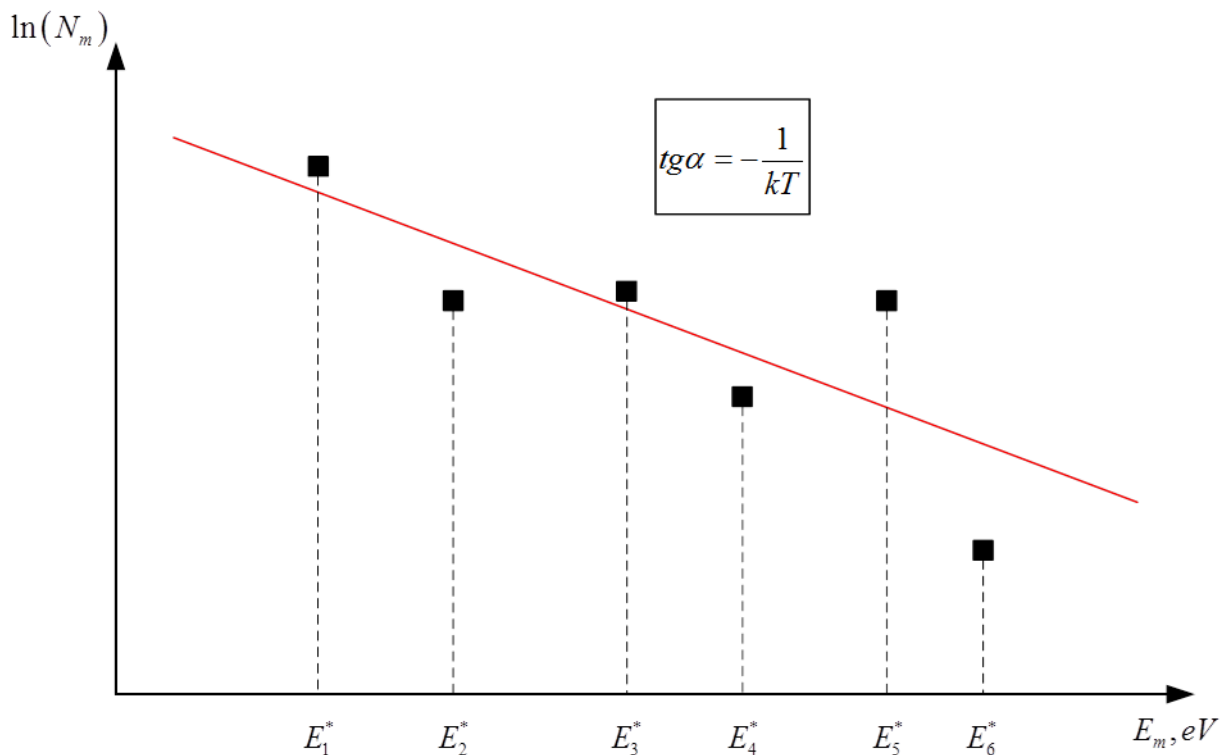


Рисунок 3.18. График зависимости $\ln(N_m) = f(E_m)$

Число атомов в возбужденном состоянии для исследуемого объекта (разрядной камеры) определяется следующим выражением (3.11).

$$N_m = 4\pi \frac{I^*}{A_{mk}} \cdot \frac{1}{h\nu}, \quad (3.11)$$

где I^* – экспериментально определенная интенсивность излучения.

Точность расчета радиального распределения температуры плазменного потока зависит от корректности идентификации спектральных линий элемента, по которым осуществляется вычисление. Радиальные распределения температуры на различном удалении от выхода плазматрона при расходе плазмообразующего газа 0,56 г/с представлены на рис. 3.19.

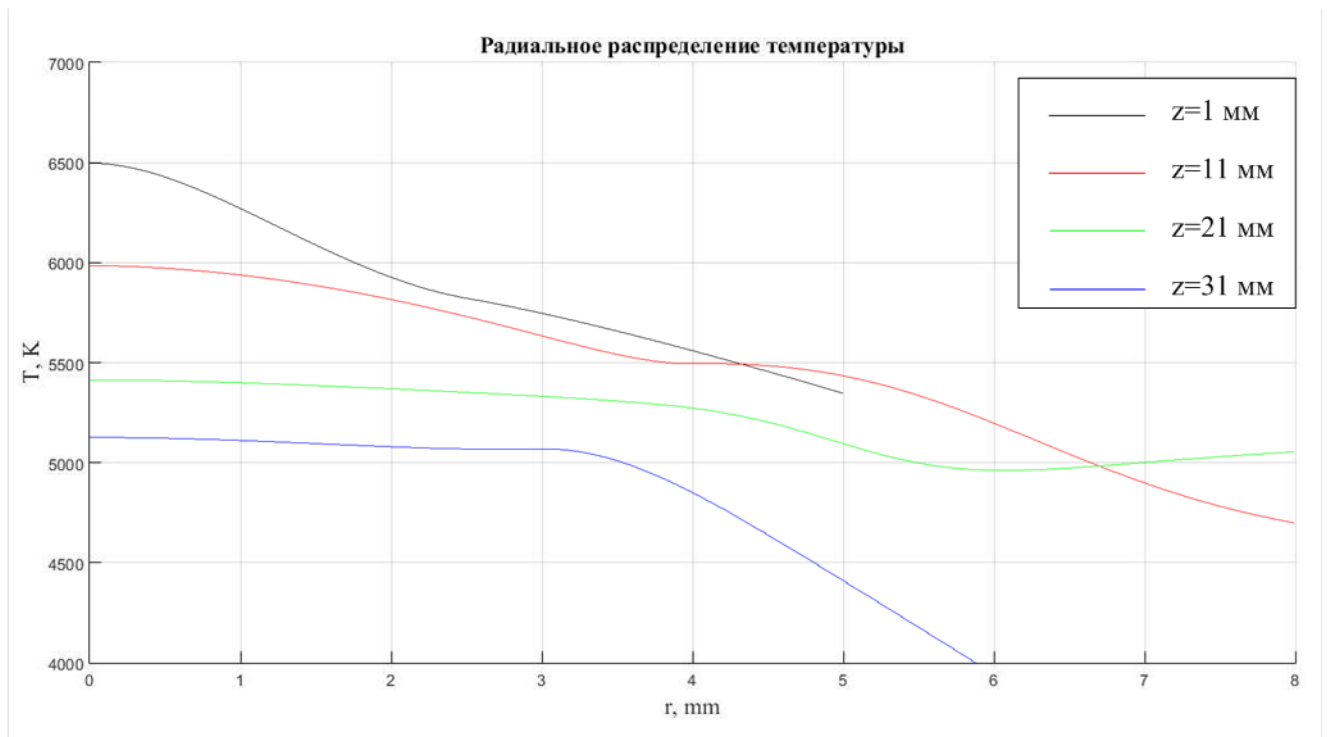


Рисунок 3.19. Экспериментальные радиальные распределения температуры на различном удалении от выхода плазматрона

Из результатов спектрографического исследования видно, что максимальная температура плазменного потока на оси и составляет 6500 К при минимальном удалении от выхода плазматрона при расходе плазмообразующего газа 0,56 г/с. По мере удаления от выхода плазматрона температура снижается до максимального значения температуры на оси 5200 К на удалении 31 мм от выходного отверстия сопла плазматрона.

3.5 Выводы по главе

Применяемые методики проведения экспериментальных исследований позволяют получить следующие данные о плазменном потоке:

- характеристики тока и напряжения на электрической дуге;
- уровень шума во времени, определяемый градиентом давления;
- интенсивность светового излучения во времени;
- радиальное распределение температуры.

Полученные экспериментальные данные позволяют оценить стабильность плазменного потока и влияние характеристик источников питания. Согласно полученным результатам исследования целесообразно рекомендовать источник питания АПР-403 в качестве основного источника питания для плазмотрона ПН-В1, что позволяет обеспечить более стабильный плазменный поток, тем самым улучшить характеристики напыляемого покрытия и повысить коэффициент полезного действия технологического процесса плазмотермического нанесения покрытий.

Радиальные распределения температуры, полученные в результате спектрального анализа, в совокупности с характеристикой напряжения на электрической дуге позволяют произвести верификацию разработанной нестационарной математической модели.

Характеристики интенсивности светового излучения и уровень шума позволяют идентифицировать развитие неустойчивости плазменного потока на выходе дугового плазмотрона с межэлектродными вставками, согласно результатам проведенных исследований развитие неустойчивости плазменного потока наблюдается при расходе плазмообразующего газа более 1,25 г/с.

ГЛАВА 4. Сравнительный анализ результатов численного моделирования и экспериментального исследования дугового плазмотрона с межэлектродными вставками

4.1 Верификация математической модели по характеристики напряжения на дуге

Оценка корректности результатов численного моделирования осуществляется путем проведения экспериментальных исследований и сопоставления полученных результатов. Сравнение результатов численного моделирования и экспериментальных данных произведено для режима работы дугового плазмотрона с расходом плазмообразующего газа 0,55-0,56 г/с. Одной из важнейших характеристик при оценке стабильности плазменного потока является падение напряжения на дуге. Расчетная и экспериментальная зависимости падения напряжения на дуге от времени представлены на рис. 4.1.

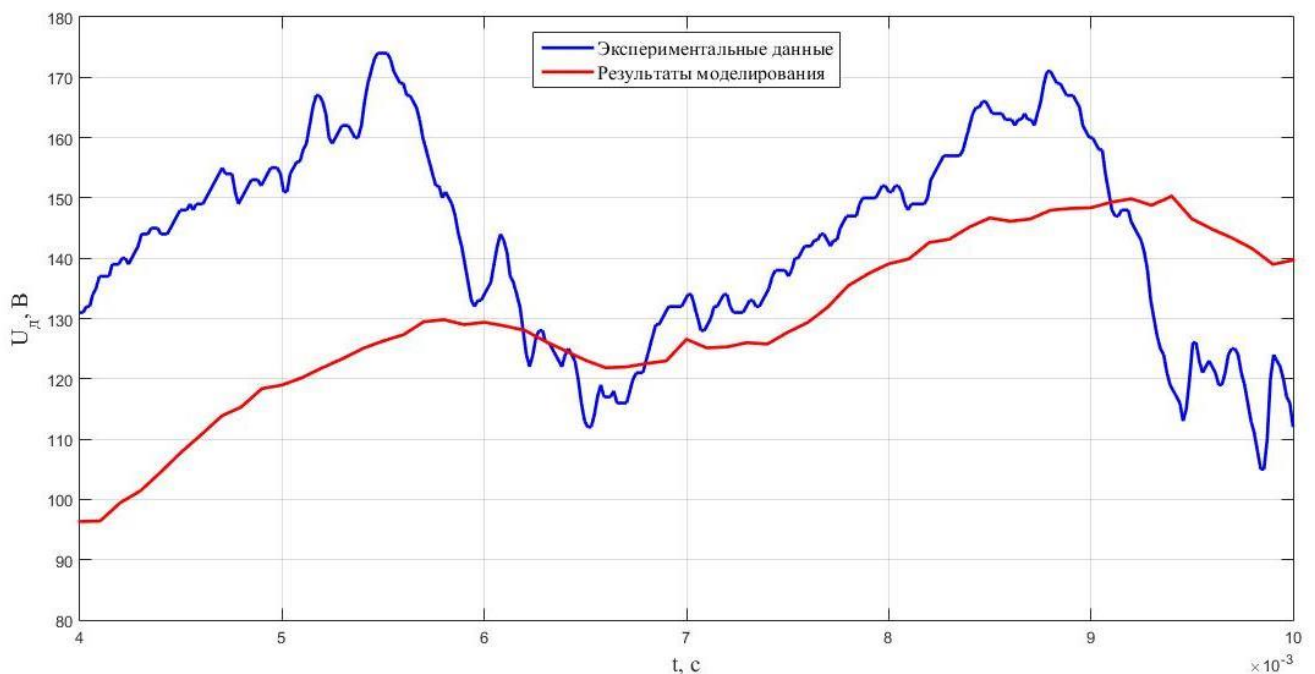


Рисунок 4.1. Падение напряжения на дуге (результаты численного моделирования и экспериментальные данные)

Полученные при численном моделировании значения падения напряжения на дуге согласуются с результатами экспериментальных исследований, незначительные различия обусловлены отсутствием движения точки привязки электрической дуги и отсутствием учета приэлектродных процессов в математической модели дугового плазмотрона с межэлектродными вставками.

4.2 Верификация математической модели по результатам спектрального анализа

Одним из результатов проведенных экспериментальных исследований являются полученные радиальные распределения температуры на различном удалении от выхода плазмотрона (см. главу 3). Сравнение результатов численного моделирования и экспериментальных данных о радиальном распределении температуры, полученных при спектральном анализе, осложняется из-за флуктуации плазменного потока, т.к. полученные радиальные распределения температуры являются усредненными значениями за время экспозиции, поэтому для более корректного сравнения было проведено осреднение радиальных распределений температуры по времени при установившемся течении плазменного потока, полученных по результатам численного моделирования. Кроме того для качественной оценки флуктуации температуры представлены минимальное и максимальное распределения температуры в установившемся режиме работы плазмотрона, полученные из результатов моделирования.

Результаты спектрального анализа приведены с погрешностью, обусловленной методикой обработки результатов. Верификация нестационарной математической модели осуществляется путём сопоставления результатов численного моделирования и спектрального анализа для идентичных режимов работы плазмотрона.

Расчетное и экспериментальное радиальные распределения температуры на удалении 1 мм от выхода плазмотрона представлены на рис. 4.2.

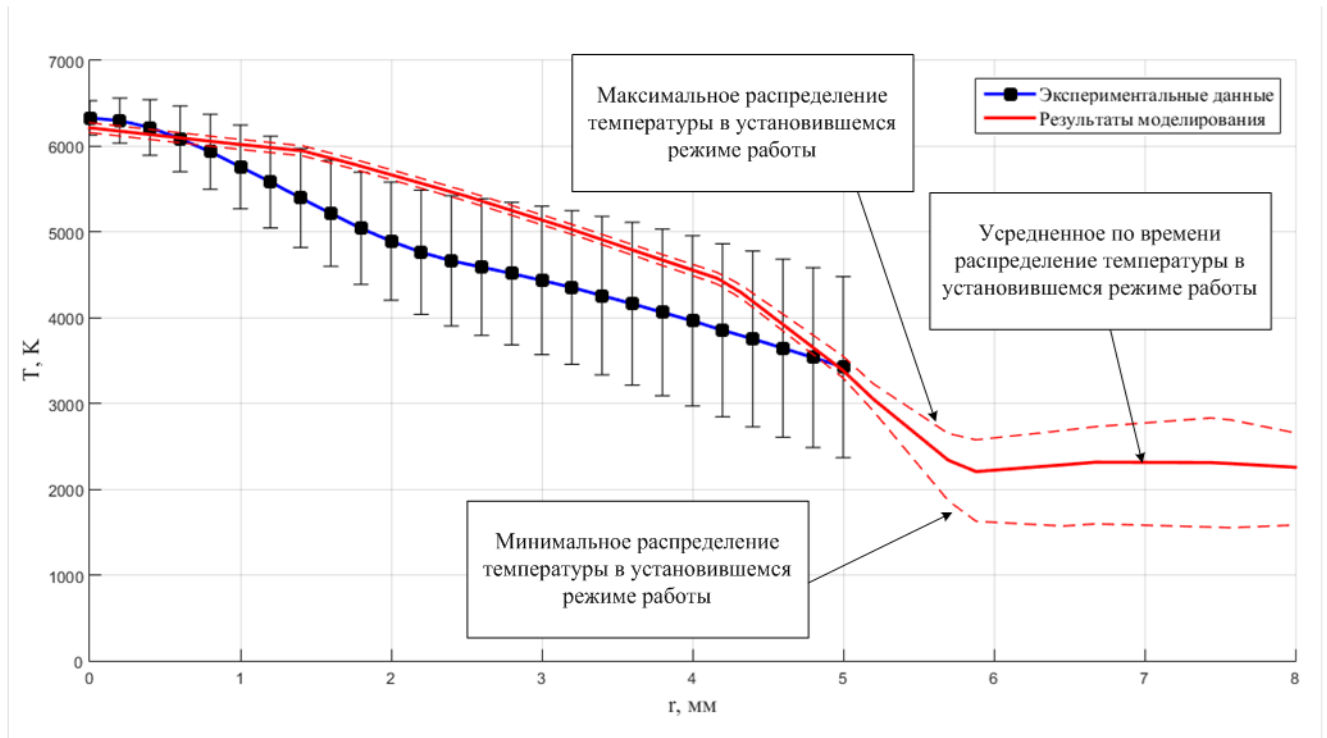


Рисунок 4.2. Радиальное распределение температуры на удалении 1 мм от выхода плазматрона

Расчетное и экспериментальное радиальные распределения температуры на удалении 11 мм от выхода плазматрона представлены на рис. 4.3.

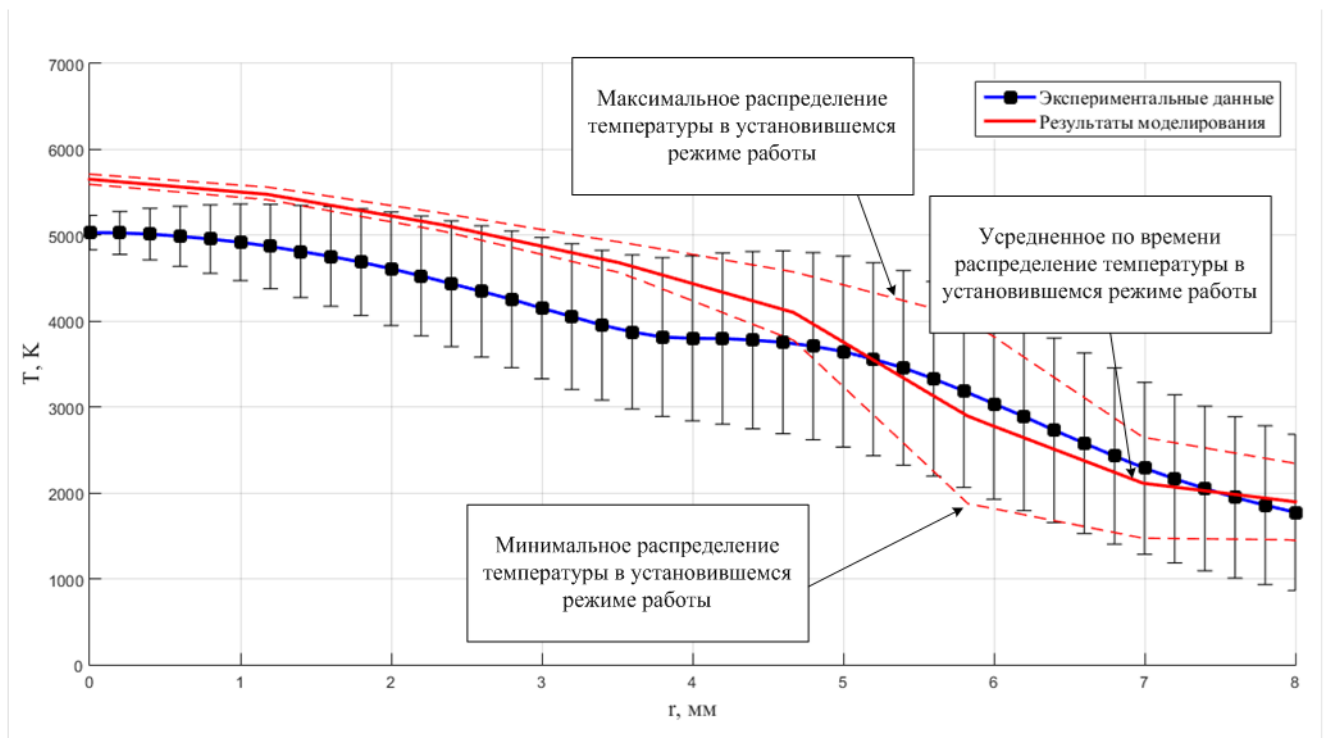


Рисунок 4.3. Радиальное распределение температуры на удалении 11 мм от выхода плазматрона

Расчетное и экспериментальное радиальные распределения температуры на удалении 21 мм от выхода плазматрона представлены на рис. 4.4.

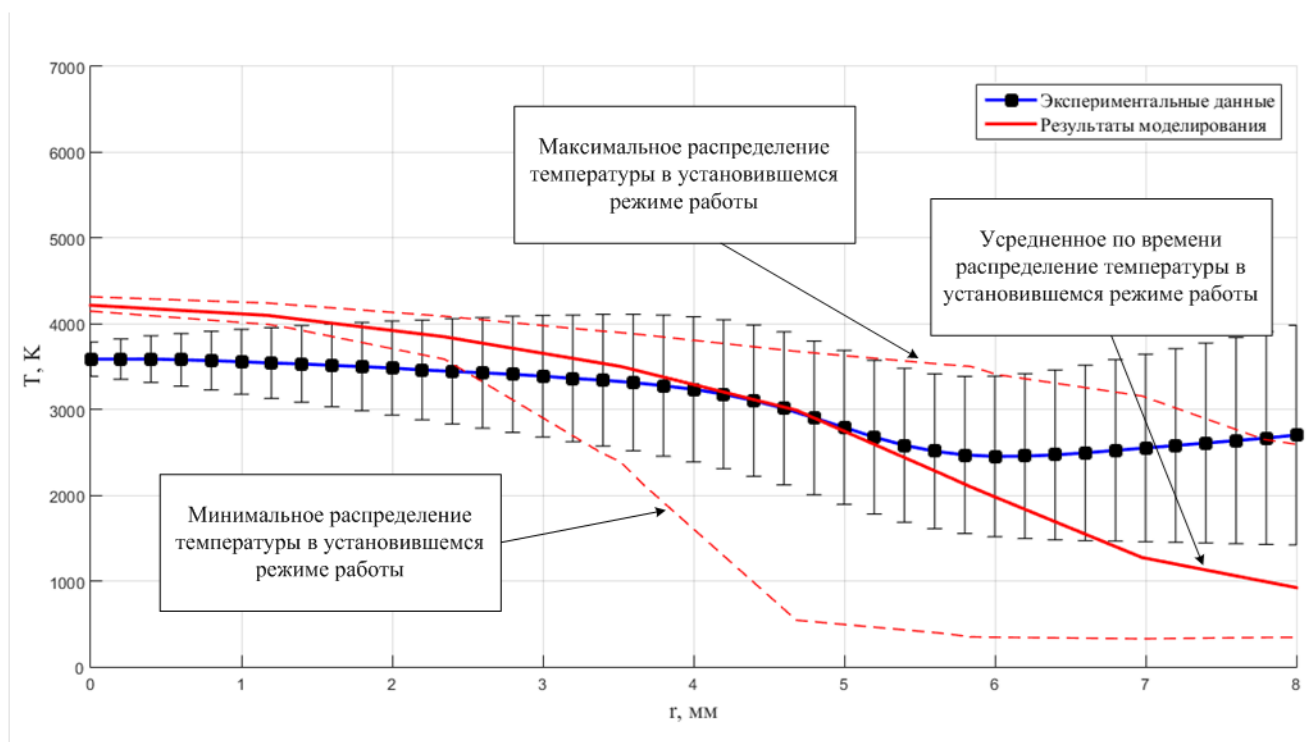


Рисунок 4.4. Радиальное распределение температуры на удалении 21 мм от выхода плазмотрона

Расчетное и экспериментальное радиальные распределения температуры на удалении 31 мм от выхода плазмотрона представлены на рис. 4.5.

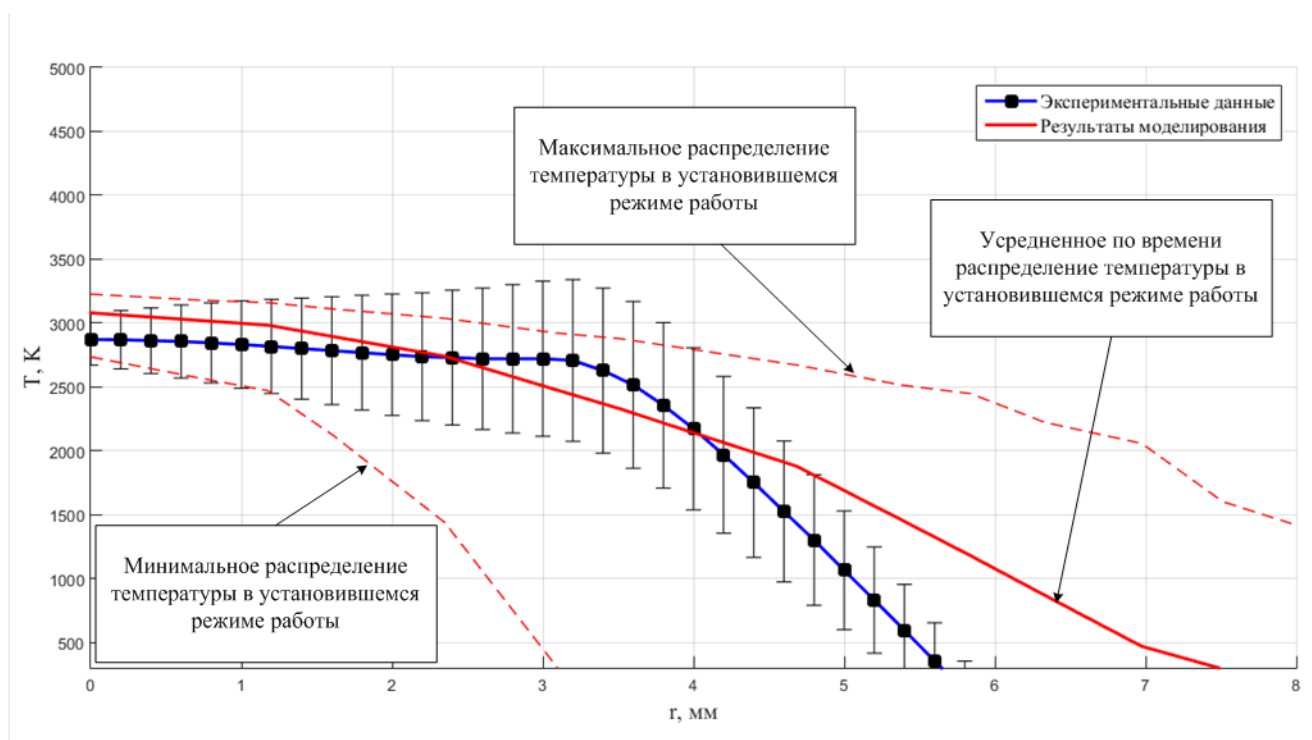


Рисунок 4.5. Радиальное распределение температуры на удалении 31 мм от выхода плазмотрона

На представленных выше рисунках приведен интервал, соответствующий погрешности обработки данных экспериментального исследования.

Радиальные распределения, полученные в результате численного моделирования, согласуются с результатами экспериментальных исследований в пределах погрешности, что свидетельствует о применимости разработанной математической модели.

Стоит отметить, что характер поведения плазменного потока, представленный на рис. 2.16, согласуется с данными, полученными при высокоскоростной съемке см. рис. 4.6.

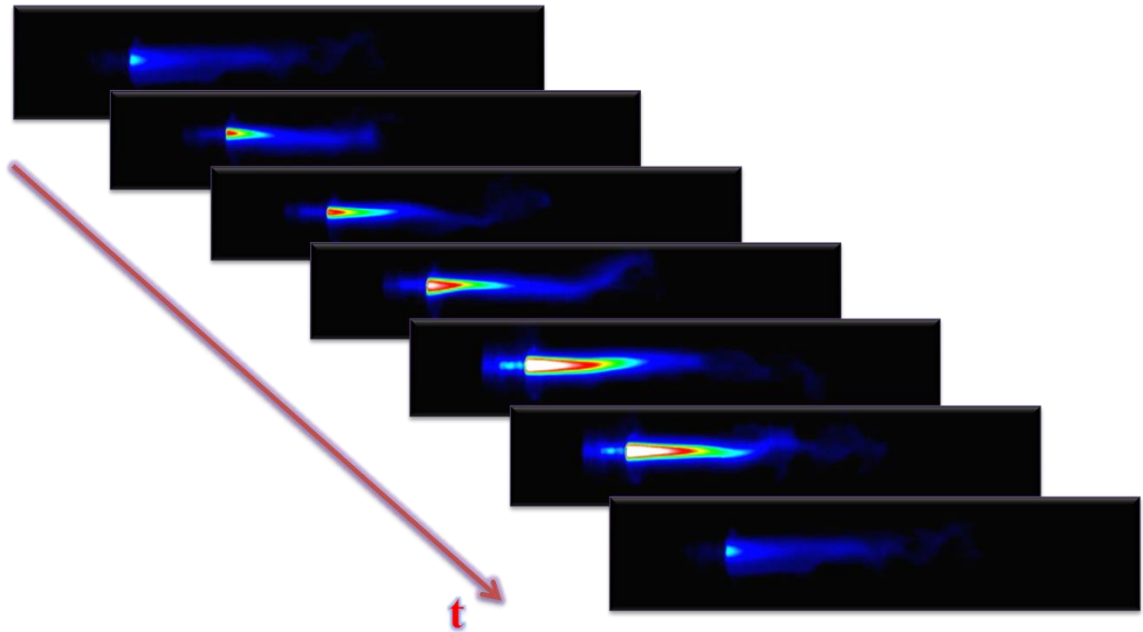


Рисунок 4.6. Данные высокоскоростной съемки плазменного потока на выходе плазмотрона

Представленные выше результаты подтверждают корректность численного моделирования работы дугового плазмотрона с межэлектродными вставками. На основании полученных экспериментальных данных о критических расходах плазмообразующего газа, при которых осуществляется переход к турбулентному течению, и результатов численного моделирования установлены критические значения числа Рейнольдса. Критическое значение числа Рейнольдса при использовании в качестве источника питания АПР-403 равно 267, а для АПР-404 – 212.

4.3 Выводы по главе

Результаты сравнительного анализа с учетом нестационарного плазменного потока и погрешности обработки результатов численного моделирования и экспериментальных исследований позволяют верифицировать математическую модель.

Анализ математической модели на границе развития неустойчивости плазменного потока (из результатов экспериментального исследования 1,25 г/с) в идентичных режимах работы дугового плазмотрона с проведенными экспериментальными исследованиями позволяет уточнить значение критического числа Рейнольдса. Согласно результатам исследования критическое значение числа Рейнольдса для конструкции плазмотрона ПН-В1 составляет 267 и 212 при использовании источников питания АПР-403 и АПР-404 соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны нестационарные математические модели дугового плазмотрона с межэлектродными вставками с вихревой стабилизацией и осевой подачей плазмообразующего газа с учетом явлений неустойчивости плазменного потока в программном продукте Comsol Multiphysics. Произведен анализ физических явлений, влияющих на устойчивость плазменного потока. Согласно результатам анализа были установлены факторы, влияющие на стабильность плазменного потока, а также установлено их взаимовлияние с целью компенсации развития неустойчивости потока.

2. Разработана трехмерная нестационарная математическая модель прикатодного узла плазмотрона, где происходит формирование вихревого потока для последующей стабилизации и обжата плазменного потока. По результатам численного моделирования получены полиномиальные зависимости осевой и радиальной скоростей на выходе формирователя от расхода плазмообразующего газа. Погрешность полученных коэффициентов полиномиальных зависимостей не превышает 5%. Полученные полиномиальные зависимости используются в качестве граничных условий в разработанной нестационарной математической модели дугового плазмотрона с вихревой стабилизацией и позволяют произвести численное моделирование с применением допущения осевой симметрии плазмотрона.

3. Произведен анализ влияния конструктивных элементов дугового плазмотрона на стабильность плазменного потока. Установлено, что при использовании диффузора анодной части плазмотрона с углом в диапазоне от 2° до 6° в номинальном режиме работы явление неустойчивости, обусловленное флуктуацией электрических параметров источника питания, и как следствие, изменение параметров тепловой энергии в столбе электрической дуги плазмотрона, компенсируется (коэффициент пульсаций напряжения для угла диффузора анодной части плазмотрона $1^\circ 24'$ при расходе плазмообразующего газа 2 г/с в номинальном режиме при использовании источника питания АПР-404

составляет 0,37, для угла диффузора анодной части плазмотрона 2° при расходе плазмообразующего газа 2 г/с в номинальном режиме при использовании источника питания АПР-404 составляет 0,06). Установлено, что увеличение угла диффузора анодной части приводит к «укорачиванию» плазменного потока и формированию отрывных течений (развитию неустойчивости, приводящей к формированию турбулентных течений вблизи стенок плазмотрона).

4. Разработана нестационарная математическая модель нагрева частицы в ламинарном и турбулентном потоках, позволяющая произвести анализ теплообменных процессов. Согласно результатам анализа более интенсивный прогрев частицы (в 1,97 раза температура возрастает быстрее при турбулентном течении, чем при ламинарном) осуществляется в турбулентном потоке за счет разрушения пограничного слоя путем импульсного воздействия и активной теплопередачи из-за перемешивания слоев течения, что является важным фактором при использовании тугоплавких материалов в технологии плазмотермического нанесения покрытий. Кроме того, из результатов данного анализа следует, что необходимо обеспечить формирование ламинарного потока внутри канала плазмотрона для повышения эксплуатационного ресурса конструктивных элементов.

5. Разработана методика проведения экспериментальных исследований, позволяющая оценить стабильность плазменного потока при различных режимах работы дугового плазмотрона, а также идентифицировать влияние характеристик источника питания на устойчивость потока плазмы. Согласно полученным результатам рекомендовано использовать источник питания АПР-403, позволяющий обеспечить устойчивость плазменного потока, тем самым улучшить характеристики напыляемого покрытия и повысить коэффициент полезного действия технологического процесса плазмотермического нанесения покрытий.

6. Идентифицировано развитие неустойчивости плазменного потока на выходе дугового плазмотрона с межэлектродными вставками, согласно результатам исследований развитие неустойчивости плазменного потока наблюдается в режимах с расходом плазмообразующего газа более 1,25 г/с.

7. Радиальные распределения температуры, полученные в результате спектрального анализа, в совокупности с характеристикой напряжения на электрической дуге позволяют произвести верификацию разработанной нестационарной математической модели.

8. Произведено уточнение значений критического числа Рейнольдса путем сопоставления результатов численного моделирования верифицированной математической модели в идентичных режимах работы дугового плазмотрона с проведенными экспериментальными исследованиями. Согласно результатам исследования критическое значение числа Рейнольдса для конструкции плазмотрона ПН-В1 составляет 267 и 212 при использовании источников питания АПР-403 и АПР-404 соответственно.

9. Результаты работы, имея теоретическую основу, подтвержденные экспериментальными исследованиями и численными методами, могут быть применены при совершенствовании существующей и разработке принципиально новых конструкций дугового плазмотрона для плазмотермического нанесения покрытий. Применение численного моделирования позволит сократить объемы работы при экспериментальных исследованиях конструкций плазмотронов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Фролов В.Я. Электротехнологические промышленные установки: учеб. пособие / В.Я. Фролова, С.В. Дресвин, А.А. Лисенков – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 572 с.

[2] Фролов В.Я. Техника и технологии нанесения покрытий: учеб. пособие / В.Я. Фролов, В.С. Клубникин, Г.К. Петров, Б.А. Юшин – СПб: Изд.-во Политехн. ун-та, 2008. - 387 с.

[3] Zhukov M.F. Heattransfer investigation from turbulent electric arc to wall at film cooling / M.F. Zhukov, A.S. An'shakov, I.M. Zasyrkin, I.I. Mishne, M.I. Sazonov // Phenomena in Ionized Gases: contributed pap. of the 12-th International conference. – Eindhoven 1975. – P.201.

[4] Zhukov M.F. Investigation of electric field distribution in front of cathode in arc discharge / M.F. Zhukov, A.S. An'shakov, G.-N.B. Dandaron // Phenomena in Ionized Gases: contributed pap. of the 12-th International conference. – Eindhoven 1975. – P.253.

[5] Жуков М.Ф. Прикладная динамика термической плазмы / М.Ф. Жуков, А.С. Коротеев, Б.А. Урюков – Новосибирск: Наука, 1975. – 298 с.

[6] Tsvetkov Yu. V.. Plasma processes in metallurgy. Thermal plasma and new materials technology / Yu. V. Tsvetkov // Cambridge. Interscience Publishing. – 1995. – V. 2. - P. 291-322.

[7] Tsvetkov Yu. V.. Plasma metallurgy. Current state, problems and prospects / Yu. V. Tsvetkov // Pure and Applied Chemistry. – 1999. - V. 71 (10). - P. 1853–1862.

[8] Цветков Ю.В. Термическая плазма в нанотехнологиях и наноиндустрии / Ю.В. Цветков, А. В. Самохин // Вакуумная наука и техника. М.: МИЭМ, 2007. – С. 168-171.

[9] Клубникин В.С. Плазменное напыление покрытий в активных средах / В. С. Клубникин, М. В. Карасев, Г. К. Петров - Л. : ЛДНТП, 1990. - 19 с.

[10] Frolov V. Air-plasma technologies of spraying of coatings / V. Frolov, G. Petrov, B. Yushin, D. Ivanov, S. Zverev // VII International Conference on Plasma Physics and Plasma Technology. – Minsk. - 2012. - P. 608-611.

[11] Heberlein J. New approaches in thermal plasma technology / J. Heberlein // Pure and Applied Chemistry. – 2002. - V. 74(3). - P. 327-335.

[12] Heberlein J. Plasma torch diamond deposition / J. Heberlein, N. Ohtake // Diamond Films Handbook. - New York. – 2002. – Ch. 6. - P. 141-210.

[13] Lima R. S. Biocompatible nanostructured high-velocity oxyfuel sprayed titania coating: deposition, characterization and mechanical properties / R. S. Lima, H. Li, K. A. Khor, B. R. Marple // Journal of Thermal Spray Technology. – 2006. – V. 15(4). – P. 623-627.

[14] Lima R. S. From APS to HVOF spraying of conventional and nanostructured titania feedstock powders: a study on the enhancement of the mechanical properties / R. S. Lima, B. R. Marple // Surface and Coatings Technology. - 2006. - V.200(11). – P. 3428-3437.

[15] Trelles J. P. Simulation Results of Arc Behavior in Different Plasma Spray Torches / J. P. Trelles, J. V. R. Heberlein // Journal of Thermal Spray Technology. – 2006. - V. 15. - P. 563-569.

[16] Trelles J.P. 3D finite element modeling of arc and jet dynamics in a DC plasma torch / J. P. Trelles, E. Pfender and J. V. R. Heberlein // APS 59th Gaseous Electronics Conference. – Columbus. – 2006. – 45 pp.

[17] Rat V. Improvement of plasma spray torch stability by controlling pressure and voltage dynamic coupling / V. Rat, J-F. Coudert // Journal Thermal Spray Technology. – 2011. – V. 20(1). - P. 28-38.

[18] Duan Z. Effects of nozzle fluid dynamics on the dynamic characteristics of a plasma spray torch / Z. Duan, J. Heberlein, S. Janisson, K. Wittmann, J. F. Coudert, P. Fauchais // United Thermal Spray Conference.- Dusseldorf. – 1999. – P. 247-252.

[19] Duan Z. Investigations of plasma instabilities in a spray torch: Ph.D. thesis / Z. Duan. – Minnesota: University of Minnesota, 2000.

- [20] Duan Z. Arc instabilities in a plasma spray torch / Z. Duan, J. Heberlein J. // Thermal Spray Technology. – 2002. – V. 11. – P. 44-51.
- [21] Coudert J. F. Arc instabilities in a D.C. plasma torch / J. F. Coudert, P. Fauchais // High Temp. Material Processes. – 1997. – V. 1. – P. 149-166.
- [22] Coudert J. F. Characterization of D.C. plasma torch voltage fluctuations / J. F. Coudert, M. P. Planche, P. Fauchais // Plasma Chem. Plasma Proc. -1996. – V. 16(1). – P. 211-227.
- [23] Gonzales J. J. Comparisons between two- and three-dimensional models: gas injection and arc attachment / J. J. Gonzales, P. Freton and A. Gleizes // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2002. – V. 35. – P. 3181-3191.
- [24] Baudry C. Three-dimensional and time-dependent model of the dynamic behavior of the arc in a plasma spray torch / C. Baudry, A. Vardelle, G. Mariaux, C. Delalondre, E. Meillot // Thermal Spray 2004: Advances in Technology and Applications. – 2004. – P. 717-723.
- [25] Baudry C. Numerical modeling of a DC non-transferred plasma torch: movement of the arc anode attachment and resulting anode erosion / C. Baudry, A. Vardelle, G. Mariaux // High Tech. Plasma Proc. – 2005. – V. 9. – P. 1-15.
- [26] Trelles J. P. Arc plasma torch modeling / J. P. Trelles, C. Chazelas, A. Vardelle, J. Heberlein // Journal of Thermal Spray Technology. - 2009. - V 18(5-6). – P. 728-752.
- [27] Монин А.С. Гидродинамическая неустойчивость / А.С. Монин // Успехи физ. Наук. – 1986. - Т.150, Вып. 1. - С. 61-105.
- [28] Фортов В.Е. Энциклопедия низкотемпературной плазмы / В.Е. Фортов – М.: Изд-во Наука. - 2000. - Т. 3. – 633 с.
- [29] Ланда П.С. Автоколебания в распределенных системах / П.С. Ланда - М.: Либроком - 2010. – 320 с.
- [30] Berndt C.C. Current Problems in Plasma Spray Processing / C.C. Berndt, Mc Brindley, A.N. Goland, H. Herman, D. L. Houck, K. Jones, R.A. Miller, R. Wiser, W. Riggs, S. Sampath, M. Smith, R Spanne // Journal of Thermal Spray Technology. – 1992. – V. 1(4). – P. 341-356.

[31] Ландау Л.Д. Теоретическая физика. Т.6. Гидродинамика. / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц - М.: Наука - 1986.- 3-е изд. – 736 с.

[32] Иевлев В.М. Турбулентность низкотемпературной плазмы в магнитном поле / В.М. Иевлев, Э.Е. Сон // Тех. Обзорных докл. 7. Всесоюзн. конф. по физике низкотемпературной плазмы. – Москва. - 1988. - С. 89-96.

[33] Цытович В.Н. Теория турбулентной плазмы / В.Н. Цытович - М.: Атомиздат - 1971. – 423 с.

[34] Huang R. Simulation of arc root fluctuation in a DC non-transferred plasma torch with three dimensional modeling / R. Huang, H. Fukanuma, Y. Uesugi, Y. Tanaka // Journal of Thermal Spray Technology. - 2012. - V. 21(3-4). - P. 636-643.

[35] Li H. Three-dimensional modeling of the turbulent plasma jet impinging upon a flat plate and with transverse particle and carrier-gas injection / H. Li, X. Chen // Plasma Chemistry and Plasma Processing. – 2002. - V 22(1). - P. 27-58.

[36] Ondrac P. Investigation of the arc-anode attachment area by utilizing a high-speed camera / P. Ondrac, A. Maslani, M. Hrabovsky // Plasma Physics and Technology. – 2016. – V. 3(1). – P. 1-4.

[37] Hurba O. Diagnostics of plasma jet generated in water/argon dc arc torch / O. Hurba, M. Hlina, M. Hrabovsky // Plasma Physics and Technology. – 2016. – V. 3(1). – P. 5-8.

[38] Hrabovsky M. Properties of hybrid water/gas dc arc plasma torch / M. Hrabovsky, V. Kopecky, V. Sember, T. Kavka, O. Chumak, M. Konrad // IEEE Transactions on plasma science. – 2006. – V. 34(4). – P. 1566-1575.

[39] Урюков В. А. Проблемы взаимодействия частиц с поверхностью / В. А. Урюков // Теоретические и экспериментальные проблемы взаимодействия частиц с поверхностью: Сб. науч. тр. – Киев: Институт твердых материалов АН УССР - 1988. – С. 4-14.

[40] Lebouvier A. Three-dimensional unsteady MHD modeling of a low current - high voltage non-transferred DC plasma torch operating with air / A. Lebouvier, C. Delalondre, F. Fresnet, V. Boch, V. Rohani, F. Cauneau, L. Fulcheri // IEEE transactions on plasma science. – 2011. – V. 39(9). – P. 1-12.

[41] Baeva M., Non-equilibrium modeling of the electrical characteristics of a freeburning // M. Baeva, S. Gorchakov, R. Kozakov, D. Uhrlandt, T. Schoenemann // High Voltage Engineering. – 2013. - V. 39. – P. 2159-2165.

[42] Tradia A. Multiphysics modelling and numerical simulation of GTA weld pools: Dr.D. thesis / A. Tradia. - Paris: Ecole Polytechnique, 2011. - 224 p.

[43] Trelles J.P. Arc plasma torch modeling / J.P. Trelles, C. Chazelas, A. Vardelle, J. Heberlein // Journal of Thermal Spray Technology. – 2009. – V. 18(5-6). - P. 728-752.

[44] Colombo V. Time dependent 3D large eddy Simulation of a DC nontransferred arc plasma spraying torch with particle injections / V. Colombo, A. Concetti, E. Ghedini // 2007 IEEE pulsed power and plasma science conference. -2007. – V. 2. – P. 1565-1568.

[45] Delalondre C. Turbulence modeling in electric arcs, heat and mass transfer under plasma conditions / C. Delalondre, O. Simonin // Begell House, New York. - 1995. – P. 1-15.

[45] Bauchire J. Numerical modeling of a free-burning arc in argon. A tool for understanding the optical mirage effect in a tig welding device / J. Bauchire, E. Langlois-Bertrand, C. Izarra // Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference. Milan. - 2009.

[47] Patankar S. Numerical Heat transfer and Fluid Flow / S. Patankar. – Hemisphere publishing corporation. -1980. – 205 pp.

[48] Дресвин С.В. Основы математического моделирования плазмотронов. Ч. 1: Уравнение баланса энергии. Метод контрольного объема. Расчет температуры плазмы: учеб. пособие / С.В. Дресвин, Д.В. Иванов – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2004. – 227 с.

[49] Дресвин С.В. Основы математического моделирования плазмотронов. Ч. 3: Уравнение движения плазмы. Методика расчета скорости плазмы в плазматронах: учеб. пособие / С.В. Дресвин, Н.К. Ши, Д.В. Иванов – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2006. – 132 с.

[50] Дресвин С.В. Основы математического моделирования плазмотронов. Ч. 2: Электромагнитные задачи в плазмотронной технике: учеб. пособие / С.В. Дресвин, Д.В. Иванов – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2006. – 296 с.

[51] Программный пакет для мультифизического моделирования [электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.comsol.ru/products>

[52] Фролов В.Я. Расчет состава плазмы дугового импульсного разряда в мультикамерном разряднике. / В.Я. Фролов, Д.В. Иванов, Ю.В. Мурашов, А.Д. Сиваев // Письма ЖТФ. - 2015. - Т. 41, в. 7. - С. 8-14.

[53] Фролов В.Я. Физика и диагностика неравновесной плазмы. Основы теории приэлектродных процессов дугового разряда / В.Я. Фролов, Д. Урланд, А.А. Лисенков – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – 198 с.

[54] Frei W. Улучшение сходимости мультифизических задач [электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.comsol.ru/blogs/improving-convergence-multiphysics-problems-ru>

[55] Frei W. Разбиение сетки для нелинейных статических конечно-элементных задач [электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.comsol.ru/blogs/meshing-considerations-nonlinear-static-finite-element-problems-ru>

[56] Дресвин С.В.: Физика плазмы: учеб. пособие / С.В. Дресвин, Д.В. Иванов – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2013. – 544 с.

[57] Мурашов Ю.В. Моделирование тиристорного источника питания с замкнутой системой управления в Simulink. / Ю.В. Мурашов, В.В. Смородинов // Неделя науки СПбГПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. – Санкт-Петербург, 2013. – Часть I. – С. 105–107.

[58] Лойцянский Л. Г., Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский - М.: Наука, 1987. – 823 с.

[59] Чжен П. Отрывные течения / П. Чжен – М.: Мир, 1973. – Т. 3. – 333 с.

[60] Гогиш Л.В. Турбулентные отрывные течения / Л.В. Гогиш, Г.Ю. Степанов – М.: Наука, 1979. – 367 с.

[61] Бойко А.В. Возникновение турбулентности в пристенных течениях / А.В. Бойко, Г.Р. Грек, А.В. Довгаль, В.В. Козлов – Новосибирск: Наука, 1999. – 328 с.

[62] Yamoah S. Analysis of fluid flow and heat transfer model for the pebble bed high temperature gas cooled reactor. / S. Yamoah, E.H.K. Akaho, N.G.A. Ayensu, M. Asamoah // Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. -2012. – V. 4(12). – P. 1659-1666

[63] Жуков М.Ф. Физика дугового разряда (сборник трудов) / Жуков М.Ф. и др. – Новосибирск, 1972. - 157 с.

[64] Белов И.А. Моделирование турбулентных течений / И.А. Белов, С.А. Исаев - СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2001. - 108 с.

[65] Юн А.А. Теория и практика моделирования турбулентных течений / А.А. Юн М. 2009. – 272 с.

[66] Wilcox D. Turbulence modeling for CFD / D. Wilcox // DCW Industries. - 1994. – 460 pp.

[67] Trelles J. P. The reattachment process in non-equilibrium arc simulations / J. P. Trelles, J. Heberlein, E. Pfender // IEEE Trans. Plasma Science. - 2008. - P. 1024-1025.

[68] Trelles J. P. Multiscale finite element modeling of arc dynamics in a DC plasma torch / P. Trelles, E. Pfender, J. Heberlein // Plasma Chemistry and Plasma Processing. - 2006. - P. 557-575.

[70] Westermoen A. Modelling of dynamic arc behavior in a plasma reactor: Dr.D. Thesis / A. Westermoen. – Trondheim: University of Science and Technology, 2007. - 181 p.

[71] Frolov V., 2015 Special aspects of dc air plasma torch's operating modes under turbulent flow conditions / V. Frolov, I. Murashov, D. Ivanov // Plasma Physics and Technology Journal. – 2015. – V. 2. - P. 129-133.

[72] Arduino MEGA 2560 & Genuino MEGA 2560 [электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560>

[73] Murashov I. Numerical simulation of DC air plasma torch modes and plasma jet instability for spraying technology / I. Murashov, V. Frolov, D. Ivanov // 2016 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference. Saint-Petersburg. - 2016. - P. 625-628.

[74] Duhamel P. Fast Fourier transforms: a tutorial review and a state of the art / P. Duhamel, M. Vetterli // Signal processing. -1990. – V. 19. - P. 259-299.

[75] Очкин В.Н. Спектроскопия низкотемпературной плазмы / В.Н. Очкин - М.:ФИЗМАТЛИТ, 2006. - 472 с.

Приложение 1. FFT анализ (MATLAB)

```
%Фоновые помехи
%Dиректория с данными о фоновых помехах:
cd('E:\Iurii\Simulink\Background')
%Загрузка сохраненных данных:
load('Background.mat')
%Dанные с аналогового входа A0 [B]:
A0_background=((double(Test_0.signals(1).values)-1023)*(-1))*5/1023;
%Dанные с аналогового входа A1 [B]:
A1_background=((double(Test_0.signals(2).values)-1023)*(-1))*5/1023;
%Dанные с аналогового входа A2 [B]:
A2_background=double(Test_0.signals(3).values)*5/1023;
%Dанные с аналогового входа A3 [B]:
A3_background=double(Test_0.signals(4).values)*250/1023;
%%
%Экспериментальные данные
%Dиректория с экспериментальными данными:
cd('E:\Iurii\Simulink\5')
%Загрузка сохраненных данных:
load('Experiment.mat')
%Dанные с аналогового входа A0 [B]:
A0=((double(Test_0.signals(1).values)-1023)*(-1))*5/1023;
%Dанные с аналогового входа A1 [B]:
A1=((double(Test_0.signals(2).values)-1023)*(-1))*5/1023;
%Dанные с аналогового входа A2 [B]:
A2=double(Test_0.signals(3).values)*5/1023;
%Dанные с аналогового входа A3 [B]:
A3=double(Test_0.signals(4).values)*250/1023;
%Dанные о измеряемом временном интервале [c]:
```



```

t=Test_0.time;
%Создание матрицы с данными экспериментальных исследований
A_tA0A1A2A3=[t,A0,A1,A2,A3];
%Сохранение экспериментальных данных в текстовом формате
dlmwrite('A_tA0A1A2A3.txt',A_tA0A1A2A3,'delimiter','\t','precision',16)
%%
%Учет фоновых помех
%Данные с аналогового входа A0 с учетом помех [B]:
A0_clear=A0-A0_background;
%Данные с аналогового входа A1 с учетом помех [B]:
A1_clear=A1-A1_background;
%Данные с аналогового входа A2 с учетом помех [B]:
A2_clear=A2-A2_background;
%Данные с аналогового входа A3 с учетом помех [B]:
A3_clear=A3-A3_background;
%%
%FFT анализ A0
Fd=1/(t(2)-t(1)); %Частота дискретизации (Гц)
FftL=151; %Количество линий Фурье спектра
FftSA0=abs(fft(A0,FftL)); %Амплитуды преобразования Фурье сигнала
FftSA0=2*FftSA0./FftL; %Нормировка спектра по амплитуде
FftSA0(1)=FftSA0(1)/2; %Нормировка постоянной составляющей в спектре
%FFT анализ A1
FftSA1=abs(fft(A1_clear,FftL)); %Амплитуды преобразования Фурье сигнала
FftSA1=2*FftSA1./FftL; %Нормировка спектра по амплитуде
FftSA1(1)=FftSA1(1)/2; %Нормировка постоянной составляющей в спектре
%FFT анализ A3
FftSA3=abs(fft(A3,FftL)); %Амплитуды преобразования Фурье сигнала
FftSA3=2*FftSA3./FftL; %Нормировка спектра по амплитуде
FftSA3(1)=FftSA3(1)/2; %Нормировка постоянной составляющей в спектре

```

```

%%
%% Построение графиков, полученных сигналов
figure %Создаем новое графическое окно
subplot(3,1,1); %Выбор области окна для построения
plot(t,A0); %Построение сигнала
grid on
title('Данные с фототранзистора'); %Подпись графика
xlabel('t, c'); %Подпись оси абсцисс графика
ylabel('I, о.е. '); %Подпись оси ординат графика
subplot(3,1,2); %Выбор области окна для построения
plot(t,A3); %Построение сигнала
grid on
title('Падение напряжения на дуге'); %Подпись графика
xlabel('t, c'); %Подпись оси абсцисс графика
ylabel('U, В'); %Подпись оси ординат графика
subplot(3,1,3); %Выбор области окна для построения
plot(t,A1_clear); %Построение сигнала
grid on
title('Данные емкостного микрофона'); %Подпись графика
xlabel('t, c'); %Подпись оси абсцисс графика
ylabel('U, В'); %Подпись оси ординат графика
%%
F=0:Fd/FftL:1000; %Массив частот вычисляемого спектра Фурье
figure %Создаем новое графическое окно
bar(F,FftSA0(1:length(F))*100/FftSA0(1));% Построение спектра Фурье
сигнала
grid on
title('Спектр сигнала данных излучения');% Подпись графика
xlabel('f, Гц'); %Подпись оси абсцисс графика
ylabel('Амплитуда данных излучения, %'); %Подпись оси ординат графика

```

```

figure %Создаем новое графическое окно
bar(F,FftSA3(1:length(F))*100/FftSA3(1));% Построение спектра Фурье
сигнала
grid on
title('Спектр сигнала падения напряжения на дуге');% Подпись графика
xlabel('f, Гц'); %Подпись оси абсцисс графика
ylabel('Амплитуда падения напряжения на дуге, %'); %Подпись оси ординат
графика
figure %Создаем новое графическое окно
bar(F,FftSA1(1:length(F))*100/FftSA1(1));% Построение спектра Фурье
сигнала
grid on
title('Спектр сигнала данных емкостного микрофона');% Подпись графика
xlabel('f, Гц'); %Подпись оси абсцисс графика
ylabel('Амплитуда данных емкостного микрофона, %'); %Подпись оси
ординат графика

```

Приложение 2. Паспортные данные платформы Arduino Mega 2560

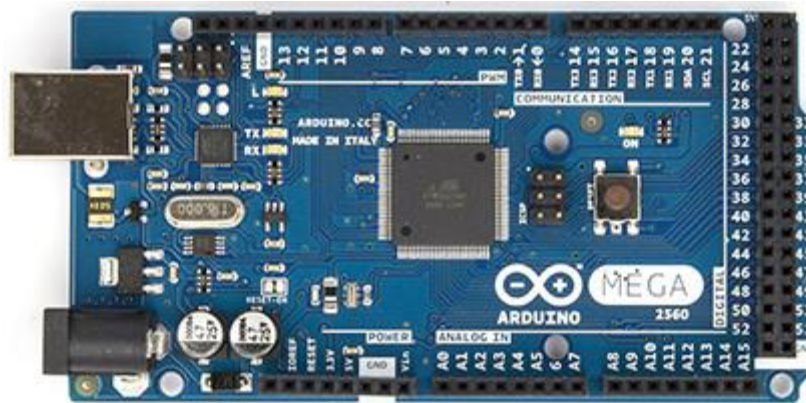


Рисунок 1. Внешний вид платформы Arduino Mega 2560

Таблица 1

Общие параметры

№	Наименование	Описание
1	Микроконтроллер	ATmega2560-16AU в корпусе TQFP100
2	Рабочее напряжение питания	5 В
3	Напряжение адаптера AC-DC	Рекомендуется 7...12 В, предельные значения 6...20 В
4	Количество портов ввода/вывода (GPIO)	54 (15 ШИМ)
5	Количество аналоговых входов АЦП (ADC)	16
6	Выходной ток порта GPIO	40 мА
7	Выходной ток вывода 3,3 В	50 мА
8	Объем памяти программ (FLASH)	256 кбайт (8 кбайт UART)
9	Объем оперативной памяти	8 кбайт
10	Объем энергонезависимой памяти (EEPROM)	4 кбайт
11	Рабочая тактовая частота	16 МГц

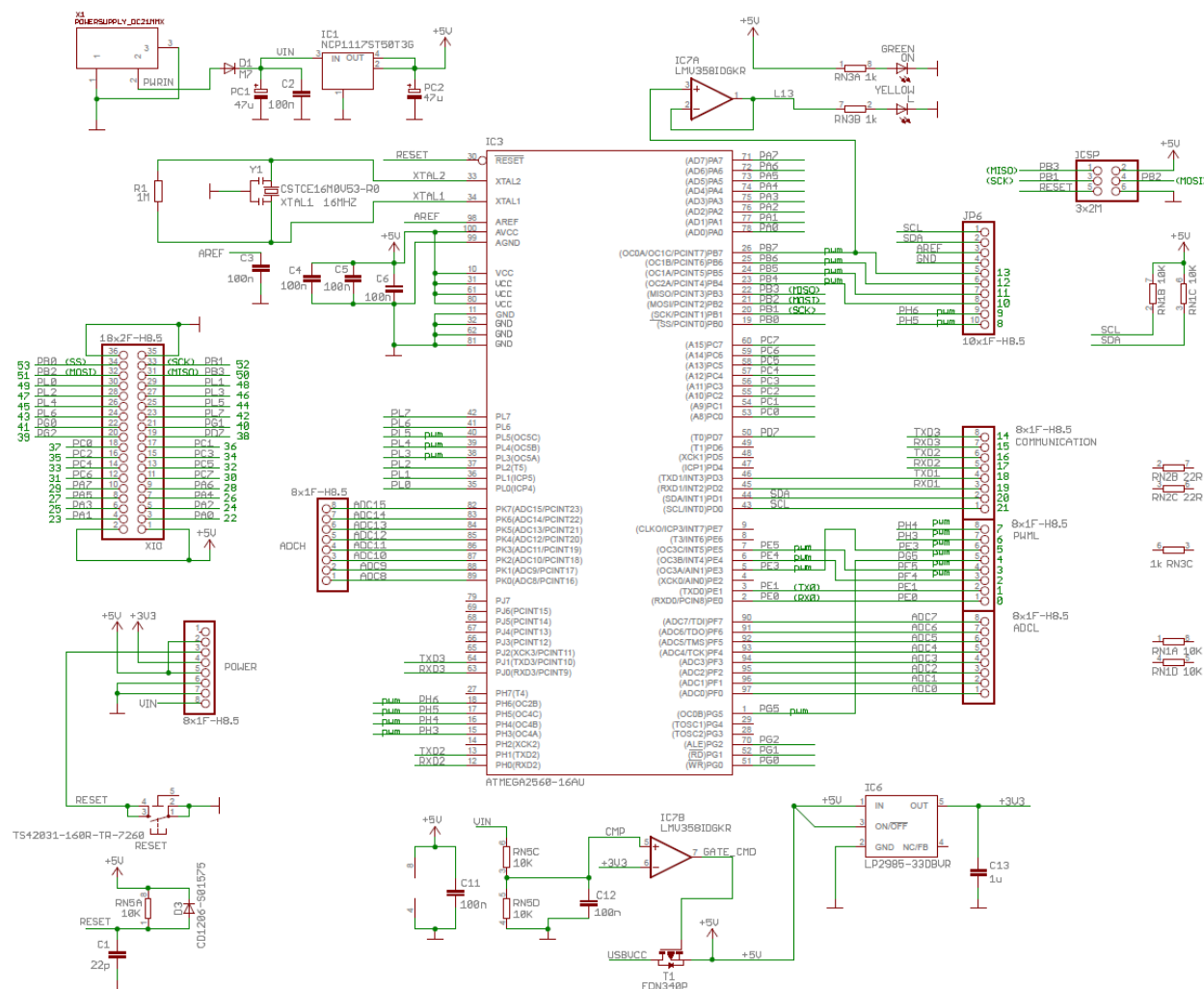


Рисунок 2. Принципиальная электрическая схема ATmega2560

