

На правах рукописи

Нгуен Куок Ши

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИНДУКЦИОННЫХ
И ДУГОВЫХ ПЛАЗМОТРОНОВ**

Специальность 05.09.10 – Электротехнология.

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Санкт-Петербург
2002

Работа выполнена на кафедре “Электротехники и электротехнологии” в Санкт-Петербургском государственном техническом университете.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор
доктор технических наук, профессор
доктор технических наук, профессор

С.В. Бобашев
В.С. Клубникин
В.В. Смирнов

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие Всероссийский научно-исследовательский институт токов высокой частоты имени В.П. Вологодина.

Защита состоится “ _____ ” _____ 2002г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.20 в Санкт-Петербургском государственном техническом университете по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного технического университета (СПбГТУ).

Автореферат разослан “ _____ ” _____ 2002г.

Ученый секретарь диссертационного совета
к.т.н., доцент

А.Д. Курмашев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации обусловлена потребностью в разработке методики моделирования плазменных процессов и фундаментальных исследованиях физических процессов в высокочастотных индукционных (ВЧИ) и дуговых плазмотронах.

ВЧИ и дуговые плазмотроны являются важными технологическими инструментами в науке и технологии. Благодаря безэлектродной, кольцевой форме индукционных токов ВЧИ плазмотрон является одним из немногих источников, позволяющих генерировать чистую плазму, не загрязненную материалами электродов, а с помощью дуговых плазмотронов можно получить плазменные потоки с высокой температурой и скоростью, что необходимо для решения важных практических задач, таких как резка, сварка и напыление.

Эффективное применение ВЧИ и дуговых плазмотронов требует фундаментальных исследований физических процессов, направленных на решение таких задач как: выявление закономерностей процессов, протекающих в плазме; получение потока плазмы с требуемым свойством; определение согласованного и оптимального режима работы генератора и плазмотрона; повышение коэффициента полезного действия плазмотрона; проектирование плазмотронов; разработка сверхмощных плазмотронов для применения в технике и технологии и т.д. Задача аналитического конструирования плазмотронов тесно связана с решением задачи структурно-параметрической идентификации плазмы для непосредственного управления плазмой до сих пор не достаточно решена. Это, с одной стороны объясняется исключительно широким многообразием и сложным характером взаимодействия физических процессов в плазме, с другой стороны, отсутствием эффективной методики моделирования плазменных процессов сдерживает развития теоретического исследования плазмы и ограничивает возможность решения таких задач, особенно для изучения двухмерных и неравновесных потоков плазмы. Для технологического применения плазменных потоков нужно решать такие вопросы, как взаимодействие потока плазмы с обрабатываемым материалом, однако теоретическое исследование загруженного потока плазмы дисперсными частицами сдерживается отсутствием замкнутой методики, позволяющей учитывать взаимодействие плазмы и частиц. С учетом сложности физических процессов в плазме, решение многих уравнений проводится в большинстве случаев на основе дополнительных упрощений, а при сравнении с экспериментальными данными не учитывается адекватность таких допущений.

В настоящее время для теоретического исследования физических процессов разработаны двухмерные модели потоков плазмы в высокочастотном индукционном (Дресвин С.В., Булос М., Сорокин Л.М.) и в дуговом (Меккер Г., Жуков М.Ф., Энгельшт В.С., Урюков Б.А.) разрядах при атмосферном давлении. Разработке численных методов решения задач теплообмена и газодинамики посвящены работы Андерсона Д., Госмена А.Д., Сполдинга Д.Б.,

Патанкара С., Пасконова В.М., Флетчера К. и других. При совместном решении систем дифференциальных уравнений плазмы в частных производных основная сложность заключается в их жесткости и сугубонелинейности, а потери информации на разных этапах моделирования приводят к плохообусловленности задачи, что часто появляется в виде неустойчивости вычислительных процедур решения. Известные численные методы интегрирования также не могут гарантировать сходимости решения. Таким образом, для моделирования плазменных процессов и получения информации о плазме необходимо разработать способ обеспечения устойчивости вычислительных процедур.

Эти обстоятельства в значительной мере определяют актуальность дальнейших теоретических исследований плазменных процессов в ВЧИ и дуговых плазмотронах и разработки единой методики их моделирования.

Целью диссертационной работы являются разработка методики моделирования плазменных процессов и исследования индукционных и дуговых плазмотронов.

Для достижения поставленной цели в диссертации решались следующие задачи:

1. Анализ математических моделей, используемых для исследования плазмотронов и плазменных процессов равновесной плазмы и разработка модели плазмы с учетом нарушения термического и ионизационного равновесия применительно к ВЧИ и дуговым плазмотронам.
2. Анализ структуры вычислительных процедур и разработка методики совместного решения комплекса систем уравнений плазмы, обеспечивающей устойчивость и сходимость вычислительных процедур.
3. Разработка методики расчета состава и свойств двухтемпературной плазмы с учетом нарушения термического и ионизационного равновесия.
4. Разработка методики моделирования и проведение исследования физических процессов в равновесной и неравновесной плазме ряда ВЧИ плазмотронов, в том числе ВЧИ плазмотронов 5 МГц – 18 кВт для очистки кремния, 1.76 МГц – 60 кВт и 5.28 МГц – 50 кВт для обработки частиц периклаза и кремния и 0.44 МГц – 1000 кВт для испытания модели космических кораблей, и установление их связи с внешними и технологическими параметрами установок.
5. Разработка методики моделирования и проведения исследования физических процессов в равновесной и неравновесной плазме дуговых плазмотронов, в том числе дуги в канале для резки и напыления и открытой свободной дуги для сварки и плавки металлов и установление их связи с внешними и технологическими параметрами установок.
6. Разработка методики расчета приэлектродных процессов дуги.
7. Построение модели взаимодействия потока дисперсных материалов с плазмой и моделирование технологии обработки порошков в плазме.
8. Создание пакета прикладных программ, обеспечивающих исследование физических процессов в ВЧИ и дуговых плазмотронах.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Получены новые результаты с помощью усовершенствованной математической модели неравновесной плазмы с учетом нарушения и термического и ионизационного равновесия при исследовании физических процессов в ВЧИ и дуговых плазмотронах.
2. Разработана методика совместного решения комплекса систем уравнений плазмы: уравнения баланса энергии, уравнения движения, уравнения неразрывности, уравнение ионизационного равновесия, уравнения описания электромагнитного поля с учетом нелинейности состава и свойств плазмы, гарантирующая устойчивость и сходимость процесса машинного моделирования и получения достоверных результатов при решении жестких и плохообусловленных задач физики плазмы.
3. Создана замкнутая методика моделирования плазменных процессов в ВЧИ и дуговых плазмотронах, позволяющая комплексно определить и физические, электроэнергетические и технологические параметры ВЧИ и дуговых плазмотронов.
4. Предложена структурная организация вычислительных процедур, базирующаяся на использовании контуров внутренней и внешней обратной связи в соответствии с прямыми физическими процессами нагревания и ускорения газа во времени от начальных условий и обеспечивающая устойчивость при совместном решении систем уравнений плазмы.
5. Предложена модель плазменной технологии обработки порошковых материалов, позволяющая исследовать нагревание и ускорение отдельной частицы и потока частиц совместно с моделированием плазмы, установить взаимосвязь между плазмой и потоком частиц, определить предельный весовой расход материалов, параметры плазмы и потока частиц.
6. Получены адекватные картины физических процессов в равновесной и неравновесной плазме ВЧИ и дуговых плазмотронов и замкнуты задачи определения внутренних физических параметров на внешние и технологические параметры установки.
7. Установлены связи между физическими, электроэнергетическими и технологическими параметрами плазмы и создано необходимое условие для создания системы автоматического проектирования исходя от технологической задачи.
8. Полученные результаты исследования можно рассмотреть как исходные материалы для решения задачи структурно-параметрической идентификации плазменных процессов, необходимой для: обоснования минимальной и достаточной системы измерения параметров; построения систем автоматического регулирования непосредственно плазменных процессов; создания моделей имитационного моделирования, свободной от проблем неустойчивости вычислительных процедур.

Данная работа выполнена в соответствии с планами научных исследований СПбГТУ в период 1993-2002г. и в рамках международного научного сотрудничества между СПбГТУ и Парижским университетом имени Пьера и Марии Кюри 1998-2002г.

Практическая значимость

1. Разработан инструментарий для исследования плазменных процессов в форме специфических структур организации вычислительных процедур, освобождающих исследователей от проблемы обеспечения сходимости решения искомых результатов.
2. Разработанные методики позволяют комплексно определить физические, электроэнергетические и технологические параметры ВЧИ и дуговых плазмотронов и связать их внутренние и внешние параметры установок, решить задачи теоретического анализа и проектирования плазмотронов.
3. Полученные результаты исследования являются основой для исследования и проектирования ВЧИ и дуговых плазмотронов, для оптимизации различных плазменно-технологических процессов и для решения проблемы структурно-параметрической идентификации и на ее основе переход к системе автоматического регулирования непосредственно плазмы.
4. Создан пакет прикладных программ, обеспечивающих исследовательские и конструкторские работы и позволяющих получить искомые результаты, гарантирующие достоверность при проведении работ исполнителями различных квалификаций.
5. Полученные методики моделирования плазменных процессов в ВЧИ и дуговых плазмотронах активно используются в учебном процессе для обучения студентов по специальности “180500 – Электротехнологические установки и системы” и аспирантов по специальности “05.09.10 – Электротехнология”.

Разработанные теоретические основы математического моделирования использованы в описании учебных пособий, в составлении курсов лекций на электромеханическом факультете СПбГТУ по курсам “Математические модели плазменных и лучевых установок”, “Плазменная техника и технология”, “Проектирование плазменных и лучевых установок”, “Теория индукционного нагрева”.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Модель неравновесной двухтемпературной плазмы с учетом нарушения термического и ионизационного равновесия и ее решение для исследования физических процессов в ВЧИ и дуговых плазмотронах.
2. Методика совместного решения комплекса систем уравнений плазмы: уравнения баланса энергии, уравнения движения, уравнения

неразрывности, уравнение ионизационного равновесия, уравнения описания электромагнитного поля с учетом нелинейности состава и свойств плазмы, гарантирующая устойчивость и сходимость процесса машинного моделирования и получения достоверных результатов при решении жестких и плохообусловленных задач физики плазмы.

3. Методика моделирования плазменных процессов в ВЧИ и дуговых плазмотронах, позволяющая определить адекватную картину физических, электроэнергетических и плазменных процессов в плазмотронах, установить связи между внутренними и внешними и технологическими параметрами установок, определить оптимальный режим работы плазмотрона с генератором, решить задачи теоретического анализа и проектирования плазмотронов.
4. Модель и результаты моделирования плазменной технологии обработки порошковых материалов, позволяющие исследовать нагревание и ускорение отдельной частицы и потока частиц совместно с моделированием плазмы, установить взаимосвязь между плазмой и потоком частиц, определить предельный весовой расход материалов и параметры плазмы и потока частиц.
5. Результаты исследования ВЧИ и дуговых плазмотронов, определяющие картину течения, нагрева газа и энергообмена в плазме, зоны холодного канала, зоны термического и ионизационного неравновесия в плазме, углубляющие представление о физике низкотемпературной плазмы, определяющие область предпочтения моделей, создающие необходимые условия для решения задачи структурно-параметрической идентификации и, на ее основе, переход к системе автоматического регулирования непосредственно плазмы.

Достоверность теоретических и прикладных результатов

1. Приемлемая для практики точность совпадения результатов моделирования с натурными экспериментами.
2. Корректное применение соответствующего математического аппарата, гарантирующее выполнение физических законов сохранения для контрольного объема и всей исследуемой области.
3. Сходимость результатов вычислительных процедур к одному пределу при различной глубине обратной связи и начальных условий.
4. Совместное выполнение законов сохранения в интегральном виде и получение предельно малых значений невязок вариационного исчисления дифференциальных уравнений.

Объект исследования – физические и технологические процессы в ВЧИ и дуговых плазмотронах, включая свойства равновесной и неравновесной плазмы, внутренние и внешние параметры плазмотронов, приэлектродные

процессы, процессы в высокочастотном и дуговом разрядах, взаимодействие потока твердых частиц с плазмой.

Методы исследования – базируются на численном анализе с помощью метода контрольного объема и структурной организации вычислительных процедур для решения эллиптических и параболических уравнений математической физики, метода решения обыкновенных дифференциальных уравнений, а также методов теоретической электротехники, теплофизики и газодинамики.

Апробация работы – Основные положения диссертации и результаты исследования докладывались и обсуждались на 17-ти Международных и Всероссийских научных конференциях, симпозиумах и семинарах: Российская научно-техническая конференция “Инновационные наукоемкие технологии для России” (г. Санкт-Петербург, 1995г.); XII, XIII, XIV Международные симпозиумы по плазмохимии (г. Миннеаполис, США, 1995г.; г. Пекин, Китай, 1997г.; г. Прага, Чехия, 1999г.); Российская научно-техническая конференция “Перспективные технологические процессы обработки материалов” (г. Санкт-Петербург, 1995г.); Международная научно-техническая конференция “Информационные технологии в моделировании и управлении” (г. Санкт-Петербург, 1996г.); IV, V, VI Европейские конференции по термическим плазменным процессам (г. Афины, Греция, 1996г.; г. Санкт-Петербург, 1998г.; г. Страсбург, Франция, 2000г.); I Международная научно-практическая конференция “Дифференциальные уравнения и применения” (г. Санкт-Петербург, 1996г.); Всероссийская научно-техническая конференция “Электротехнология: сегодня и завтра” (г. Чебоксары, 1997г.); Международная научно-техническая конференция “Электрофизические и электрохимические технологии” (г. Санкт-Петербург, 1997г.); II Международная конференция по физике плазмы и плазменным технологиям (г. Минск, 1997г.); VI Французский конгресс по лазерной технике (г. Париж, Франция, 1998г.); Международный семинар по индукционному нагреву (г. Падуя, Италия, 1998г.); Международная научно-техническая конференция “Электротехнология XXI века” (г. Санкт-Петербург, 2001г.); Международный семинар по нагреву от внутренних источников (г. Падуя, Италия, 2001г.).

Публикации – Основные результаты диссертационной работы изложены в 40 научных работах, в том числе в четырех учебных пособиях.

Структура и объем работы – Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка используемой литературы и двух приложений. Общий объем диссертации - 454 страницы, 206 рисунков и 16 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации и проблем исследования; сформулирована цель работы, отмечены научная новизна и практическая значимость работы; определены основные положения,

выносимые на защиту и основные задачи, необходимые к решению для достижения поставленной цели; указаны объект и методы исследования.

В первой главе приведен обзор основных типов и применений индукционных и дуговых плазмотронов, определены основные параметры и особенности работы этих видов плазмотронов.

Во второй главе рассматривается состояние вопроса моделирования плазмотронов и плазменных процессов; дан анализ основных математических моделей для описания плазменных процессов; сформулированы двухмерные равновесные и неравновесные модели плазменных процессов в ВЧИ и дуговых плазмотронах; разработана методика расчета состава и свойства равновесной и двухтемпературной плазмы.

В числе условий, определяющих допустимость при построении моделей плазмы в газодинамическом приближении, содержатся обычные для газодинамики ограничения. Основной моделью для описания термически равновесной плазмы является равновесная модель, которая широко применяется при расчете нагрева и ускорения газа в плазмотронах. В основе этой модели находятся предположение о существовании термодинамического равновесия плазмы, равенство температур электронов и всех групп частиц плазмы, бoльцмановское распределение частиц по заселенности и максвелловское распределение по скоростям всех компонентов плазмы. Все процессы стационарные, двухмерные, излучение плазмы оптически тонкое и свободно уходит из объема плазмы, не возбуждая различные степени свободы плазмы. В условиях плотной плазмы атмосферного давления рождение и гибель заряженных частиц происходят в основном за счет тройной рекомбинации и двухчастичной ионизации.

Основные уравнения равновесной модели плазмы в двухмерной цилиндрической системе координат имеют вид:

Уравнение баланса энергии (УБЭ).

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z T) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r T) = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{c_p} [\sigma E^2 - U_{rad}] \quad (1)$$

Уравнения движения газа относительно $v_z, v_r, (v_\phi = 0)$.

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z v_z) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r v_z) = -\frac{\partial p}{\partial z} + [\vec{J} \times \vec{B}]_z + 2 \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\mu r \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) \right] - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r v_r)}{\partial r} \right) \right] + \rho g_z \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r v_r) = -\frac{\partial p}{\partial r} + [\vec{J} \times \vec{B}]_r + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) \right] \\ + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu r \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) - 2\mu \frac{v_r}{r^2} - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial r} \left[\mu \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(rv_r)}{\partial r} \right) \right] \end{aligned} \quad (3)$$

Уравнение неразрывности.

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r) = 0 \quad (4)$$

Уравнения Максвелла.

- для ВЧИ плазматронов относительно $E_\phi, H_z, H_r; E_z = E_r = H_\phi = 0$:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_\phi}{\partial z} = \mu_0 \frac{\partial H_r}{\partial t}; \quad \frac{\partial H_r}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial r} = \sigma E_\phi \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r E_\phi) = -\mu_0 \frac{\partial H_z}{\partial t}; \quad \frac{\partial H_z}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r H_r) = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

- для дуговых плазматронов относительно $E_z, E_r, H_\phi; H_z = H_r = E_\phi = 0$:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r H_\phi) = \sigma E_z; \quad -\frac{\partial H_\phi}{\partial z} = \sigma E_r; \quad \frac{\partial E_r}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial r} = 0 \quad (6)$$

В модель термически равновесной плазмы включают еще уравнение типа Саха и закон Дальтона о парциальных давлениях для определения состава плазмы, а также систему дифференциальных и интегральных уравнений для определения коэффициентов переноса и термодинамических функций плазмы от температуры $\lambda(T), \sigma(T), \mu(T), \rho(T), c_p(T), H(T), U_{rad}(T)$.

Для изучения неравновесной плазмы широко используется двухтемпературная модель. В этой модели, считается, что газ находится в состоянии частично локального термического равновесия. Электронный газ и тяжелые компоненты находятся в термическом равновесии отдельно. Вместо общего УБЭ для всего газа (1) включаются два УБЭ отдельно для электронов и тяжелых компонентов.

УБЭ электронного газа.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial z} \left[n_e v_{ze} \left(\frac{5}{2} k T_e + E_i \right) \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r n_e v_{re} \left(\frac{5}{2} k T_e + E_i \right) \right] = \\ \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_e \frac{\partial T_e}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda_e \frac{\partial T_e}{\partial r} \right) + \sigma_e E^2 - U_{rad} - b_{eai}(T_e - T_a) \end{aligned} \quad (7)$$

Где скорость электронов $\vec{v}_e = \vec{v} + \vec{v}_D + \vec{v}_A + \vec{v}_T$ складывается из скорости общего потока газа, скорости дрейфа электронов в электрическом

поле, скорости амбиполярной диффузии и термодиффузии;

$$b_{eai} = \frac{3}{2} k \frac{2m_e}{m_a} \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m_e}} (n_a Q_{ea} + n_i Q_{ei}) n_e - \text{коэффициент теплообмена}$$

электронов с тяжелыми частицами (на примере атомарного газа).

УБЭ атом-ионного компонента.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial z} \left[v_z \frac{5}{2} k T_a (n_a + n_i) \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r v_r \frac{5}{2} k T_a (n_a + n_i) \right] = \\ = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_{ai} \frac{\partial T_a}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda_{ai} \frac{\partial T_a}{\partial r} \right) + b_{eai} (T_e - T_a) \end{aligned} \quad (8)$$

При нарушении ионизационного равновесия, закон действующих масс в плазме нарушается, и концентрации заряженных частиц следует определить из решения уравнения ионизационного равновесия, учитывающего различные механизмы рождения и гибели частиц.

Уравнение ионизационного равновесия.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial z} (n_e v_{ze}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r n_e v_{re}) = \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{amb} \frac{\partial n_e}{\partial z} \right) + \\ + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r D_{amb} \frac{\partial n_e}{\partial r} \right) + k_r n_e n_a \left(\frac{n_e^{*2}}{n_a^*} - \frac{n_e^2}{n_a} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

Где D_{amb} – коэффициент амбиполярной диффузии; k_r – коэффициент тройной рекомбинации; n_e^*, n_a^* – концентрация электронов и атомов соответственно при ионизационном равновесии. Остальные обозначения в уравнениях (1-9) общеприняты.

Определение состава и свойства плазмы, включая расчет коэффициентов переноса и термодинамических функций, является важнейшим вопросом физики газового разряда и составной частью расчета при моделировании плазменных процессов. В рамках кинетической теории разработана методика расчета состава и свойства равновесной и двухтемпературной атомарной плазмы. Поставлены и решены следующие задачи:

- Расчет состава двухтемпературной плазмы и анализ результатов по известным уравнениям Саха и Потапова: концентрация электронов n_e , атомов n_a и ионов n_i (для квазинейтральной плазмы $n_e = n_i$).

- Расчет эффективных сечений взаимодействия.

- Расчет термодинамических функций в термическом равновесии и в двухтемпературной плазме в двух вариантах (при составе плазмы по Саха и Потапову соответственно): плотность ρ , энтальпия атомов H_a , ионов H_i ,

электронов H_e , ионизации H_I и суммарная H_{sum} ; теплоемкость атомов Cr_a , ионов Cr_i , электронов Cr_e , ионизации Cr_I и суммарная Cr_{sum} ;

- Расчет коэффициентов переноса плазмы и сравнение их с экспериментальными данными в термическом равновесии и данными расчета на основе метода Чепмен-Энскога. Определено влияние способа определения состава (по Саха и Потапову) на свойства плазмы: электропроводность σ , теплопроводность атомов λ_a , ионов λ_i , электронов λ_e , радиационная λ_R и суммарная λ_{sum} ; вязкость μ ; полное излучение плазмы U_{rad} ; коэффициент амбиполярной диффузии D_{amb} .

- Расчет коэффициента тройной (ударно-радиационной) рекомбинации k_r и двухчастичной ионизации k_i .

- Расчет частоты упругих соударений электрон-атомов f_{ea} , электрон-ионов f_{ei} и суммарной f_{eai} ; минимальной плотности тока для поддержания заданного значения температуры плазмы j ; удельной мощности, передаваемой электронами тяжелым частицам через упругие соударения P_{ai} .

- Определить влияние степени термической неравновесности на состав и свойства двухтемпературной плазмы.

- Привести сравнительный анализ результата расчета состава и свойства двухтемпературной аргоновой плазмы и определить необходимые поправочные коэффициенты.

Результаты расчета приводятся на примере аргоновой плазмы атмосферного давления с диапазоном температур $T_e = 5000 - 15000$ К, $T_a = 500 - 15000$ К.

Третья глава посвящена разработке общей методики совместного решения систем уравнений плазмы и способу обеспечения устойчивости вычислительных процедур. Рассматриваются численные методы решения основных уравнений моделей плазмы, проводится их анализ и определяется более устойчивый и точный метод решения. Определяются проблемы при решении жестких и плохообусловленных задач, причины нарушения устойчивости вычислительных процедур и предложить пути их решения. Проведен анализ устойчивости вычислительных процедур, построена структура вычислительных процедур с внутренней обратной связью и использована дополнительная информация в задачах моделирования плазмы. На основе предложенной структуры определены области устойчивости при совместном решении систем уравнений плазмы для типичных условий ВЧИ и дуговых плазмотронов и решена задача оптимизации вычислительных процедур по быстродействию.

Численное решение уравнений (1-4, 7-9) произведено с помощью метода контрольного объема (МКО). МКО объединяет многие преимущества методов конечных разностей и конечных элементов, основным достоинством которого

является максимальное отражение законов сохранения для конечного контрольного объема и всей исследуемой области. Чтобы применять единую методику решения, различные уравнения моделей плазмы (1-4, 7-9) сначала преобразованы к общему виду дифференциального уравнения с помощью некоторой обобщенной переменной φ .

Получен дискретный аналог решения общего дифференциального уравнения эллиптического типа и соответствующие дискретные аналоги решения всех уравнений (1-4, 7-9), записанные в цилиндрической системе координат. Уравнения движения и неразрывности всего газа решаются совместно в переменных скорости-давления. Решение уравнения движения и неразрывности в явном виде позволяет определить в ходе решения не только скорости газа но и давление, необходимое для расчета состава и свойств плазмы. Для решения проблемы недостаточности информации о граничном условии давления в центре разряда, на входе и на стенке плазмотрона (для ВЧИ и дуги в канале), на свободной границе (для открытой свободной дуги и струи) использована и развита концепция смещенной шахматной сетки. Предложены структуры сеток с учетом специфики моделирования процессов в ВЧИ и дуговых плазмотронах, которые позволяют определить давление в точках, примыкающих к этим границам через известные составляющие скорости.

Совместное решение уравнений моделей плазмы производится с помощью итерационных процедур, одной из особенностей которых является замена физических процессов объекта моделирования динамическими вычислительными процедурами с изменяющимися по времени параметрами. Несмотря на популярность их использования в качестве главного инструмента для решения нелинейных и многомерных систем, они обладают существенным недостатком: информация о связи различных физических процессов может быть восстановлена только после решения каждого дифференциального уравнения, а не отражена внутри его решения. Коэффициенты каждого уравнения определяются и корректируются только на стадии перехода между решениями, а внутри решения каждого уравнения (локальная процедура итерации) они остаются неизменными. В процедурном смысле это означает, что связь многих физических процессов имитируется только внешней связью, а их внутренняя связь отсутствует и не отражена в структурном решении вычислительных процедур. Следует, что в управлении вычислительных процедур возникает запаздывание по времени по сравнению с натурными процессами ровно на один период квантования, т.е. время, после которого учитывается связь различных процессов в вычислительных процедурах.

При этом, если физическая связь имитируется на локальном уровне (при решении отдельного уравнения), то запаздывание в управлении вычислительных процедур по сравнению с реальным объектом равно времени работы одной локальной процедуры, а если связь между физическими процессами находится на глобальном уровне между законами физики (при решении различных уравнений) то запаздывание равно времени решения одной глобальной процедуры вычисления. Потери информации при решении

различных уравнений внутри вычислительных процедур приводят к разной степени плохообусловленности задачи.

С другой стороны, из-за невозможности учета одновременно всех связей физических процессов происходит искажение имитационной модели плазмы внутри каждой локальной вычислительной процедуры от математической модели. Чем более жестко связаны физические процессы, тем больше происходит запаздывание в управлении вычислительных процедур и еще более увеличивается искажение имитационной модели в вычислительном процессе от математической модели. В случае, когда внешний контур обратной связи не сможет компенсировать запаздывания в управлении вычислительные процедуры становятся несходящимися или неустойчивыми.

Многочисленные экспериментальные и теоретические исследования показывают, что плазма и плазменные процессы в практических проявлениях имеют большую степень нелинейности. Представление плазменных процессов в виде совокупности отдельных физических процессов облегчает их описание и исследование, однако их соответствующие вычислительные процедуры моделирования, имеющие только внешнюю связь, приводят к потерям информации о внутренней взаимосвязи реальных физических процессов и к неустойчивости вычислительной системы. Чтобы восстановить потерянную информацию и обеспечить устойчивость вычислительных процедур необходимо имитировать и установить не только внешние, но и внутренние связи физических процессов объекта в каждой вычислительной процедуре.

Установить эти связи внутри процедуры решения каждого дифференциального уравнения на основе имитации принципа устойчивости физического объекта моделирования можно путем линеаризации падающей функции источникового члена (ИЧ) S от искомой переменной в φ виде.

$$S = S_c + S_p \varphi; S_p = - \left| \frac{S^*}{\beta \varphi^*} \right|; S_c = S^* - S_p \varphi^* \quad (10)$$

Где коэффициенты S_p , S_c зависят от итерации и от пространства; S^* и φ^* - значение ИЧ и искомой переменной в данной итерации. После каждого итерационного цикла S^* , S_p и S_c пересчитывают с учетом новых значений φ . Поскольку функция ИЧ (10) зависит от φ и установлена прямо внутри итерационной процедуры можно использовать её для имитирования внутренних связей между физическими процессами.

Введенный коэффициент β определяет скорость изменения линейной функции ИЧ S от φ . Таким образом, можно назвать β коэффициентом внутренней обратной связи при решении данного уравнения. Коэффициент β подлежит регулированию в зависимости от решения конкретного дифференциального уравнения при моделировании конкретного физического

процесса. Отметим, что $S_p \leq 0$, это делается в соответствии с принципом устойчивости физического процесса.

Хотя коэффициент β вводится для установления внутренней связи между ИЧ и искомой переменной φ , благодаря возможности его регулирования мы сможем имитировать по принципу устойчивости не только связь ИЧ и φ , а все связи других физических процессов с данной переменной. Таким образом, можно полностью восстановить все потери информации, возникающие в результате предположения о постоянстве коэффициентов внутри итерационных процедур и их последовательности решения, прямо внутри итерационной процедуры, т.е. открывает пути к решению жестких и плохообусловленных задач и разрешению проблемы устойчивости вычислительных процедур при моделировании плазменных процессов.

Если принимать одну итерацию за единицу времени, то изменения решения по итерациям и по времени идентичны. В этом случае итерационная процедура имитирует некоторую нестационарную модель плазменных процессов и исследование устойчивости итерационных процедур по аналогии можно свести к задаче исследования нагрева и ускорения газа по времени с некоторым начальным условием.

Замкнутая структура вычислительных процедур при моделировании плазмы представляется двумя контурами итерации, внутренний (локальный) для решения отдельного уравнения и внешний (глобальный) контур для последовательного решения различных уравнений (рис. 1).

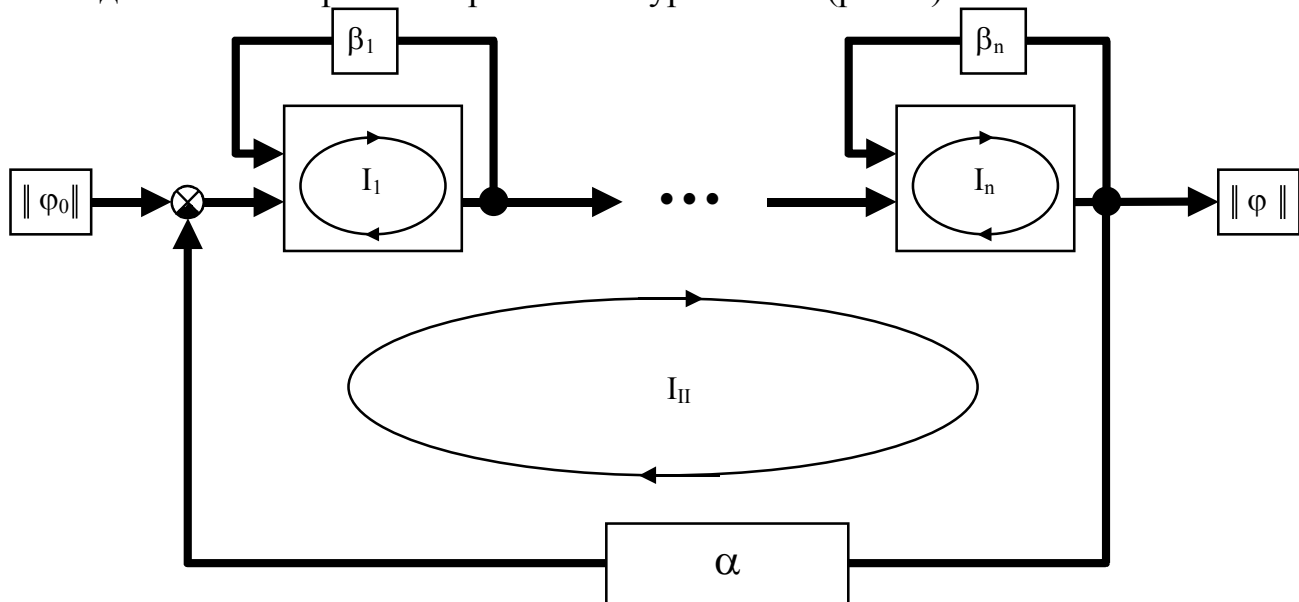


Рис. 1. Схема замкнутой вычислительной структуры с внутренними обратными связями при совместном решении уравнений плазмы.

Для предложенной структуры вычислительных процедур с внутренней обратной связью предложена структура области устойчивости всей системы как многомерное замкнутое пространство, размерность которого равна количеству дифференциальных уравнений, входящих в данную модель, а каждая

координата этого пространства есть диапазон изменения соответствующего коэффициента β .

В результате проведения экспериментов при моделировании плазменных процессов получены сведения об области устойчивости вычислительных процедур при решении основных уравнений плазмы для широкого диапазона входных данных ВЧИ и дуговых плазмотронов. Так при решении УБЭ $S = 0.5 - 1$ кВт/см³ – для ВЧИ плазмотронов; $S = 1 - 10$ кВт/см³ – для столба дуги и анодного пятна дуги; $S = 50 - 100$ кВт/см³ – для сжатой дуги в канале и катодного пятна дуги. Аналогично и при решении уравнения движения, уравнения неразрывности и УБЭ электронного газа. Шаги сеток регулируются в диапазоне $\Delta h = 0.001 - 10$ мм с учетом мощностей современных вычислительных машин. Данные об области устойчивости при решении УБЭ приводятся на рис. 2.

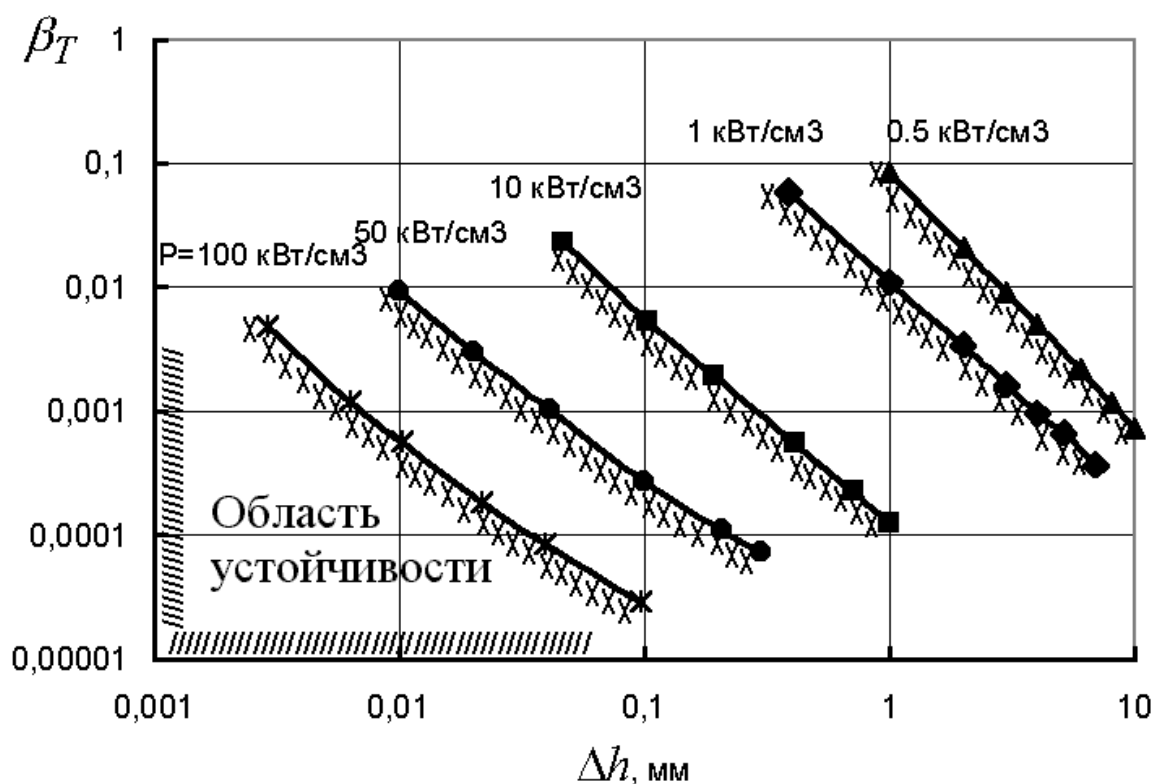


Рис. 2. Область устойчивости вычислительной процедуры при совместном решении УБЭ с другими уравнениями равновесной модели плазмы (аналог D - разбиения Неймарка Ю.И.).

С учетом предложенной структуры вычислительных процедур с внутренней обратной связью сформулирована и решена задача оптимизации вычислительных процедур по быстродействию при заданном ограничении вычислительного ресурса системы, которую, в свою очередь, можно разделить на две задачи, решаемые последовательно: оптимизация закона управления и оптимизация программы управления.

Первая задача построена на основе принципа максимума и решения Гамильтоновой системы уравнений приводит к требованию о работе системы

на своем ограничении в управлении $u_i = \beta_{i \max} \varphi_i$, т.е. на верхней грани своей области устойчивости: $\beta_i = \beta_{i \max}$, ($i = 1, 2, \dots, n$).

Оптимизация программы вычислительных процедур по быстродействию может быть получена на основе организации оперативного управления вычислительными процедурами. Суть которого заключается в оперативной передаче управления системой следующей процедуре в очереди если происходит насыщение в управлении в данной вычислительной (итерационной) процедуре. Таким образом, система сама определяет ведущую процедуру, которая больше всех нуждается в управлении на данный момент времени и отдает ей полное управление системой, а остальные вычислительные процедуры идут вслед за ней. Система, тем самым, будет максимально эффективно распределять свой вычислительный ресурс среди своих многочисленных процедур. В реальной системе организация оперативного управления производится с помощью введения некоторого критериального ограничения внутренней процедуры решения для каждой переменной φ .

Четвертая глава посвящена моделированию и расчету параметров ВЧИ плазмотронов. На базе двухмерной равновесной и неравновесной моделей плазмы, которые сформулированы во второй главе, и вычислительных, структурных, информационных свойств процедур решения в третьей главе сформулирована методика моделирования и расчета параметров ВЧИ плазмотронов. Дополнениями являются методика решения двухмерной электромагнитной задачи для ВЧИ плазмотронов, формирование системы дискретных аналогов, включая дискретные аналоги для граничных точек и построение смещенных шахматных сеток при решении различных уравнений в канале ВЧИ плазмотронов с учетом их граничных условий.

На основе одномерной модели неравновесной плазмы проводился анализ нарушения термического и ионизационного равновесия плазмы движением газов и определена глубина выравнивания температуры в характерных условиях ВЧИ и дуговых плазмотронов. Установлено, что с учетом ионизационного неравновесия концентрация заряженных частиц меньше, чем в случае ионизационного равновесия и существенно влияет на степень нагрева газа. Результаты показывают, что большинство газов активно нагревается при температуре выше 2000-3000 К, поэтому для повышения коэффициента полезного действия (КПД) термического воздействия установки можно предварительно применять обычные термические процессы нагрева газов и использование их в качестве плазмообразующего газа.

Для большинства реальных конструкций ВЧИ плазмотронов длина индуктора соизмерима с поперечным размером ($h \approx D$), двумерные и краевые эффекты играют заметную роль, и решение двухмерной электромагнитной задачи является необходимым. Общий метод решения двухмерной электромагнитной задачи заключается в решении уравнения относительно векторного потенциала \vec{A} в виде:

$$\frac{\partial^2 \dot{A}}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \dot{A}}{\partial r} \right) - \left(\frac{1}{r^2} + j\mu_0\omega\sigma - \varepsilon_0\mu_0\omega^2 \right) \dot{A} = -\mu_0 j_c \quad (12)$$

Где $j^2 = -1$; \dot{A} - комплексная величина векторного потенциала; ε_0 , μ_0 - диэлектрическая и магнитная проницаемость; ω - угловая частота тока индуктора; j_c - плотность тока индуктора ($j_c = 0$ вне индуктора).

Получены дискретные аналоги решения уравнения (14). Приведены два способа определения граничного условия: задание нулевого граничного условия на бесконечно удаленной границе и определение граничного условия по сумме токов плазмы и индуктора.

Полученное распределение векторного потенциала использовано для определения параметров электромагнитного поля в канале ВЧИ плазмотрона, включая поле внутри разряда, в зазоре между стенкой и индуктором, между витками и вне индуктора: напряженность электрического поля E_φ , напряженность магнитного поля H_r, H_z , плотность тока плазмы $j_\varphi = \sigma E_\varphi$, удельная выделяемая мощность $S = \sigma E_\varphi^2$, электромагнитная сила F_r, F_z , сдвиг по фазе токов плазмы ψ_i , полный ток I_2 и полная мощность P_2 в плазме, активное R и реактивное сопротивления X_L системы индуктора-плазмы и т.д.

На основании равновесной и неравновесной моделей плазмы проведено теоретическое исследование физических процессов ряда ВЧИ плазмотронов с разными мощностями, режимами работы и технологическими назначениями: 0.44 МГц – 1000 кВт для испытания модели космического корабля; 5 МГц – 18кВт для спектрального анализа и очистки кремния с разными режимами работы; 1.76 МГц – 60 кВт и 5.28 МГц – 50 кВт для обработки тугоплавких частиц и материалов.

Получены все пространственные распределения параметров плазмы в канале ВЧИ плазмотронов. Проанализированы результаты с учетом отклонения плазмы от состояния термического и ионизационного равновесия. Определены зоны термического (пристеночная зона) и ионизационного (зона максимальной плотности тока) неравновесия плазмы в канале ВЧИ плазмотронов, а также зона активного нагрева газа. Полученные результаты в целом согласуются с экспериментальными данными. Проведен сравнительный анализ результатов моделирования на основе равновесной и неравновесной моделей плазмы и определение области применения той или иной модели при моделировании ВЧИ плазмотронов. Полученные результаты позволяют определить зависимости внутренних полей от внешних параметров, выявить зоны активного термического нагрева, зоны термического и ионизационного неравновесий, зоны протекания тока и выделения мощности, зоны действия электромагнитных сил, глубины проникновения электромагнитных волн и т.д.

Эти данные могут использоваться для определения оптимальной и согласованной работы плазмотрона с генератором.

Установлено, что основной силой ускорения плазмы в канале ВЧИ плазмотронов является электромагнитная сила. Доказано и вычислено, что появление избыточного давления в канале не позволяет холодному газу активно проникать в разряд, сохраняя, тем самым, высокотемпературное поле в разряде и устойчивое состояние его горения. Результирующая сила ускорения составляет всего 10%-20% от электромагнитной силы. Поэтому для моделирования движения плазмы некорректно сравнение двух сил: газостатического давления и электромагнитной. Установлено, что средняя температура в ВЧИ-разряде находится в районе 9000-10000 К, ее максимальное значение достигается не в центре разряда, а в зоне максимальной плотности тока и удельной мощности. Как показывает анализ, такое поле температуры обеспечивает хорошие условия для получения энергии от электромагнитного поля и для подставки заряженных частиц устойчивого существования разряда.

Установлена полная картина течения и нагрева газа в канале ВЧИ плазмотрона, для которой характерным является существование зоны обратного вихревого течения в первой половине индуктора (рис. 3). Достаточное сильное поле для выделения энергии и малое постоянное количество газа внутри вихря обеспечивает эту зону максимальной температуры разряда. С середины индуктора, под действием электромагнитной силы, газ активно проникает в плазму. Недостаточное количество плазмообразующего газа может привести к засасыванию дополнительного количества газа с выхода и возникновению пристеночного вихря на выходе канала плазмотрона.

Установлено, что холодный газ не проникает внутрь разряда. В разряд под действием электромагнитной силы проникает горячий газ внешнего слоя плазмы с температурой 5000-6000 К, что быстро выравнивает температуру внутри разряда. В целом ВЧИ разряд плотной плазмы атмосферного давления термически равновесный, кроме пристеночной зоны, где отрыв температур электронов и тяжелых компонентов доходит до несколько тысяч градусов (рис. 3а, 4а). Однако энергоемкость и концентрация электронов в этой зоне очень низкие и неравновесность в пристеночной зоне практически не влияет на формирование свойства разряда.

Проведен сравнительный анализ результатов моделирования с использованием различных моделей и данных о режимах работы ВЧИ плазмотронов. Определены параметры разряда в случае появления холодного канала в центре плазмотрона (рис. 3б, 4б). Показаны изменения параметров при появлении холодного канала и доказана необходимость его учета. Холодный канал, возникающий в результате введения материалов и химического состава для обработки в ВЧИ-разряде, может существенно снизить эффективность теплообмена в плазме и КПД технологического процесса. Поэтому в дальнейшем следует уменьшить его до минимума или использовать высокоэнтальпийный газ в качестве транспортирующего газа.

Табл. 1. Основные результаты расчета параметров ВЧИ плазмотронов.

Исходные данные	Параметры	0.44 МГц	1.76 МГц	5 МГц	5.28 МГц
	U_1 , кВ	9.45	6÷7	4.4	6÷7
	W	4	5	4	4
	h , мм	160	100	45	70
	D , мм	165	60	41	54
	$X_L = \omega L$, Ом	7.878	17.03	36.38	38.68
Данные полученного расчета	E_{max} , В/см	20.3	22.7	12.5	13.2
	H_{zmax} , А/см	204	128.1	60.9	59.9
	H_{rmax} , А/см	60	27.5	13.4	6.5
	J_{max} , А/см ²	160	185	147	137
	P_{max} , Вт/см ³	748	1019	808	769
	F_{zmax} , 10 ⁻³ Н/см ³	0.15	1.75	1.9	0.3
	F_{rmax} , 10 ⁻³ Н/см ³	- 21.7	- 13.1	- 6.2	- 5.4
	I_2 , А	5180	1690	400	580
	P_2 , кВт	400÷600	48.4	13.3÷15.1	30
	R_2 , Ом	0.015	0.0169	0.0834	0.0875
	T_{max} , К	10850	10960	10710	10610
	v_{zmax} , м/с	128.4	72.8	30.9	27.6
	v_{zmin} , м/с	- 177.5	- 87.7	- 7.5	- 11.8
	v_{rmax} , м/с	40.6	43.2	13.3	1.35
	v_{rmin} , м/с	- 40.8	- 9.98	- 7.7	- 4.5
	ΔP_{max} , Па.	156.9	67	21.9	15.8
ΔP_{min} , Па.	- 212.7	- 27.7	- 9.1	- 7.2	

Где U_1 – напряжение на индукторе; W – число витков; h – высота индуктора; D – внутренний диаметр плазмотрона; L – индуктивность индуктора; $X_L = \omega L$ – индуктивное сопротивление индуктора; E_{max} – максимальная напряженность электрического поля на стенке плазмотрона; H_{zmax} , H_{rmax} – максимальные составляющие напряженности магнитного поля; J_{max} – максимальная плотность тока плазмы; P_{max} – максимальная удельная мощность плазмы; F_{zmax} , F_{rmax} – максимальные составляющие электромагнитной силы в плазме; I_2 – полный ток в плазме; P_2 – полная мощность, выделяемая в плазме; R_2 – полное активное сопротивление плазмы.

Разработан пакет программ для проведения теоретического исследования физических процессов и автоматического проектирования ВЧИ плазмотронов. В пакет входят следующие программы: программа решения двухмерной электромагнитной задачи; программы решения двухмерного уравнения баланса энергии, уравнения движения и уравнения неразрывности; программа моделирования равновесной плазмы; программа анализа нарушения термического и ионизационного равновесий движением газов; программа расчета состава и свойства двухтемпературной плазмы; программа моделирования неравновесной плазмы на основе двухтемпературной модели.

**Основные результаты моделирования аргоновой плазмы ВЧИ
плазмотрона 5 МГц-18 кВт для очистки кремния.**

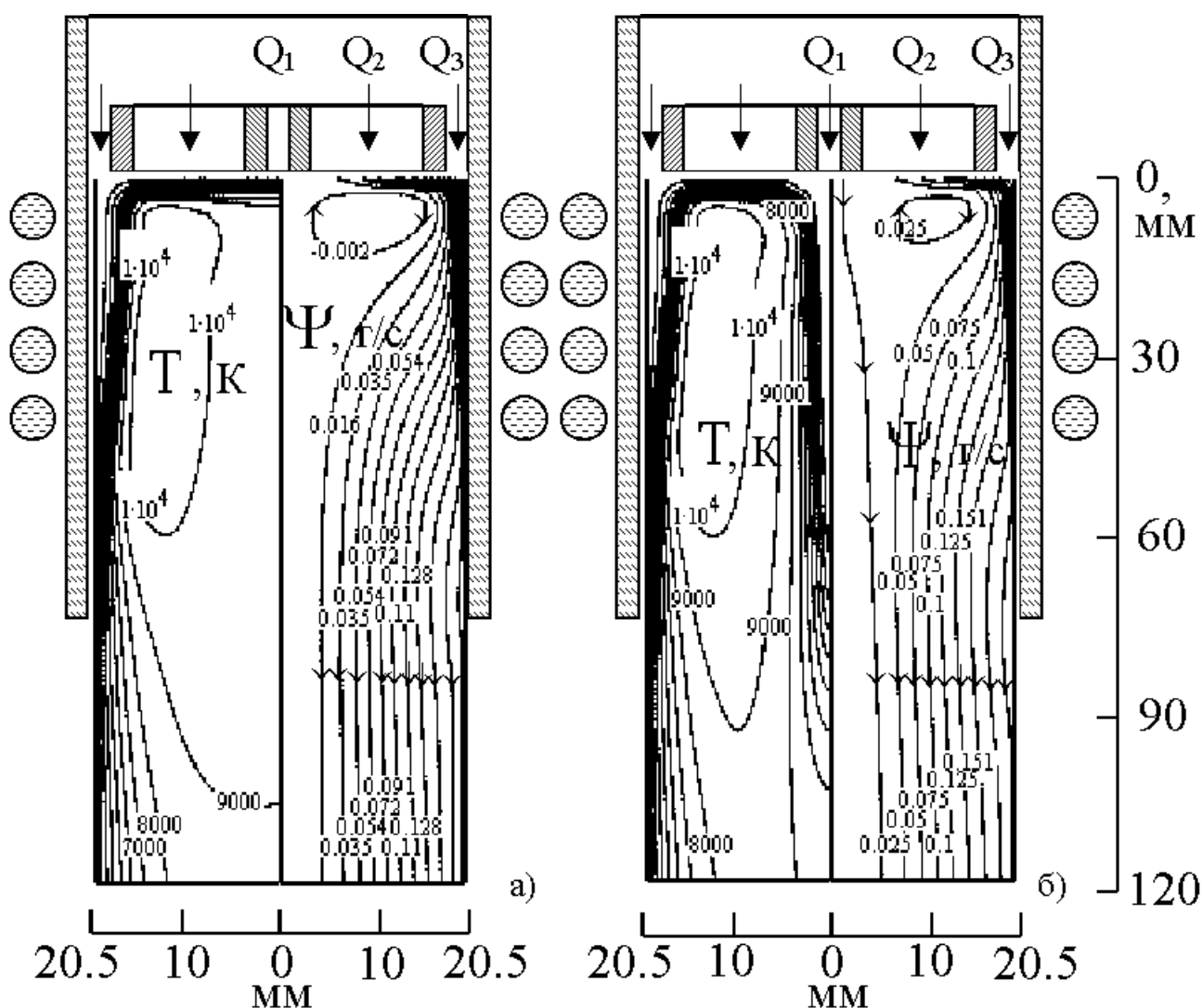


Рис. 3. Поля температур и течения Аг - плазмы ВЧИ плазмотрона 5 МГц-18кВт: а) $Q_1 = 0, Q_2 = 20, Q_3 = 40$ л/мин. б) $Q_1 = 8, Q_2 = 20, Q_3 = 40$ л/мин.

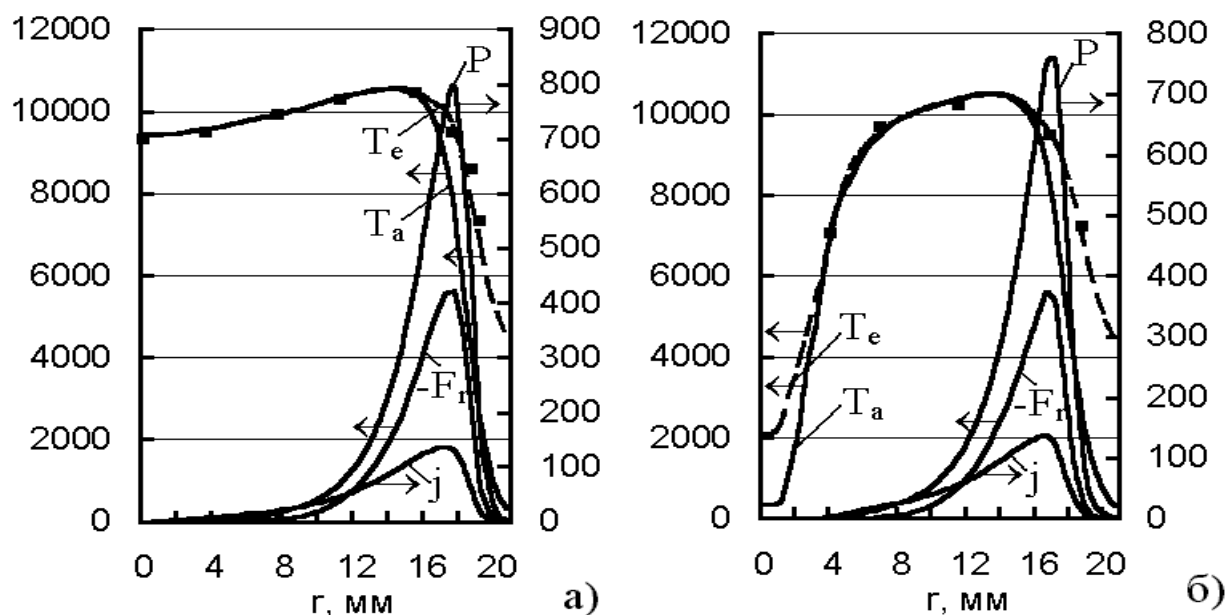


Рис. 4. Распределения температур электронов T_e , атомов T_a ; удельной мощности P , Вт/см³; плотности тока j , А/см² и электромагнитной силы F_r , Н/м³ в центральном сечении индуктора Ar-плазмы ВЧИ плазматрона 5 МГц-18 кВт: а) $Q_1 = 0$, $Q_2 = 20$, $Q_3 = 40$ л/мин. б) $Q_1 = 8$, $Q_2 = 20$, $Q_3 = 40$ л/мин.; ■ - данные измерения температуры Ж. Амуру, Д. Морван.

Результаты расчета модели космического корабля в плазменной струе.

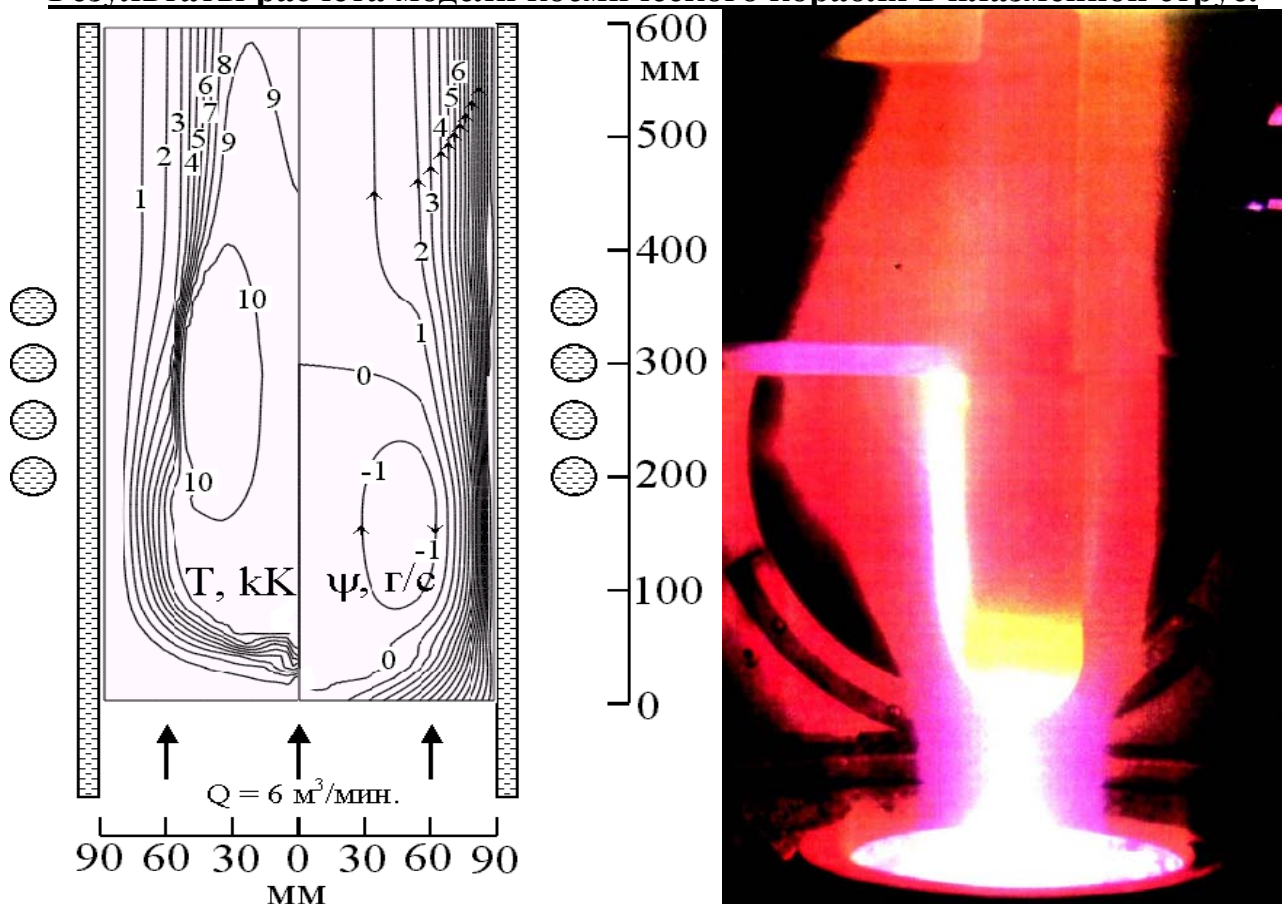


Рис. 5. Поля температуры, течения воздушной плазмы ВЧИ плазматрона 0.44МГц-1000 кВт и испытание модели космического корабля в его струе.

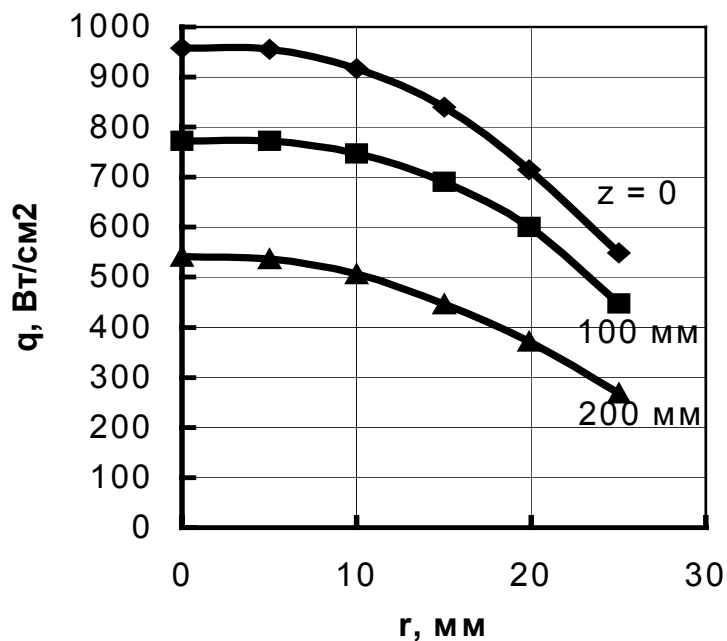


Рис. 6. Тепловой поток нагревания лобовой части модели космического корабля в воздушной плазме ($z=0$; 100; 200 мм от среза) ВЧИ плазматрона – 0.44МГц, 1000 кВт.

Пятая глава посвящена моделированию и расчету параметров дуговых плазматронов. На базе двухмерной равновесной и неравновесной моделей плазмы, которые сформулированы во второй главе и общих теоретических решений в третьей главе сформулирована методика моделирования и расчета параметров дуговых плазматронов, включая методику моделирования и расчета параметров дуги в канале; методику расчета двухмерного электромагнитного поля дуги; методику моделирования и расчета параметров открытой дуги; методику расчета приэлектродных процессов. Получены соответствующие системы дискретных аналогов, включая дискретные аналоги для граничных точек различных уравнений дуги в канале и открытой дуги.

Проведены сравнительные исследования физических процессов в ряде дуг в канале для резки и напыления и открытых дуг для сварки и плавки металлов в широком диапазоне параметров их работы. Установлены связи внутренних и внешних параметров дуги: поле температур и скоростей плазмы на выходе канала в зависимости от токов дуги; поле напряженности электрического поля и плотности тока от токов дуги; вольтамперные характеристики дуги и т.д. Эти связи важны для определения согласованной и устойчивой работы дуги с источником питания, а также для решения задачи непосредственного управления дугой. Из полученных данных можно также и определить соответствующие потоки тепла, потери мощностей за счет излучения и теплопроводности на стенку плазматрона, мощность, уносимую потоком плазмы в струю, КПД установки и эффективность данного технологического процесса и т.д.

Основные результаты расчета дуги в канале для резки и напыления.

Проведено исследование дуг в каналах для резки и напыления в широком диапазоне данных: Ток дуги $I = 50 - 300$ А, диаметр $D = 3 - 20$ мм, расход газа $G = 0.2 - 1.5$ г/с с разными плазмообразующими газами – аргон, воздух, азот.

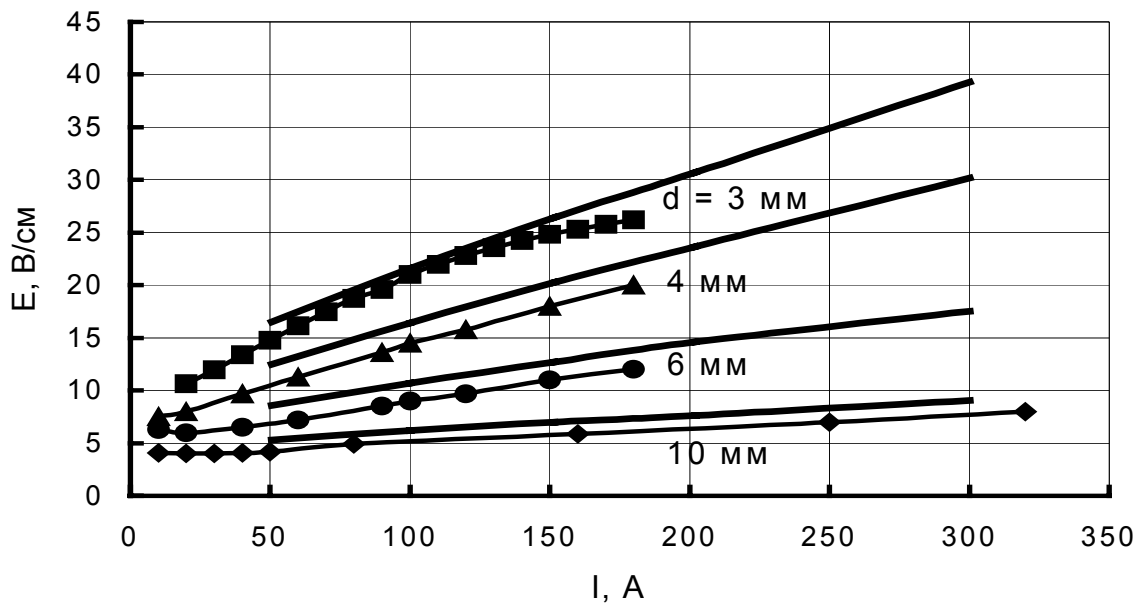


Рис. 7. Напряженность электрического поля на установившемся участке дуги в канале для резки и напыления с диаметрами $d = 3$ мм, 4 мм, 6 мм, 10 мм. Расход газа $G = 1$ г/с. Линии – расчеты; точки – экспериментальные данные E. Shulz-Gulde, AIAA Paper и Асиновского Э.И.

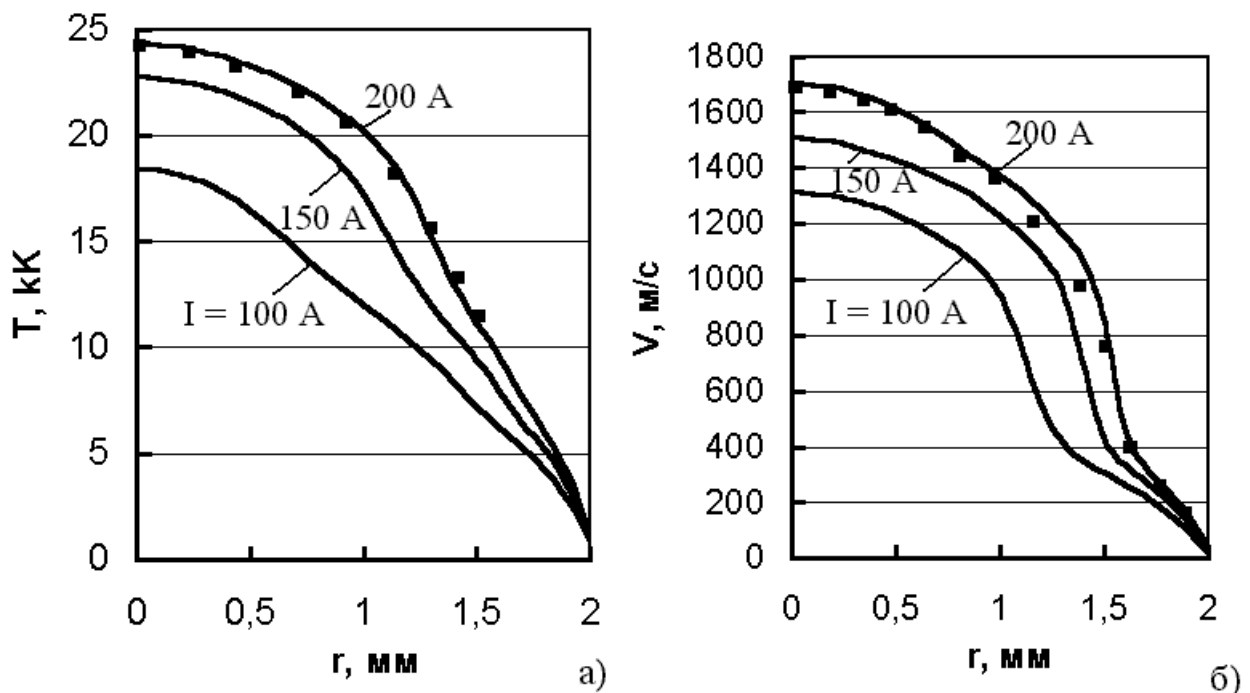


Рис. 8. Поля температур а) и скоростей б) по радиусу на установившемся участке дуги в канале $d = 4$ мм для резки металлов с токами $I = 100, 150, 200$ А. Расход газа $G = 1$ г/с. ■ - $I = 200$ А – экспериментальные данные Киселева Ю.Я.

Получены все внутренние и внешние параметры дуги и установлены их связи. Проведенное сравнение полученных результатов моделирования с

экспериментальными данными показывают приемлемую точность для практических задач.

Приведена модель двумерного электромагнитного поля дуги и решение с помощью электрического потенциала V и функции электрического тока Φ . Соответствующие уравнения имеют вид:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\sigma \frac{\partial V}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \sigma \frac{\partial V}{\partial r} \right) = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\sigma r} \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{\sigma r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right) = 0 \quad (14)$$

Граничное условие V и Φ для дуги в канале и свободной дуги определено из условий цилиндрической осесимметрии и протекания тока на электродах, на стенке или на свободной границе. Полученное поле V или Φ использовано для определения локальных распределений электромагнитного поля дуги: напряженности электрического поля E_z , E_r ; напряженность магнитного поля H_ϕ ; плотности тока j_z , j_r ; выделяемая мощность P ; электромагнитные силы F_z , F_r ; падение напряжения в столбе дуги U и т.д.

Результаты расчета свободной дуги для сварки. На основе двумерной равновесной и неравновесной моделей плазмы проведены теоретические исследования открытой свободной дуги для сварки металлов. Данные сварочной дуги: Ток дуги $I = 75 - 160$ А, диаметр сопла дуги $D = 10 - 14$ мм, длина дуги $L = 5 - 18$ мм, расход аргона $Q = 10 - 40$ л/мин. Данные дуги для плавки металлов: Ток дуги $I = 1000 - 2000$ А, диаметр катода $D_k = 10 - 12$ мм, длина дуги $L = 150 - 200$ мм, расход аргона $Q = 50 - 70$ л/мин.

Получены все распределения локальных параметров дуги, включая: поле температур и скоростей, поле течения плазмы и электрического тока, поле плотности тока и удельной мощности, поле электромагнитных сил, поле статического давления, электромагнитное поле дуги. Проведен анализ полученных результатов и сравнение их с использованием соответствующих моделей. Определено ограничение применения двух моделей.

Полученные результаты позволяют определить полную картину течения и нагрева газа в дуге и установить их связи с внешними параметрами плазмотрона. Из-за низкой энергоемкости и концентрации электронов во внешнем слое столба дуги электроны не успевают передать всю полученную энергию от поля тяжелым частицам и существует отрыв их температур в этом слое. Поэтому для исследования дуги малой мощности и пониженного давления нужно использовать неравновесную модель плазмы.

Доказано, что столб открытой дуги стабилизируется двумя потоками - внешним обдуваемым потоком холодного газа и вихревым потоком, который образуется в результате взаимодействия первого потока с внешней средой газа. Дуга работает как магнитный насос, причем начальной участок дуги является зоной активного проникания газа и его нагревания. В этой зоне имеются

максимальные значения плотности тока, выделяемой мощности и электромагнитной силы. В дугу проникает только определенное количество газа, достаточное для нагрева. При этом механизмом обратной связи является градиент статического давления и фиксированная мощность дуги. Доказано, что сила ускорения плазмы составляет всего 2%-5% от электромагнитной силы и приравнение ее с силой градиента статического давления приводит к ошибочному определению поля течения плазмы.

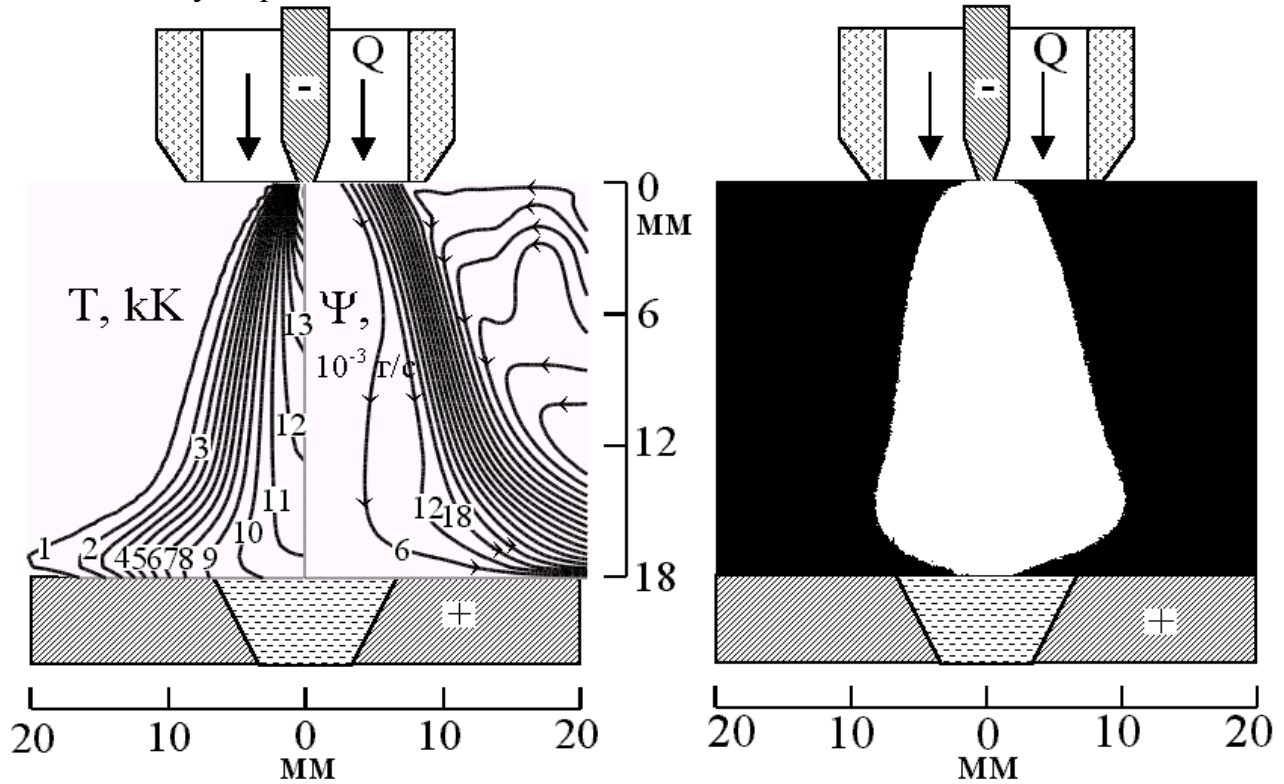
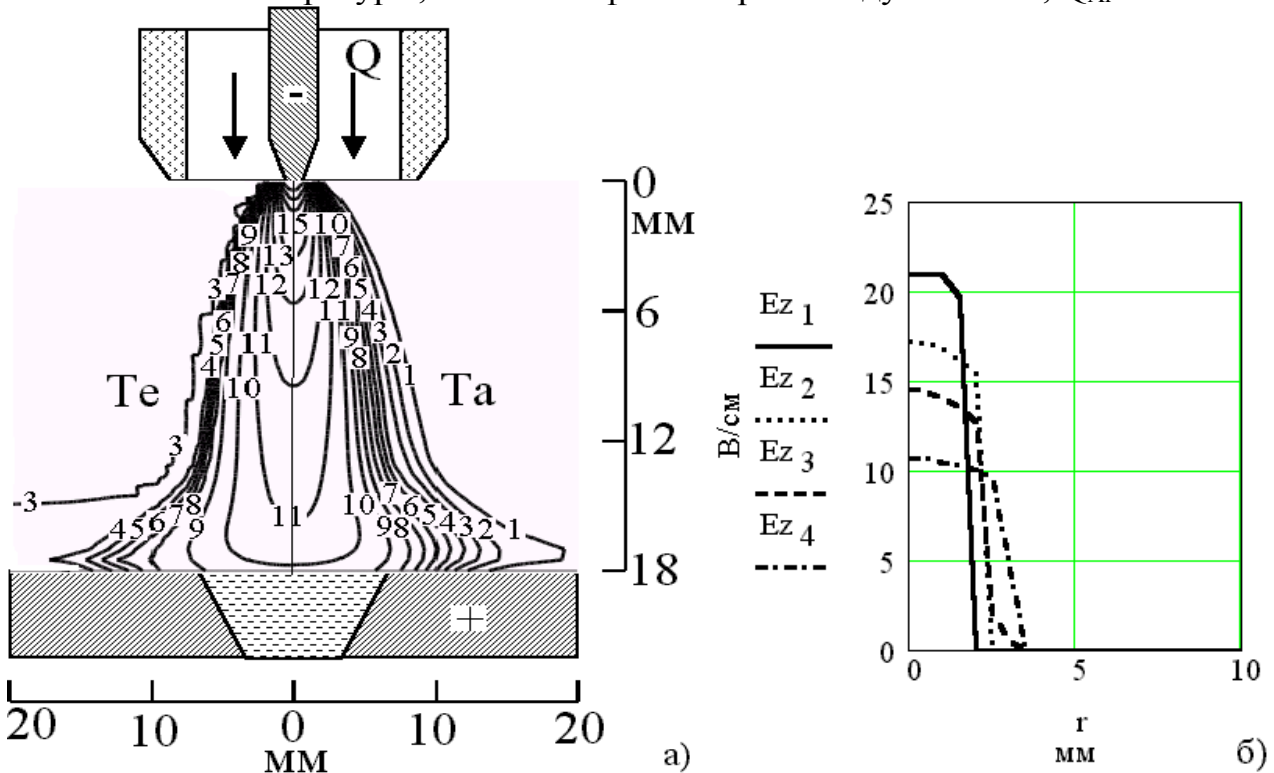


Рис. 9. Поля температуры, течения и фото сварочной дуги $I=90\text{A}$, $Q_{\text{Ar}}=20\text{ л/мин}$.



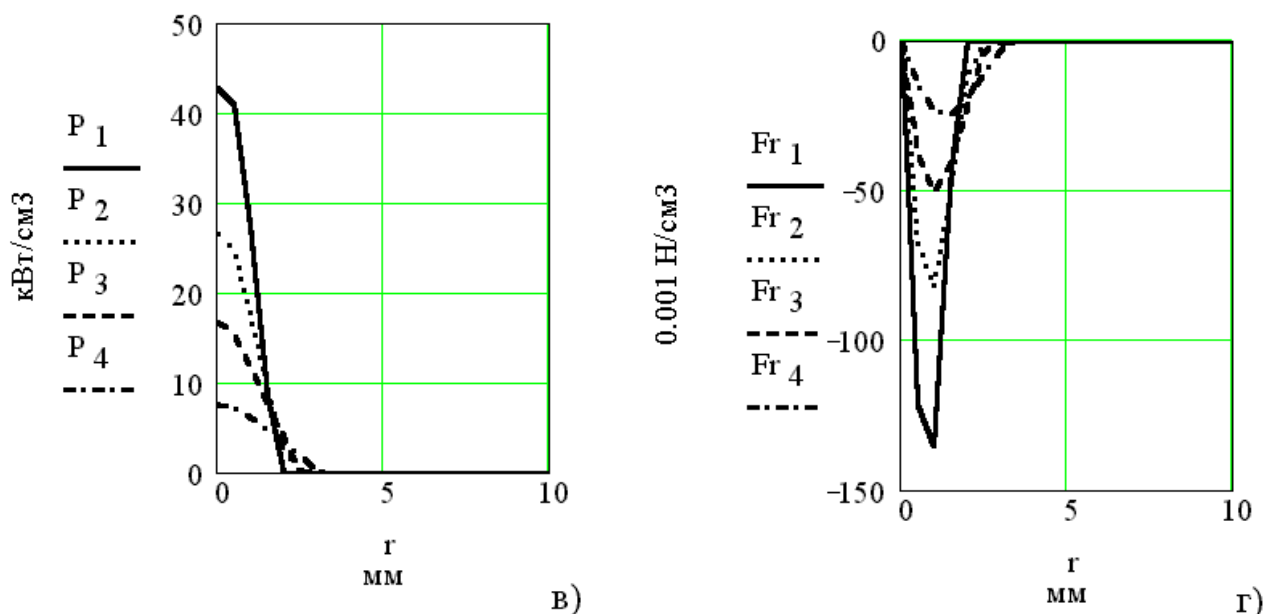


Рис. 10. Поля температур электронов T_e и атомов T_a сварочной дуги $I=90A$, $Q_{Ar}=20$ л/мин. а) и распределения напряженности электрического поля E_z б), удельной мощности P в) и электромагнитной силы F_r г) по радиусу на соответствующих сечениях $z_1 = 1$ мм, $z_2 = 2$ мм, $z_3 = 3$ мм, $z_4 = 5$ мм от катода.

Расчет приэлектродных процессов.



Рис. 11. Схема двухслойной модели прикатодной области дуги.

Электроды являются основными узлами дуговых плазмотронов и изучение приэлектродных процессов является важной составной частью при моделировании дуговых плазмотронов. Кроме выявления физических картин приэлектродных процессов его изучение помогает решить задачу повышения ресурса установки. Разработана методика расчета приэлектродных процессов на основе двухслойной модели (слой пространственного заряда и ионизационный слой), что допустимо при длине приэлектродных областей на

много меньшей, чем их радиальные размеры. Основные уравнения этой модели следующие:

Баланс токов на поверхности катода.

$$j = Zen_{is}v_{is} + AT_k^2 \exp\left(-\frac{e\varphi - \Delta(e\varphi)}{kT_k}\right) + \frac{en_{es}\bar{v}_e}{4} \left(-\frac{eU_D}{kT_e}\right) \quad (15)$$

Баланс мощностей на поверхности катода.

$$q_k = q_\lambda = \frac{j_i}{Ze} \left(k \left(2T_i + \frac{ZT_e}{2} - 2T_k \right) + ZeU_D + E_i - Ze\varphi_{\text{эф}} \right) + \frac{j_{ec}}{e} (2kT_e + e\varphi_{\text{эф}}) - \frac{j_{eem}}{e} (2kT_k + e\varphi_{\text{эф}}) + q_R^{nl} - q_R^k - q_{исп} \quad (16)$$

Уравнение баланса энергии в ионизационном слое.

$$j_{eem} \left[eU_D + 2kT_k + kT_e \left(\ln \frac{n_{e\infty}}{n_{es}} - 3.2 \right) \right] = j_{ec} \left[eU_D + kT_e \left(\ln \frac{n_{e\infty}}{n_{es}} - 1.2 \right) \right] + j_i \left[\frac{E_i}{Z} + kT_e \left(3.2 - 0.5 \ln \frac{n_{e\infty}}{n_{es}} \right) \right] \quad (17)$$

Где T_k , T_e – температура поверхности катода и электронов плазмы; E_i – энергия ионизации; j_{eem} – плотность тока термоэмиссии; j_i – плотность ионного тока; j_{ec} – плотность обратного тока электронов на катод. В данную модель также включаются: уравнение Маккоуна для определения напряженности электрического поля на поверхности катода E_k , критерий Бома для определения скорости ионов на катод v_{is} , формула для определения равновесной плотности ионов на границе между двумя слоями $n_{es} = n_{is}$, закон Дальтона о парциальных давлениях, формулы определения падений напряжения в пространственном слое заряда U_d и в ионизационном слое U_i .

На основе этой модели проведены исследования приэлектродных процессов двух типов катода чистого вольфрама и торированного вольфрама в среде аргона атмосферного давления в широком диапазоне данных (температуры катода $T_k = 3000 - 4400$ К и $T_k = 2000 - 3200$ К соответственно, температуры плазмы $T_e = 20000 - 40000$ К). Установлены зависимости основных параметров прикатодной области от температур катода и плазмы. Важнейшими параметрами расчета являются: плотность тока термоэмиссии, плотность обратного тока, плотность ионного тока, баланс токов на катоде, тепловой поток на катод, мощность в катод и радиус катодного пятна, вольтовый эквивалент теплового потока в катод, напряженность электрического поля на катоде, падение напряжения в катодной области,

снижение работы выхода материала катода и т.д. Эти данные использованы для определения степени эрозии электродов, их ресурс работы, а также для граничных условий при моделировании столба дуги.

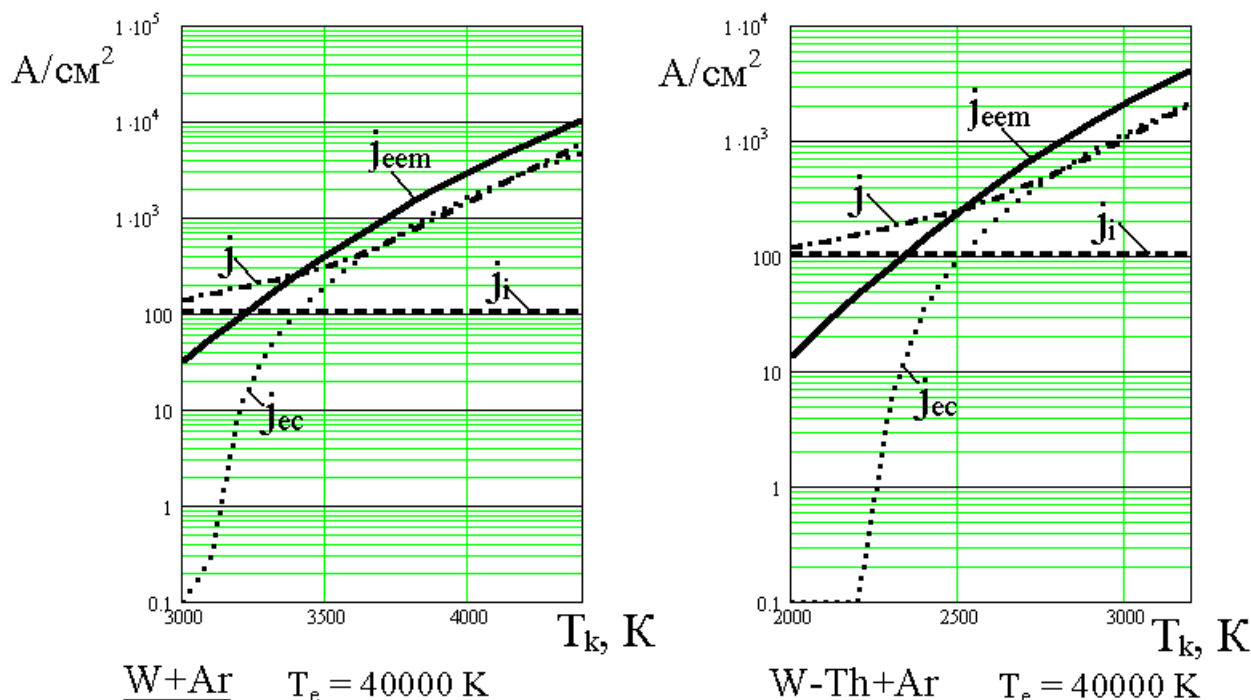


Рис. 12. Результаты расчета баланса токов на поверхности катода в зависимости от температуры поверхности катода при температуре плазмы $T_e = 40000 \text{ K}$.

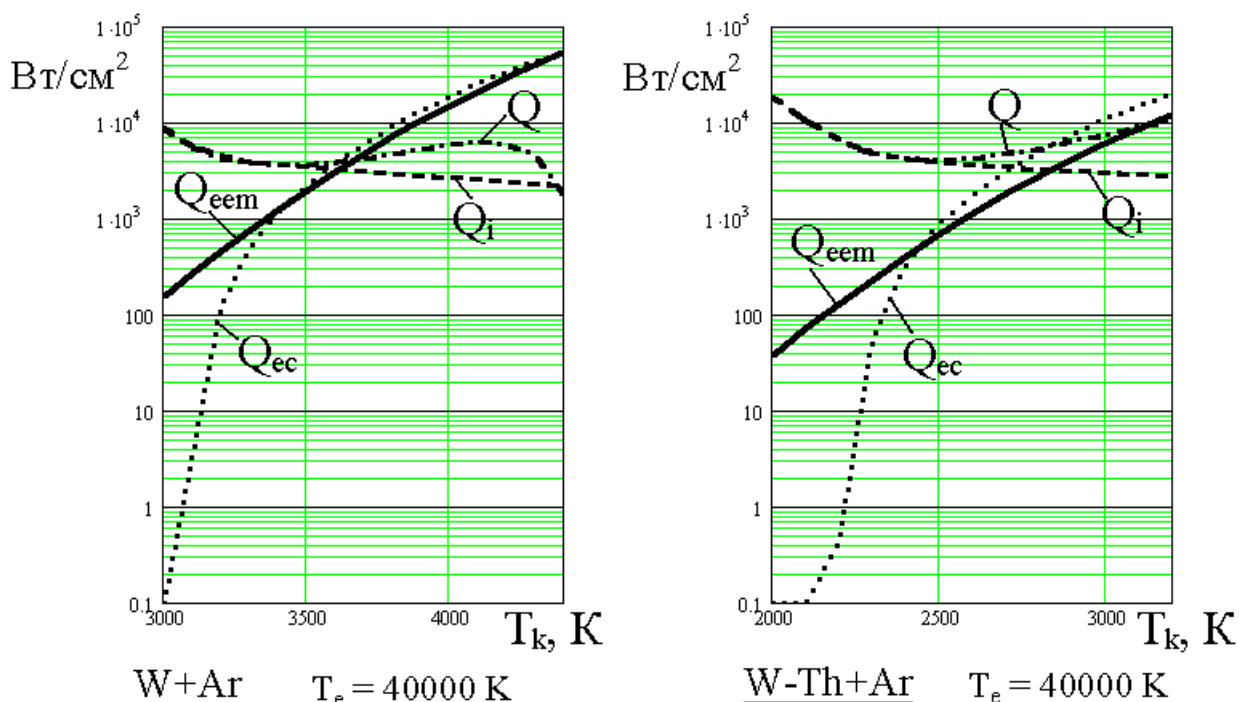


Рис. 13. Результаты расчета баланса энергии на поверхности катода в зависимости от температуры катода при $T_e = 40000 \text{ K}$: Q_{eem} – поток термоэмиссии с катода; Q_{ec} – поток обратных электронов на катод; Q_i – поток ионов на катод, включая энергию рекомбинации и энергию, уносимую атомами в результате нейтрализации ионов на поверхности катода.

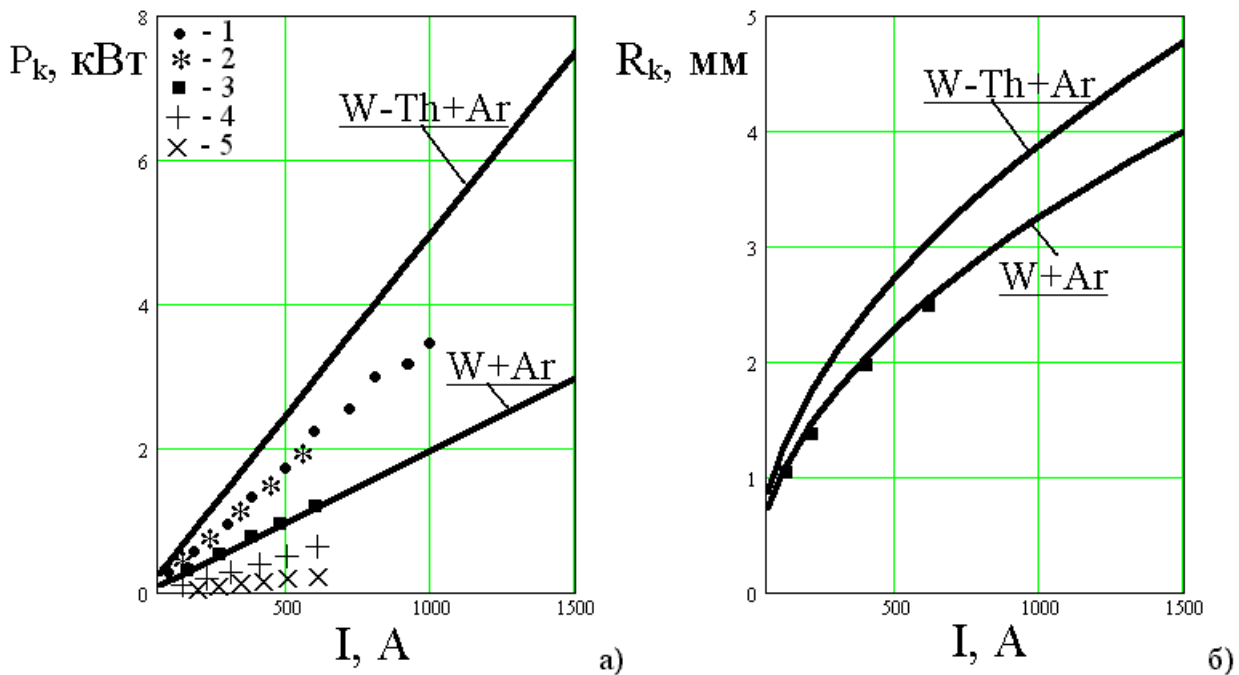


Рис. 14. Результаты расчета мощности в катод а) и радиуса катодного пятна б) в зависимости от тока дуги: линии – расчет; точки – эксперимент ИТФ СО РАН (длина охлаждаемого участка катода: 1,2 – $l_c = 0$; 3 – 0.6 см; 4 – 1.2 см; 5 – 6 см).

Приведены сравнения расчетов с экспериментальными данными в литературе. Рассмотрены также решения тепловой задачи в теле электродов, диффузии присадки с тела катода и модели прианодных процессов.

Разработаны алгоритмы и пакет программ для проведения теоретического исследования физических процессов в дуговых плазмотронах: программа моделирования дуги в канале; программа моделирования открытой дуги на основе равновесной и двухтемпературной моделей; программа моделирования приэлектродных процессов.

Шестая глава посвящена разработке методики расчета плазменной технологии обработки порошковых материалов. Построена модель, позволяющая учитывать взаимодействие между плазмой и группами частиц. Создана методика моделирования процесса обработки частиц в плазме, включающая методику моделирования движения и нагрева частицы в заданном поле температур и скоростей плазмы с учетом фазовых превращений плавления и испарения и методику моделирования загруженного факела плазмы потоком частиц с учетом их взаимодействия.

Уравнения модели безградиентного нагрева и движения частицы можно записать в нормальной форме записи по Коши как:

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{1}{\rho_s c_{ps}} \left[\frac{6}{d_s} \left(\alpha(T_n - T_s) - \varepsilon \sigma T_s^4 \right) + U_r \right] \quad (18)$$

$$\frac{dv_{sz}}{dt} = 0.75C_{dz} \frac{\rho_n (v_{nz} - v_{sz}) |v_{nz} - v_{sz}|}{\rho_s d_s} + g_z$$

$$\frac{dv_{sr}}{dt} = 0.75C_{dr} \frac{\rho_n (v_{nr} - v_{sr}) |v_{nr} - v_{sr}|}{\rho_s d_s}$$

Где обозначение “s” относится к частице, “n” к плазме, остальные обозначения общеприняты. Система уравнений (18) имеет следующие начальные граничные условия: $t=0$, $T_s(0)=T_{s0}$, $v_{sz}(0)=v_{sz0}$, $v_{sr}(0)=v_{sr0}$, $z(0)=z_0$, $r(0)=r_0$. Координаты нахождения частицы определяются как:

$$z(t) = \int_0^t v_{sz}(t) dt, \quad r(t) = \int_0^t v_{sr}(t) dt \quad (19)$$

Оценка сил, действующих на частицу при типичных условиях струй дуговых и ВЧИ плазмотронов показывает, что основные силы ускорения частиц есть сила аэродинамического сопротивления, сила тяжести и сила термофореза. Остальными силами можно пренебречь из-за малости абсолютного значения.

В тех случаях, когда интенсивность нагревания и скорости пролета (малости критериев Bi , Fo) определяют существенный градиент температуры внутри частицы, для определения температуры внутри ее во времени следует решить уравнение градиентного нагревания, которое записано в сферической системе координат в виде.

$$\rho_s c_{ps} \frac{\partial T_s(r, t)}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \lambda_s \frac{\partial T_s(r, t)}{\partial r} \right) \quad (20)$$

с начальным условием $T_s(r, 0) = T_{s0}$ и граничным условием третьего рода

$$\frac{\partial T_s(0, t)}{\partial r} = 0 \quad (21)$$

$$\lambda_s \frac{\partial T_s(R, t)}{\partial r} = \alpha(T_n - T_s(R, t)) - \varepsilon \sigma T_s^4(R, t) + U_r R / 3$$

Где R – радиус частицы; $\alpha(T_n - T_s(R, t))$ - тепловой поток энергии от плазмы к поверхности частицы; $\varepsilon \sigma T_s^4(R, t)$ - тепловой поток излучения от поверхности частицы; U_r – тепловой поток излучения от плазмы к частице.

В модели градиентного нагревания решались одновременно (на шаге времени) две задачи: внешняя задача - решение уравнений движения частицы по Коши с определением координаты нахождения частицы и теплового потока, идущего на нагрев частицы; внутренняя задача - решение уравнения градиентного нагревания для нахождения распределения температуры внутри частицы в каждый момент времени и определения момента начала плавления и

испарения, скорость плавления и испарения частицы, времени полного расплавления и испарения частицы.

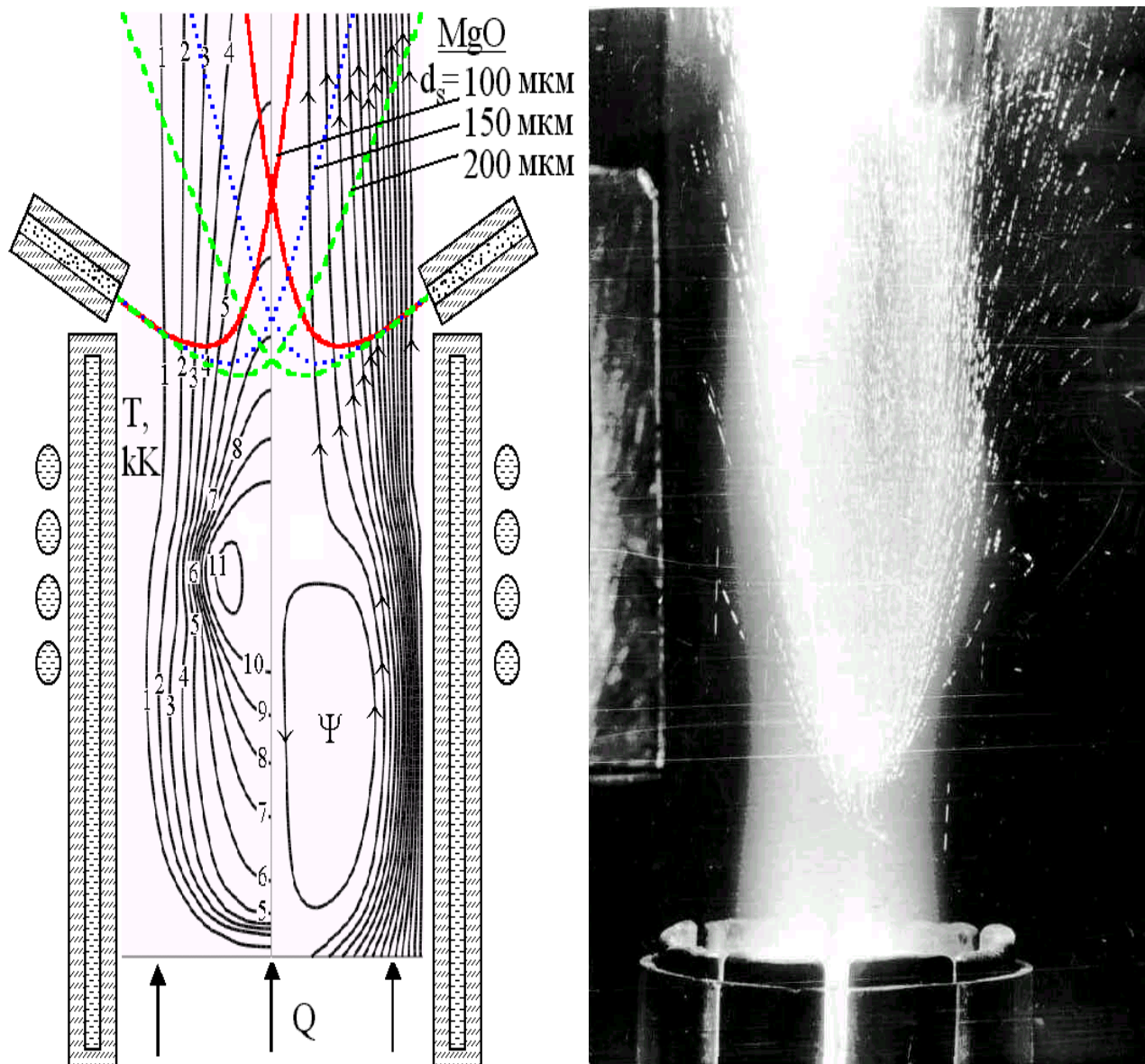


Рис. 15. Траектории движения частиц MgO ($d_s = 100, 150, 200 \mu\text{м}$; $v_{sz0} = -4 \text{ м/с}$, $v_{sr0} = -1 \text{ м/с}$) в воздушной плазменной струе ВЧИ 1.76 МГц - 60кВт.

Модель плазмы, загруженной большим количеством частиц. Для моделирования взаимодействия потока частиц с плазмой и определения параметров технологического процесса обработки дисперсного сырья нужно построить модель загруженного факела плазмы. В данной работе предложена модель, позволяющая рассчитывать не только скорость разгона и нагрева дисперсных частиц в плазме, но и учесть обратное влияние группы частиц на параметры плазмы – захолаживание и затормаживание последней. Метод, которым мы будем пользоваться для решения предлагаемой модели, можно назвать методом квазиодной частицы, потому что поведение большого количества твердых частиц в плазме будет рассматриваться без учета

взаимного их влияния (столкновений, экранировки и т.п.). Каждая частица, помещенная в рассматриваемый слой, взаимодействует с плазмой, как бы не замечая присутствия рядом других частиц. Тогда можно применять уравнение нагревания и движения одной частицы для определения параметров (температуры и скорости) всего потока частиц. Также отметим, что предложенная модель справедлива только для масштаба плазменного потока гораздо большего размера обрабатываемых частиц. Уравнения нагрева и движения частиц имеет вид (18), а уравнения баланса энергии и движения потока газа с учетом потери энергии на нагрев и импульса сил на ускорение частиц имеют следующие вид:

Уравнение баланса энергии плазмы.

$$\rho c_p \left[v_z \frac{\partial T}{\partial z} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} \right] = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \sigma E^2 -$$

$$-U_r - \frac{6}{d_s} \left[\alpha(T_n - T_s) - \varepsilon \sigma T_s^4 \right] G_{sn} \quad (22)$$

Уравнения движения потока плазмы.

$$\frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z v_z) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v_r v_z) = -\frac{\partial p}{\partial z} + F_z^B + F_z^\mu + \rho g_z$$

$$- 0.75 C_{dz} \frac{\rho_n (v_z - v_{sz}) |v_z - v_{sz}|}{d_s} \cdot G_{sn} \quad (23)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v_r v_r) = -\frac{\partial p}{\partial r} + F_r^B + F_r^\mu -$$

$$- 0.75 C_{dr} \frac{\rho_n (v_r - v_{sr}) |v_r - v_{sr}|}{d_s} \cdot G_{sn}$$

Где F_z^B, F_r^B - составляющие электромагнитной силы; F_z^μ, F_r^μ - составляющие вязкостной силы; G_{sn} - коэффициент весовой загрузки материала.

Такая модель позволяет описывать взаимодействие потока твердых частиц с плазмой и с технологической точки зрения позволяет определить важные параметры процесса обработки частиц - предельный весовой расход материалов и КПД данного процесса и установки в целом, выбирать наилучшие параметры для получения дисперсного продукта с заданным качеством.

Проведено исследование процесса обработки частиц периклаза (MgO) в воздушной струе плазмы ВЧИ плазмотрона 1.76 МГц – 60 кВт, плазменная установка и технология обработки которого разработаны в лаборатории электротехнологических установок СПбГТУ. На основе предложенной модели

определены основные локальные и интегральные параметры, как для плазменной струи, так и для частиц при разной степени загрузки материалов. Определены предельный весовой расход материала и параметры плазменной струи и частиц в предельном режиме работы. Разработаны программы для автоматизации процесса исследования обработки порошковых материалов в плазменных струях ВЧИ и дуговых плазмотронов.

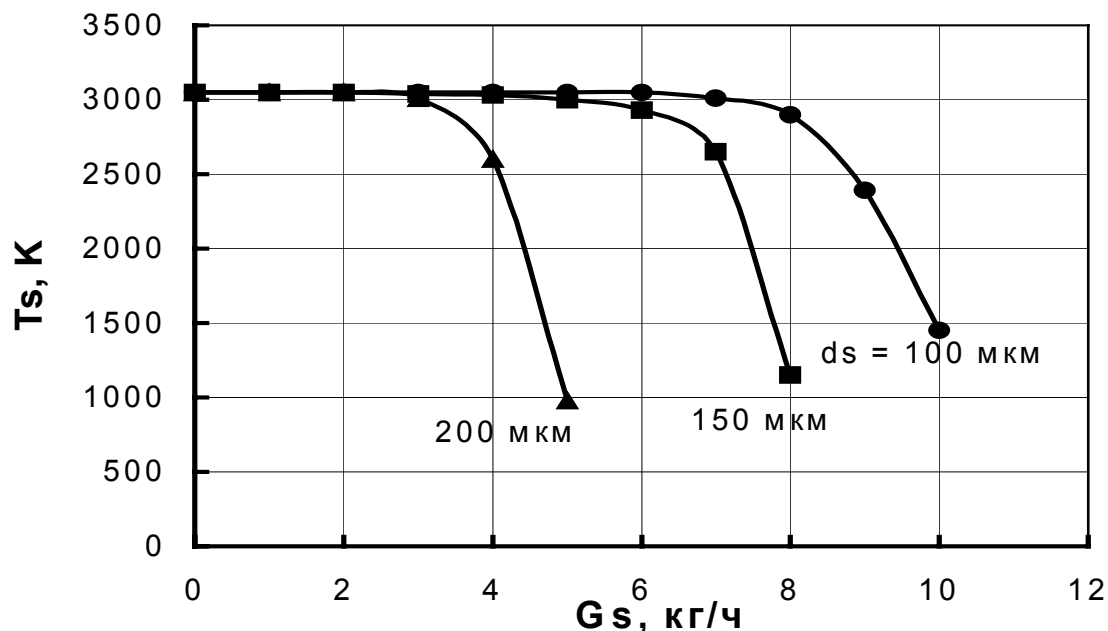


Рис. 16. Предельные весовые расходы обрабатываемого MgO в вертикальной воздушной плазменной струе ВЧИ – 1.76 МГц, 60 кВт.

В приложениях 1 и 2 приводятся дополнительные данные исследования ВЧИ и дуговых плазмотронов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе решена научная проблема, заключающаяся в создании методики моделирования и исследованиях ВЧИ и дуговых плазмотронов, имеющая важное народно-хозяйственное значение. Основные результаты:

1. Разработаны методики совместного решения комплекса систем уравнений плазмы и моделирования плазменных процессов в ВЧИ и дуговых плазмотронах, позволяющие определить адекватную картину физических, электроэнергетических и плазменных процессов в плазмотронах, установить связи между внутренними и внешними и технологическими параметрами установок, определить оптимальный режим работы плазмотрона с генератором, решить задачи теоретического анализа и проектирования плазмотронов.

2. Проведено исследование физических процессов в ряде ВЧИ плазмотронов с разными технологическими назначениями и режимами работы. Получены все пространственные распределения параметров плазмы в канале

ВЧИ плазмотронов. Установлены полные картины течения, нагрева газа и электромагнитного поля в канале ВЧИ плазмотронов. Проведены сравнительные исследования с учетом отклонения плазмы в ВЧИ разряде от состояния термического и ионизационного равновесия.

3. Проведено исследование ряда дуг в канале для резки и напыления и открытых свободных дуг для сварки и плавки металлов. Получены все распределения локальных параметров дуги. Проведён анализ полученных результатов и сравнение их с использованием различных моделей. Определена полная картина течения и нагрева газа в дуге и установить их связи с внешними параметрами плазмотрона. Сравнение полученных результатов моделирования с экспериментальными данными показывает приемлемую точность для практических задач.

4. Получены новые результаты исследования ВЧИ и дуговых плазмотронов (холодный канал, отрыв температуры электронов и тяжелых компонентов, зоны термического и ионизационного неравновесия и т.д.) с помощью усовершенствованной модели неравновесной двухтемпературной плазмы.

5. В рамках кинетической теории разработана методика расчета состава и свойств двухтемпературной плазмы. Обобщены результаты экспериментов и теоретических исследований по определению состава и свойств аргоновой плазмы. Анализ и расчеты приводились для аргоновой плазмы, однако полученные формулы возможно использовать как источник для расчета состава и свойств других газов.

6. Построена структура вычислительных процедур на основе имитации принципа устойчивости и самоорганизации физических процессов с учетом контуров внутренней и внешней обратной связи, позволяющая восстановить потерянную информацию в последовательной итерационной процедуре, исключить запаздывание в управление и решить проблему устойчивости вычислительных процедур при решении жестких и плохообусловленных задач моделирования плазмы.

7. На основе введенных коэффициентов внутренней обратной связи β предложена структура многомерной области устойчивости вычислительных процедур и определены области устойчивости для ряда типичных данных ВЧИ и дуговых плазмотронов. Предложены различные алгоритмы установки внутренней обратной связи с учетом особенности физических процессов в плазме. На основе принципа максимума решалась задача оптимизации по быстрдействию для вычислительных процедур с внутренней обратной связью.

8. Разработана методика расчета приэлектродных процессов на основе двухслойной модели. С помощью разработанной методики проведено исследование прикатодных процессов чистого и торированного вольфрама в среде аргона атмосферного давления для широкого диапазона входных данных катода и плазмы и установлены зависимости основных параметров приэлектродных областей от параметров электрода и плазмы.

9. Предложена модель, позволяющая исследовать нагревание и ускорение отдельной частицы и потока частиц совместно с моделированием плазмы,

установить взаимосвязь между плазмой и потоком частиц, определить предельный весовой расход материалов и параметры плазмы и потока частиц.

10. Созданы алгоритмы и пакет программ для исследования физических и технологических процессов ВЧИ и дуговых плазмотронов.

11. Полученные методики моделирования и результаты исследования с одной стороны дополняют уже имеющуюся информацию о физических процессах, протекающих в ВЧИ и дуговых разрядах. С другой стороны, разработанный инструментарий открывает широкие перспективы для проведения теоретического исследования плазменных процессов, приэлектродных процессов, процесса теплообмена в плазме, для проектирования плазмотронов, для определения оптимального и согласованного режима работы плазмотронов с источником питания, для решения задачи структурно параметрической идентификации плазмы и на ее основе переход к непосредственному управлению плазмой.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Нгуен Куок Ши. Математическое моделирование как инструмент для исследования сложных плазменных процессов. // Тезисы докл. Росс. науч. техн. конф. “Инновационные наукоемкие технологии для России” - Санкт-Петербург, 1995 - Ч. 2, С. 73.
2. S. Dresvin, Nguyen Quoc Shi. High frequency plasma-torch with ceramic porous wall in plasma chemistry. // Abst. of the XII Inter. Sym. on Plasma Chemistry - Minneapolis, USA, 1995 – p.120.
3. D. Morvan, J. Erin, S. Magnaval, J. Amouroux, S. Dresvin, S. Nguyen-Kuok. RF multflux plasmatron study. Experimental measurement and modeling. // Proc. of the XII Inter. Sym. on Plasma Chemistry - Minneapolis, USA, 1995 - pp.1743-1748.
4. С.В. Дресвин, С.А. Панфилов, Нгуен Куок Ши. Расчет нагревания твердых частиц и гранул в плазменных дугах. // Труды Росс. науч. техн. конф. “Перспективные технологические процессы обработки материалов” - Санкт-Петербург, 1995 - С.5-11.
5. Нгуен Куок Ши. Обеспечение устойчивости вычислительного процесса при моделировании тепло и газодинамических систем с распределенными параметрами. // Труды Межд. науч. техн. конф. “Информационные технологии в моделировании и управлении” - Санкт-Петербург, 1996 - С.68-70.
6. S. Dresvin, J. Amouroux, Nguyen Quoc Shi. Analysis of deviation from thermal and ionization equilibrium in an Argon plasma flow. // Abst. of the IV European Conference on Thermal plasma Processes - Athens, Greece, 1996 - p.59.
7. S. Dresvin, J. Amouroux, D. Morvan, L. Butman, Nguyen Quoc Shi. Calculation movement and heating of solid particles of silicon inside RF plasma torch. // Abst. of the IV European Conference on Thermal plasma Processes - Athens, Greece, 1996 - p. 72.

8. S. Dresvin, Nguyen Quoc Shi. Thermodynamic and transport properties two temperature Ar plasma. // Abst. of the IV European Conference on Thermal plasma Processes - Athens, Greece, 1996 - p. 120.
9. S. Magnaval, D. Morvan, J. Amouroux, S. Nguen-Kuok, S. Dresvin. Study of the metallurgical silicon powder treatment by thermal RF plasma. // Proc. of the IV European Conference on Thermal plasma Processes - Athens, Greece, 1996 - pp. 453-459.
10. D. Morvan, J. Amouroux, S. Magnaval, S. Dresvin, S. Nguen-Kuok. Modelling of the RF multiflux plasmatron. // Proc. of the IV European Conference on Thermal plasma Processes - Athens, Greece, 1996 - pp. 712-717.
11. D. Morvan, J. Amouroux, S. Magnaval, S. Dresvin, S. Nguen-kuok. Experimental investigation of impurity evaporation from powders injected in an RF plasma torch. // Proc. of the IV European Conference on Thermal plasma Processes - Athens, Greece, 1996 - pp. 713-720.
12. Нгуен Куок Ши. Устойчивое решение системы дифференциальных уравнений при моделировании низкотемпературных плазменных процессов. // Труды I Межд. науч. практ. конф. "Дифференциальные уравнения и применения" - Санкт-Петербург, 1996 - С. 234-236.
13. Нгуен Куок Ши, Дресвин С.В. Использование равновесной модели плазмы для исследования плазменных процессов в высокочастотных индукционных и дуговых плазматронах. // Тезисы докл. Всеросс. науч. техн. конф. "Электротехнология: сегодня и завтра" - Чебоксары, 1997 - С.47.
14. Нгуен Куок Ши. Моделирование неравновесной плазмы на основе двухтемпературной модели. // Тезисы докл. Всеросс. науч. техн. конф. "Электротехнология: сегодня и завтра" - Чебоксары, 1997 - С.69.
15. Нгуен Куок Ши. Математический алгоритм для решения задач теплообмена в плазменных потоках. // Труды Межд. науч. техн. конф. "Электрофизические и электрохимические технологии" - Санкт-Петербург, 1997 - С.56-59.
16. Нгуен Куок Ши. Двухтемпературная модель неравновесной плазмы. // Труды Межд. науч. техн. конф. "Электрофизические и электрохимические технологии" - Санкт-Петербург, 1997 - С.59-62.
17. Нгуен Куок Ши. Моделирование равновесной плазмы в высокочастотных индукционных и дуговых плазматронах. // Труды Межд. науч. техн. конф. "Электрофизические и электрохимические технологии" - Санкт-Петербург, 1997 - С.63-66.
18. S. Dresvin, J. Amouroux, Nguen Quoc Shi. Analisis of deviation from thermal and ionization equilibrium in an Argon plasma flow. // J. High temperature Material Processes. - V. 1, №3, 1997 – pp. 369-381.
19. Nguyen Quoc Shi, S. Dresvin. Mathematical modeling nonequilibrium plasma in HF-plasmatorch on a two-temperature model. // Abst. of the XIII Inter. Sym. on Plasma Chemistry - Beijing, China, 1997 - p. 319.

20. Nguyen Quoc Shi, S. Dresvin, J. Amouroux. Analyze of heating of the heavy particles of atom and ion in channel HF - plasmatorch. // Abst. of the XIII Inter. Sym. on Plasma Chemistry - Beijing, China, 1997 - p. 320.
21. Дресвин С.В., Нгуен Куок Ши. Двухтемпературная модель неравновесной плазмы. // Труды II Межд. конф. по физике плазмы и плазменным технологиям - Минск, 1997 - С. 433-439.
22. E. Franke, F. Krayem, D. Morvan, J. Amouroux, S. Dresvin, S. Nguen-Kuok. Mise en oeuvre de la velocimetrie et de la granulometrie laser-doppler un environnement hostile – mesures sur des particules dans un plasma thermique. // 6eme Congres Francophone de velocimetrie Laser - FRA, 1998 - pp. 272-278.
23. Nguyen Quoc Shi, S. Dresvin, J. Amouroux. Electromagnetic field calculation on the induction plasma. // Proc. of the Inter. Induction Heating Seminar - Padua, Italy, 1998 - pp. 163-168.
24. Nguyen Quoc Shi, S. Dresvin, J. Amouroux. Mathematical modeling plasma in RF-plasmatorch on a two-temperature model. // Proc. of the Inter. Induction Heating Seminar - Padua, Italy, 1998 - pp. 352-357.
25. S. Nguyen-Kuok, S. Dresvin, J. Amouroux, D. Morvan. Calculation of temperature and flow in RF plasma torch. Influence of cold channel produced by axial gas injection. // Proc. of the V European Conference on Thermal plasma Processes - St. Petersburg, 1998 - pp. 169-175.
26. S. Nguyen-Kuok, S. Dresvin, J. Amouroux, D. Morvan. Nonequilibrium calculation of a RF plasma torch produced by the axial cold channel. // Abst. of the V European Conference on Thermal plasma Processes - St. Petersburg, 1998 - p.78.
27. Nguyen Quoc Shi. How to secure the stability of the calculation process in modeling of plasma processes. // Abst. of the V European Conference on Thermal plasma Processes - St. Petersburg, 1998 - p. 204
28. E. Franke, F. Krayem, D. Morvan, J. Amouroux, S. Dresvin, S. Nguen-Kuok. In-flight measurement of particle size and velocity in a radio frequency plasma torch. // Proc. of the V European Conference on Thermal plasma Processes - St. Petersburg, 1998 - pp. 347-353.
29. D. Morvan, J. Amouroux, S. Magnaval, S. Dresvin, S. Nguen-Kuok. Modelling of the RF multiflux plasmatron. // J. High Tem. Mat. Proc. - V.1, №3, 1998 - pp.78-85.
30. Крылов А.В., Нгуен Куок Ши. Прикатодная область электрической дуги. // Тезисы докл. науч. тех. конф. студ. – СПбГТУ, 1998 – С. 52-55.
31. Amouroux J., Dresvin S., Nguyen Kuok Shi, Morvan D. Disturbance of the chemical ionisation and the thermal equilibrium by means of the gas flow in RF plasma torch. // Abst. of the XIV Inter. Sym. on Plasma Chemistry - Prague, 1999 - p. 125.
32. Mandin Ph., Morvan D., Amouroux J., Nguyen-Kuok S., Dresvin S. Modeling of coupled motion, heat and mass transfer, electromagnetic and atomic hydrogen in a Ar – H₂ thermal RF plasma. // Proc. of the XIV Inter. Sym. on Plasma Chemistry - Prague, 1999 - V. 1, pp. 415 – 420.

33. J. Amouroux, S. Dresvin, S. Nguyen-Kuok, A.V. Krylov. Calculations of a free-burning electric ARC by nonequilibrium model. // Proc. of the VI European Conference on Thermal plasma Processes - Strasbourg, 2000 - pp. 289-294.
34. S.V. Dresvin, S. Nguyen-Kuok, D. Ivanov, J. Amouroux. Calculation of RF plasma torch parameters by means of nonequilibrium model of Ar Plasma. // Proc. of the VI European Conference on Thermal plasma Processes - Strasbourg, 2000 - pp. 257-267.
35. Дресвин С.В., Нгуен Куок Ши, Иванов Д.В., Иванов В.Н., Брыков С.И., Эйленкриг Г.С. Расчет параметров высокочастотных индукционных (ВЧИ) плазмотронов, предназначенных для различных технологических процессов. // Труды Межд. науч. техн. конф. "Электротехнология XXI века" – Санкт-Петербург, 2001 - Ч.2, С. 149-160.
36. S. Nguyen Quoc. 2D-Electromagnetic field calculation on the radio frequency plasma torch. // Proc. of the Inter. Sem. on Heating by Internal Sources, Padua, Italy, 2001 - pp. 609-615.
37. Дресвин С.В., Нгуен Куок Ши, Чечурин Д.В. Электромагнитные задачи в расчетах высокочастотных индукционных плазмотронов. // Учеб. пособие - СПбГТУ, 1999 - 114с.
38. Дресвин С.В., Нгуен Куок Ши, Иванов Д.В. Свойства двухтемпературной аргоновой плазмы. // Учеб. пособие - СПбГТУ, 2000 - 80с.
39. Дресвин С.В., Нгуен Куок Ши, Иванов Д.В. Решение уравнения баланса энергии для плазмотронов методом контрольного объема. // Учеб. пособие - СПбГТУ, 2000 - 120с.
40. Нгуен Куок Ши, Дресвин С.В. Уравнение движения плазмы и методика его решения. // Учеб. пособие - СПбГТУ, 2000 - 110с.