

004 - 839

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ

УДК 537.527

На правах рукописи

ГОРДЕЕВА НАТАЛЬЯ ОЛЕГОВНА

**Численное исследование балансовой дуги во внешних
поперечных скрещенных магнитном и газодинамическом
полях**

Специальность 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Бишкек – 2004

Работа выполнена на кафедре
«Информационных технологий и математического моделирования»
Кыргызского горно-металлургического института

Научные руководители: академик НАН КР, доктор физ.-мат. наук
Жайнаков Аманбек Жайнакович

доктор физ.-мат. наук
Урусов Руслан Мухтарович

Официальные оппоненты: доктор физ.-мат. наук
Слободянюк Валерий Сергеевич

кандидат технических наук
Татыбеков Алымбек Татыбекович

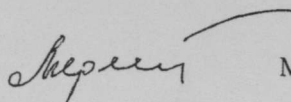
Ведущая организация: Факультет физики и электроники
КНУ им.Ж.Баласагына

Защита состоится «25» июня 2004г. в 16⁰⁰ часов на заседании Межведомственного диссертационного совета Д 01.04.242 по присуждению ученых степеней доктора(кандидата) наук при Институте физики НАН КР, Иссык-Кульском Государственном университете им.Тыныстанова, Ошском Государственном университете по адресу 720071, г.Бишкек, пр.Чуй, 265-а.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке Национальной академии наук Кыргызской Республики.

Автореферат разослан «24» мая 2004г.

Ученый секретарь
Межведомственного
диссертационного совета, к. ф.-м.н.



Меренкова Л.К.

Общая характеристика работы

Актуальность темы: Электрическая дуга находит широкое применение в различных областях науки и техники. Для технологических процессов, использующих электродуговую плазму, важна проблема пространственной стабилизации и управления разрядом. Поиск систем управления дугой является актуальной задачей.

Одним из эффективных способов управления дугой является использование внешних магнитных и газодинамических полей. Особый интерес представляет балансовая дуга, горящая во внешних поперечных скрещенных магнитном и газодинамическом полях. Балансовой дугой называют такую конфигурацию дуги, когда электромагнитная сила, обусловленная внешним магнитным полем по абсолютной величине равна газодинамической силе, обусловленной внешним обдувом и направлена ей навстречу, и столб дуги располагается вдоль оси электродов, как и при отсутствии внешних полей (Ясько О.И.). Стабилизация электрической дуги на оси с помощью внешних полей позволяет затем, изменяя внешние параметры, получать электрическую дугу с заданной конфигурацией и расположением.

Поведение электрической дуги во внешнем магнитном, газодинамическом поле исследовалось как экспериментально (Брон О.Б., Сушков Л.К., Бонд С.Е.), так и теоретически, с использованием различных математических моделей (Урюков Б.А., Новиков О.Б., Жайнаков А.Ж., Урусов Р.М., Лелевкин В.М.). Данные исследования внесли существенный вклад в понимание процессов, происходящих в электрической дуге, горящей во внешних полях. Появление быстродействующей компьютерной техники и трехмерных математических моделей позволяет расширить эти представления, глубже исследовать взаимное влияние внешних полей на характеристики столба дуги. Поэтому дальнейшие численные исследования на основе трехмерной математической модели являются актуальными.

Работа выполнялась в рамках договоров ПНТ-012-2001 от 5.01.2001г., ПНТ-007-2002 от 1.01.2002г., ПНТ-007-2003 от 1.01.2003г. с Госагентством по науке и интеллектуальной собственности при Правительстве КР по теме «Математическое моделирование магнитогазодинамических течений на основе новых компьютерных технологий».

Цель работы: На основе трехмерной математической модели электродуговой плазмы провести численное исследование условий, при которых наблюдается балансовая дуга во внешних поперечных магнитном и газодинамическом полях; выяснить характер зависимости напряженности внешнего поперечного магнитного поля от скорости поперечного обдува в балансовой дуге; исследовать тепловые, электрические и газодинамические характеристики балансовой дуги; исследовать влияние внешних регулируемых параметров – силы тока, межэлектродного расстояния, температуры обдувающего газа на условия получения балансовой дуги.

Для достижения поставленных целей решались следующие задачи:

- разработка вычислительной программы для расчета трехмерных потоков плазмы;
- апробация используемой математической модели, метода решения и вычислительной программы путем сравнения с экспериментальными данными;
- проведение численных исследований электрической дуги отдельно во внешнем поперечном магнитном поле и, отдельно с внешним поперечным обдувом и, путем сравнения полученных характеристик, определение величин напряженности внешнего магнитного поля $H_{вн}$ и скорости внешнего обдува $V_{вн}$, при которых можно получить балансовую дугу;
- численное исследование характеристик и особенностей балансовой дуги;
- проведение численных исследований балансовой дуги при различных значениях силы тока, межэлектродного расстояния, температуры обдувающего газа, с целью определения влияния указанных внешних параметров на условия получения балансовой дуги.

Научная новизна: Впервые на основе стационарной трехмерной математической модели выполнено численное исследование балансовой электрической дуги, горящей в скрещенных поперечных магнитном и газодинамическом полях. Найдены зависимости напряженности внешнего магнитного поля от скорости внешнего обдува $H_{вн}(V_{вн})$, необходимые для получения балансовой дуги с фиксированной и свободной привязкой на аноде.

Показано, что в балансовой дуге большинство характеристик приобретает не симметричный характер относительно оси дуги.

Впервые, в результате численных исследований, установлено влияние силы тока, межэлектродного расстояния и температуры обдувающего газа на условия получения балансовой дуги. Показано, что увеличение межэлектродного расстояния практически не влияет на значения величин $H_{вн}$ и $V_{вн}$, необходимых для получения балансовой дуги; с увеличением силы тока уменьшается значение $H_{вн}$, необходимое для получения балансовой дуги при той же величине $V_{вн}$; с увеличением температуры обдувающего газа увеличивается $V_{вн}$, необходимая для получения балансовой дуги при той же величине $H_{вн}$.

Практическая значимость: Результаты численных исследований и полученные зависимости позволяют дать рекомендации по возможности управления характеристиками дуги с помощью внешних скрещенных магнитного и газодинамического полей, прогнозировать поведение дуги при изменении внешних параметров, могут быть полезны при создании и оптимизации устройств с использованием балансовой дуги.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты численного исследования и выводы относительно соотношений $H_{вн}$ и $V_{вн}$, необходимых для получения балансовой дуги в скрещенных поперечных магнитном и газодинамическом полях.

2. Результаты численного исследования характеристик и особенностей балансовой дуги.
3. Результаты численного исследования и выводы относительно влияния силы тока, межэлектродного расстояния, температуры обдувающего газа на условия получения балансовой дуги в скрещенных полях.

Апробация работы: Основные результаты и положения работы докладывались на Международной научной конференции «Технологии и перспективы современного инженерного образования, науки и производства» (Бишкек, 1999), Международной научно-технической конференции «Геология и горно-технические процессы» (Бишкек-1999), Международной научной конференции «Проблемы математического моделирования и информационных технологий» (Бишкек, 2001), Международной научной конференции «Современные проблемы механики сплошных сред и механики горных пород» (Бишкек, 2002), Юбилейной научно-практической конференции, посвященной 70-летию факультета физики и электроники КНУ им.Ж.Баласагына (Бишкек, 2003).

Публикации: Результаты диссертационной работы опубликованы в работах [1–10]. Научным руководителям академику НАН КР, д.ф.-м.н. Жайнакову А. Ж. в работах [1-5,7-9] принадлежит постановка задачи, д.ф.-м.н. Урусову Р.М. в работах [1,4,5] принадлежит обсуждение результатов, аспиранту – проведение численных расчетов, получение, анализ и обсуждение конкретных результатов.

Структура и объем работы: Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и библиографии (94 наименования). Работа содержит 103 страницы машинописного текста, 39 рисунков, 6 таблиц.

Основное содержание работы

Во введении дается общая характеристика работы, делается краткий обзор литературы по экспериментальному и численному исследованию электрической дуги во внешних полях, обосновывается актуальность темы, ее новизна и практическая ценность. Приводится перечень основных научных положений, выносимых на защиту.

В первой главе описывается математическая модель для расчета электрической дуги во внешних полях и метод численного решения трехмерных уравнений электродуговой плазмы.

Для математического моделирования физических процессов, протекающих в электрической дуге, используются система уравнений магнитной газовой динамики, которая включает уравнения неразрывности, энергии, движения, уравнения Максвелла, закон Ома (Жуков М.Ф., Урюков Б.А., Энгельшт В.С.):

$$\operatorname{div}(\rho \mathbf{V}) = 0$$

$$\operatorname{div}(\rho \mathbf{V} \mathbf{h}) = \operatorname{div}\left(\frac{\lambda}{c_p} \operatorname{grad} h\right) + \sigma E^2 - \psi \quad (1)$$

$$\operatorname{div}(\rho \mathbf{V} \mathbf{u}) = \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} u) - \frac{\partial P}{\partial x} + (j_y B_z - j_z B_y) + S_x$$

$$\operatorname{div}(\rho \mathbf{V} \mathbf{v}) = \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} v) - \frac{\partial P}{\partial y} + (j_z B_x - j_x B_z) + S_y$$

$$\operatorname{div}(\rho \mathbf{V} \mathbf{w}) = \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} w) - \frac{\partial P}{\partial z} + (j_x B_y - j_y B_x) + S_z$$

Уравнения Максвелла

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = 0$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{j} \quad (2)$$

Закон Ома :

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E} \quad (3)$$

Система дополняется соотношениями:

$$\rho = \rho(T, p) \quad \sigma = \sigma(T, p) \quad \lambda = \lambda(T, p)$$

$$\mu = \mu(T, p) \quad c_p = c_p(T, p) \quad \psi = \psi(T, p)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$$

Система МГД-уравнений записана в декартовых координатах, при записи уравнений были использованы следующие обозначения :

\mathbf{V} - вектор скорости, u, v, w - компоненты скорости, P - давление, h - энтальпия, T - температура, \mathbf{j} - вектор плотности тока, \mathbf{E} - напряженность электрического поля, \mathbf{H} - напряженность магнитного поля, \mathbf{B} - вектор магнитной индукции, μ - вязкость, λ - коэффициент теплопроводности, c_p - теплоемкость при постоянном давлении, σ - электропроводность, ρ - плотность плазмы, ψ - полный поток излучения, S_x, S_y, S_z дополнительные к $\operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} u)$, $\operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} v)$, $\operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} w)$ вязкие члены.

Система МГД-уравнений записана с учетом следующих предположений: процессы стационарны, плазма представляет собой сплошную деформируемую квазинейтральную среду и находится в состоянии локального термодинамического равновесия, течение ламинарное, установившееся, излучение объемное, вязкой диссипацией и работой сил давления пренебрегается, приэлектродные процессы не рассматриваются.

Расчет электромагнитных характеристик дуги в рамках трехмерной модели проводится в переменных скалярный потенциал электрического поля - векторный потенциал магнитного поля (Жайнаков, Урусов, Урусова). Введение

скалярного потенциала электрического поля ϕ позволяет не рассчитывать три компоненты напряженности электрического поля. Введение векторного потенциала магнитного поля \mathbf{A} позволяет избежать вычисления напряженности магнитного поля через тройные интегралы по закону Био-Савара-Лапласа, что заняло бы много машинного времени.

Потенциал электрического поля ϕ связан с \mathbf{E} соотношением :

$$\mathbf{E} = -\operatorname{grad} \phi.$$

Уравнение для ϕ получают используя закон Ома и закон сохранения тока:

$$\operatorname{div}(\sigma \operatorname{grad} \phi) = 0; \quad (4)$$

Векторный потенциал магнитного поля \mathbf{A} вводят уравнением:

$$\mathbf{H} = \operatorname{rot} \mathbf{A}$$

Уравнение для определения \mathbf{A} , при условии, что $\operatorname{div} \mathbf{A} = 0$, имеет вид

$$\nabla^2 \mathbf{A} = -\mathbf{j} \quad (5)$$

Таким образом, имеем систему из уравнений эллиптического типа для нахождения неизвестных $h, P, u, v, w, \phi, A_x, A_y, A_z$.

Для каждой из неизвестных переменных необходимо задать граничные условия по всему контуру расчетной области.

Постановку граничных условий приведем на примере дуги, горящей между стержневым катодом и плоским анодом (рис.1). Открытые границы AH и DE должны выбираться на достаточно большом расстоянии от оси дуги, чтобы граничные условия на данных поверхностях не оказывали существенного влияния на характеристики дуги. При постановке граничных условий для энтальпии начальное и конечное сечение расчетной области располагалось на некотором расстоянии от электродов, что позволяет не учитывать приэлектродные процессы.

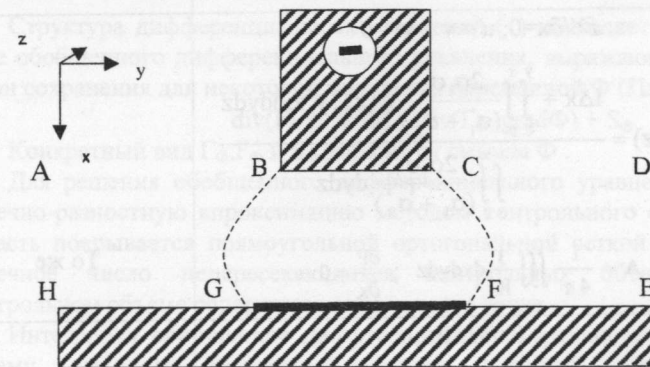


Рис.1. Схема расчетной области дуги

Энтальпия на токопроводящей поверхности электродов BC, GF находится из условия равенства нулю первой производной по нормали к поверхности. На

нетокопроводящих поверхностях HG,FE энтальпия полагается равной энтальпии охлаждаемой поверхности h_0 . На открытых границах AH,DE,AB,CD энтальпия определяется из условия $\partial h/\partial n=0$ при отсутствии внешнего обдува. При внешнем обдуве энтальпия на открытой границе равна энтальпии обдувающего потока.

Для скорости на поверхности электродов выполняется условие прилипания – скорость равна нулю. На свободных границах при отсутствии внешнего обдува скорость находится из условия гладкого сопряжения с окружающей средой. При наличие внешнего обдува скорость на открытой границе равна скорости обдувающего газа.

Потенциал электрического поля на токопроводящих поверхностях электродов находится из условия ортогональности течения электрического тока к этим поверхностям. На остальных границах потенциал электрического поля находится из условия $\partial\varphi/\partial n=0$ (течение электрического тока отсутствует).

Значения векторного потенциала рассчитываются из уравнения:

$$A = \frac{1}{4\pi} \iiint_R \frac{j}{R} dx dy dz,$$

которое является точным решением уравнения для векторного потенциала (5).

Давление на поверхностях электродов определяется из условия равенства нулю первой производной по нормали к поверхностям (Роуч). На открытых границах давление полагается равным константе.

Математическая запись граничных условий представлена в табл.1

Таблица 1

| сечение | Отсутствие внешнего обдува | Внешний обдув вдоль оси Y |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| BC | $\frac{\partial h}{\partial x}=0; u = v = w = 0$ $\varphi(x_1, y, z) = \frac{I\Delta x + \int_0^y \int_0^z \frac{2\sigma_1\sigma_2}{(\sigma_1 + \sigma_2)} \varphi(x_2, y, z,) dy dz}{\int_0^y \int_0^z \frac{2\sigma_1\sigma_2}{(\sigma_1 + \sigma_2)} dy dz}$ $A = \frac{1}{4\pi} \iiint_R \frac{j}{R} dx dy dz ; \frac{\partial P}{\partial x} = 0$ | То же |
| AB, CD | $\frac{\partial h}{\partial x}=0$ $\frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad \frac{\partial w}{\partial x} = 0 \quad \frac{\partial \varphi}{\partial x} = 0$ $A = \frac{1}{4\pi} \iiint_R \frac{j}{R} dx dy dz ; P = P_0$ | То же |

| | $\partial h/\partial y=0$ | (для сечения, куда подается газ) |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| DE, AH | $\frac{\partial u}{\partial y} = 0 \quad \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad \frac{\partial w}{\partial y} = 0 \quad \frac{\partial \varphi}{\partial y} = 0$ $A = \frac{1}{4\pi} \iiint_R \frac{j}{R} dx dy dz$ $P = P_0$ | $h = h_{\text{газа}}$ $u = 0, v = v_{\text{вн}}, w = 0$ $\frac{\partial \varphi}{\partial y} = 0$ $A = \frac{1}{4\pi} \iiint_R \frac{j}{R} dx dy dz$ $P = P_0$ |
| HG, EF | $h = h_0 ; u = v = w = 0$ $\frac{\partial \varphi}{\partial x} = 0$ $A = \frac{1}{4\pi} \iiint_R \frac{j}{R} dx dy dz ; \frac{\partial P}{\partial x} = 0$ | То же |
| GF | $\frac{\partial h}{\partial x}=0; u = v = w = 0$ $\varphi(x_N, y, z) = \frac{-I\Delta x + \int_0^y \int_0^z \frac{2\sigma_N\sigma_{N-1}}{(\sigma_N + \sigma_{N-1})} \varphi(x_{N-1}, y, z,) dy dz}{\int_0^y \int_0^z \frac{2\sigma_N\sigma_{N-1}}{(\sigma_N + \sigma_{N-1})} dy dz}$ $A = \frac{1}{4\pi} \iiint_R \frac{j}{R} dx dy dz ; \frac{\partial P}{\partial x} = 0$ | То же |

Структура дифференциальных уравнений (1) позволяет представить их в виде обобщенного дифференциального уравнения, выражающего обобщенный закон сохранения для некоторой зависимой переменной Φ (Патанкар) :

$$\text{div}(F_\Phi \cdot \rho \cdot V \cdot \Phi) = \text{div}(\Gamma_\Phi \cdot \text{grad}\Phi) + S_\Phi$$

Конкретный вид Γ_Φ, F_Φ и S_Φ зависит от смысла Φ .

Для решения обобщенного дифференциального уравнения проводят его конечно-разностную аппроксимацию методом контрольного объема. Расчетная область покрывается прямоугольной ортогональной сеткой и разбивается на конечное число непересекающихся контрольных объемов, в каждом контрольном объеме содержится одна узловая точка.

Интегрируя обобщенное дифференциальное уравнение по контрольному объему, находим дискретный аналог, который представляет собой алгебраическое уравнение, связывающее значение переменной Φ в узловой точке P со значениями переменной в шести соседних узловых точках – E, W, N, S, B, T:

$$a_p \Phi_p = a_E \Phi_E + a_W \Phi_W + a_N \Phi_N + a_S \Phi_S + a_T \Phi_T + a_B \Phi_B + b$$

Таким образом, система дифференциальных уравнений сводится к системе алгебраических уравнений, которая решается итерационным методом.

Для повышения устойчивости итерационного процесса применяется метод нижней релаксации:

$$\Phi^\tau = \alpha \cdot \Phi^\tau + (1-\alpha)\Phi^{\tau-1},$$

где τ - номер итерации; α - коэффициент релаксации ($0 < \alpha \leq 1$).

Система решается в физических переменных скорость-давление, с применением алгоритма SIMPLE'R (Патанкар) для расчета компонент скорости и давления дуги.

Во второй главе проводится апробация математической модели, численного метода решения, расчетной программы путем сравнения результатов расчета с экспериментальными данными.

Был проведен расчет открытой электрической дуги, горящей в атмосфере аргона между стержневым коническим катодом и плоским анодом, для которой имеются экспериментально измеренные поля температуры (Hsu, Etemadi, Pfender, 1983). В эксперименте использовался катод с углом заточки 60° , ток 100 А, длина дуги от вершины катода до анода 10мм. Численные расчеты проводились с различными граничными условиями. В первом случае, распределения температуры у поверхности катода и анода берутся из эксперимента. Во втором случае были заданы тепловые потоки ($\sim 10^7$ Вт/м²) в катод и анод через пятна привязки. В третьем случае энтальпия на токопроводящих поверхностях электродов находилась из условия равенства нулю первой производной энтальпии по нормали к данным поверхностям. Сравнение распределений температуры, полученных при различных граничных условиях, показало, что отличие наблюдается вблизи электродов и составляет не более 10%. Это говорит о правомерности нахождения энтальпии вблизи токопроводящих поверхностей исходя из равенства нулю первой производной по нормали ($dh/dx=0$).

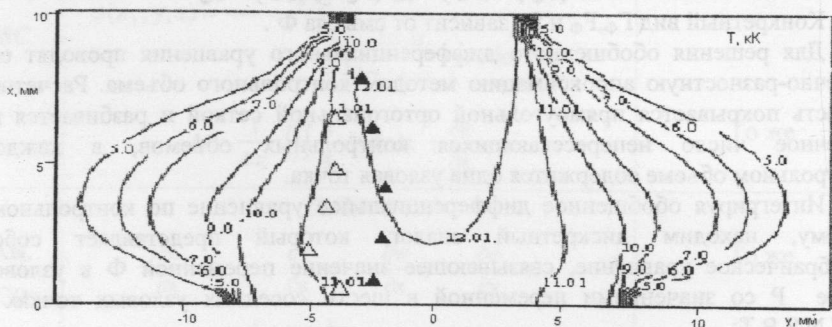


Рис.2 Поле температуры в плоскости XY (сплошные линии – расчет, эксперимент ▲ - 12 кК. Δ - 11кК)

На рис.2 приведены изотермы дуги, полученные из эксперимента и численного расчета. Сравнение показывает достаточно хорошее качественное и количественное согласие (отличие не более 9%)

Кроме этого, проведено сравнение с результатами эксперимента (Бененсон, Ценкнер) по изучению влияния скорости внешнего обдува и силы тока на распределение температуры поперечно обтекаемой дуги.

Были рассчитаны характеристики дуги с внешним обдувом, горящей в атмосфере аргона между стержневыми электродами, с токопроводящей поверхностью катода 4 мм², анода 36мм², межэлектродным расстоянием 12мм, при силах тока 42,60,80А, скоростях поперечного обдува от 41 до 127 см/с, соответствующие условиям эксперимента. Рассчитанные характеристики дуги согласуются с выводами данного эксперимента. При нулевом расходе дуга содержит выступы вниз и вверх по потоку. Начальное влияние внешнего потока сказывается в смещении выступа вверх по потоку. При более высоких скоростях наблюдается смещение столба дуги в направлении потока. В поперечном сечении при отсутствии внешних полей изотермы круговые, по мере увеличения скорости, поперечное сечение вытягивается в направлении потока (рис.3).

Таким образом, результаты численного расчета качественно повторяют наблюдаемое в эксперименте.

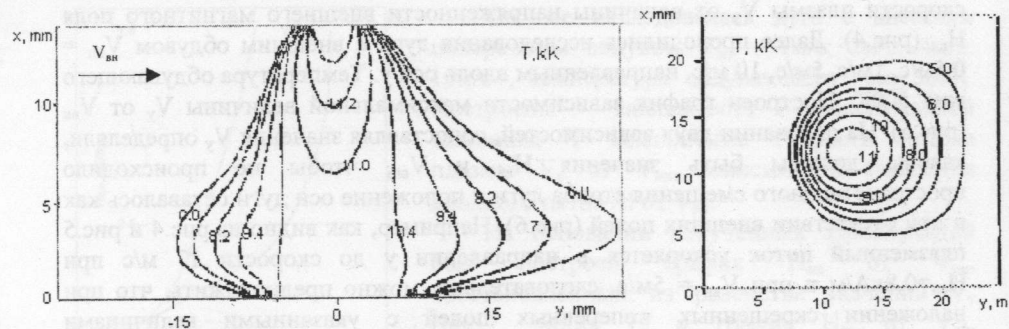


Рис.3 Поле температуры в плоскости XY ($z=z/2$) и YZ ($x=x/2$), ток 60А, скорость внешнего обдува 0,66 м/с

В третьей главе приведены результаты численных исследований балансовой дуги, горящей во внешних поперечных скрещенных магнитном и газодинамическом полях.

Для определения значений напряженности внешнего магнитного поля ($H_{вн}$) и скорости внешнего обдува ($V_{вн}$), при которых наблюдается балансовая дуга, в экспериментальных исследованиях производилось очень медленное увеличение расхода обдувающего газа и напряженности внешнего магнитного поля. При этом велся непрерывный визуальный контроль за положением оси дуги через

смотровое окно. После того, как ось дуги совпадала с отмеченной вертикальной линией, производились измерения.

При численных исследованиях такой метод подбора не достаточно эффективен, поэтому была сделана попытка найти другую методику определения $H_{вн}$ и $V_{вн}$, при которых наблюдается балансовая дуга.

Проводились численные исследования дуги, горящей в атмосфере аргона между параллельными пластинами с фиксированной привязкой на электродах. Площадь токопроводящей поверхности на катоде полагалась равной 4мм^2 , на аноде 25мм^2 , расстояние между электродами 5 мм, ток 50А.

Имеющиеся исследования электрической дуги во внешних поперечных полях (отдельно в магнитном и газодинамическом) показали, что под их действием происходит деформация и смещение столба дуги вдоль действия внешних сил.

Можно предположить, что если внешнее поперечное магнитное поле вызывает такую же деформацию столба дуги и смещение пространственного положения, что и внешний поперечный газовый поток, то при совместном действии они будут компенсировать друг друга.

Проводились исследования с $H_{вн} = 1\text{кА/м}$, 2кА/м , 4кА/м , направленным вдоль оси $-z$, так что результирующая магнитная сила направлена вдоль оси y . Построен график зависимости максимальной величины Y -компоненты скорости плазмы V_y от величины напряженности внешнего магнитного поля $H_{вн}$ (рис.4). Далее проводились исследования дуги с внешним обдувом $V_{вн} = 0,5\text{м/с}$, 1м/с , 5м/с , 10м/с , направленным вдоль оси y . Температура обдувающего газа 500К. Построен график зависимости максимальной величины V_y от $V_{вн}$ (рис.5). На основании двух зависимостей, сопоставляя значения V_y определяли, каковы должны быть значения $H_{вн}$ и $V_{вн}$, чтобы не происходило пространственного смещения столба дуги и положение оси дуги оставалось как и при отсутствии внешних полей (рис.6). Например, как видно из рис.4 и рис.5 плазменный поток ускоряется в направлении y до скорости 17м/с при $H_{вн}=0,8\text{кА/м}$ и при $V_{вн} = 5\text{м/с}$, следовательно, можно предположить, что при наложении скрещенных поперечных полей с указанными величинами смещения столба дуги происходить не будет. Проведенные численные исследования дуги в скрещенных полях с $H_{вн}=0,8\text{кА/м}$, направленным вдоль оси z и с $V_{вн} = 5\text{м/с}$, направленным вдоль оси y , действительно показали, что при данных значениях $H_{вн}$ и $V_{вн}$ не происходит пространственного смещения столба дуги, ось дуги находится в том же положении, как и при отсутствии внешних полей.

Далее проводилось численное исследование электрической дуги со свободной привязкой на аноде, горящей в зазоре между параллельными пластинами в атмосфере аргона. Ток 50А, межэлектродное расстояние 5 мм, площадь привязки на катоде 9мм^2 . В данном случае, кроме пространственного смещения столба дуги, происходит смещение пятна привязки, следовательно нужно учитывать данные два параметра.

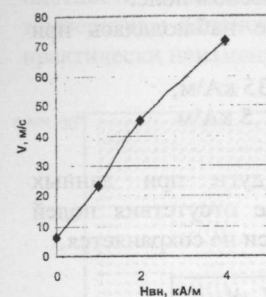


Рис.4. Зависимость V_y от $H_{вн}$

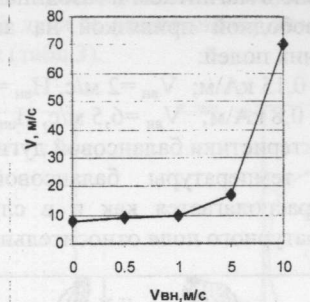


Рис.5. Зависимость V_y от $V_{вн}$

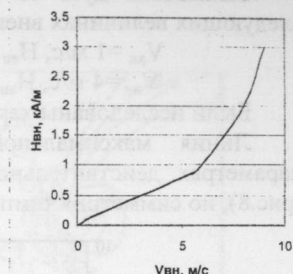


Рис.6 Соотношения между $V_{вн}$ и $H_{вн}$ в балансовой дуге

Исследовалась дуга со свободной привязкой на аноде во ВПМП с $H_{вн} = 0,5\text{кА/м}$; 1кА/м ; $1,5\text{кА/м}$; 2кА/м . Магнитное поле было направлено вдоль оси Z . Построены зависимость максимальной величины Y компоненты скорости потока плазмы V_y от $H_{вн}$, так же зависимость величины смещения анодного пятна Δl от $H_{вн}$.

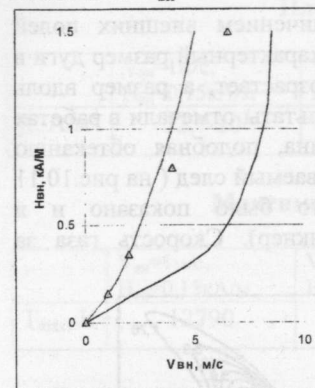


Рис.7 Зависимость $H_{вн}(V_{вн})$
1- линия, полученная сравнением V_y
2- линия, полученная сравнением Δl
 Δ - расчетные значения

Так же исследовалась дуга с внешним поперечным обдувом $V_{вн} = 1\text{м/с}$; 2м/с ; 4м/с ; 10м/с , температура обдувающего газа 500К. Построены зависимость максимальной величины Y компоненты скорости потока плазмы V_y от $V_{вн}$, зависимость смещения анодного пятна Δl от $V_{вн}$.

На основании полученных зависимостей был построен график $H_{вн}$ от $V_{вн}$, восстановленный из равенства значений V_y (рис.7, линия 1) и график $H_{вн}$ от $V_{вн}$, восстановленный из равенства значений Δl

(рис.7, линия 2).

Для данных параметров разряда линии 1 и 2 не совпадают, поэтому были проведены дополнительные численные исследования в пределах значений $H_{вн}$ и $V_{вн}$, ограниченных

линиями 1 и 2. Найдены действительные значения $H_{вн}$ и $V_{вн}$, при которых наблюдается балансовая дуга, не совпадающие с линией 1 и 2 (рис.7).

Таким образом, численный эксперимент показал, что для электрической дуги с фиксированной привязкой на аноде во внешних скрещенных поперечных магнитном и газодинамическом полях возможно построить зависимость

$H_{вн}(V_{вн})$, исследуя зависимости максимальной величины компоненты скорости от величины $H_{вн}$ и $V_{вн}$ отдельно в магнитном и газодинамическом поле.

Балансовая дуга со свободной привязкой на аноде наблюдалась при следующих величинах внешних полей:

$$V_{вн}=1 \text{ м/с}, H_{вн}=0,15 \text{ кА/м}; V_{вн}=2 \text{ м/с}, H_{вн}=0,35 \text{ кА/м};$$

$$V_{вн}=4 \text{ м/с}, H_{вн}=0,8 \text{ кА/м}; V_{вн}=6,5 \text{ м/с}, H_{вн}=1,5 \text{ кА/м}$$

Были исследованы характеристики балансовой дуги.

Линия максимальной температуры балансовой дуги при данных параметрах действительно располагается как и в случае отсутствия полей (рис.8), но симметрия температурного поля относительно оси не сохраняется.

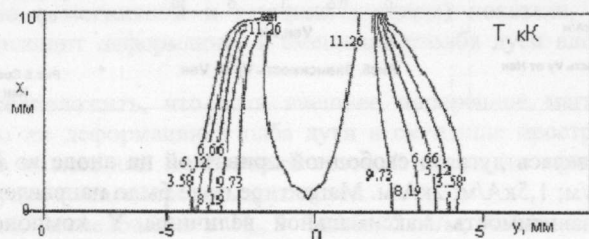


Рис.8 Поле температуры дуги в плоскости XY, $z=z/2$; $V_{вн}=8 \text{ м/с}$, $H_{вн}=2 \text{ кА/м}$

Форма дуги в поперечном сечении с увеличением внешних полей меняется от эллипса до «формы бумеранга» (рис.9), характерный размер дуги в направлении перпендикулярном внешним силам возрастает, а размер вдоль действия внешних сил уменьшается (подобные результаты отмечали в работах Урюков, Брон, Сушков и др.). Получается картина, подобная обтеканию твердого тела, обтекая которое газ образует так называемый след (на рис.10,11 показано течение плазмы в плоскости zy), что было показано и в экспериментальных исследованиях (Бененсон, Ценкнер). Скорость газа за столбом дуги практически равна нулю.

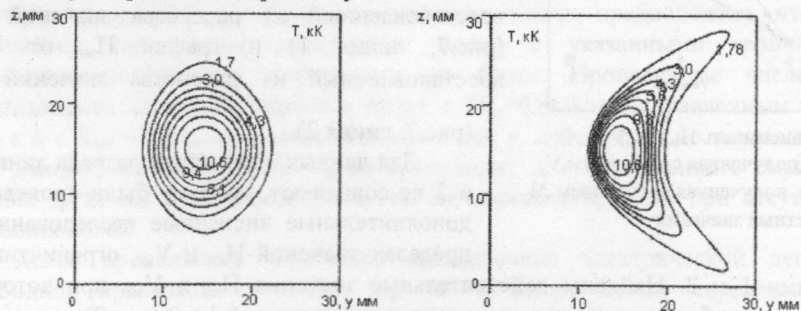


Рис.9 Поле температуры в плоскости yz при $x=x/2$.

а) $V_{вн}=1 \text{ м/с}$, $H_{вн}=0,15 \text{ кА/м}$ б) $V_{вн}=8 \text{ м/с}$, $H_{вн}=2 \text{ кА/м}$

С увеличением внешних полей соотношение характерных размеров изменяется приблизительно линейно. Это значит, что площадь поперечного

сечения дуги меняется мало, следовательно, то же можно сказать и о средней плотности тока (табл.2). Подтверждением служит значение максимальной температуры балансовой дуги, с увеличением внешних полей - она остается практически неизменной (табл.3).

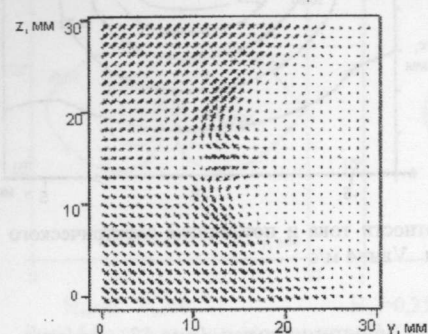


Рис.10 Векторное поле скорости в плоскости yz при $x=x/2$; $V_{вн}=2 \text{ м/с}$, $H_{вн}=0,35 \text{ кА/м}$

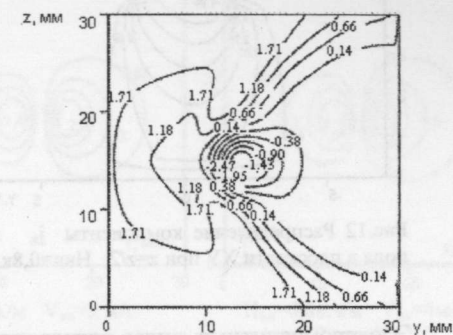


Рис.11 Поле Y-компоненты скорости в плоскости yz при $x=x/2$; $V_{вн}=2 \text{ м/с}$, $H_{вн}=0,35 \text{ кА/м}$

Плотность тока в балансовой дуге

Таблица 2

| | $V_{вн}=1 \text{ м/с}$, $H_{вн}=0,15 \text{ кА/м}$ | $V_{вн}=2 \text{ м/с}$, $H_{вн}=0,35 \text{ кА/м}$ | $V_{вн}=4 \text{ м/с}$, $H_{вн}=0,8 \text{ кА/м}$ | $V_{вн}=6,5 \text{ м/с}$, $H_{вн}=1,5 \text{ кА/м}$ | $V_{вн}=8 \text{ м/с}$, $H_{вн}=2 \text{ кА/м}$ |
|----------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| $j_x, \text{ A/m}^2$ | $52,7 \cdot 10^5$ | $49,8 \cdot 10^5$ | $55,1 \cdot 10^5$ | $55,0 \cdot 10^5$ | $54,8 \cdot 10^5$ |

Максимальная температура балансовой дуги

Таблица 3

| | $V_{вн}=1 \text{ м/с}$, $H_{вн}=0,15 \text{ кА/м}$ | $V_{вн}=2 \text{ м/с}$, $H_{вн}=0,35 \text{ кА/м}$ | $V_{вн}=4 \text{ м/с}$, $H_{вн}=0,8 \text{ кА/м}$ | $V_{вн}=6,5 \text{ м/с}$, $H_{вн}=1,5 \text{ кА/м}$ | $V_{вн}=8 \text{ м/с}$, $H_{вн}=2 \text{ кА/м}$ |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| $T_{\text{max}}, \text{ K}$ | 12790 | 12650 | 12835 | 12830 | 12809 |

Распределение плотности тока в балансовой дуге приобретает незначительную асимметрию (рис.12).

Для распределения потенциала электрического тока справа от оси дуги наблюдается незначительное увеличение по сравнению с левой. Разность потенциалов для дуги при отсутствии внешних полей составляет $\sim 4 \text{ В}$, для балансовой дуги это значение практически не изменяется.

Рассмотрим характер действия электромагнитных сил в балансовой дуге. С увеличением внешних сил разница между значениями F_y справа и слева от оси, для $H_{вн}=0,8 \text{ кА/м}$ и $V_{вн}=4 \text{ м/с}$ она достигает 40% (рис.13).

Таким образом, в балансовой дуге действие компоненты F_y электромагнитной силы на дугу вдоль оси y не уравновешено.

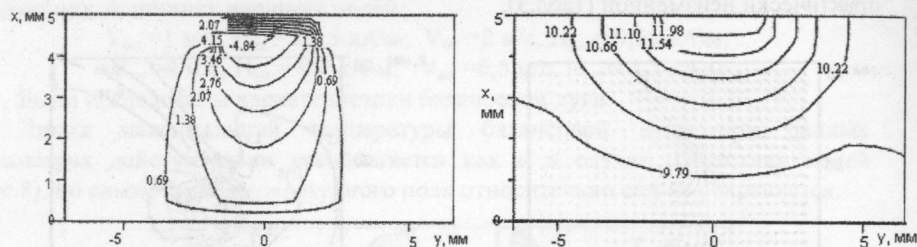


Рис.12 Распределение компоненты j_x плотности тока и потенциала электрического поля в плоскости XU при $z=z/2$; $H_{вн}=0,8\text{кА/м}$ $V_{вн}=4\text{ м/с}$

Электромагнитные силы справа от оси увеличиваются (рис.13) за счет наложения внешнего поля и стремятся отклонить столб дуги справа налево, в тоже время внешний поток газа в этом случае выполняет роль фактора, сдерживающего отклонение дуги.

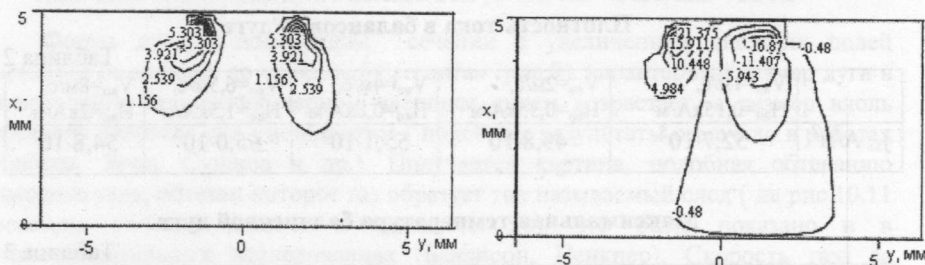


Рис.13. Распределение компонент электромагнитной силы F_x и F_y в плоскости XU при $z=z/2$, $H_{вн}=0,8\text{кА/м}$ $V_{вн}=4\text{ м/с}$

На балансовую дугу действует магнитное поле ($\mathbf{H} + \mathbf{H}_{вн}$), которое является суперпозицией внешнего магнитного поля $\mathbf{H}_{вн}$ и собственного магнитного поля дуги \mathbf{H} .

Компоненты магнитного поля H_x , H_y , H_z в отсутствии внешних полей распределены симметрично относительно оси дуги. В балансовой дуге имеет место различие значений H_x и H_z в правой и левой частях дуги, которое увеличивается с увеличением внешних полей (рис.14).

Таким образом, в балансовой дуге наблюдается значительное изменение формы поперечного сечения дуги и нарушается симметричное распределение большинства характеристик.

Чтобы убедиться в правдоподобности полученных характеристик, были проведены расчеты балансовой электрической дуги с межэлектродным

расстоянием 10мм, током 100А и температурой обдувающего газа 1000К. Наблюдалось аналогичное поведение дуги, как и при рассмотренных выше параметрах.

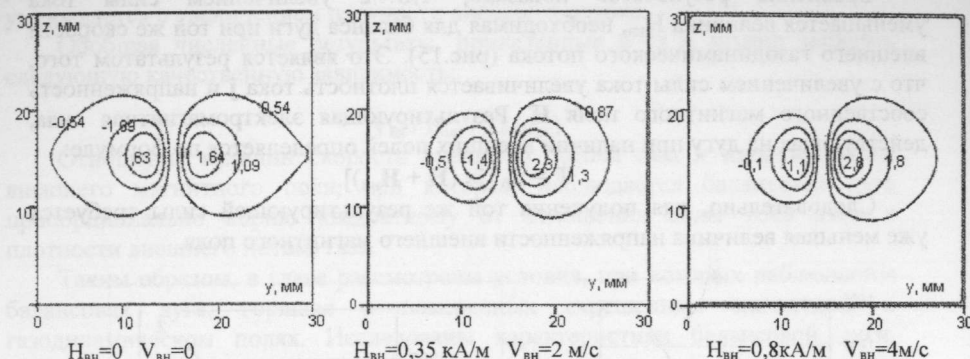


Рис.14 Распределение компоненты H_z (кА/м) магнитного поля в плоскости YZ при $X=X/2$

Были выполнены численные расчеты балансовой дуги при различных значениях межэлектродного расстояния, силы тока и температуры обдувающего газа.

Для выяснения зависимости условий получения балансовой дуги от межэлектродного расстояния, были найдены значения $H_{вн}$ и $V_{вн}$, при которых наблюдается балансовая дуга для следующих расстояний: 5мм, 7.5 мм, 10мм; при следующих параметрах дуги: ток 50А, площадь привязки на катоде 9мм^2 , на аноде свободная привязка, газ аргон атмосферного давления, температура обдувающего газа 500К.

Получено, что для данных межэлектродных расстояний балансовая дуга наблюдается практически при тех же значениях $V_{вн}$ и $H_{вн}$ (табл.4).

Балансовая дуга для разных межэлектродных расстояний

Таблица 4

| № | L = 5мм | | L = 7,5мм | | L = 10мм | |
|---|----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|
| | $V_{вн}, \text{м/с}$ | $H_{вн}, \text{кА/м}$ | $V_{вн}, \text{м/с}$ | $H_{вн}, \text{кА/м}$ | $V_{вн}, \text{м/с}$ | $H_{вн}, \text{кА/м}$ |
| 1 | 1 | 0,15 | 1 | 0,15 | 1 | 0,15 |
| 2 | 2 | 0,35 | 2 | 0,35 | 2 | 0,35 |
| 3 | 4 | 0,8 | 3,8 | 0,8 | 3,8 | 0,8 |
| 4 | 6,5 | 1,5 | 6,5 | 1,5 | - | - |
| 5 | 8 | 2,0 | - | - | - | - |

Данные результаты можно объяснить тем, что для различных межэлектродных расстояний величины компоненты V_y скорости плазмы близки между собой (подобный факт был установлен в работах Жайнакова, Урусова).

Влияние силы тока на условия получения балансовой дуги рассматривалось на примере расчета характеристик дуги при токах 50А, 100А,

150А, межэлектродное расстояние 7.5мм, площадь привязки на катоде 9мм², на аноде свободная привязка, газ аргон атмосферного давления, температура обдувающего газа полагалась 1000К.

Сравнение результатов показало, что с увеличением силы тока уменьшается величина $H_{вн}$, необходимая для баланса дуги при той же скорости внешнего газодинамического потока (рис.15). Это является результатом того, что с увеличением силы тока увеличивается плотность тока j и напряженность собственного магнитного поля H . Результирующая электромагнитная сила, действующая на дугу при наличии внешних полей определяется по формуле:

$$F = \mu_0 [j \times (H + H_{вн})].$$

Следовательно, для получения той же результирующей силы требуется уже меньшая величина напряженности внешнего магнитного поля.

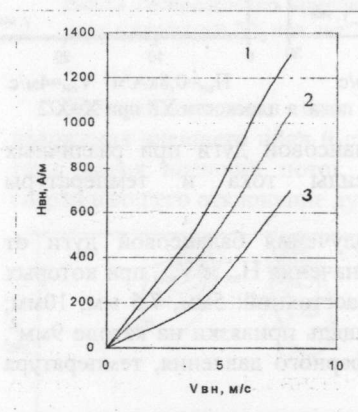


Рис.15 $H_{вн}(V_{вн})$ в зависимости от силы тока:
1 – 50А; 2 – 100А; 3 – 150А

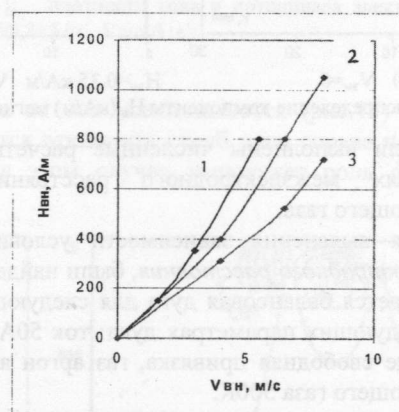


Рис.16 Кривые баланса дуги в зависимости от температуры обдувающего газа
1 – 500К; 2 – 1000К; 3 – 2000К

В связи с вышеизложенным, можно сказать, что отношение скорости внешнего обдува к напряженности внешнего магнитного поля, необходимые для баланса дуги увеличивается с увеличением силы тока.

Проводились численные исследования баланса дуги при различной температуре обдувающего газа (500К, 1000К, 2000К). Результаты показали (рис.16), что при увеличении температуры обдувающего газа для получения балансовой дуги требуется внешний поток с большей скоростью при равных значениях напряженности внешнего магнитного поля. Это можно объяснить тем, что при температуре 500К плотность аргона $\rho = 0,97 \text{ кг/м}^3$, а при 1000К $\rho = 0,48 \text{ кг/м}^3$. Следовательно, для передачи одинакового импульса, потоку с большей температурой требуется придать большую скорость.

Можно сказать, что отношение скорости внешнего обдува к напряженности внешнего магнитного поля, необходимые для баланса дуги увеличивается с увеличением температуры обдувающего газа или уменьшается с увеличением плотности внешнего потока.

Обобщая численные результаты, приведенные в гл.3, можно записать следующую качественную зависимость:

$$V_{вн} / H_{вн} \sim (I / \rho_{вн})^{1/2}$$

Отношение величин скорости внешнего потока газа и напряженности внешнего магнитного поля, при которых наблюдается балансовая дуга пропорционально корню квадратному от отношения силы тока дуги к плотности внешнего потока газа.

Таким образом, в главе рассмотрены условия, при которых наблюдается балансовая дуга, горящая в поперечных скрещенных магнитном и газодинамическом полях. Исследованы характеристики балансовой дуги, показано, что происходит нарушение симметричного распределения характеристик. Показано, что изменение межэлектродного расстояния практически не влияет на величины $H_{вн}$ и $V_{вн}$, необходимые для получения балансовой дуги; увеличение силы тока требует уменьшения напряженности внешнего магнитного поля для получения балансовой дуги при той же скорости внешнего обдува; увеличение температуры обдувающего газа требует увеличения скорости обдувающего потока для получения балансовой дуги при той же напряженности внешнего магнитного поля.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы работы:

1. Расширена трёхмерная математическая модель для расчета электродуговых потоков плазмы на случай электрической дуги, горящей во внешних поперечных скрещенных газодинамическом и магнитном полях, разработана вычислительная программа для расчета стационарных трехмерных потоков электродуговой плазмы во внешних полях.
2. Путем сравнения результатов численного расчета с экспериментальными данными показано, что разработанная программа для расчета электродуговых потоков позволяет получать достоверные результаты.
3. Предложен метод определения величин напряженности внешнего поперечного магнитного поля ($H_{вн}$) и скорости внешнего поперечного обдува ($V_{вн}$), при которых наблюдается балансовая дуга для рассматриваемого диапазона параметров.

4. В результате численных исследований найдены соотношения между величинами напряженности внешнего поперечного магнитного поля и скорости внешнего поперечного обдува, при которых наблюдается балансовая дуга для рассматриваемого диапазона параметров.
5. Установлено, что совместное влияние внешнего поперечного магнитного поля и внешнего поперечного обдува сказывается в том, что балансовая дуга не обладает осевой симметрией.
6. Показано, что такие характеристики как максимальная температура, средняя плотность тока, разность потенциалов в балансовой дуге практически не изменяются при изменении $H_{вн}$ и $V_{вн}$.
7. Установлено влияние силы тока и межэлектродного расстояния на условия получения балансовой дуги: при увеличении силы тока необходимо уменьшить напряженность внешнего магнитного поля для получения балансовой дуги при той же скорости внешнего обдува, при увеличении межэлектродного расстояния балансовую дугу можно получить практически при тех же значениях $H_{вн}$ и $V_{вн}$.
8. Установлено влияние температуры обдувающего газа на условия получения балансовой дуги: при увеличении температуры внешнего обдувающего потока газа необходимо увеличить скорость внешнего потока для получения балансовой дуги при тех же значениях напряженности внешнего магнитного поля.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Гордеева Н.О., Жайнаков А.Ж., Урусов Р.М. Особенности расчета трехмерных МГД-потоков // Вестник КГПУ им.Арабаева, серия Математика, Физика, Информатика, - Бишкек, 1998г.-№1.- С.62-66
2. Гордеева Н., Жайнаков А. К расчету МГД-течений в каналах сложной геометрии // Материалы научной конференции «Технологии и перспективы современного инженерного образования», посвященной 45-летию КТУ им.И.Раззакова, -Бишкек, 1999.- С.23-27
3. Гордеева Н.О., Жайнаков А.Ж. Апробация метода расчета трехмерных МГД-потоков // Материалы междунар. науч.-тех. конференции «Геология и горно-технические процессы».- Бишкек, 1999.-С.91-95
4. Гордеева Н., Жайнаков А., Урусов Р. Применение среды программирования Delphi для решения прикладных задач магнитогидродинамики // Доклады международной конференции «Проблемы управления и информатики», Бишкек, 2000.-С.

5. Гордеева Н., Жайнаков А., Урусов Р. Численное исследование электрической дуги с поперечным обдувом // Доклады III-й традиционной Казахстанско-российской научно-прак. конференции «Математическое моделирование научно-тех. и экологич. проблем в нефтегазодобывающей промышленности», - Алматы, 2000.-С.57-61
6. Гордеева Н.О. Численное исследование электрической дуги в скрещенном магнитном и газодинамическом поле // Доклады международной науч. конференции «Проблемы математического моделирования и информационных технологий», - Бишкек, 2001.-С.93-97
7. Гордеева Н., Жайнаков А. Проверка корректности использования модели, метода и программы расчета для моделирования электрической дуги во внешних полях // Известия НАН КР.- Бишкек, 2002.-№4.-С.32-34
8. Гордеева Н., Жайнаков А. Исследование баланса электрической дуги во внешних газодинамическом и магнитном полях в зависимости от межэлектродного расстояния // Доклады Междунар.науч.конф. «Современные проблемы механики сплошных сред и механики горных пород», Бишкек, 2002.-С.57-61
9. Гордеева Н.О., Жайнаков А.Ж. Характеристики балансовой электрической дуги // Вестник КНУ им.Ж.Баласагына, Вып.3 – Физика и физическое образование,- Бишкек, 2003.- С.299-301
10. Свидетельство №56 (Кыргызпатент). Программа для расчета трехмерных электродуговых потоков плазмы во внешних полях / Гордеева Н.О.- заявка № 20030008.6; зарегистр. 30.07.2003

АННОТАЦИЯ

Гордеева Наталья Олеговна

«Численное исследование балансовой дуги во внешних поперечных скрещенных магнитном и газодинамическом полях»

Специальность 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника

На основе уравнений магнитной газовой динамики выполнены численные исследования балансовой дуги, горячей между параллельными пластинами во внешних поперечных скрещенных магнитном и газодинамическом полях. Найдены условия, при которых удается получить балансовую дугу – значения напряженности внешнего магнитного поля и скорости внешнего обдува. Получены характеристики балансовой дуги. Показано, что при совпадении положения оси балансовой дуги с положением оси дуги в отсутствии внешних полей, симметрия большинства характеристик относительно оси нарушается. Существенно меняется форма поперечного сечения дуги. Проведен численный анализ влияния внешних параметров – силы тока, межэлектродного расстояния, температуры обдувающего газа на величины напряженности внешнего магнитного поля и скорости внешнего обдува, необходимые для получения балансовой дуги.

ABSTRACT

Natalja Olegovna Gordeeva

"The numerical researches of balance arc in external transverse crossbred magnetic and gasodynamic floors"

Speciality 01.04.14 – heatphysics and theoretical heattechnics

On the basis of the equations of magnetic gasdynamics executed numerical researches of balance arc, burning between parallel plates in external transverse crossbred magnetic and gasdynamic floors. The founded conditions, under which manages to get the balance arc - importances of tension of external magnetic field and velocities external gasdynamic flows. Features of balance arc are received. Is shown, that at coincidence of position of axis of balance arc with position of axis of arc in absence of external floors, symmetry of majority of features for axis is broken. The numerical analysis of influence of external parameters - amperage, interelectrode distance, temperature blowing on gas on values of tension of external magnetic field and velocities external gasdynamic flows required for reception of balance arc carried out.

АННОТАЦИЯ

Гордеева Наталья Олеговна

“Магниттик жана газдинамикалык талаадагы баланстын тышкы кайчылаш кесилишинин сандык изилдөө”

Адистик 01.04.14 - жылуук физика жана теоретикалык жылуулук техникасы

Баланстык жааны сандык изилдөө менен магниттик жана газдинамикалык талаанын тышкы кайчылаш кесилишинин натыйжасында параллелдик пластиналар аралыгындагы тутануу, магниттик газдын динамиканын тедемесинин негизинде жүргүзүлдү. Тышкы магниттик талаанын жана тышкы үйлөөнүн чыңалуу айрымачылыгынын негизинде баланстык жааны алуунун шарты табылды.

Баланстык жаанын мүнөздөмөсү алынды. Баланстык жаанын огунун абалы менен тышкы талаалардын огунун симметриясы туш келбесе көбүнчө мүнөздүк салыштырмалуу октор бузулат. Жаанын каршылаш тушташуу формасы өзгөрөрү анык. Баланстык жааны алуунун зарылдары боюнча тышкы параметрдин таасиринде сандык анализ жүргүзүлдүгү – токтуң күчү, электрод аралык чек. Тышкы магниттик талаанын чыңалуусунун көлөмү жана тышкы үйлөө ылдамдыгы аркасында үйлөөчү газдын жылуулугу.

Отпечатано в ОсОО «Лакпринт»
Тираж 100 экз. Объем 1.4 печ. л.