

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК КЫРГЫЗСКОЙ
РЕСПУБЛИКИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ

Межведомственный диссертационный совет Д 01.07.342

На правах рукописи
УДК 537.527

Нам Инна Эроновна

**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ
ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ КАТОДА НА
ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ**

01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Бишкек 2008

Работа выполнена в лаборатории теории плазмы и плазменных технологий Института физики Национальной академии наук Кыргызской Республики

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Урусов Руслан Мухтарович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор
Десятков Геннадий Александрович

кандидат физико-математических наук
Султангазиева Рейна Турдубековна

Ведущая организация: Факультет физики и электроники
Кыргызского Национального
университета им. Жусупа Баласагына

Защита состоится 8 февраля 2008 г. в 14.00 часов на заседании Межведомственного диссертационного совета Д 01.07.342 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, 265а.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке Национальной Академии Наук Кыргызской Республики.

Автореферат разослан 20 декабря 2007 г.

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

Меренкова Л.К.

Общая характеристика работы

Диссертация посвящена численному исследованию влияния геометрической формы катода на характер протекающих в электрической дуге теплофизических процессов.

Актуальность темы диссертации. Как отмечается во многих работах, наиболее важным элементом конструкции электродугового устройства, в значительной степени определяющим ресурс и эффективность работы, является катодный узел. Наряду с внешними параметрами дугового разряда (сила тока, род плазмообразующего газа, давление и т.д.) геометрическая форма катодного узла и условия катодной привязки дуги оказывают существенное влияние на протекающие в дуге процессы. Таким образом, выбор определенной геометрии катода позволяет в значительной степени оптимизировать требуемые технологические характеристики электрической дуги.

Так, результаты экспериментальных исследований (Жуков М.Ф., Аньшаков А.С., Дандарон Г.-Н.Б., Тимошевский А.Н., Урбах Э.К.) позволили разработать новые геометрические формы катодных узлов, работающих на сравнительно больших токах (килоампер и выше) при сохранении умеренной эрозии катода.

Широкое применение в различных областях науки и производства нашли двухструйные плазматроны (Брунинг Дж., Жеенбаев Ж.Ж., Энгельшт В.С., Болотов А.В.)

Разработка новой геометрической формы катода и условий катодной привязки дуги позволила экспериментально реализовать трубчатую пространственную форму дугового разряда (Новиков О.Я., Путько В.Ф.).

Вместе с тем, наряду с экспериментальными методами исследования большую роль играют теоретические методы, в частности, математическое моделирование электрической дуги (Урюков Б.А., Энгельшт В.С., Жайнаков А., Лелевкин В.М.).

До недавнего времени в большинстве математических моделей используется прямоугольная расчетная область, которая не включает в себя электроды, а содержит только область столба дуги.

Однако очевидно, что для учета влияния геометрии электродов на характеристики электрической дуги расчетная область должна включать в себя также и электроды с реальными теплофизическими свойствами, имеющими нередко достаточно сложную геометрическую форму.

Вместе с тем, решение подобного класса задач требует больших ресурсов вычислительных средств, и, кроме этого, сопряжено с немалыми трудностями методического характера, в частности, построением разностной сетки и разностной аппроксимацией граничных условий вблизи криволинейных границ электродов.

В силу отмеченных трудностей до недавнего времени решению подобного класса задач посвящено незначительное количество работ. В этой связи численное исследование влияния геометрии электродов и, в частности, катода на характеристики дуги являются актуальной задачей.

Исследования проводились в соответствии с планом научно-исследовательских работ Института физики НАН КР в рамках проекта «Физика низкотемпературной плазмы. Развитие расчетно-теоретических моделей для оптимизации электродуговых плазменных технологий» (№ Гос. регистрации 0003746).

Цель и задачи исследования: на основе математического моделирования исследовать влияние геометрической формы неплавящегося катода на теплофизические процессы и характеристики электрической дуги; провести оценку теплового состояния анода.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1. Формулировка математической модели и выбор методики решения.
2. Расчет характеристик электрической дуги с катодом цилиндрической, конусной и сферической формы.
3. Расчет характеристик электрической дуги с катодом, имеющим профилированную поверхность – каверну, либо кольцевой выступ.
4. Расчет характеристик электрической дуги с кольцевой привязкой на торце сплошного цилиндрического катода.

Научная новизна полученных результатов:

- переход от цилиндрической формы катода к конусной форме и уменьшение угла заточки обуславливает изменение направления воздействия электромагнитных сил, а именно: с уменьшением угла заточки все более возрастает аксиальная компонента электромагнитных сил, непосредственно ускоряющая поток плазмы;

- в дуговых разрядах силой тока до ≈ 200 А со стержневыми катодами различной геометрии (конус, сфера, цилиндр, притупленный конус) радиусом не более ≈ 2 мм, характеристики плазмы будут близки между собой при условии равенства площадей токопроводящих поверхностей. Различия в характеристиках наблюдаются только на участке разгона и в его протяженности, которая незначительна по сравнению с длиной дуги.

- в катоде с углублением формируется зона циркуляция газа, препятствующая «уходу» испарившегося материала катода в столб дуги. При определенной организации течения плазмы вблизи катода с целью вовлечения окружающего газа в столб дуги и его движения по направлению к катоду часть атомов, покинувших поверхность катода вне пятна, будет возвращаться обратно в столб дугового разряда;

- для дуги с кольцевой привязкой на торце сплошного цилиндрического катода тепловое воздействие на анод распределяется по кольцевой

поверхности; выявлена немонотонная зависимость глубины плавления анода от межэлектродного расстояния; существует оптимальное значение межэлектродного расстояния, обеспечивающее максимальное тепловое воздействие на поверхность анода. Увеличение силы тока или уменьшение радиуса кольцевой катодной привязки приводят к увеличению теплового воздействия дуги на анод.

Практическая значимость полученных результатов.

Результаты исследований могут быть использованы при разработке и оптимизации режимов работы электродуговых устройств, а также при чтении специальных курсов по дисциплине «Численные методы решения задач тепломассообмена».

Основные положения диссертации, выносимые на защиту.

1. Переход от цилиндрической формы катода к конусной форме и уменьшение угла заточки обуславливает изменение направления действия электро-магнитных сил – с уменьшением угла заточки все более возрастает аксиальная компонента электромагнитных сил, ускоряющая поток плазмы.

2. В дуговых разрядах силой тока до ≈ 200 А со стержневыми катодами различной геометрии (конус, сфера, цилиндр, притупленный конус) радиусом не более ≈ 2 мм, характеристики плазмы будут близки между собой при условии равенства площадей токопроводящих поверхностей. Различия в характеристиках наблюдаются только на участке разгона и в его протяженности, которая незначительна по сравнению с длиной дуги.

3. В катоде с профилированной поверхностью – каверной, либо кольцевым выступом, формируется зона циркуляция газа, препятствующая «уходу» испарившегося материала катода в столб дуги. При определенной организации течения плазмы вблизи катода с целью вовлечения окружающего газа в столб дуги и его движения по направлению к катоду часть атомов, покинувших поверхность катода вне пятна, будет возвращаться обратно в столб дуги.

4. В случае дуги с кольцевой катодной привязкой тепловое воздействие на анод распределяется по кольцевой поверхности. Зависимость глубины плавления анода от межэлектродного расстояния является немонотонной; существует оптимальное значение межэлектродного расстояния, обеспечивающее максимальное тепловое воздействие на поверхность обрабатываемого изделия.

Личный вклад соискателя. Диссертационная работа является результатом самостоятельных исследований, проведенных автором. Определение цели исследований и обсуждение результатов проводились при участии академика НАН КР Жайнакова А.Ж., научного руководителя д.ф.-м.н., с.н.с. Урусова Р.М. и к.ф.-м.н. Урусовой Т.Э. Исходная компьютерная программа предоставлена к.ф.-м.н. Урусовой Т.Э.

Апробация результатов диссертации. Результаты выполненных исследований докладывались на научно-практической конференции «Актуальные вопросы физики, образования и экологии» (Бишкек, КРСУ, 2005), международной научной конференции «Физика и физическое образование» (Бишкек, КНУ, 2006), X международной конференции «Газоразрядная плазма и её применение» (Томск 2007), а также на научных семинарах Института физики НАН КР, физического факультета КНУ.

Публикации. Основные результаты опубликованы в виде 11 статей.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и библиографии. Работа содержит 118 страниц текста, 53 рисунка, 10 таблиц и 71 библиографических ссылок.

Основное содержание работы

Во введении дана общая характеристика работы. Показана актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, положения диссертации, выносимые на защиту, научная новизна полученных результатов расчета и их практическая значимость.

В 1-й главе представлен краткий литературный обзор состояния вопроса в области экспериментальных и теоретических исследований катодных узлов различной геометрической формы.

Во 2-й главе представлены математическая модель электрической дуги и обсуждается постановка граничных условий в рамках метода фиктивных областей. Проводится конечно-разностная аппроксимация дифференциальных уравнений и описывается итерационный метод решения разностного аналога. Обсуждаются результаты тестирования математической модели и методики численного расчета. Численное исследование потоков электродуговой плазмы проводится в рамках системы уравнений, записанной в приближении частичного локального термодинамического равновесия (Энгельшт В.С., Жайнаков А., Лелевкин В.М.).

При записи уравнений используется цилиндрическая система координат (z, r, θ) при условии $\partial/\partial\theta = 0$, поскольку в настоящей работе принято, что все рассматриваемые задачи обладают осевой симметрией.

Система уравнений включает в себя:

уравнение неразрывности газа

$$\operatorname{div}(\rho \mathbf{U})=0, \quad (1)$$

уравнение неразрывности электронного газа

$$\operatorname{div}[N_e(\mathbf{U} + \mathbf{U}_d + \mathbf{U}_t + \mathbf{U}_a)]=R_e, \quad (2)$$

уравнения движения по координатам z и r соответственно

$$\operatorname{div}[m(N_i+N_a)\mathbf{U}u]=\operatorname{div}(\mu \operatorname{grad}u) - \partial P/\partial z + \mu_0 j_r H_\theta + s_z + (\rho - \rho_\infty)g, \quad (3)$$

$$\operatorname{div}[m(N_i+N_a)\mathbf{U}v]=\operatorname{div}(\mu \operatorname{grad}v) - \partial P/\partial r + \mu_0 j_z H_\theta + s_r, \quad (4)$$

уравнение энергии электронного газа

$$\operatorname{div}[N_e(\mathbf{U}+\mathbf{U}_d+\mathbf{U}_t+\mathbf{U}_a)(\frac{5}{2}kT_e+U_i)] = \operatorname{div}(\lambda_e \operatorname{grad}T_e) + j^2/\sigma - \psi - B(T_e - T), \quad (5)$$

уравнение энергии тяжелых частиц

$$\operatorname{div}[\frac{5}{2}kT(N_i+N_a)\mathbf{U}] = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad}T) + B(T_e - T), \quad (6)$$

$$\text{уравнения Максвелла} \quad \operatorname{rot}\mathbf{H} = \mathbf{j}, \operatorname{rot}\mathbf{E} = 0, \operatorname{div}\mathbf{H} = 0, \quad (7)$$

$$\text{закон Ома} \quad \mathbf{E} = \mathbf{j}/\sigma, \quad (8)$$

$$\text{закон Дальтона} \quad P/kT = N_i + N_a + N_e T_e/T. \quad (9)$$

Электромагнитная часть задачи решается по известной методике с использованием функции электрического тока $\chi(r,z)$, автоматически удовлетворяющей уравнению сохранения электрического тока $\operatorname{div}\mathbf{j} = 0$ и определяемой соотношениями $\partial\chi/\partial z = -j_r r$, $\partial\chi/\partial r = j_z r$.

Принято, что протекающие процессы являются стационарными, течение ламинарным, излучение объемным; однократно ионизованная плазма атмосферного давления представляет собой сплошную квазинейтральную среду. Приэлектродные процессы не рассматриваются.

В уравнениях (1–9) использованы следующие обозначения: ρ – плотность плазмы, ρ_∞ – плотность окружающего холодного газа, λ_e – теплопроводность электронного газа, λ – теплопроводность газа тяжелых частиц или материала электродов, μ – вязкость, σ – электропроводность плазмы или материала электродов, ψ – интенсивность излучения, m – масса атома, N_e , N_i , N_a – концентрации электронов, ионов и атомов соответственно; $R_e = (K_i N_e N_a - K_r N_e^2 N_i)$ – скорость генерации электронов, где K_i , K_r – константы ударной ионизации и трехчастичной рекомбинации соответственно, U_i – энергия ионизации газа, k – постоянная Больцмана, B – коэффициент энергообмена между электронами и тяжелыми частицами, g – ускорение свободного падения, q_e – заряд электрона, μ_0 – магнитная постоянная. Векторы \mathbf{U} , \mathbf{E} , \mathbf{j} , \mathbf{H} обозначают соответственно скорость газа, напряженность электрического поля, плотность электрического тока и напряженность магнитного поля, T – температура тяжелых частиц или электродов, T_e – температура электронного газа, P – давление; s_z , s_r – дополнительные к $\operatorname{div}(\mu \operatorname{grad}u)$, $\operatorname{div}(\mu \operatorname{grad}v)$ вязкие слагаемые, \mathbf{U}_d , \mathbf{U}_t , \mathbf{U}_a – векторы скоростей дрейфа электронов, термо- и амбиполярной диффузии соответственно, определяемые по формулам:

$$\mathbf{U}_d = \mathbf{j}/(q_e N_e), \quad \mathbf{U}_t = - (0.5/T_e) D_e \operatorname{grad}T_e, \quad \mathbf{U}_a = - (D_e/N_e) \operatorname{grad}N_e,$$

где D_e – коэффициент амбиполярной диффузии электронов.

Коэффициенты переноса и теплофизические свойства двухтемпературной аргоновой плазмы рассчитываются по известным формулам и уравнениям.

Исходные уравнения (1–9) после несложных преобразований записываются, следуя С. Патанкару, в виде обобщенного уравнения:

$$\left[\frac{\partial(\alpha r v \Phi)}{\partial r} + \frac{\partial(\alpha r u \Phi)}{\partial z} \right] = \frac{\partial}{\partial r} \left(\beta \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\beta \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) + \gamma \quad (10)$$

где Φ – одна из неизвестных χ , T_e , N_e , T , u , v . Конкретный вид коэффициентов α , β , γ зависит от смысла переменной Φ .

Отметим, что обобщенное уравнение (10) не используется в явном виде для расчета давления P , которое вычисляется с помощью специального алгоритма SIMPLE'R (С. Патанкар).

Постановку граничных условий рассмотрим на примере открытой дуги, горящей между неплавящимися конусным катодом и плоским анодом. Обобщенное дифференциальное уравнение (10) является уравнением эллиптического типа и граничные условия задаются по всему периметру расчетной области ABCD (рис. 1а), включающей в себя столб дуговой плазмы и электроды. Наличие электродов в расчетной схеме учитывается методом фиктивных областей (Вабищевич П.Н. Смагулов Ш.С., Орунханов М.К), адаптированным для расчета характеристик электрической дуги (Жайнаков А., Урусова Т.Э.).

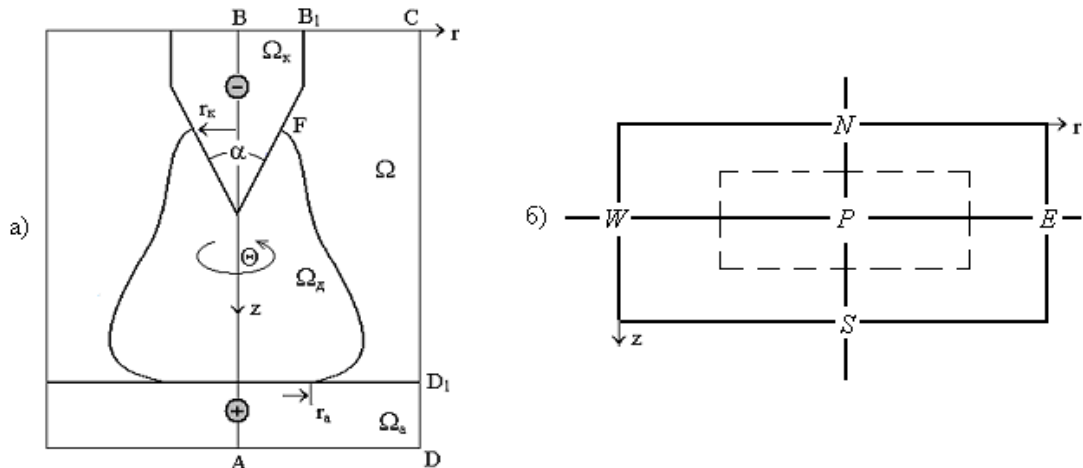


Рис. 1. а) к постановке граничных условий в расчетной области Ω (ABCD), охватывающей области катода Ω_k , анода Ω_a и столба дуги Ω_d ;
б) фрагмент сетки с узловыми точками W, N, E, S, P .

Для рассчитываемых переменных граничные условия, задаваемые на границе Γ прямоугольной расчетной области Ω , охватывающей области катода Ω_k , анода Ω_a и столба дуги Ω_d приведены в таблице 1.

Из таблицы 1 видно, что для всех переменных, за исключением функции электрического тока χ , метод фиктивных областей позволяет избежать задания граничных условий на криволинейных границах электродов, что существенно облегчает проведение численных расчетов.

Задание же условия $\chi = \text{const}$ на криволинейной в общем случае границе FB_1 не представляет вычислительных трудностей.

Таблица 1. Граничные условия

	χ	T_e	N_e	T	P	$\mathbf{U}(u, v)$
BC	$\partial\chi/\partial z = 0$	$T_e = T_e^{\min}$	$N_e = N_e^{\min}$	$\partial T/\partial z = 0$	1	$\partial\mathbf{U}/\partial z = 0$
CD	$\chi = I/2\pi$	$T_e = T_e^{\min}$	$N_e = N_e^{\min}$	$\partial T/\partial r = 0$	1	$\partial\mathbf{U}/\partial r = 0$
AD	$\partial\chi/\partial z = 0$	$T_e = T_e^{\min}$	$N_e = N_e^{\min}$	$\partial T/\partial z = 0$	1	0
AB	$\chi = 0$	$\partial T_e/\partial r = 0$	$\partial N_e/\partial r = 0$	$\partial T/\partial r = 0$	$\partial P/\partial r = 0$	$\partial u/\partial r = 0$; $v = 0$
FB_1	$\chi = I/2\pi$	–	–	–	–	–

Поскольку используемая математическая модель не рассматривает приэлектродные процессы, то привлекается дополнительная информация о дуговом разряде. Так, например, для дуги с конусным катодом привлекается значение радиуса r_k дуги на катоде (см. рис. 1а), определяемое по результатам экспериментов.

Конечно-разностная аппроксимация уравнений и метод решения дискретного аналога проводятся в соответствии с методикой С. Патанкара.

Расчетная область заменяется прямолинейной ортогональной сеткой (рис.1б) и разбивается на конечное число непересекающихся контрольных объемов (штриховые линии) таким образом, что каждая узловая точка содержится в одном контрольном объеме. В результате конечно-разностной аппроксимации обобщенного дифференциального уравнения (10) получаем дискретный аналог для рассчитываемой переменной Φ :

$$a_P \Phi_P = a_E \Phi_E + a_W \Phi_W + a_N \Phi_N + a_S \Phi_S + \Gamma \quad (11),$$

связывающий значение Φ в центральном узле P со значениями переменной Φ в соседних узлах E, W, S, N .

Дискретный аналог решается итерационным методом до получения сходимости; условие окончания итерационного процесса:

$$\max |(\Phi_p^\tau - \Phi_p^{\tau-1}) / \Phi_p^{\tau-1}| < 10^{-3} \div 10^{-5}, \tau - \text{номер итерации.}$$

В 3-й главе представлены результаты численного анализа электрической дуги с цилиндрической, конусной и сферической формой катода, а также катодом с профилированной поверхностью. Рассмотрена кольцевая привязка дуги на торце сплошного цилиндрического катода.

3.1. Конусная, цилиндрическая и сферическая формы катода.

Рассматривается открытая электрическая дуга силой тока $I = 100$ А и межэлектродным расстоянием $L = 5$ мм, горящая в аргоне атмосферного давления. Катодом является неплавящийся вольфрамовый стержень

радиусом 1,5 мм с заточкой токопроводящей поверхности под конус с углом $\alpha = 30^0, 60^0, 90^0$ и 120^0 .

Численные значения радиуса r_k дуги на катоде взяты по результатам экспериментов (Ерошенко Л.Е., Мечев В.С.), в которых по фотографиям дуги при различных углах заточки катода измерялся радиус r_k основания конуса, окруженного дуговой плазмой.

На аноде полагается свободная привязка, площадь которой определяется в процессе численного решения. Во всех вариантах анодом является плоская неплавящаяся медная пластина толщиной $h = 1$ мм.

Из результатов расчета следует, что для всех рассматриваемых значений углов заточки конусного катода процессы тепломассообмена в столбе дуги качественно близки между собой.

С уменьшением угла заточки α возрастают температура и скорость потока плазмы, давление вблизи электродов, плотность электрического тока. Это видно из таблицы 2, где приведены характеристики дуги для различных углов заточки α конусного катода: максимальные значения температуры электронного газа T_e , скорости u плазмы и удельного теплового потока на анод q_a ; давления вблизи поверхности катода P_c и анода P_a , плотности тока j вблизи катода.

Таблица 2

α^0	T_e кК	u м/с	q_a МВт/м ²	P_c Па	P_a Па	j 10 ⁶ А/м ²	S_j мм ²
30	25	270	47	410	300	118	1,1
60	15,4	83	33	160	89	57	3,1
90	14,3	68	32	152	71	43	3,6
120	12,6	52	32	125	56	35	4,3

Анализ результатов расчетов показал также, что для тепловых и электрических характеристик – температуры T , плотности тока j_z и напряженности электрического поля E_z наибольшее влияние угла заточки наблюдается на начальном участке столба дуги при $0 < z < 1$ мм. Вниз по потоку при $z > 1$ мм численные значения T , E_z и j_z практически совпадают. Для динамических характеристик плазмы – скорости и давления влияние угла заточки заметно на протяжении всего столба дуги.

Численные значения характеристик дуги для углов заточки в диапазоне $60^0 \div 120^0$ близки между собой, однако заметно отличаются от соответствующих значений для угла заточки $\alpha = 30^0$.

Результаты численного исследования качественно согласуются с опытными данными (Мечев В.С., Ерохин А.А), а также с результатами расчетов (Энгельшт В.С., Козлов П.В.), где в рамках феноменологической модели проведено исследование влияния угла заточки неплавящегося

конусного катода на характеристики начального участка аргоновой дуги атмосферного давления. Отмечается, что уменьшение угла заточки приводит к концентрации сил Ампера в узкой приосевой области, что обуславливает интенсивное вовлечение газа в столб дуги, увеличение осевой скорости, а также потоков тепла и импульса на начальном участке.

Рассмотрим, почему для конусного катода при $\alpha = 30^\circ$ при прочих одинаковых параметрах разряда площадь токопроводящей поверхности S_j существенно меньше (в 3–4 раза) по сравнению с углами заточки в диапазоне $60^\circ \div 120^\circ$. На рис. 2 представлены фрагменты векторного поля электромагнитных сил \mathbf{F}_{mag} , воздействующие на дуговую плазму и изолинии электрического тока I вблизи поверхности катода. Видно, что электрический ток в дуговой плазме течет практически по нормали к образующей конуса, поэтому магнитное поле \mathbf{H} тока направлено (правило буравчика) по нормали от плоскости рисунка к читателю. Тогда электромагнитные силы $\mathbf{F}_{\text{mag}} \sim (\mathbf{j} \times \mathbf{H})$ будут направлены (правило левой руки) параллельно образующей конуса с периферии внутрь разряда.

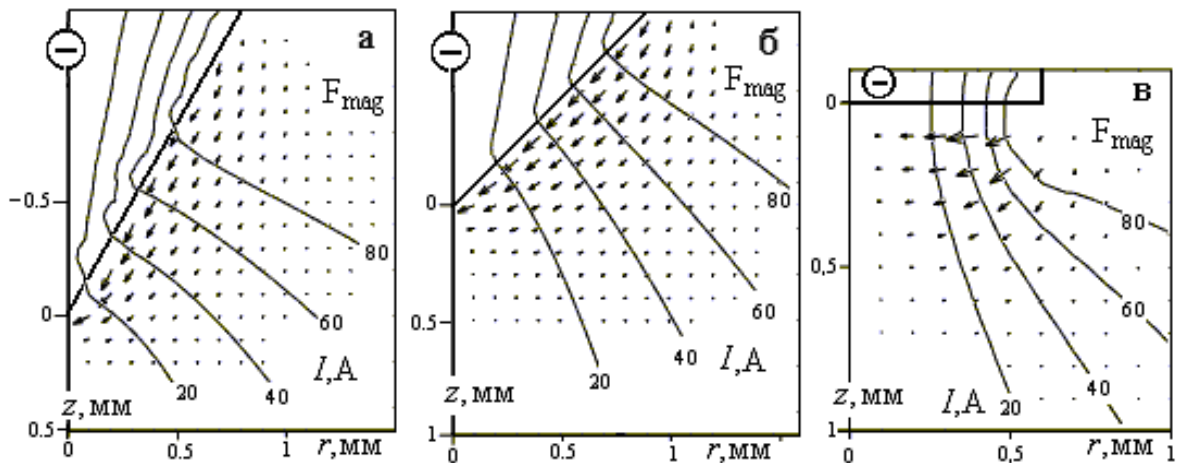


Рис. 2. Фрагменты векторного поля электромагнитных сил \mathbf{F}_{mag} и линий электрического тока I вблизи поверхности катода; а) $\alpha = 60^\circ$; б) $\alpha = 90^\circ$; в) $\alpha = 180^\circ$; $I = 100$ А, $L = 5$ мм.

Таким образом, на плазму воздействуют две компоненты электромагнитных сил – радиальная и аксиальная, соотношение между которыми зависит от величины угла заточки α . При значениях $\alpha < 90^\circ$ аксиальная компонента электромагнитных сил превышает радиальную компоненту, а при $\alpha > 90^\circ$ наблюдается противоположное соотношение.

Подобное направление воздействия \mathbf{F}_{mag} в дуге с конусным катодом отличается от дуги с цилиндрическим катодом. В последнем случае аксиальная компонента \mathbf{F}_{mag} весьма незначительна, и «работает» преимущественно радиальная компонента (см. рис. 2в), создавая в приосевой

области зону повышенного давления, аксиальный градиент которого и является основной причиной ускорения плазмы (Меккер Г.).

Сказанное позволяет сделать вывод, что в дуге с конусным катодом причиной ускорения плазмы является не только воздействие радиальной компоненты F_{mag} , создающей аксиальный градиент давления, но и непосредственное ускорение потока плазмы аксиальной компонентой F_{mag} вдоль образующей конуса. Вовлечение в дугу окружающего холодного газа вдоль образующей конуса является причиной смещения опорного пятна дуги к вершине конуса и, тем самым, уменьшения площади токопроводящей поверхности; смещение пятна будет тем больше, чем меньше угол заточки конусного катода. По-видимому, указанная причина (по крайней мере, одна из причин) и обуславливает малое значение площади токопроводящей поверхности S_j для угла заточки $\alpha = 30^\circ$.

Результаты расчета позволяют сделать вывод, что переход от цилиндрической формы катода к конусной форме и уменьшение угла заточки α приводит не только к концентрации сил Ампера в узкой приосевой области, но и обуславливает изменение направления воздействия электромагнитных сил – с уменьшением α все более возрастает аксиальная компонента электромагнитных сил.

Далее рассмотрим электрическую дугу с катодами различной геометрической формы при условии равенства площадей токопроводящей поверхности S_j катода (и остальных внешних параметров разряда). Сравнение расчетных данных позволит оценить влияние формы катода на характеристики потока дуговой плазмы.

Выполнены расчеты электрической дуги с конусным ($\alpha = 30^\circ$), цилиндрическим ($\alpha = 180^\circ$) и сферическим катодом. Для конусного катода с углом заточки $\alpha = 30^\circ$ радиус катодной привязки дуги задается по результатам эксперимента $r_k = 0,3$ мм. Для цилиндрического и сферического катодов радиусы привязки дуги полагаются равными соответственно $r_k = 0,6$ мм и $r_k = 0,4$ мм. При указанных значениях r_k площадь привязки дуги S_j на цилиндрическом и сферическом катодах $S_j = 1,1$ мм² равна значению S_j для конусного катода.

Анализ результатов (таблица 3) показывает, что во всех трех случаях независимо от геометрической формы катода характеристики потока плазмы весьма близки между собой: различие составляет около 5 %.

$I = 100$ А, $L = 5$ мм, $S_j = 1,1$ мм². Таблица 3

Форма катода	T_e кК	u м/с	q_a МВт/м ²	P_c Па	P_a Па	j 10 ⁶ А/м ²
конус 30 ⁰	25	270	47	410	300	118
сфера	24	272	48	600	290	110
цилиндр	24	273	48	820	280	105

Различия в характеристиках наблюдаются только на участке разгона и в его протяженности, которая для всех трех вариантов составляет около 1 мм и не столь значительна по сравнению с длиной дуги. Это видно из рис. 3, где представлены осевые распределения градиента давления $\partial P/\partial z$, аксиальной скорости u и температуры электронов T_e для дуги с конусным и цилиндрическим катодом.

Обращает на себя внимание, что в случае цилиндрического катода протяженность участка разгона, где «работает» градиент давления $\partial P/\partial z$, в два раза больше, а величина $\partial P/\partial z$ превышает в 2–3 раза соответствующее значение для конусного катода (см. рис. 3). Поскольку аксиальный градиент давления и является причиной ускорения плазмы, то, казалось бы, скорость течения плазмы в дуге с конусным катодом должна быть ниже по сравнению с цилиндрическим катодом.

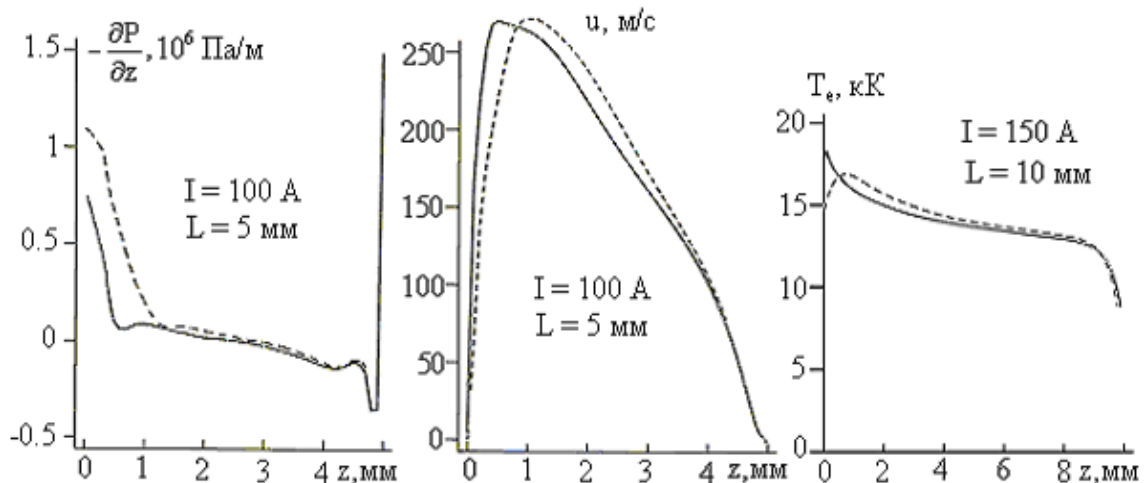


Рис. 3. Распределения осевых значений градиента давления $\partial P/\partial z$, скорости u дуговой плазмы и температуры электронов T_e для дуги с конусным (сплошная) и цилиндрическим (штриховая) катодом

Однако этого не наблюдается: скорости течения плазмы в обоих случаях примерно одинаковы. В данном случае меньшее значение $\partial P/\partial z$ вблизи катода конусной формы компенсируется тем, что переход от цилиндрической формы катода к конусной форме обуславливает, как отмечалось выше, изменение направления воздействия электромагнитных сил, а именно: возрастает аксиальная компонента F_{mag} , непосредственно ускоряющая поток плазмы.

При больших токах и радиусах катода различие в характеристиках дуги становится заметным. Действительно, рассмотрим дугу с конусным ($\alpha = 90^\circ$) и цилиндрическим катодом при значениях силы тока $I = 150$ A и межэлектродного расстояния $L = 5$ и 10 мм. Для конусного и

цилиндрического катодов радиусы привязки дуги полагаются равными соответственно $r_k = 1$ мм и $r_k = 1,2$ мм; в этом случае площадь привязки дуги примерно одинаковая и составляет $S_j \approx 4,5$ мм².

Анализ результатов расчета показал, что для обоих значений L различия наблюдаются только на участке разгона и в его протяженности, которая составляет 1 – 2 мм, а расчетные характеристики весьма близки между собой: различие не превышает 10 %. С увеличением тока дуги от 150 до 200 А и радиуса r_k конусного катода от 1 до 1,5 мм и цилиндрического от 1,2 до 1,8 мм (при одинаковой площади катодной привязки) различия между расчетными характеристиками дуги возрастают до ≈ 20 %. При дальнейшем увеличении силы тока до 350 А и радиуса r_k конусного катода до 2 мм и цилиндрического до 2,5 мм количественные различия становятся существенными и достигают 250 %.

Таким образом, результаты расчета позволяют сделать вывод, что в дуговых разрядах силой тока до ≈ 200 А со стержневыми катодами различной геометрии (конус, сфера, цилиндр, притупленный конус) радиусом не более ≈ 2 мм, характеристики плазмы будут близки между собой при условии равенства площадей токопроводящих поверхностей S_j . Различия в характеристиках наблюдаются только на участке разгона и в его протяженности, которая незначительна по сравнению с длиной дуги.

Данный вывод согласуется и дополняет результаты расчетов (Энгельшт В.С., Козлов П.В.), показавших слабое влияние угла заточки на температурное поле дуги при малых (25 А) токах.

3.2. Катод с профилированной поверхностью. Рассчитывается дуга при следующих внешних параметрах: сила тока $I = 500$ А, длина и внешний радиус катода (рис. 4) равны соответственно $l = 6$ мм и $R_k = 4$ мм. Полагалось, что привязка дуги осуществляется на токоведущей поверхности ABC в каверне радиусом $r_0 = 3$ мм и глубиной $h = 5$ мм. Участки каверны АВ и ВС являются эллипсоидальной и цилиндрической поверхностями соответственно, толщина стенки CD принята равной 1 мм.

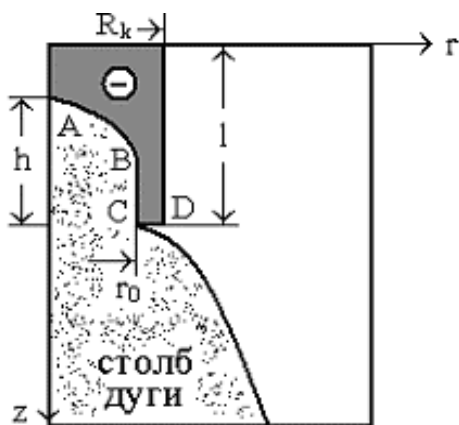


Рис. 4. Схема расчетной области для дуги с профилированной поверхностью ABC катода

В данном случае геометрия катода качественно соответствует условиям экспериментов (Фридланд М.Г., Григоренко Г.М., Мечев В.С.).

Анализ результатов расчета позволяет отметить следующие особенности. Вследствие вязкого взаимодействия между внешним потоком газа, вовлекаемого в столб дуги электромагнитными силами, и газа в каверне последний приходит в движение – в каверне формируется тороидальный вихрь (рис. 5а).

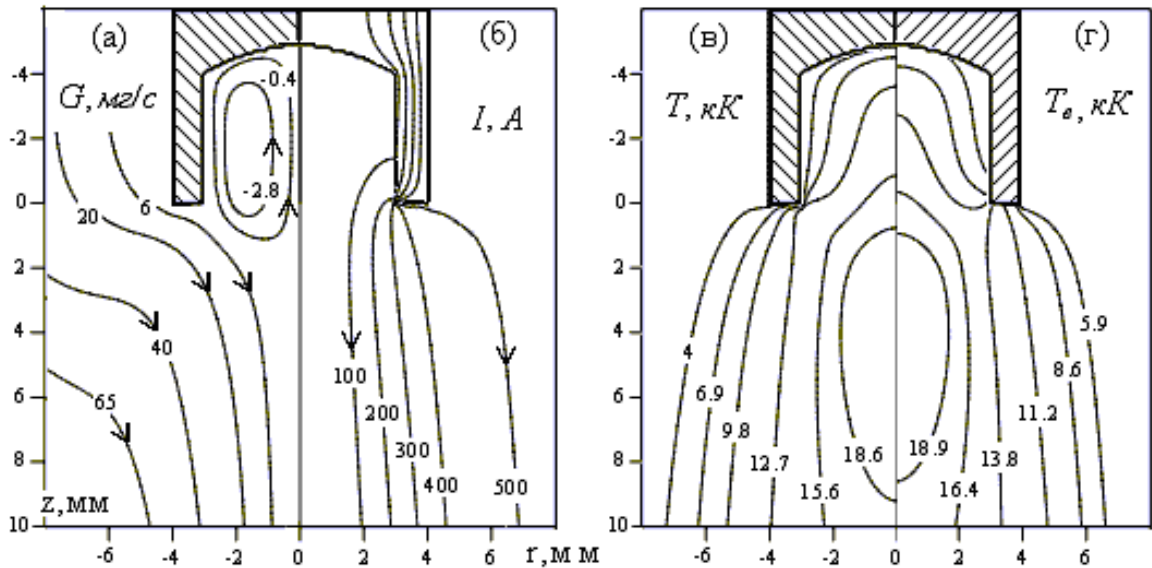


Рис. 5. а) течение газа G ; б) течение электрического тока I ; в) температура газа T ; г) температура электронов T_e ; $I = 500$ А.

Основная часть (около 80%) тока протекает не через приосевую область, а периферийную поверхность каверны (рис. 5б), что обусловлено большей (на 2–3 порядка) электропроводностью вольфрама по сравнению с электропроводностью плазмы. Как следствие, вблизи этой поверхности наблюдается увеличение температуры дуговой плазмы (рис. 5в, г).

Экспериментальные исследования показывают следующее: как только на поверхности катода появляется каверна определенного размера, характер массопереноса существенно меняется и удельная эрозия материала катода становится минимальной. Принимая во внимание результаты расчета, можно предположить, что низкая эрозия обусловлена формированием зоны циркуляции газа, что препятствует выносу материала катода в столб дуги и способствует снижению эрозии катода.

Далее рассмотрим результаты расчета катодного узла, качественно соответствующего следующей конструкции (Стенин В.В). Катод в виде вольфрамового стержня диаметром 5 мм запрессован в медную обойму диаметром 30 мм. Сила тока составляет 400 А, дуга обдувается потоком газа со скоростью 2 м/с. Установлено, что эрозия катода происходит в основном в

периферийной кольцевой зоне в виде канавки, окружающей катодное пятно. В центре катодного пятна эрозии не наблюдалось, а наоборот, происходило увеличение количества материала катода.

Расчетные поля течения газа и температуры электронов представлены на рис. 6. В результате воздействия электромагнитных сил вблизи катода ($0 < z < 7$ мм) окружающий газ вовлекается с периферии в столб дуги в радиальном направлении, прогревается и движется в аксиальном направлении. От боковой границы столба дуги вплоть до изотермы ≈ 10 кК газ движется по направлению к катоду. Это обусловлено наличием торoidalного вихря, который формируется при обтекании катодной обоймы потоком газа, и этот вихрь выступает в роли своеобразной непроницаемой стенки.

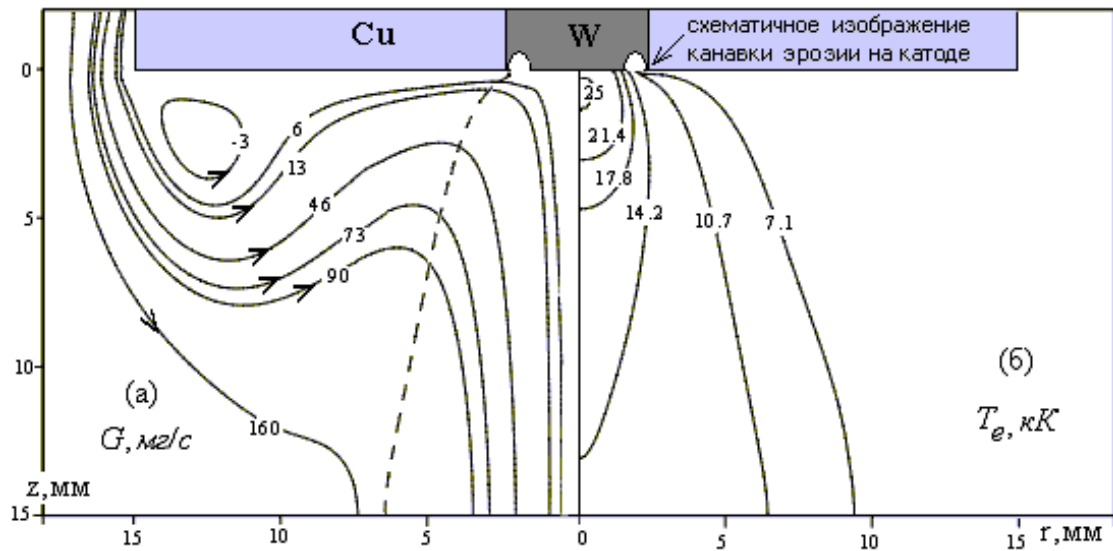


Рис. 6. а) течение газа G , штриховая – изотерма 10.7 кК;
б) температура электронов T_e .

На основании экспериментальных исследований делается следующий вывод: часть атомов, покинувших поверхность катода вне пятна, вследствие теплового движения попадает в область дугового разряда, ионизуется и в результате воздействия электрического поля возвращается на поверхность катода, что и определяет увеличение массы материала катода в области катодного пятна.

Принимая во внимание результаты расчета, данный вывод можно дополнить, а именно: не только вследствие теплового движения, но и вследствие особенностей гидродинамики течения плазмы часть атомов, покинувших поверхность катода вне пятна, будет возвращаться обратно в столб дуги, двигаясь по направлению к катоду.

3.3. Кольцевая форма привязки дуги на катоде. Привязка дуги осуществляется на торцевой поверхности катода «-» с внутренним и внешним радиусами R_0 и R_1 соответственно (рис. 7). Внутри цилиндра заключается непроводящая электрический ток вставка ($j = 0$). Анодом «+» является алюминиевая неохлаждаемая пластина толщиной h_a с боковой токосъемной поверхностью. Расположение дуги на поверхности анода определялось в процессе численного расчета. Для области анода с расчетной температурой T_a , превышающей температуру плавления алюминия $T_{пл} = 930$ К результаты условно интерпретировались как формирование сварочной ванны.

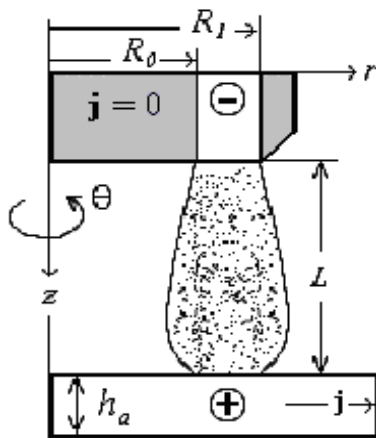


Рис. 7. Схема дугового разряда с кольцевой привязкой на торце цилиндрического катода

Формирование в аноде сквозной области с температурой $T_a > T_{пл}$ интерпретировалось как сквозное плавление анода. Подчеркнем, что плавление материала анода и гидродинамика расплава не рассматриваются, и оценка теплового состояния проводится по результатам решения тепловой задачи в аноде.

Влияние межэлектродного расстояния рассмотрено на примере дуги силой тока $I = 2$ кА в диапазоне значений межэлектродного расстояния $L = 3 \div 30$ мм. Геометрические параметры катодного узла приняты равными $R_0 = 10$ мм и $R_1 = 10,5$ мм.

Толщина алюминиевого анода составляет $h_a = 10$ мм, т.к. при меньшем значении $h_a = 8$ мм в аноде наблюдалась сквозная в аксиальном направлении область с температурой $T_a > T_{пл}$, что интерпретировалось условно как сквозное плавление. В целом распределения характеристик столба дуги для различных значений L качественно близки между собой. На рис. 8 представлены расчетные распределения дуги при $L = 3$ мм.

Течение электрического тока (рис. 8а) обуславливает джоулево тепловыделение: наиболее сильно плазма прогревается в центральной области ($r \sim 10$ мм) кольцевого разряда вблизи катода (рис. 8б).

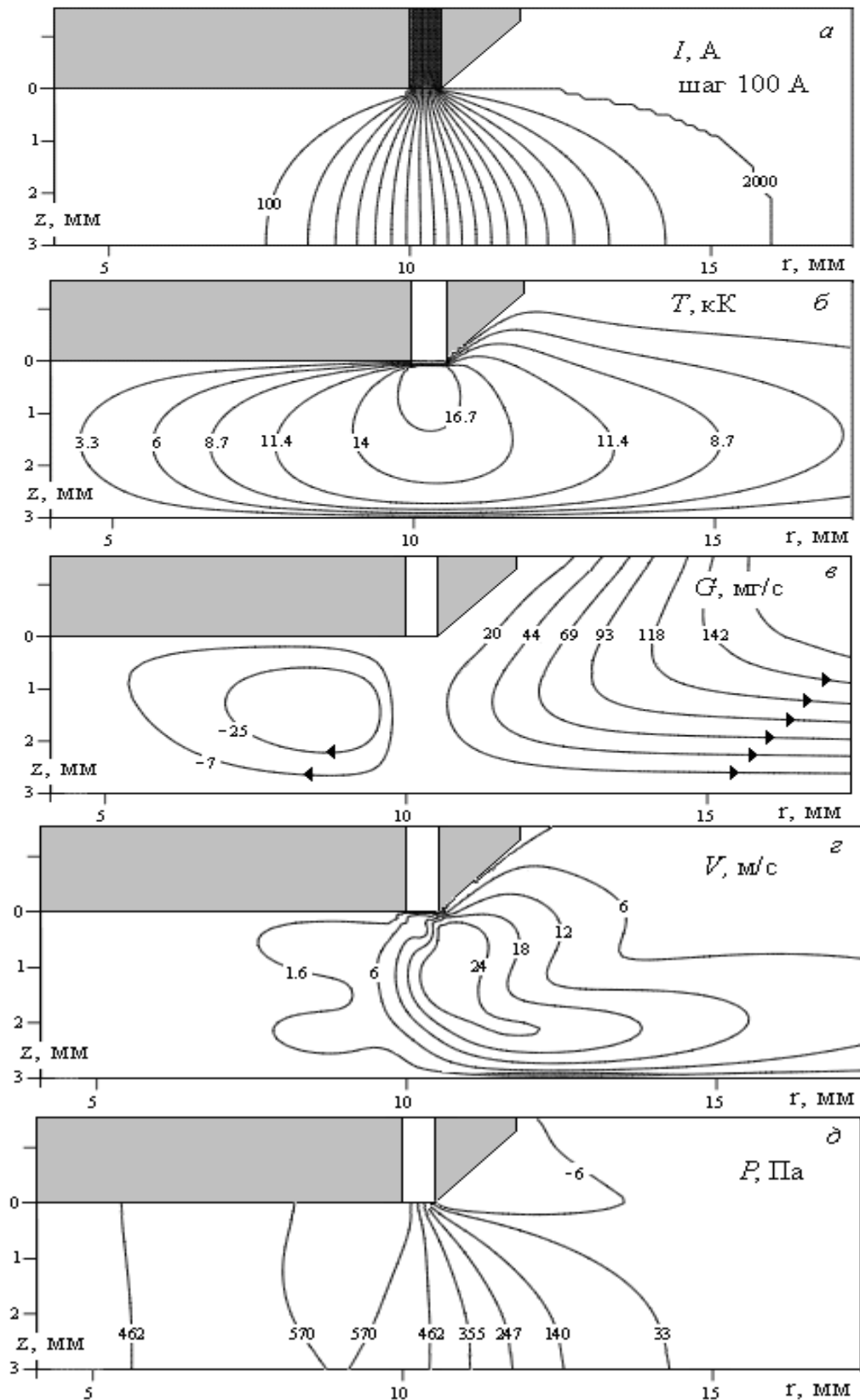


Рис. 8. Расчетные распределения характеристик дуги:

- а) изолинии электрического тока I ; б) температуры T ; в) расхода G ;
г) скорости V ; д) давления P . $I = 2$ кА, $L = 3$ мм.

Приосевая область при $0 < r < 5$ мм остается практически непроводящей электрический ток и сравнительно холодной. Окружающий газ (рис. 8в) вовлекается в дуговой разряд, прогревается, и движется в аксиальном направлении, растекаясь по поверхности анода. В межэлектродном зазоре формируется тороидальный вихрь, препятствующий проникновению окружающего газа вглубь зазора. Наибольшие значения скорости $V = \sqrt{u^2 + v^2}$ (u, v – аксиальная и радиальная компоненты вектора скорости) наблюдаются в центральной области (рис. 8г). Давление газа (рис. 8д) в центральной области повышенное $P > P_{\text{атм}}$ (пинч-эффект), а на периферии разряда вблизи катода – пониженное $P < P_{\text{атм}}$ (эффект Бернулли). Несмотря на достаточно большую силу тока $I = 2$ кА наблюдаются сравнительно низкие значения температуры $T \approx 20$ кК и скорости $V \approx 30$ м/с потока плазмы. По-видимому, это обусловлено осесимметричным пространственным рассредоточением столба дуги.

Распределение удельного теплового потока на поверхность анода и поле температуры в аноде представлены на рис. 9. Видно, что тепловой поток имеет немонокотное радиальное распределение и достигает максимального значения $q \approx 60$ МВт/м² в центральной $r \sim 10$ мм области (рис. 9а) кольцевой поверхности. В зоне анодной привязки дуги температура анода превышает температуру плавления материала и формируется «сварочная ванна» в виде кольцевой канавки глубиной $l_{\text{пл}} = 2,4$ мм, внутренним и внешним радиусами соответственно $\approx 3,5$ и $\approx 12,5$ мм (рис. 9б).

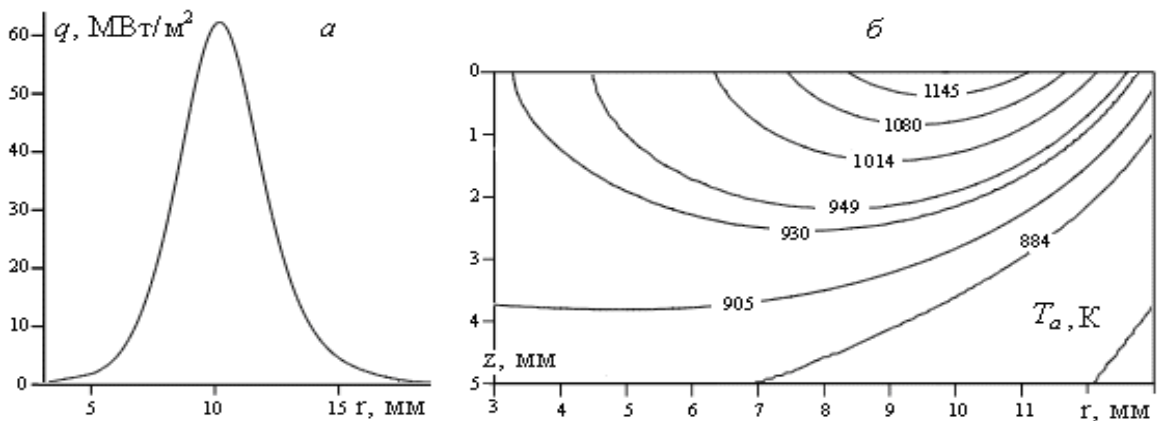


Рис. 9. Распределения удельного теплового потока q на поверхность анода (а) и изолиний температуры T_a анода (б). $L = 3$ мм, $I = 2$ кА.

С увеличением межэлектродного расстояния высокотемпературная область дуги все глубже проникает в межэлектродный зазор, где температура газа возрастает до $\approx 10 - 12$ кК. Но течение электрического тока при $r < 5$ мм по-прежнему отсутствует, а пространственная форма дуги трансформируется в трубчатую форму.

Расчетные данные для различных значений межэлектродного расстояния L представлены в таблице 4. Видно, что с увеличением L температура плазмы T практически не меняется, но скорость потока V существенно возрастает и далее при $L > 20$ мм выходит на асимптотическое значение ≈ 100 м/с. Вследствие пространственного рассредоточения столба дуги максимальные значения q и T_a уменьшаются. В тоже время глубина плавления $I_{пл}$ анода сначала возрастает, а затем уменьшается.

Наибольшая глубина плавления $I_{пл} = 5,2$ мм наблюдается для межэлектродного расстояния 10 мм, которое, по-видимому, и является близким к оптимальному значению L , несмотря на то, что при $L = 10$ мм значение q не самое большое.

Таким образом, глубина плавления зависит не только от величины q , но и от характера распределения $q(r)$ на поверхности анода.

Расчетная немонотонная зависимость $I_{пл}$ от L согласуется с опытными данными (Ерохин А.А.) для дуги со стержневым катодом.

Таблица 4. Расчетные данные для различных L . $I = 2$ кА, $h_a = 10$ мм.

L , мм	T , кК	V , м/с	T_a , К	q , МВт/м ²	Q , кВт	$I_{пл}$, мм
3	19,4	31	1210	62	18,7	2,4
5	19,7	47	1171	40	19,0	3,7
8	19,7	62	1152	29	19,3	4,9
10	19,8	67	1134	27	19,4	5,2
12	19,8	72	1113	25	19,5	4,7
15	19,8	73	1053	22	19,7	3,5
20	19,8	83	1042	21	20,1	3,4
25	19,8	87	1039	20	20,1	3,3
30	19,9	96	955	17	20,1	0,7

Влияние силы тока I на характеристики дуги и тепловое состояние анода рассмотрено на примере кольцевой дуги с межэлектродным расстоянием $L = 10$ мм в диапазоне $I = 1,8 \div 2,1$ кА; геометрические размеры катода и толщина анода $R_0 = 10$ мм, $R_1 = 10,5$ мм, $h_a = 10$ мм.

С ростом силы тока возрастают джоулев нагрев и воздействие электромагнитных сил, ускоряющих поток плазмы, мощность электрической дуги и, следовательно, тепловое воздействие последней на поверхность анода.

Расчетные значения для различных значений силы тока приведены в таблице 5. Анализ результатов показывает, что при значении $I = 1,8$ кА температура анода не превышает температуру плавления материала и сварочной ванны не образуется. Дальнейший рост силы тока приводит к увеличению мощности дуги и ее теплового воздействия на анод. Температура

анода и глубина плавления возрастают и уже при значении тока $I = 2,1$ кА происходит его сквозное плавление.

Таблица 5. Расчетные данные для различных значений силы тока I .
 $L = 10$ мм, $h_a = 10$ мм.

I , кА	T , кК	V , м/с	T_a , К	q , МВт/м ²	Q , кВт	$l_{пл}$, мм
1,8	14,9	49	922	23	17,2	отсутствие
1,9	15,3	55	1009	25	18,3	1,3
2,0	19,8	67	1134	27	19,4	5,2
2,1	20,9	74	1197	29	20,6	сквозное

Обращает на себя внимание высокая чувствительность теплового состояния анода к изменению силы тока: различие значений 1,8 и 2,1 кА невелико и составляет около 15 %, но если в первом случае анод вообще не плавится, то в последнем случае происходит его сквозное плавление. В данном случае это обусловлено тем, что при значении $I = 1,8$ кА температура анода уже близка к температуре плавления материала и, следовательно, сам материал – к началу фазовых превращений.

Влияние радиальных размеров кольцевого катода рассмотрено на примере дуги силой тока $I = 2$ кА, межэлектродным расстоянием $L = 10$ мм в диапазоне значений R_0 , R_1 кольцевого катода, указанных в таблице 6.

Поскольку изменение площади катодной привязки дуги (при прочих неизменных параметрах) влечет за собой изменение характеристик потока плазмы, то значения R_0 и R_1 задавались таким образом, что бы площадь катодной привязки в рассматриваемых вариантах была примерно одинаковой. Толщина анода принята равной $h_a = 15$ мм, поскольку при меньшем значении $h_a = 10$ мм в большинстве случаев наблюдалось сквозное плавление анода.

Результаты расчета приведены в табл. 6. Анализ показывает, что уменьшение радиальных размеров катода приводит к локализации столба дуги, увеличению температуры и скорости потока плазмы. Как следствие, возрастают тепловое воздействие дуги на анод, температура анода и глубина плавления.

Таблица 6. Расчетные данные для различных значений R_0 , R_1 радиуса катода. $I = 2$ кА, $L = 10$ мм, $h_a = 15$ мм.

№	$R_0 - R_1$ мм	T кК	V м/с	T_a К	q МВт/м ²	Q кВт	$l_{пл}$ мм
1	10 – 10,5	19,8	67	860	27	19,4	отсутствие
2	8,4 – 9	22,3	100	1060	36	20,1	1,5
3	7,3 – 8	23,7	121	1196	43	20,7	3,5
4	5,0 – 6	24,9	192	2020	62	22,6	9,7
5	3,8 ÷ 5	25	223	2473	78	23,8	сквозное

Выводы

На основе математического моделирования рассмотрено влияние геометрической формы неплавящегося катода на теплофизические процессы и характеристики столба стационарной электрической дуги.

Выполнен расчет характеристики электрической дуги с катодом цилиндрической, конусной и сферической формы.

Установлено, что переход от цилиндрической формы катода к конусной форме и уменьшение угла заточки обуславливает изменение направления воздействия электромагнитных сил: с уменьшением угла заточки все более возрастает аксиальная компонента электромагнитных сил, непосредственно ускоряющая поток плазмы.

В дуговых разрядах силой тока до ≈ 200 А со стержневыми катодами различной геометрии (конус, сфера, цилиндр, притупленный конус) радиусом не более ≈ 2 мм, характеристики плазмы будут близки между собой при условии равенства площадей токопроводящих поверхностей; различия в характеристиках наблюдаются только на участке разгона и в его протяженности, которая незначительна по сравнению с длиной дуги.

Проведен расчет характеристик электрической дуги с катодом, имеющим профилированную поверхность – каверну, либо кольцевой выступ.

Показано, что в катоде с профилированной поверхностью формируется зона циркуляция газа. По-видимому, циркуляция газа вблизи профилированной поверхности катода препятствует «уходу» испарившегося материала катода в столб дуги. При этом обратный поток плазмы способствует транспортировке испарившегося материала обратно в область катодного пятна.

При определенной организации течения плазмы вблизи катода с целью вовлечения окружающего газа в столб дуги и его движения по направлению к катоду часть атомов, покинувших поверхность катода вне пятна, будет возвращаться обратно в столб дугового разряда.

Выполнен численный анализ характеристик электрической дуги с кольцевой привязкой на торцевой поверхности цилиндрического катода. Выявлена немонотонная зависимость глубины плавления анода от межэлектродного расстояния – глубина плавления сначала возрастает с ростом L , а затем уменьшается. Аналогично дуге со стержневым катодом, существует некоторое оптимальное значение межэлектродного расстояния, обеспечивающее максимальное тепловое воздействие кольцевой дуги на поверхность обрабатываемого изделия.

Увеличение силы тока или уменьшение радиуса кольцевой катодной привязки приводят к увеличению теплового воздействия дуги на анод.

Сравнение результатов расчета с известными экспериментальными и расчетными данными показывает их удовлетворительное согласие и свидетельствует в целом о достоверности полученных результатов.

Список опубликованных работ

1. Жайнаков А., Урусов Р.М., Урусова Т.Э., Нам И.Э. К исследованию влияния формы катода на характеристики электрической дуги // Проблемы автоматики и управления. – Бишкек: Илим, 2004. – С.107-116.
2. Жайнаков А., Урусов Р.М., Урусова Т.Э., Нам И.Э. Расчет гидродинамики электродуговой плазмы вблизи профилированной поверхности катода // Известия НАН КР. № 1. – Бишкек, 2004. – С.49-54.
3. Жайнаков А., Урусов Р.М., Урусова Т.Э., Нам И.Э. Расчет электрической дуги с кольцевой привязкой на торце цилиндрического катода // Известия НАН КР. № 4. – Бишкек, 2004. – С.35-40.
4. Урусов Р. М., Урусова Т. Э., Нам И. Э. К тестированию методики расчета электрической дуги в многосвязной области // Вестник КРСУ. Т.5. № 1. – Бишкек, 2005. – С.15-18.
5. Жайнаков А., Урусов Р.М., Урусова Т.Э., Нам И.Э. Численная реализация дугового разряда с кольцевой привязкой на торце цилиндрического катода // Вестник КРСУ. Т.5. № 1. – Бишкек, 2005. – С.19-22.
6. Нам И.Э. Численный анализ влияния внешних параметров на характеристики кольцевой электрической дуги // Проблемы автоматики и управления. – Бишкек: Илим, 2005. – С.107-113.
7. Урусов Р.М., Нам И.Э. Оценка влияния геометрии стержневого катода на характеристики столба электрической дуги // Вестник КНУ им.Ж.Баласагына, вып.3. – Бишкек, 2006. – С.170-173.
8. Жайнаков А., Урусов Р.М., Нам И.Э. К оценке теплового воздействия столба кольцевой электрической дуги на анод // Известия НАН КР. № 1. – Бишкек, 2007. – С.35-40.
9. R.M. Urusov, I.E. Nam To the Assessment of the Impact of the Cathode Geometrical Shape on Arc Plasma Flow Parameters. 10th International Conference "Gas Discharge Plasmas and Their Applications" // Томск Изв. Вузов. Физика 2007. – №9. Приложение. С. 130.
10. Нам И. Численное исследование влияния формы катода на характеристики электрической дуги // Вестник КазНУ им. Аль-Фараби, Алматы, 2007. – С.177-182.
11. Нам И. Математическое моделирование оптимизации работы стержневого катода электрической дуги // Проблемы управления и информатики. – Бишкек: Илим, 2007. – С.96-100.

Нам Инна Эроновнанын

«Электр жаасынын мүнөздөмөсүнө сандык изилдөөнүн катоддун геометриялык формага таасир этүүсү»

темада физика-математика илимдеринин жылуулук физикасы жана жылуулук техника назарияти – 01.04.14 адистиги боюнча кандидаты окулуштуулук даражасына талапкер диссертациялык ишине

НУСКА

Ток этер сөздөр: турактуу электр жаасы, математикалык моделдөө, катоддун геометриялык калыбы, жаанын сырткы мүнөздөмөлөрү, жаа плазмасынын эсептелү үч ү мүнөздөмөлөрү.

Математикалык моделдөөнүн негизинде эрибеген катоддун геометриялык калыбынын турактуу электр жаасынын түркүгүнүн мүнөздөмөлөрүнө тийгизген таасири каралган. Төмөнкүлөр такталды:

- катоддун цилиндр калыбынан конус калыбына өтүшү жана курчутуу бурчунун кичирейиши электромагнит күчтөрүнүн таасир багыттын өзгөрүшүн шарттайт, баса айтсак: курчутуу бурчунун кичирейиши мене плазма агымын түздөн-түз ылдамдатуучу электромагнит күчтөрүнүн аксиалдык түзүүчүсү чоңоет;

- радиусу 2 мм ден чөң эмес өзөк катоддор ар түрдүү геометриялык калыпта (конус, сфера, цилиндр, туюк цилиндр) болуп, 200 А ге чейинке ток күчү өтүп, жаа разряды түзгөн плазманын мүнөздөмөлөрү ток өткөрүүчү беттердин аянттары бирдей учурда өтө жакын болушат;

- катоддун чуңкурчасында газ уюлу пайда болуп, бууланган катод бөлүкчөлөрүнүн жаа түркүчүнө кетүүсүнө тоскоолдук кылат. Катоддо чукул чөйрөдөгү газды жаа түркүчүнө иштөө үчүн плазма агымын жөндөп жана аны катодду карай багытаса, чуңкурчадан сырт катод беттерин таштап кеткен атомдордун бир тобу разряд жаасынын түркүчүнө кайрылат;

- туюк цилиндр катоддун өзөгүнө байланган шакек түзгөн жаанын анодго болгон жылуулук таасири шакекче боюнча бөлүштүрүлөт. өтө жөндүү маанидеги электродор аралыгы бар, ал анод бетине өтө жогорку жылуулук таасиринин кымсыздайт. Ток күчүнүн өсүшү же катоддун шакек илинчегинин радиусунун кысуушу анодго жаанын жылуулук таасиринин күчөтөт.

Изилдөөнүн жыйынтыктары электр жаалуу жабдыктарды иштеп чыгууда жана алардын иштөө убагын жөндөөдө колдонулушу мүмкүн. Ошондой эле «Жылуулук масса алмашуу маселелерин чечүүнүн сандык усулдары» сабагынын атайын курсун окууда эске алса болот.

РЕЗЮМЕ

Нам Инна Эроновна

«Численное исследование влияния геометрической формы катода на характеристики электрической дуги»

диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника.

Ключевые слова: стационарная электрическая дуга, математическое моделирование, геометрическая форма катода, внешние параметры дуги, расчетные характеристики дуговой плазмы.

На основе математического моделирования рассмотрено влияние геометрической формы неплавящегося катода на характеристики столба стационарной электрической дуги. Выявлено, что:

- переход от цилиндрической формы катода к конусной форме и уменьшение угла заточки обуславливает изменение направления воздействия электромагнитных сил, а именно: с уменьшением угла заточки все более возрастает аксиальная компонента электромагнитных сил, непосредственно ускоряющая поток плазмы;

- в дуговых разрядах силой тока до 200 А со стержневыми катодами различной геометрии (конус, сфера, цилиндр, притупленный конус) радиусом не более 2 мм, характеристики плазмы будут близки между собой при условии равенства площадей токопроводящих поверхностей.

- в катоде с углублением формируется зона циркуляция газа, препятствующая «уходу» испарившегося материала катода в столб дуги. При определенной организации течения плазмы вблизи катода с целью вовлечения окружающего газа в столб дуги и его движения по направлению к катоду часть атомов, покинувших поверхность катода вне пятна, будет возвращаться обратно в столб дугового разряда;

- для дуги с кольцевой привязкой на торце сплошного цилиндрического катода тепловое воздействие на анод распределяется по кольцевой поверхности. Существует оптимальное значение межэлектродного расстояния, обеспечивающее максимальное тепловое воздействие на поверхность анода. Увеличение силы тока или уменьшение радиуса кольцевой катодной привязки приводят к увеличению теплового воздействия дуги на анод.

Результаты исследований могут быть использованы при разработке и оптимизации режимов работы электродуговых устройств, а также при чтении специальных курсов по дисциплине «Численные методы решения задач тепломассообмена»

RESUME

Nam Inna Eronovna

«Numerical research of geometric cathode shape influence on electric arc characteristics»

thesis for taking an academic degree of candidate of physical and mathematical sciences in specialty 01.04.14 – thermal physics and theoretical heat engineering.

Key words: stationary electric arc, mathematical modeling, cathode geometry, external parameters of the arc, settlement characteristics of arc plasma.

Contagion of geometric shape of non-fusible cathode to the stationary electric arc column characteristics was considered on base of mathematical modeling.

It was revealed, that:

- a transition from cylindrical shape of the cathode to the conical shape and reduction of the re-sharpening angle makes for changing of directions of the influence of the electromagnetic forces, namely with reduction of the re-sharpening angle, axial component of electromagnetic forces increases more directly accelerating current of plasma;

- in arc discharge till 200 A current strength with rod cathodes of different geometry and binding radius less than 2mm, the characteristic of plasma will be close to each other under the assumption of equality of current-carrying surface areas;

- in cathode with deepening a zone of gas circulation forms preventing “a drift” of evaporated material of the cathode to the arc column. Under determined organizations plasma current close to cathode with purpose of surrounding gas involvement into the arc column and its motion on direction to the cathode, a part of the atoms abandoned the surface of the cathode outside dirt pits will come back to the arc column of the discharge;

- for arc with circular binding on the face of full cylindrical cathode heat influence on anode distributes on circular surface. There is an optimal decision of interelectrode distance which provides maximal thermal influence on a surface of the anode. The increase of current force or reduction of circular binding cathode radius reduces to increasing of thermal influence of the arc to the anode.

The results of researches can be used in developing and optimization of electro arc devices operating modes and also in reading special courses on discipline

“Numerical methods of solving heat-mass exchange problems”.