

**КЫРГЫЗСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ им. И. РАЗЗАКОВА**

**КЫРГЫЗСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СТРОИТЕЛЬСТВА,  
ТРАНСПОРТА И АРХИТЕКТУРЫ им. Н. ИСАНОВА**

Диссертационный совет Д.01.15.505

На правах рукописи  
УДК 553.981:537.52.1  
(575.2)(043.3)

**АМАНКУЛОВА НУРГУЛ АСИМКАНОВНА**

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ПОТОКОВ  
ПЛАЗМЫ С ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ**

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

**Бишкек – 2016**

Работа выполнена в Институте горного дела и горных технологий им. академика У. Асаналиева при КГТУ им. И. Раззакова.

**Научный руководитель:**

доктор физико-математических наук,  
Кабаева Гульнара Джамалбековна

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук,  
профессор Чечейбаев Байыш

кандидат физико-математических наук,  
профессор Табышов Рыскелди

**Ведущая организация:**

«Научно - исследовательский  
институт математики и механики»  
Казахского Национального университета  
им. аль - Фараби, Казахстан, 050040,  
г. Алмата, пр. аль - Фараби, 71.

Защита диссертации состоится 3 февраля 2017 года в 14<sup>00</sup> часов, на заседании диссертационного совета Д.01.15.505 при Кыргызском государственном техническом университете им. И. Раззакова и Кыргызском государственном университете строительства транспорта и архитектуры, по адресу: 720044, Бишкек, пр. Ч. Айтматова, 66. Ауд. 1/314.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеках Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова (720044, Кыргызская Республика, г. Бишкек, пр. Ч. Айтматова, 66) и Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова (720020, Кыргызская Республика, г. Бишкек, ул. А. Малдыбаева, 34б).

Автореферат диссертации размещен на сайте КГТУ им. И.Раззакова <http://kstu.kg>

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 01.15.505, к.ф.-м.н.



Мекенбаев Б.Т.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность темы диссертации.** В настоящее время широко применяются технологии плазменной обработки материалов, такие как резка, сварка, нанесение покрытий, и др. Потоки дуговой плазмы генерируются плазмотронами, в которых как плазмообразующие среды применяются различные газы и газовые смеси, а обрабатываемое изделие из электропроводящего материала может выступать в качестве второго электрода - анода.

Изучению электромагнитных, тепловых и газодинамических явлений в электродуговой плазме посвящены многие теоретические и экспериментальные исследования, основными из которых являются работы В.Финкельбурга, Г. Меккера, М.Ф. Жукова, С.В.Дресвина, В.С. Урюкова, В.С. Энгельшта, Г.А. Десяткова, Ж.Ж.Жеенбаева, А.Ж. Жайнакова, В.М. Лелевкина, Г.А. Слободянюка и др.

Вопросы расширения области применения электрической дуги привели к необходимости комплексного изучения, как дуговых процессов, так и процессов при взаимодействии электродуговой плазмы с обрабатываемым изделием. И вместе с тем, к изучению многофазных процессов в зоне взаимодействия дугового потока плазмы с металлом, где имеет место интенсивный нагрев металла до температуры кипения и образования паров металла, что может оказывать влияние на процессы тепломассобмена в этой зоне, и приводить к термодиформационным и нежелательным структурным изменениям в металле. Кроме того, задачи повышения технологических характеристик электродуговых потоков плазмы для обработки изделий приводят к поиску более эффективных смесей рабочих плазмообразующих сред, необходимости исследования их состава и свойств. Все вышеуказанное обуславливает актуальность темы исследования.

**Связь темы диссертации с основными научно – исследовательскими работами.** Диссертационная работа выполнялась в соответствии с планами научных работ кафедры «Информационные технологии и математическое моделирование им. академика А.Жайнакова» Института горного дела и горных технологий им. академика У. Асаналиева и по проектам МОН КР (2009-2016 гг.).

**Цель и задачи исследования.** Целью работы является усовершенствование двумерной стационарной математической модели электрических дуг в приближении локального термодинамического равновесия (ЛТР) плазмы для совместного рассмотрения процессов в дуговой плазме и на поверхности обработки металла с учетом его плавления и испарения.

Поставленная цель достигалась решением следующих задач:

- Анализ изученности вопросов взаимодействия электродуговой плазмы с обрабатываемой поверхностью с учетом многофазных процессов, имеющих место при этом, и их математического моделирования;
- Сравнительный анализ влияния состава смеси газов на характеристики электрической дуги и на тепловые процессы, протекающие на обрабатываемой поверхности на основе численного моделирования. Расчет термодинамических характеристик дуговой плазмы с изменением соотношений компонентов рабочей смеси газов.
- Формулировка двумерной стационарной математической модели с позиций ЛТР, с учетом условий перехода на поверхности взаимодействия дуги с металлом

на основе единой системы МГД уравнений для расчетной схемы дуга – зона обработки с учетом фазового состояния;

- Проведение численных исследований электромагнитных и тепловых явлений при взаимодействии электрической дуги с обрабатываемой поверхностью с учетом влияния паров металла на свойства электродуговой плазмы и расплавленного металла;

- Численный анализ термических циклов и температурных полей на обрабатываемой поверхности в зависимости от тепловых режимов обработки и свойств металла.

**Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:**

- Проведен сравнительный численный анализ влияния компонентного состава рабочей смеси на характеристики дуговой плазмы. Установлено, что применение рабочей смеси аргон + активные компоненты газов, приводит к росту температуры в приосевой области дуги по сравнению с чистым аргоном почти на 4000К, в сравнении с воздухом на 2000К.

- Развита двумерная стационарная математическая модель с позиций ЛТР, с учетом условий перехода на поверхности взаимодействия дуги с металлом на основе единой системы МГД уравнений для расчетной схемы дуга – зона обработки в воздушной среде.

- Усовершенствована двухмерная стационарная математическая модель с позиций ЛТР, для рассмотрения процессов в электрической дуге и в объеме сварочной ванны с учетом явления испарения атомов металла с поверхности обрабатываемого изделия. Система МГД уравнений дополняется уравнением конвективной диффузии паров металла. Поставлены граничные условия для концентрации паров металла по всей расчетной области.

- Рассчитаны концентрация паров металла в объеме электрической дуги и коэффициенты диффузии паров металла. Установлено что в приосевой части конвекция является доминирующей, поэтому пары металла вовлекаются в радиальном направлении потоками газа и растекаются над поверхностью анода. Определено, что наличие паров металла приводит к охлаждению дуги, что обусловлено увеличением коэффициента излучения в интервале температур от 5000 до 13000К, приводящее к увеличению радиационных потерь в данном интервале.

- Определены линии плотности тока в столбе электрической дуги и в зоне расплава. Установлено, что изменение электропроводности при наличии паров металла приводит к охлаждению дуги и уменьшению электромагнитной составляющей в проплавляющую способность дуги. Показано, что при решении задачи с учетом паров металла тепловой поток от дуги в сторону анода уменьшается на 27%, что приводит к уменьшению температуры на поверхности анода на 7%.

**Практическая значимость полученных результатов**

Полученные результаты могут быть использованы при исследовании процессов обработки различных поверхностей электродуговыми потоками энергии с целью оптимизации режимов работы плазматронов, в технологических процессах обработки материалов. Результаты исследований могут быть рекомендованы для применения в учебном процессе по дисциплинам

«Математическое моделирование» и «Математическое моделирование металлургических процессов».

**Основные положения диссертации, выносимые на защиту:**

– Результаты сравнительного численного анализа влияния компонентного состава рабочей среды на характеристики дуговой плазмы, показывающие, что применение рабочей смеси аргон + активные компоненты газов, приводит к росту температуры в приосевой области дуги по сравнению с чистым аргоном почти на 4000К, в сравнении с воздухом на 2000К.

– Результаты численных расчетов на основе единой модели, позволяющие установить характер электромагнитного и теплового воздействия дуговой плазмы в среде воздуха и аргона на обрабатываемую поверхность. Установлено, дуга в воздухе более сжата и меньшие поперечные размеры дуги обуславливают большее тепловое и силовое воздействие на обрабатываемое изделие в сравнении с аргоном. Установлено, что при использовании воздуха как рабочей среды проплавляющая способность дуги возрастает в 1.3 раза, чем при аргоне.

– Двумерная стационарная математическая модель в рамках ЛТР плазмы, позволяющая рассмотреть условия перехода на поверхности взаимодействия дуги с металлом на основе единой системы МГД уравнений для расчетной схемы дуга – зона обработки, с учетом фазового состояния дополненная уравнением конвективной диффузии для учета паров металла обрабатываемого изделия.

– Результаты численного исследования влияние паров металла на тепловые, электромагнитные и динамические характеристики электрической дуги и обрабатываемой поверхности. Установлено что в приосевой части конвекция является доминирующей, поэтому пары металла вовлекаются в радиальном направлении с потоками газа и растекаются над поверхностью анода. Присутствие паров металла приводит к охлаждению дуги, что связано с увеличением коэффициента излучения в интервале температур от 5000 до 13000К.

– Установлено, что изменение электропроводности при наличии паров при фазовых переходах металла приводит к уменьшению вклада электромагнитной составляющей в проплавляющую способность дуги. Решение задачи с учетом паров металла показывает, что тепловой поток от дуги в сторону анода в этом случае уменьшается на 27%, и в результате приводит к уменьшению температуры на поверхности анода на 7%.

**Личный вклад соискателя.** Представленные в диссертации результаты являются итогом самостоятельных исследований автора. Личный вклад заключается в выборе путей и способов достижения цели работы, проведении исследований, в получении научных результатов, их анализе и формулировании выводов, написании и публикации научных статей.

В определении цели работы и обсуждении результатов участвовал научный руководитель д.ф.-м.н. Кабаева Г.Дж. В обсуждении полученных результатов также принимали участие д.ф.-м.н., академик А. Жайнаков и к.ф.-м.н., доцент Султангазиева Р.Т.

**Апробация результатов исследований.** Результаты работы докладывались и обсуждались на международных конференциях:

– «Информационные технологии и математическое моделирование в науке, технике образовании», Бишкек 2011г.;

- «Математические информационные технологии» МИТ-2013 Врнячка Баня, Сербия; Будва, Черногория 05 – 14 сентября 2013 г.;
- “Computational and Information Technologies in Science, Engineering and Education” (ciTech-2015) Almaty, Kazakhstan, 2015г.
- «Инновации в науке» LI международной научно-практической конференции Новосибирск, № 11 (48) Ноябрь 2015 г. Часть I.

**Полнота отражения результатов диссертации в публикациях.** Результаты исследования опубликованы в 18-ти статьях в научных изданиях, рекомендованных ВАК КР, а также трудах международных конференций.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, 4 главы и выводов, изложенных на 125 странице машинописного текста, включая 6 таблиц, 52 рисунков и списка литературы из 138 наименования.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** показана актуальность исследования, дана формулировка цели и задачи исследования, показана научная новизна, практическая значимость результатов. Приведены положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведен литературный обзор по теме диссертации. Показана необходимость дальнейшего развития двумерных стационарных математических моделей в приближении локального термодинамического равновесия (ЛТР) плазмы для совместного рассмотрения процессов в дуговой плазме и обрабатываемом изделии с учетом его плавления и испарения. Предлагается математическая модель взаимодействия потоков электродуговой плазмы и потоков расплавленного металла в обрабатываемом изделии, позволяющая рассмотреть взаимосвязанные процессы в электрической дуге, на поверхности и внутри изделия как единую картину, что дает возможность получить более полную информацию о динамике и взаимовлиянии этих процессов. Особенностью решения данной задачи является то, что процессы в каждой из областей можно описать одной и той же системой уравнений магнитной гидродинамики (МГД - уравнения).

В модельной системе приняты допущения: электрическая дуга и обрабатываемая поверхность обладают осевой симметрией, плазменная дуга находится в состоянии локального термодинамического равновесия, без внешнего магнитного поля и без закрутки газа, газ и расплавленный металл несжимаемы, течения ламинарные, поверхность обрабатываемого изделия плоская. В объеме обрабатываемой поверхности рассматриваются четыре различные движущие силы - сила Архимеда возникающая за счет зависимости плотности от температуры; сила вязкого взаимодействия между потоками электродуговой плазмы и расплавленного металла; электромагнитные силы, возникающая вследствие взаимодействия магнитного поля и электрического тока; сила Марангони, возникающая за счет зависимости поверхностного натяжения расплавленного металла от температуры. В рамках данной задачи мы предполагаем, что в объеме сварочной ванны радиусом  $R$  и глубиной проплавления  $h$ , форма которой определяется изотермой плавления  $T_{plav}$ , находится жидкий металл, поведение которой описывается МГД уравнениями. Физические процессы в столбе электродугового разряда и взаимодействующего с этим разрядом жидкого металла описываются одной и той же системой

уравнений магнитной гидродинамики. Указанная система уравнений объединяет уравнение неразрывности, Навье-Стокса, энергии, уравнения Максвелла и закон Ома:

Уравнение неразрывности:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r u)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

Уравнения движения для радиальной составляющей:

$$\rho v \frac{\partial v}{\partial r} + \rho u \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial r} - j_z B_\varphi + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \mu r \frac{\partial v}{\partial r} \right) - 2\mu \frac{v}{r^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \left( \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{2}{3} \mu \left( \frac{1}{r} \frac{\partial(rv)}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right) \quad (2)$$

Уравнения движения для аксиальной составляющей:

$$\rho v \frac{\partial u}{\partial r} + \rho u \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial z} + j_r B_\varphi + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \mu r \left( \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{2}{3} \mu \left( \frac{1}{r} \frac{\partial(rv)}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right) + 2 \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + S_u \quad (3)$$

Закон сохранения энергии:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \rho v h - \frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial h}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \rho u h - \frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial h}{\partial z} \right) = \frac{1}{\sigma} (j_r^2 + j_z^2) - q + S_h \quad (4)$$

Уравнения Максвелла:

$$\frac{\partial E_r}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial r} = 0; \quad \frac{1}{r} \frac{\partial(r H_\varphi)}{\partial r} = j_z; \quad -\frac{\partial H_\varphi}{\partial z} = j_r \quad (5)$$

Закон Ома:

$$j_r = \sigma E_z, \quad j_z = \sigma E_r \quad (6)$$

Система (1-6) дополняется соотношениями:  $\sigma = \sigma(T, P)$ ,  $\lambda = \lambda(T, P)$ ,  $\mu = \mu(T, P)$ ,  $\rho = \rho(T, P)$ ,  $q = q(T, P)$ ,  $c_p = c_p(T, P)$ ,  $h = h(T, P)$  (7)

Приняты следующие обозначения:  $u, v$  - аксиальная и радиальная скорости потока;  $P$  - давление;  $T$  - температура;  $j$  - плотность тока;  $E$  - напряженность электрического поля;  $H$  - напряженность магнитного поля;  $B$  - магнитная индукция;  $\rho$  - плотность плазмы;  $c_p$  - теплоемкость при постоянном давлении;  $\mu$  - вязкость;  $\lambda$  - теплопроводность;  $q$  - излучательная способность;  $\sigma$  - электропроводность;  $h$  - энтальпия.

В уравнении движения:

$$S_u = \begin{cases} 0 & \text{для дуги} \\ \rho g - \rho g \beta (T - T_0) & \text{для сварочной ванны} \end{cases} \quad (8)$$

где  $\beta$  - коэффициент термического расширения;  $g$  - ускорение свободного падения. Данное слагаемое обусловлено суммой силы инерции и выталкивающей силы в расплавленном металле в приближении Буссинеска.

В уравнении энергии источниковый член  $S_h$  учитывает потери тепла на плавление. Он показывает поведение удельной теплоты плавления во время изменения фаз: теплота поглощается во время плавления, то есть при изменении твердой фазы к жидкой, и высвобождается в процессе затвердевания.  $H_f$  - удельная энтальпия.

$$H_f = \begin{cases} L & T > T_l \\ f_l L & T_s \leq T \leq T_l, \\ 0 & T < T_s \end{cases} \quad (9)$$

где  $L$  - удельная теплота плавления металла анода.

В расплавленном металле жидкая фракция  $f_L$  меняется линейно от температуры ( $s$  - твердая фракция).

$$f_L = \begin{cases} 1 & T > T_l \\ \frac{T-T_s}{T_l-T_s} & T_s < T < T_l \\ 0 & T < T_s \end{cases} \quad (10)$$

В уравнении энергии для сварочной ванны используется эффективная теплоемкость:  $c_p^{ef} = c_p + \Delta H_f \frac{\partial f_L}{\partial T}$ , (11)

где  $\Delta H_f$  - удельная теплота плавления материала анода.

Система МГД уравнений решается в переменных «вихрь - функция тока», путем введения переменных:  $\omega$  - напряженность вихря,  $\psi$  - функция тока,  $\chi$  - функция электрического тока, которые в случае цилиндрической системы координат при осевой симметрии определяются соотношениями:

$$\omega = \frac{1}{r} \left( \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial u}{\partial r} \right); \quad \frac{\partial \psi}{\partial r} = \rho u r; \quad -\frac{\partial \psi}{\partial z} = \rho v r; \quad \frac{\partial \chi}{\partial r} = r j_z; \quad -\frac{\partial \chi}{\partial z} = r j_r. \quad (12)$$

Тогда исходная система запишется в следующем каноническом виде:

$$a \left[ \frac{\partial}{\partial z} \left( \varphi \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left( \varphi \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[ b \frac{\partial}{\partial z} (c \varphi) \right] - \frac{\partial}{\partial r} \left[ b \frac{\partial}{\partial r} (c \varphi) \right] + e r = 0, \quad (13)$$

где  $\varphi$  - искомая функция, принимающая значения  $\omega, \psi, h, \chi$ ,  $a, b, c, e$  - нелинейные коэффициенты, соответствующие каждому из уравнений. Значения данных коэффициентов представлены в таблице 1.

Таблица 1- Значения коэффициентов канонического уравнения

$\varphi$	$a$	$b$	$c$	$e$
$\omega$	$r^2$	$r^3$	$\mu$	$-r^2 \left[ \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{u^2 + v^2}{2} \right) \frac{\partial \rho}{\partial r} - \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{u^2 + v^2}{2} \right) \frac{\partial \rho}{\partial z} - \frac{\mu}{r^3} \frac{\partial \chi}{\partial z} - g \frac{\partial \rho}{\partial r} + S_w \right]$
$\psi$	0	$1/\rho r$	1	$\omega r$
$h$	1	$\frac{\lambda}{c_p} r$	1	$\frac{1}{\sigma r} \left[ \left( \frac{\partial \chi}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{\partial \chi}{\partial z} \right)^2 \right] - \Psi r + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \left( \rho D - \frac{\lambda}{c_p} \right) (h_m - h_p) \frac{\partial C_1}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial r} \left[ \left( \rho D - \frac{\lambda}{c_p} \right) (h_m - h_p) \frac{\partial C_1}{\partial r} \right]$
$\chi$	0	$1/\sigma r$	1	0

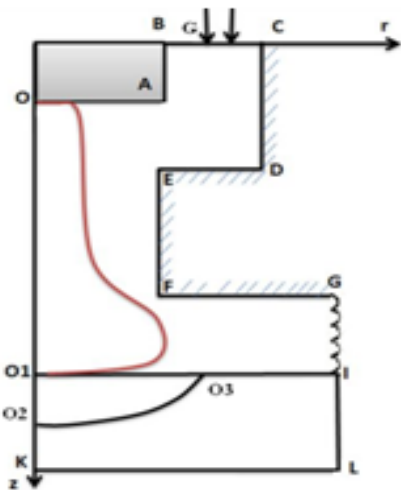


Рис.1. Схема расчетной области

Единая форма записи (13) позволяет при решении системы уравнений использовать один и тот же алгоритм расчета.

**Постановка граничных условий.** На рис.1.представлена схема расчетной области. Катод - цилиндр с плоским торцом, канал плазматрона - полый цилиндр с внутренним радиусом  $R_k$  и внешним радиусом  $R$ , анод - обрабатываемое изделие. Область расчета ограничена боковой и торцевой поверхностями катода, осью OZ, сечением  $r = R_k$ , сверху область ограничена осью Or, снизу - нижней частью материала. Между боковыми стенками катода и внутренними стенками сопла в аксиальном направлении подается поток газа.

Граничные условия на входное сечение (**BC**) определяется из распределения скорости в сечении  $z = 0$ :

$$u(r, 0) = \frac{2G \left( \frac{R_c^2 - R_k^2}{\ln \frac{R_c}{R_k}} \ln \frac{R_c}{r} - R_c^2 + r^2 \right)}{\pi \rho (R_c^2 - R_k^2) \left( \frac{R_c^2 - R_k^2}{\ln \frac{R_c}{R_k}} - R_c^2 - R_k^2 \right)}. \quad (14)$$

Распределение температуры у торца катода задается либо с учетом экспериментальных данных, либо задается Урюковским распределением:

$$T_k(r) = (T_{кин} - T_0) \left( 1 - \frac{r}{R_k} \right)^m \left( 1 + \frac{r}{R_k} m \right) + T_0, \quad (15)$$

где  $T_{кин}$  - температура кипения катодного материала,  $m$  - степень наполнения профиля температуры.

Таблица 2- Граничные условия для переменных  $\omega, \psi, \chi, h$ .

	$\omega$	$\psi$	$h, T$	$\chi$
<b>BC</b>	$\omega = -\frac{1}{r} \frac{\partial u(r, 0)}{\partial r}$	$\psi = \rho \int_{R_k}^r u(r, 0) r dr$	$h = h_0$	$\chi = \frac{I}{2\pi}$
<b>BA</b>	-	$\partial\psi/\partial r = 0; \psi = 0$	$h = h_0$	$\chi = I/2\pi$
<b>CDEF</b>	-	$\partial\psi/\partial r = 0; \psi = G/2\pi$	$h = h_0$	$\chi = I/2\pi$
<b>OA</b>	-	$\frac{\partial\psi}{\partial z} = 0; \psi = 0$	$h = h_k$	$\chi_k = \frac{I \int_0^r \sigma r dr}{2\pi \int_0^{R_k} \sigma r dr}$
<b>EDFG</b>	-	$\partial\psi/\partial z = 0; \psi = G/2\pi$	$h = h_0$	$\chi = I/2\pi$
<b>GI</b>	$\partial\omega/\partial r = 0$	$\partial\psi/\partial r = 0$	$\partial h/\partial r = 0$	$\chi = I/2\pi$
<b>OK</b>	$\partial\omega/\partial r = 0$	$\psi = 0$	$\partial h/\partial r = 0$	$\chi = 0$
<b>O1O3</b>	$\mu_p \omega_p = \mu_a \omega_a$ $-\frac{1}{r} \frac{\partial \alpha}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial r}$	$\psi = 0$	$\lambda_a \frac{\partial T_a}{\partial z}$ $= \lambda_{ayzu} \frac{\partial T_{ayzu}}{\partial z}$ $-\sigma_\varepsilon \varepsilon (T_a^4 - T_0^4)$ $-W_v h_{fg} - j\varphi_a$	$\frac{\partial \chi}{\partial z} = 0$

Граничные условия для напряженности вихря задавались в точке, отстоящей на один шаг от твердой границы, что позволило избежать неоднозначности задания граничных условий в угловых точках и обеспечить устойчивую сходимость решения на прямоугольной сетке для границы любой формы. Дискретизация обобщенного дифференциального уравнения (13) проводилось конечно-разностным методом (Самарский А.А., Патанкар С.). Полученная система линейных уравнений дискретных аналогов уравнения (13) решена итерационным методом Зейделя - Гаусса с нижней релаксацией.

**Во второй главе** с целью поиска более эффективных смесей рабочих и плазмообразующих сред применяемые при обработке, рассмотрены методики расчета состава и свойств плазмообразующих и защитных газов. Проведены тестовые расчеты равновесного состава, термодинамических функций, коэффициентов переноса воздуха и расчеты для смеси аргона с активными газами в различных компонентных соотношениях в температурном интервале от 300-35000К для исследования влияния смеси газов на тепловые характеристики

электрической дуги. Расчеты выполнены с помощью хорошо апробированных программ АСТРА 4, ТЕРРА и известных методов расчета. Полученные теплофизические коэффициенты использованы для проведения сравнительного численного анализа тепловых процессов в дуговых разрядах в зависимости от состава рабочей газовой среды.

Численные расчеты проведены для токов  $I=150\text{A}$ ,  $I=200\text{A}$  и  $I=250\text{A}$ , дуга горит в среде воздуха, при давлении  $P=0.1\text{ МПа}$ , с постоянным межэлектродным расстоянием в  $5\text{ мм}$ , в качестве материала анода используется алюминий. Размер дуги у катода принимался равным размеру цилиндрического электрода  $1\text{ мм}$ , температура в центре катодного пятна  $18000\text{K}$ . Боковые стенки катода и стабилизирующие стенки поддерживаются при температуре  $T=300\text{K}$ . Размеры дуги у анода формируются в процессе расчета в соответствии с поставленными условиями. На рис.2-3. показаны линии равных расходов газа и изотерм в столбе воздушной электрической дуги при  $I=150\text{A}$ ,  $G=10\text{ мг/сек}$ .

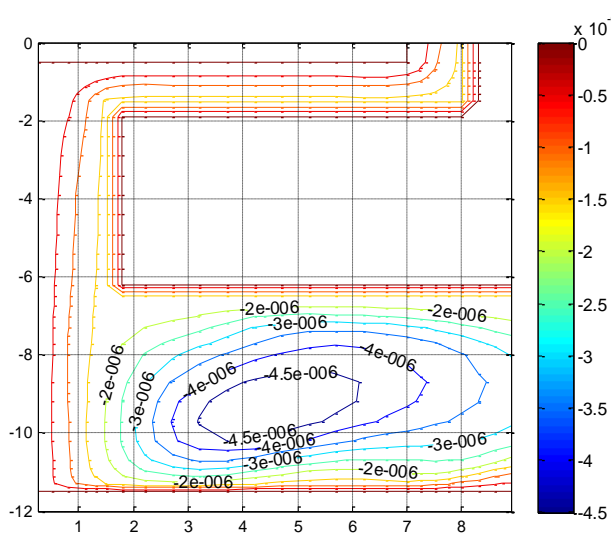


Рис.2. Линии равных расходов газа

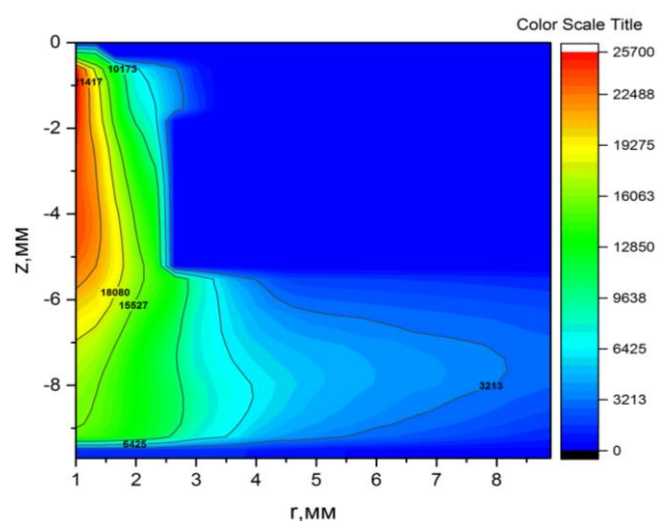


Рис.3. Изолинии температур

Численные эксперименты показали, что в свободной области образуется тороидальный вихрь с застойной зоной по центру, форма и размеры вихря зависят от расхода газа, геометрии и размеров плазматрона. В объеме ванны расплавленный металл движется в одном направлении по часовой стрелке. Основными силами, обуславливающими потоки жидкости, являются силы поверхностного натяжения Марангони и силы вязкого взаимодействия с потоками плазмы. Градиент поверхностного натяжения является отрицательным, а конвективные течения на поверхности ванны расплавленного металла центробежными. Силы вязкого взаимодействия также вовлекают потоки расплавленного металла в направлении от центра поверхности к краям. Действие электромагнитных сил при  $I=150\text{A}$  не оказывает видимого влияния на картину в расплавленном металле. На рис.4-5 показан характер течения расплавленного металла на обрабатываемой поверхности и расположения изотерм при  $I=200\text{A}$ . С увеличением силы тока до  $200\text{A}$  в центральной части ванны расплавленного металла образуется вихрь, движение которого обусловлено возросшей ролью электромагнитных сил, которые прокачивают потоки жидкого металла вглубь ванны, образуя на поверхности ванны конвективные потоки к центру ванны. На границы ванны сохраняется движение потоков расплавленного металла к ее

краям, обусловленное вязким взаимодействием с потоками электрической дуги и термокапиллярной конвекцией.

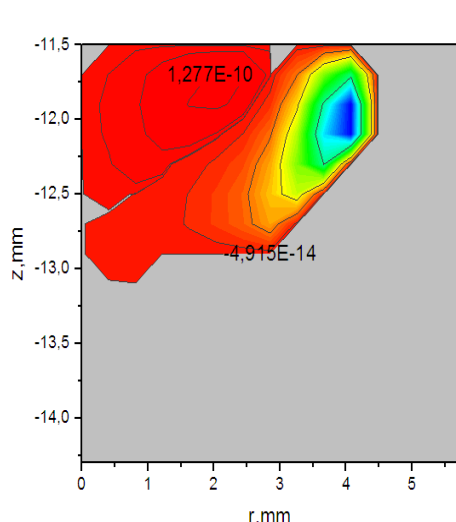


Рис.4. Изолинии функции тока.

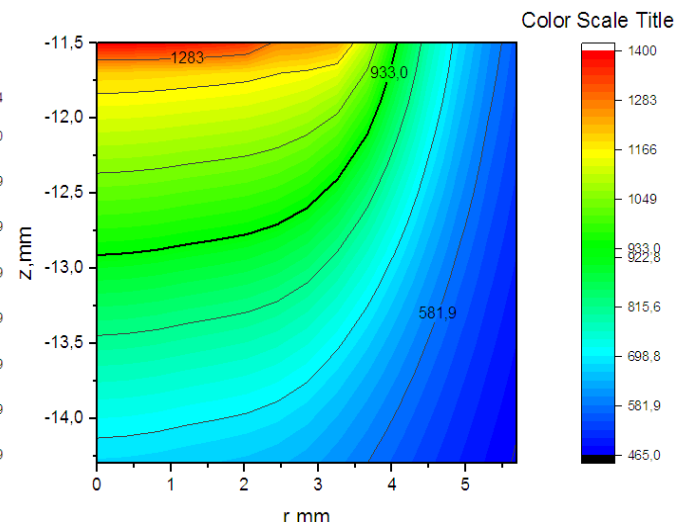


Рис.5. Изолинии температур.

При увеличении тока до 250А действие сил поверхностного натяжения увеличивается в сравнении с силой Лоренца и в объеме расплавленного металла вновь образуется только один вихрь, направленный на поверхности от центра поверхности ванны к краям, увеличивая радиальные размеры проплавленной области, а глубина проплавления практически не меняется. Дальнейшее увеличение силы тока до 300А также не влияет практически на глубину проплавления обрабатываемой поверхности, лишь увеличивается ее ширина из-за преобладания силы Марангони и сил вязкого трения.

В случае воздуха растекающиеся радиально у поверхности жидкого металла поток плазмы вследствие вязкого взаимодействия и термокапиллярной конвекции, вовлекает в радиальное движение верхние слои жидкого металла и вызывает во всем объеме сварочной ванны вихрь, центр которого смещен в направлении движения потока расплавленного металла. В случае аргона для алюминиевой пластины в объеме сварочной ванны, у ее краев, образуется дополнительный вихрь обратного направления, вовлекающий в движение столько же металла, сколько и в основном вихре. Параметры ванны расплавленного металла при различных силах тока, расходе рабочего газа  $G=10\text{ мг/сек}$  для аргона и воздуха показаны в таблице 3.

Таблица 3-Зависимость параметров ванны расплавленного металла от рода рабочего газа

	Воздух		Аргон	
	<b>Rv (мм)</b>	<b>Hv (мм)</b>	<b>Rv(мм)</b>	<b>Hv (мм)</b>
I=150A	3,4	1,2	2	0.7
I-200A	3,5	1,4	2.3	0.9
I=250A	3.9	1,45	2.8	1.0

В сравнении с результатами расчета дуги в аргоне, дуга в воздухе более сжата, имеет меньшие поперечные размеры дуги, которые обуславливают большее тепловое и силовое воздействие на обрабатываемое изделие.

**В третьей главе** представлены математическая модель взаимодействия потоков электродуговой плазмы и сварочной ванны с учетом влияния паров

металла с поверхности обрабатываемого изделия. Система находится в замкнутом объеме, схема расчетной области которой представлена на рис.6. Неплавящийся катод реального плазматрона представляет собой цилиндр с плоским торцом, анодом служит обрабатываемое изделие, область ограничена боковыми стенками на расстоянии  $R$ . Физические процессы в столбе электродугового разряда и взаимодействующего с этим разрядом жидком металле описываются единой системой уравнений магнитной гидродинамики (1-6). Система дополняется уравнением конвективной диффузии паров металла:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v C_1) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho u C_1) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \rho D \frac{\partial C_1}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \rho D \frac{\partial C_1}{\partial z} \right) \quad (16)$$

В этом случае, слагаемое  $S_h = -\nabla \left[ (h_m - h) \frac{\lambda}{C_p} \nabla C_1 \right]$  в правой части закона

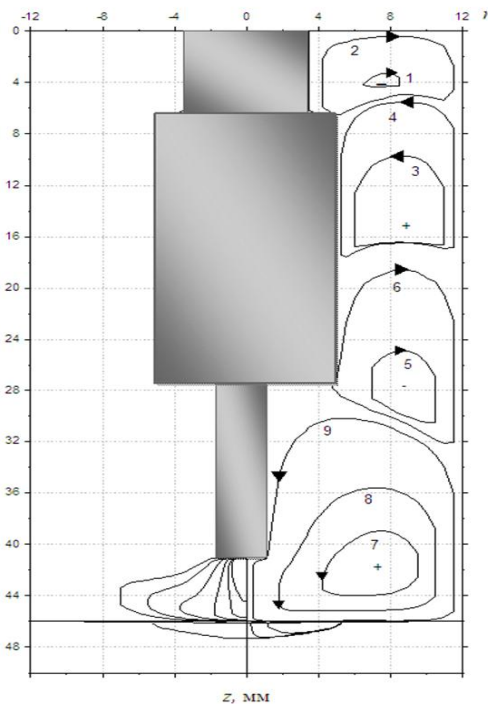


Рис.6. Схема расчетной области

сохранения энергии определяет изменение энтальпии за счет перемешивания паров металла и плазмообразующего газа,  $h_m$  — энтальпия паров металла. Взаимодействие между плазмой и парами металла, их взаимное влияние друг на друга определяется через теплофизические свойства среды как функции температуры и концентрации паров металла в плазме.

Для определения коэффициента диффузии используется приближение вязкой аппроксимации. Диффузный коэффициент в данном приближении вычисляется по формуле:

$$D_{Ar-Fe} = \frac{2\sqrt{2} \left( \frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2} \right)^{0.5}}{\left( \left( \frac{\rho_1^2}{\beta_1^2 \eta_1^2 M_1} \right)^{0.25} + \left( \frac{\rho_2^2}{\beta_2^2 \eta_2^2 M_2} \right)^{0.25} \right)^2} \quad (17)$$

где  $M_1, M_2$  — молярный вес металла и плазмообразующего газа;  $\rho_1, \rho_2, \eta_1$  и  $\eta_2$  — плотность и вязкость металла и газа соответственно;  $\beta_1 = \beta_2 = 1.385$  по экспериментальным данным. В состав искомой функции  $\varphi$ , принимающая значения  $\omega, \psi, h, \chi$  дополняется значением  $C_1$  — весовая концентрация паров металла.

Таблица 4- Значения коэффициентов канонического уравнения

$\varphi$	$a$	$b$	$c$	$e$
$C_1$	1	$\rho r D$	1	0

Граничные условия ставятся: на боковой границе катода концентрация паров металла  $C_1 = 0$ ; на торце катода:  $C_1 = 0$ ; на боковой границе плазматрона:  $C_1 = 0$ , на оси столба дуги выполняются условия симметрии:  $(\partial C_1)/\partial r = 0$ . Концентрация паров металла на поверхности анода, где температура выше температуры плавления определяется выражением:

$$C_1 = \frac{p_{v,1} M_1}{p_{v,1} M_1 + (p_{atm} - p_{v,1}) M_2}, \quad (18)$$

где  $p_{v,1}$  — парциальное давление паров металла, которое является функцией температуры расплавленного металла сварочной ванны.

Для определения давления паров металла при различных температурах можно использовать упрощенное уравнение Клапейрона - Клаузиуса, которое для удобства расчетов приводится к виду:

$$P_{vap} = P_{atm} \exp \left( \frac{-H_{vap}}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{boi}} \right) \right), \quad (19)$$

где  $H_{vap}$  - молярная теплота испарения;  $R$  - универсальная газовая постоянная;  $T_{boi}$  - температура кипения материала анода.

В области анода уравнение конвективной диффузии паров металла не решается. В качестве анода выбрана стальная пластина, содержащая более 97%, железа в своем составе. На основании свойств чистых компонентов, рассчитаны равновесный состав и коэффициенты переноса для смесей Ar+1%Fe, Ar+3%Fe. Расчеты проводились для  $I=150A$  и  $200A$ . Для тока  $150A$ , максимальная концентрация паров железа на поверхности сварочной ванны исходя из граничного условия составила 0,6%, что практически не влияет на транспортные коэффициенты аргоновой дуги. Максимальная концентрация паров железа при силе тока в  $200A$  составляет 1.05 % на оси дуги. Распределение концентрации паров металла определяется конвективными и диффузионными потоками. Аксиальная скорость потока газа, направленного к аноду в 5 раз выше радиальной (рис.7-8), поэтому пары металла в приосевой части сосредоточены в основном у поверхности анода. Также, это связано с коэффициентом диффузии, максимальное значение которого приходится на периферию ядра дуги, где атомы металла легче диффундируют в область электрической дуги

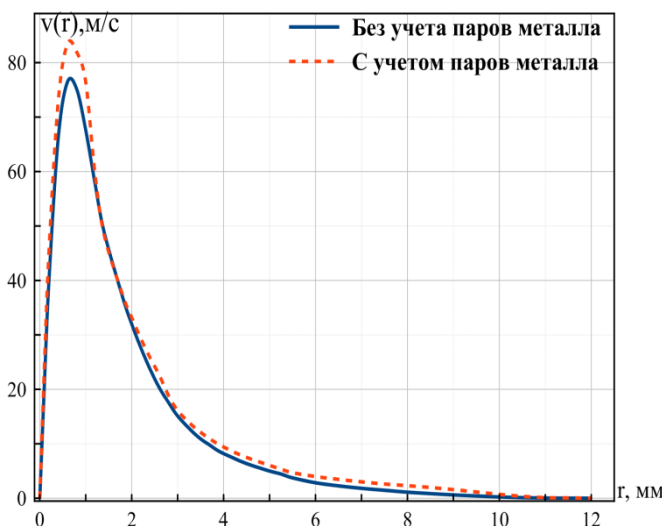


Рис.7. Распределение радиальной скорости над поверхностью анода.

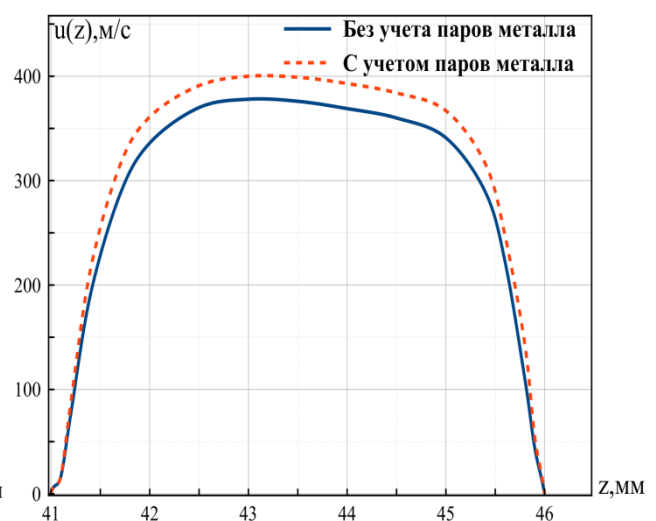
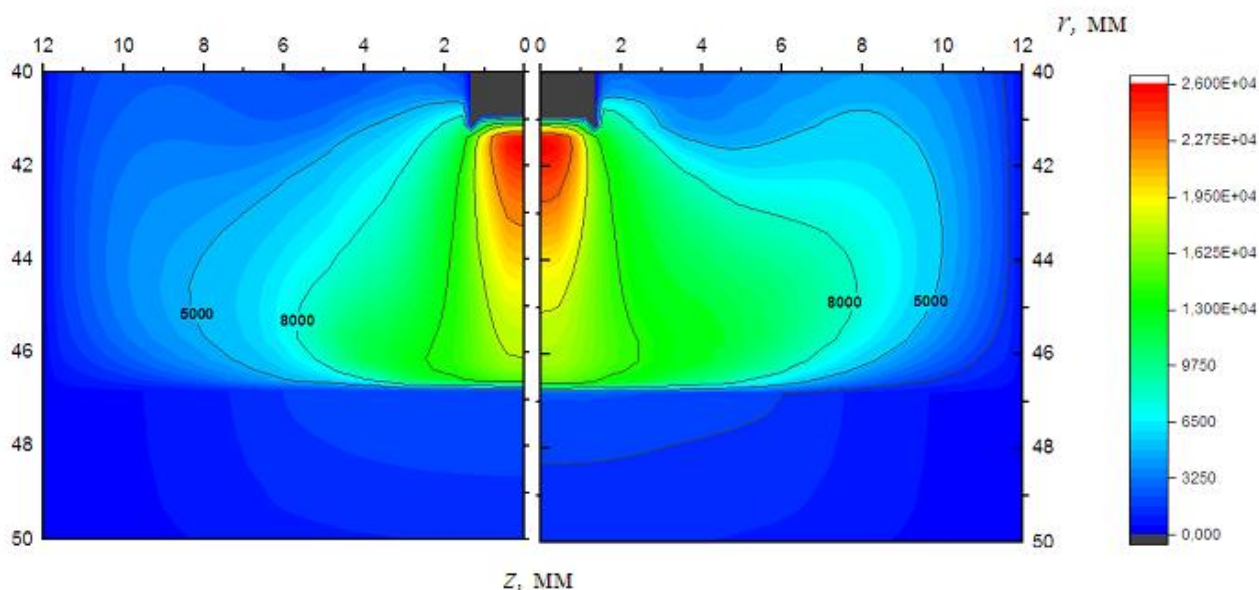


Рис.8. Осевая аксиальная скорость в столбе электрической дуги.

В приосевой части конвекция является доминирующей, поэтому пары металла вовлекаются в радиальное движение потоков газа и растекаются над поверхностью анода.

На рис.9. представлены изолинии температур без учета и с учетом паров металла в аргоновой плазме при силе тока  $I=200A$ . Присутствие паров металла в прианодной части поджимают радиально дугу, охлаждая столб дуги по ее краям и нагревая ядро дуги. Это объясняется тем, что коэффициент излучения для смеси аргона с парами металла заметно выше в интервале температур от 5000 до 13000K, что приводит к увеличению радиационных потерь в данном интервале и

сужению дуги. Следующим механизмом охлаждения дуги на периферии является увеличение теплопроводности при температурах ниже 8000K, вызванное большей термической диффузией в окрестностях дуговой плазмы.



а) с учетом паров металла

б) без учета паров металла

Рис.9. Изотермы столба электрической дуги  $I=200A$ .

Данное явление охлаждения дуги при наличии паров металла согласуется с экспериментальными и теоретическими результатами работы Lag - Lago F. На рис. 10. представлен тепловой поток от столба электрической дуги на анод для обоих случаев. Несмотря на то, что температура ядра дуги выше для аргона с парами металла, тепловой поток в сторону анода выше для чистого аргона, что обусловлено более высоким коэффициентом теплопроводности в этом диапазоне температур. Таким образом, температура поверхности сварочной ванны в присутствии паров металла понижается (рис.11).

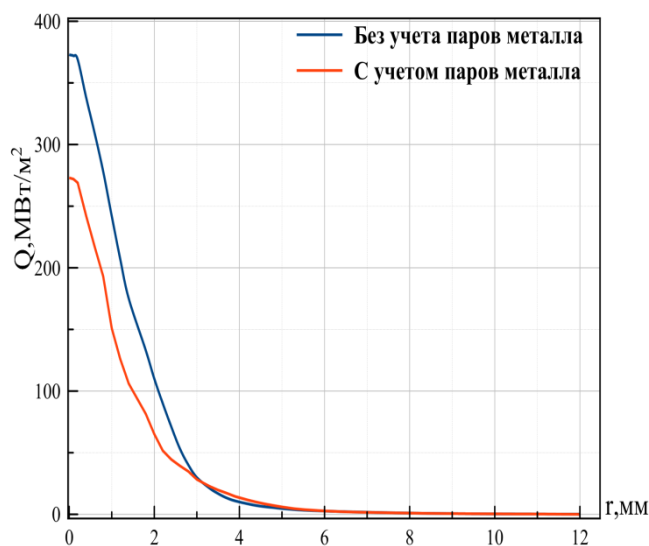


Рис.10. Тепловой поток на анод.

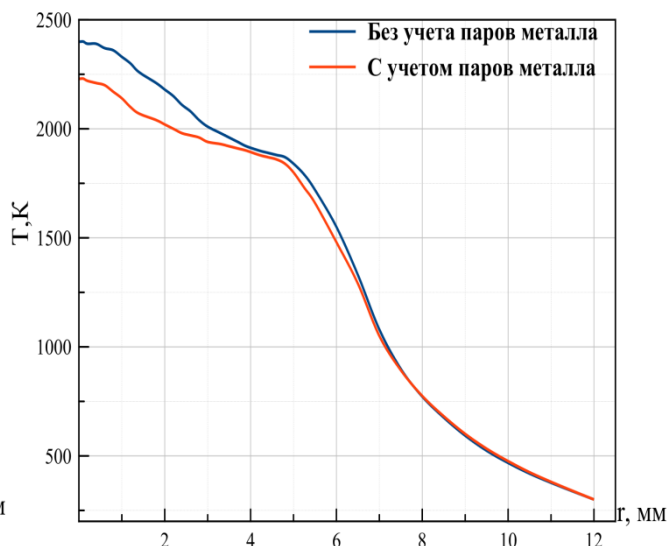
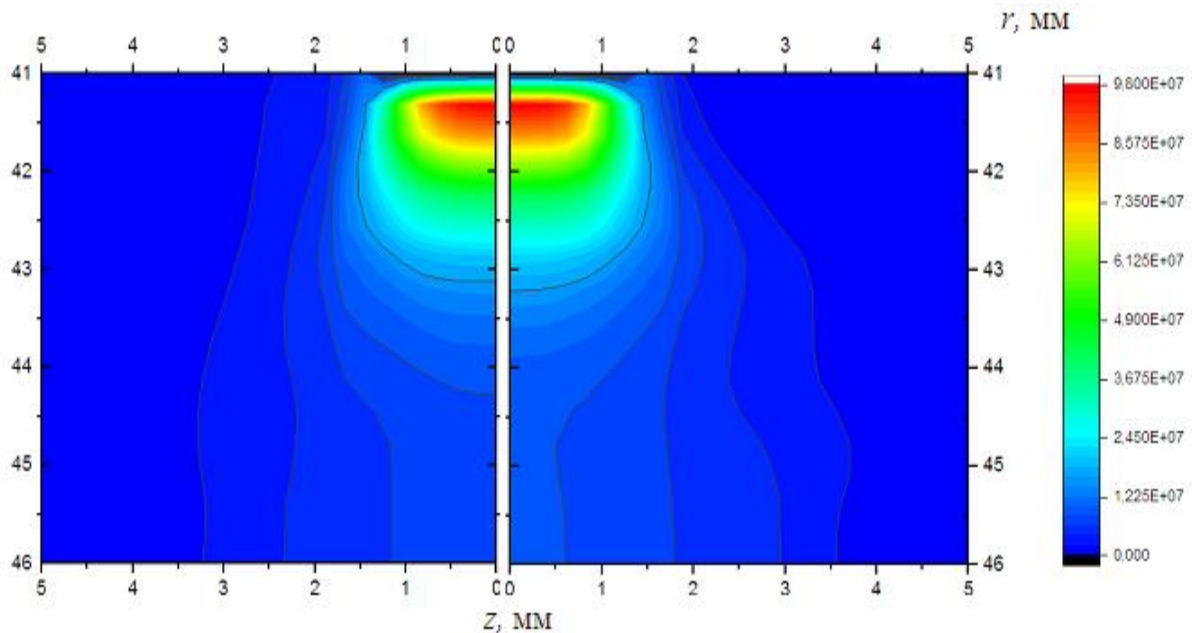


Рис.11. Температура поверхности анода

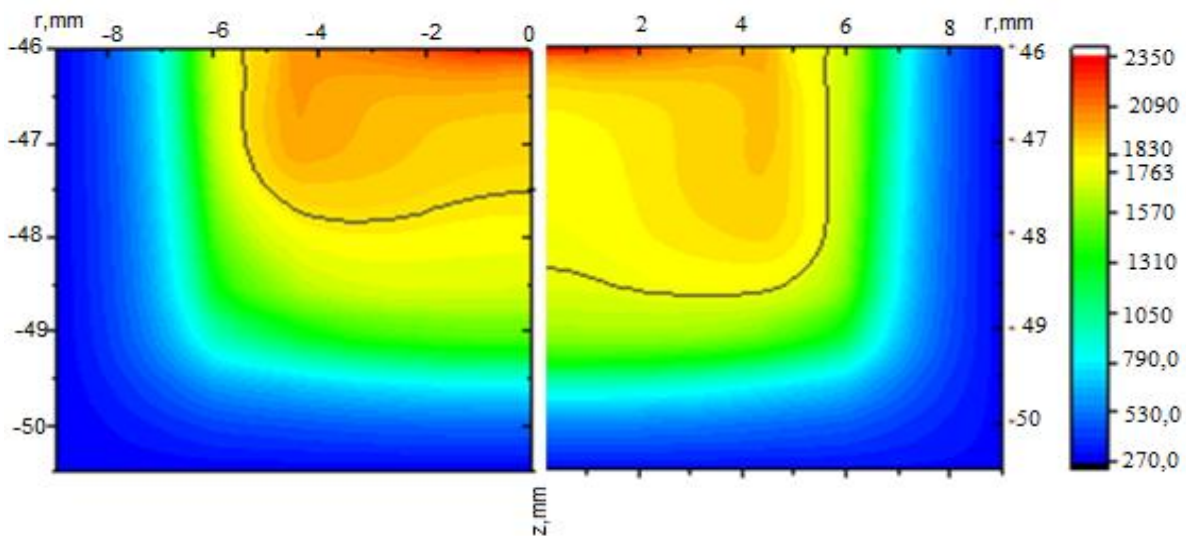
На рис.12. представлены графики плотности тока в столбе дуги. Плотность тока на поверхности анода в присутствии паров железа уменьшается, это вызвано тем, что наличие паров увеличивает электропроводность при температурах ниже 10000K, и электрический ток течет в более холодных областях дуги. На рис.13.

представлены распределения температур сварочной ванны для обоих случаев. При учете испарения размеры сварочной ванны уменьшаются за счет уменьшения теплового потока от столба дуги в сторону сварочной ванны и уменьшения электромагнитной составляющей дуги.



а) с учетом паров металла      б) без учета паров металла

Рис.12. Линии плотности тока в столбе электрической дуги  $I=200A$ .



а) с учетом паров металла      б) без учета паров металла

Рис.13. Распределение температуры в сварочной ванне.

На рис.14. представлены распределения температуры расплавленного металла и макрошлиф обрабатываемого металла, полученный экспериментальным методом в работе Fan Ding. Сравнение показывает удовлетворительное согласие результатов расчета и эксперимента по геометрическим размерам (глубина / ширина) ванны расплава.

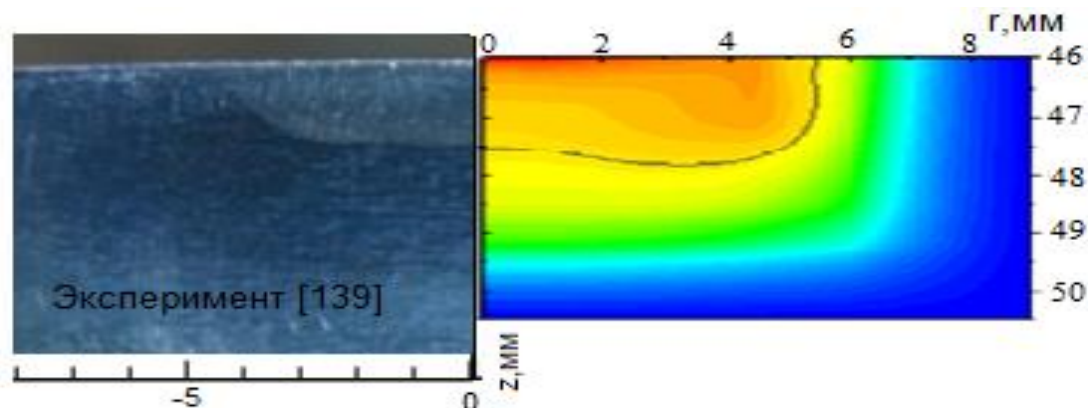


Рис.14. Макрошлиф анода – эксперимент и распределение температуры в расплаве.

Изменение электропроводности при учете паров металла в прианодной части формируется двумя механизмами. С одной стороны, присутствие паров железа должно увеличить электропроводность плазмы. С другой стороны, охлаждение дуги, вызванное более высокими радиационными потерями и увеличением теплопроводности в периферийной части, приводит к уменьшению общей электропроводности смеси. В итоге, вклад электромагнитной составляющей на проплавляющую способность дуги уменьшается. Из приведенного выше анализа можно сделать вывод, что при электродуговой сварке в замкнутом объеме при токах выше 150А для более полного описания физических процессов взаимодействия электрической дуги с обрабатываемым изделием необходимо учитывать наличие паров металла над поверхностью анода.

**В четвертой главе** выполнено решение тепловых задач нагрева поверхности и термодинамический анализ его состояния. Исследование и анализ взаимодействие компонентов различных газов с расплавленными металлами позволяет уменьшить отрицательное влияние газовой атмосферы на свойства обрабатываемого материала. С этой целью, проведено термодинамическое моделирование взаимодействия различных марок стали с рабочей средой в программе Терра. Полученные результаты термодинамического исследования взаимодействия плазмообразующего газа с обрабатываемой поверхностью дают количественную оценку участвующих при взаимодействии компонентов и позволяют прогнозировать их влияние на процессы в прианодной области, а также на структурный состав поверхности обработки.

Кроме этого, основную информацию о тепловых процессах в зоне обработки можно получить по распределению температуры и термических циклов на поверхности обрабатываемого материала в зависимости от мощности источника энергии, толщины и времени воздействия для различных материалов. Поэтому рассмотрена задача поверхностного нагрева полубесконечной пластины, определенной толщины когда распространение теплоты можно рассмотреть только в плоскости с координатными осями  $x, y$ .

Математическое описание задачи теплопередачи в поверхностном слое при нагреве как от точечного источника энергии может быть представлено двумерным нестационарным уравнением теплопроводности, без учета теплоотдачи:

$$\frac{\lambda}{c\rho} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + Q. \quad (20)$$

Для которого выполняются начальное условие:  $T(x, y, 0) = T_0$ ; и условия  $T = T(x, y, t)$ ,  $-l_m < y < l_m$ ,  $0 < x < l_m$ ,  $t > 0$ . (21)

Граничные условия в момент времени  $t$ :

$$T(0, 0, t) = T_{пл}, T(l_m, 0, t) = T_0, T(0, \pm l_m, t) = T_0. \quad (22)$$

В случае движущегося со скоростью  $v$  источника условия (22) переписутся в виде:

$$T(x, 0, t) = T_{пл}, T(x, \pm l_m, t) = T_0. \quad (23)$$

Используются табличные соотношения:  $\rho = \rho(T)$ ,  $\lambda = \lambda(T)$ ,  $c = c(T)$ . Уточнение их значений, проводилось интерполяционным методом.

Дискретизация уравнения теплопроводности выполнена с помощью метода конечного объема. Полученная система линейных уравнений решается методом переменных направлений, который представляет собой комбинацию точного метода прогонки и итерационного метода Гаусса - Зейделя. На рис.15, как пример, приведено распределение температурного поля, полученного при расчетах.

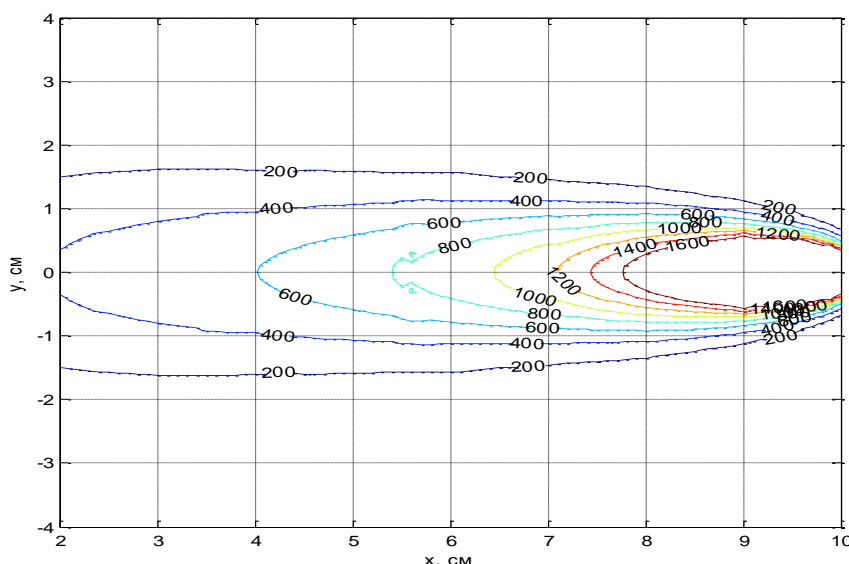


Рис.15. Распределения температурного поля (сталь 20).

Решение нестационарной задачи теплопроводности позволило определить характерные временные интервалы достижения температурного пика и размеры зон плавления и термического влияния, приводящих к структурным изменениям в них для различных марок стали.

## ВЫВОДЫ

Основные результаты диссертационной работы можно сформулировать следующим образом:

1. Проведен сравнительный численный анализ влияния компонентного состава рабочей смеси на характеристики дуговой плазмы. Установлено, что применение рабочей смеси аргон + активные компоненты газов, приводит к росту температуры в приосевой области дуги почти на 4000K в сравнении с чистым аргонном на 2000K в сравнении с воздухом.

2. Развита двумерная стационарная математическая модель с позиций ЛТР, с учетом условий фазового перехода на поверхности взаимодействия дуги с металлом на основе единой системы МГД уравнений для расчетной схемы дуга – зона обработки в воздушной среде. Результаты численных расчетов на основе

единой модели, позволили установить характер воздействия дуговой плазмы на обрабатываемую поверхность. Установлено, что при использовании воздуха как рабочей среды проплавляющая способность дуги возрастает в 1.3 раза, по сравнению с аргоном.

3. Усовершенствована стационарная двумерная математическая модель для совместного рассмотрения процессов в электрической дуге и в объеме сварочной ванны с учетом явления испарения атомов металла с поверхности обрабатываемого изделия. Система МГД уравнений дополняется уравнением конвективной диффузии паров металла.

4. Рассчитаны концентрация паров металла в объеме электрической дуги и коэффициенты диффузии паров металла. Установлено что в приосевой части конвекция является доминирующей, поэтому пары металла вовлекаются в радиальном направлении потоками газа и растекаются над поверхностью анода. В результате численного исследования установлено, что присутствие паров металла приводит к охлаждению дуги. Данное явление обусловлено увеличением коэффициента излучения в присутствии паров металла в интервале температур от 5000 до 13000К, приводящее к увеличению радиационных потерь в данном интервале. Установлено, что увеличение электропроводности при наличии паров металла приводит к охлаждению дуги и уменьшению электромагнитной составляющей в проплавляющую способность дуги.

5. Показано, что при решении задачи с учетом паров металла тепловой поток от дуги в сторону анода уменьшается на 27%, что приводит к уменьшению температуры на поверхности анода на 7%.

## **СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. **Аманкулова, Н.А.** Анализ процесса плазменной резки металлов путем математического моделирования механизмов образования реза [Текст] / Г.Дж. Кабаева, Н.А. Аманкулова // Вестн. КНУ им. Ж.Баласагына. Сер.3: Естественные и техн. науки, физика и техника, - Бишкек, 2005. -Вып. 3. -С. 138-141.

2. **Аманкулова, Н.А.** Оценка влияния теплофизических свойств плазмообразующего газа и разрезаемого металла на процесс образования реза [Текст] / А.Ж. Жайнаков, Г.Дж. Кабаева, Д.С. Асанов, Н.А. Аманкулова // Вестн. КНУ им. Ж.Баласагына. Сер. 3: Естественные и техн. науки, физика и техника, - Бишкек, 2005. -Вып. 3.-С.144-148.

3. **Аманкулова, Н.А.** Компьютерное моделирование процесса плазменной резки металлов [Текст] / А.Ж. Жайнаков, Г.Дж. Кабаева, Н.А. Аманкулова и др. // Вестн. КНУ им. Ж.Баласагына. Сер.3: Естественные и техн. науки, физика и техника, - Бишкек, 2007.-Вып. 3.- С.198-202.

4. **Аманкулова, Н.А.** Расчет напряженностей электрического поля вблизи электрода с произвольной формой [Текст] / Н.А. Аманкулова, А.Ж. Жайнаков, Д.С.Асанов // Изв. КГТУ.- Бишкек, 2007.- № 12.- С. 131-135.

5. **Аманкулова, Н.А.** Анализ распределения тепловых полей при обработке материала плазменной дугой [Текст] / Н.А. Аманкулова // Современные проблемы механики сплошных сред. - Бишкек, 2008.- Вып. - С. 172-179.

6. **Аманкулова, Н.А.** О виртуальной лаборатории плазменной обработки материалов [Текст] / А. Жайнаков, Г. Дж. Кабаева, Н.А. Аманкулова Ж.М. Жумалиев // Изв. КГТУ.- Бишкек, 2009.- № 16.- С. 131-134.

7. **Аманкулова, Н.А.** Компьютерное моделирование сопряженных задач теплообмена при плазменной резке металлов [Текст] / А.Ж. Жайнаков, Г.Дж. Кабаева, Н.А. Аманкулова // Вестн. КНУ им. Ж. Баласагына. Сер. 3: Естественно - техн. науки.- Бишкек, 2011.-С.125-129.
8. **Аманкулова, Н.А.** К расчету параметров воздушной дуги при плазменной резке металлов [Текст] / Г.Д. Кабаева, Н.А. Аманкулова // Изв. КГТУ. Материалы Междунар. юбил. конф. «Информационные технологии и мат. моделирование в науке, технике образовании». - Бишкек, 2011. - № 24. - С. 403-406.
9. **Аманкулова, Н.А.** К анализу приповерхностных явлений на аноде при контрагированной привязке воздушной дуги [Текст] / Н.А. Аманкулова // Тр. Международной конф. Современные проблемы механики сплошной среды. - Бишкек, 2012. - С. 88-93.
10. **Аманкулова, Н.А.** Расчет состава многокомпонентной воздушной плазмы [Текст] / Н.А. Аманкулова // Современные проблемы механики сплошных сред. - Бишкек, 2012.- Вып.15. - С.175-183
11. **Аманкулова, Н.А.** Исследование приповерхностных явлений на аноде при контрагированной привязке воздушной дуги [Текст] / Г.Дж. Кабаева, Н.А. Аманкулова // Вестн. КНУ им. Ж.Баласагына - Бишкек, 2013. - С.155-159.
12. **Аманкулова, Н.А.** Математическое моделирование приповерхностных явлений на аноде при воздушно - плазменной резке металлов [Текст] / А.Ж. Жайнаков, Г.Д. Кабаева, Н.А. Аманкулова // Zbornik radova konferencije MIT 2013.Matematicke i informacione tehnologije Beograd, april.- 2013. - С. 290-300.
13. **Аманкулова, Н.А.** Расчет характеристик сжатой воздушно-дуговой плазмы для резки [Текст] // А.Ж. Жайнаков, Г.Д. Кабаева, Н.А. Аманкулова // Изв. КГТУ. - Бишкек, 2014.- № 34. - С. 579-582.
14. **Аманкулова, Н.А.** О влиянии состава защитных газов на поведение электрической дуги и сварочной ванны [Текст] / А.Ж. Жайнаков, Р.Т. Султангазиева, Н.А. Аманкулова // Совместный вып. «Вычислительной технологии» Вестн. КАЗНУ им. аль - Фараби. Серия математика, механика, информатика. -Алмата, 2015. – Т.20.- №3 (86). - С. 208-215.
15. **Аманкулова, Н.А.** Численное моделирование влияния паров металла сварочной ванны на параметры электродуговой плазмы [Текст] / А.Ж. Жайнаков, Р.Т. Султангазиева, Н.А. Аманкулова // «Инновации в науке» сб. ст. по материалам LI Международной научно - практ. конф. - Новосибирск, 2015. –Ч. 1. № 11 (48). - С. 7-23.
16. **Аманкулова, Н.А.** О влиянии паров металла сварочной ванны на параметры электродуговой плазмы [Текст] / Р.Т. Султангазиева, Н.А. Аманкулова // Изв. КГТУ. - Бишкек, 2015. -№3(36). - С. 220-224.
17. **Аманкулова, Н.А.** Численный анализ влияния рабочего газа на характеристики электрической дуги и обрабатываемой поверхности [Текст] / Н.А. Аманкулова, Р.Т. Султангазиева, Г.Дж. Кабаева // «Инновации в науке» сб. ст. по материалам LIII Международной научно - практ. конф.- Новосибирск,- 2016.- Ч. 2.-№ 1 (50). - С. 53-64.
18. **Аманкулова, Н.А.** Влияние состава многокомпонентной рабочей среды на характеристики дуговой плазмы [Текст] / А.Жайнаков, Г.Дж. Кабаева // Физика. - Бишкек, 2016.-№1. - С.133-139.

**Аманкулова Нургүл Асимкановнанын «Плазманын электр жаа агымынын иштетилүүчү бет менен өз ара аракеттешүүсү» деген темадагы 01.02.05 – Суюктуктун, газдын жана плазманын механикасы адистиги боюнча физика-математика илимдеринин кандидаты окумуштуулук даражасын алуу үчүн жазган диссертациясынын**

### **РЕЗЮМЕСИ**

**Урунттуу сөздөр:** жаа плазмасындагы электр магниттик, жылуулук жана газ динамикасынын кубулуштары, иштетилүүчү металл, сандык моделдештирүү, металл буусу.

**Изилдөөнүн объекти:** плазматрондо түзүлгөн электр жаа плазма агымы жана электр жаасы эриткен анод металлынын эриген агымы.

**Иштин максаты:** электр жаа плазмасынын жергиликтүү термодинамикалык тең салмактуу (ЖТТ) абалындагы жаа плазмасында жана иштетилүүчү металлда өтүүчү эрүү жана буулануу процесстерин эске алуу менен бирге кароонун эки өлчөмдүү туруктуу математикалык моделдештирүү ыкмасын өнүктүрүү.

**Изилдөө ыкмалары:** математикалык моделдештирүү, сандык эксперимент.

**Алынган жыйынтыктар жана алардын жаңылыктары:**

– Жаа плазмасынын мүнөздөмөлөрүнө иште пайдаланылган аралашманын компонентинин курамынын таасирин аныктоо үчүн салыштырмалуу сандык талдоо жүргүзүлгөн. Иште пайдаланылган аргон аралашмасынын активдүү газ компоненттери менен колдонууда, температура жаанын октук аймагында, таза аргонго салыштырганда дээрлик 4000K, аба менен салыштырганда 2000K жогорулашына алып келери аныкталды.

– Бирге короо моделдин негизинде аба жана аргон чөйрөсүндөгү жаа плазмасынын металлдын иштетилүүчү бетине тийгизген электр магниттик жана жылуулук таасирлеринин мүнөздөрүн аныктоонун сандык эсептөөлөрү аткарылды. Аргонго салыштырганда аба жаасы дээрлик кысылган жана туурасынан кеткен өлчөмүнүн кичине болушу, иштетилүүчү нерсеге жылуулук жана күч таасирлеринин жогору болушуна шарт түзөт деп аныкталды.

– Металлдын иштетилүүчү бетинен чыккан металл атомдорунун буулануу кубулушун эске алуу менен ширетүү ваннасындагы жана электр жаасындагы процесстерди кароо үчүн жергиликтүү термодинамикалык тең салмактуу (ЖТТ) абалындагы эки өлчөмдүү туруктуу математикалык модели өнүктүрүлдү. Металл буусунун болушу менен электр өткөрүмдүүлүктүн өзгөрүүсү жаанын муздашына жана эритүү жөндөмдүүлүгүнүн электр магниттик түзүмүнүн азайышына алып келери аныкталды.

– Металл буусун эске алып тапшырманы чечүүдө жаадан чыккан жылуулук агымынын анодго карай 27% азайышы, аноддун бетинде температуранын 7% төмөндөшүнө алып келүүсү көрсөтүлөт.

**Колдонуу аймагы:** Жыйынтыктарды электр жаа агымынын жардамы менен ар кандай беттерди иштетүүдө материалдарды иштетүү технологиялык процесстеринде колдонулуучу плазматрондордун иштөө шартын оптималдаштыруу максатында колдонсо болот. Ошондой эле жыйынтыктар окуу процессинде «Математикалык моделдештирүү», «Металлургиялык процесстерди математикалык моделдештирүү» сабактарынан окутууга сунуштоого болот.

## РЕЗЮМЕ

**диссертации Аманкуловой Нургул Асимкановны на тему: «Взаимодействие электродуговых потоков плазмы с обрабатываемой поверхностью» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы**

**Ключевые слова:** электромагнитные, тепловые и газодинамические явления в дуговой плазме, обрабатываемый металл, численное моделирование, пары металлов.

**Объект исследования:** электродуговой поток плазмы, формируемый плазматроном и потоки жидкого металла анода, расплавленного дуговой плазмой.

**Цель работы:** усовершенствование двумерной стационарной математической модели электрических дуг в приближении локального термодинамического равновесия (ЛТР) плазмы для совместного рассмотрения процессов в дуговой плазме и на поверхности обработки металла с учетом его плавления и испарения.

**Методы исследования:** математическое моделирование, численный эксперимент.

**Полученные результаты и их новизна:**

– Проведен сравнительный численный анализ влияния компонентного состава рабочей смеси на характеристики дуговой плазмы. Установлено, что применение рабочей смеси аргон + активные компоненты газов, приводит к росту температуры в приосевой области дуги в сравнении с аргоном на 4000K, в сравнении с воздухом на 2000K.

– Выполнены численные расчеты на основе единой модели, позволяющие установить характер электромагнитного и теплового воздействия дуговой плазмы в среде воздуха и аргона на обрабатываемую поверхность. Установлено, дуга в воздухе более сжата и меньшие поперечные размеры дуги обуславливают большее тепловое и силовое воздействие на обрабатываемое изделие в сравнении с аргоном.

– Усовершенствована двумерная стационарная математическая модель с позиций ЛТР, для рассмотрения процессов в электрической дуге и в объеме сварочной ванны с учетом явления испарения атомов металла с поверхности обрабатываемого изделия. В результате численного исследования установлено, что присутствие паров металла приводит к охлаждению дуги.

– Показано, что при решении задачи с учетом паров металла тепловой поток от дуги в сторону анода уменьшается на 27%, что приводит к уменьшению температуры на поверхности анода на 7%.

**Область применения:** Полученные результаты могут быть использованы при исследовании процессов обработки различных поверхностей электродуговыми потоками энергии с целью оптимизации режимов работы плазматронов, в технологических процессах обработки материалов. Результаты исследований могут быть рекомендованы для применения в учебном процессе по дисциплинам «Математическое моделирование» и «Математическое моделирование металлургических процессов».

## SUMMARY

**dissertation Amankulova Nurgul Asimkanovny on the theme: "Interaction of electric arc plasma flows with the treated surface" for the degree of candidate of physical and mathematical sciences on a specialty 01.02.05 - Mechanics of liquid, gas and plasma**

**Keywords:** arc plasma flows, processed metal, numerical simulation, a single model, a pair of metal.

**Object of research:** arc plasma stream generated by plasma torch and flows of liquid metal anode, melted by an electric arc.

**Purpose of work:** improvement of two-dimensional steady-state mathematical model of electric arcs in the approximation of local thermodynamic equilibrium (LTE) plasma for joint review processes in the arc plasma and on the surface of metal processing, taking into account its melting and evaporation.

**Methods:** mathematical modeling, computational experiment.

**The results and their novelty:**

- A comparative numerical analysis of the effect of the component composition of the working mixture in the characteristics of the plasma arc. It is found that the use of a mixture of argon working gas + active component leads to an increase of temperature in the axial region of the arc in comparison with argon at 4000K, as compared with the air at 2000K.

- Numerical calculations based on a single model, allowing to establish the nature of the electromagnetic and thermal effects of the arc plasma in air and argon on the surface. It was established arc in the air more compressed and smaller cross-sectional dimensions of the arc cause more heat and a force on the workpiece in comparison with argon.

- Improved two-dimensional mathematical model of a stationary position with LTE, for the consideration of the processes in the arc and weld pool in volume, taking into account the phenomenon of evaporation of metal atoms from the surface of the workpiece. The numerical study found that the presence of metal vapor arc resulting in cooling.

- Shown that solving the problem of metal vapor given heat flow from the arc toward the anode is reduced by 27%, resulting in a reduced temperature at the anode surface is 7%.

**Scope:** The results can be used for studying the treatment of various surfaces for the electric energy flows to optimize the plasmatron operating modes, in materials processing technology processes. The research results can be recommended for use in the educational process in the disciplines of "Mathematical Modeling" and "Mathematical modeling of metallurgical processes."

**АМАНКУЛОВА НУРГУЛ АСИМКАНОВНА**

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ПОТОКОВ ПЛАЗМЫ С  
ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ**

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико - математических наук

Подписано в печать 29.12.2016.  
Формат 60x84 1/16. Объем 1.25 п.л.  
Бумага офсетная. Печать офсетная.  
Тираж 150 экз. Заказ 345

---

720020, г. Бишкек, ул. Малдыбаева 34, б,  
Кыргызский государственный университет  
строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова

