

2000 100

**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ**

На правах рукописи

**МУКАЛАЕВ КАНЫБЕК ОБОЗОВИЧ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ НАЧАЛЬНОГО УЧАСТКА  
ПРОТЯЖЕННОЙ ДУГИ В КАНАЛЕ**

**01.04.14 – теплофизика и молекулярная физика**

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук**

**Бишкек - 2000**

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ

На правах рукописи

МУКАЛАЕВ КАНЫБЕК ОБОЗОВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ НАЧАЛЬНОГО УЧАСТКА  
ПРОТЯЖЕННОЙ ДУГИ В КАНАЛЕ

01.04.14-теплофизика и молекулярная физика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Бишкек-2000

Работа выполнена в Институте Физики Национальной Академии  
Наук Кыргызской Республики

**Научные руководители:**

акад. НАН КР, д.ф.-м.н., профессор Ж.Ж. Жеенбаев  
д.ф.-м.н., профессор В.М. Лелевкин

**Официальные оппоненты:**

д.ф.-м.н., профессор В. С. Слободянюк  
к.ф.-м.н. А. Т. Байтерекон

**Ведущая организация:** Институт теоретической и прикладной  
механики СО РАН

Защита диссертации состоится "15" сентября 2000г. в 14<sup>00</sup> часов на  
заседании диссертационного совета Д 01.00.108 в Институте Физики  
Национальной Академии Наук Кыргызской Республики, 720071, г. Бишкек,  
проспект Чуй 265<sup>а</sup>

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

Автореферат разослан "14" августа 2000г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета

к.ф.-м.н.

  
Л. К. Меренкова

**ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность темы.** Достигнутые успехи в создании плазменных генераторов (М.Ф. Жуков, Б.А. Урюков, А.С. Аньшаков, А.Н. Тимошевский и др.) и разработка на их основе технологических процессов позволяют говорить о низкотемпературной плазме как о важном элементе новых промышленных технологий, интенсифицирующих производство. Для эффективного применения плазматронов необходимо знать: - начальный участок дуги - это область, в которой происходит нагрев и ускорение потока газа под влиянием джоулева тепловыделения в токопроводящем дуговом столбе и взаимодействия его со стенками канала.

В настоящее время исследованию начального участка относятся работы Э.И. Асиновского, Е.П. Пахомова, И.М. Ярцева, А.Н. Тимошевского, О.А. Синкевича и т.д. Теоретическому описанию начального участка дуги посвящены работы (В.А. Урюков, В.С. Энгельшт, А.Ж. Жайнаков, В.М. Лелевкин, В.Ф. Семенов и др.).

Таким образом задача исследования характеристик начального участка, необходимых при конструировании и использовании генераторов потока плазмы является **актуальной** и представляет большой интерес для специалистов. Решение таких задач связано с определенными трудностями: выбором объекта (источника потока плазмы) и установлением точности измерения параметров плазмы, обработки и интерпретацией полученных результатов. Данная работа посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию характеристик ламинарного потока плазмы на начальном участке канала каскадной дуги.

**Цель работы.** На основе разработанного катодного насадка и экспериментального изучения начального участка канала каскадной дуги определить характеристики ламинарного потока плазмы: статическое давление, электрический потенциал, условия горения дуговой плазмы, длина начального участка канала плазматрона. Для этого необходимо:

1. Разработать катодный насадок, позволяющий получить на срезе сопла одномерное, близкое к развитому течение плазмы;
2. Разработать кюветный интерферометр и специальные шайбы;
3. Выполнить цикл измерений и регистрацию физических параметров начального участка дуги;
4. Усовершенствовать зонд и специальные шайбы для измерения напряженности электрического поля зондовым методом;
5. Провести численный анализ характеристик потока плазмы и сравнить их экспериментальными измерениями при адекватных условиях;

**Научная новизна:**

1. Впервые разработан катодный насадок состоящий из набора медных водоохлаждаемых шайб, позволяющий стабилизировать режим горения дуги у катода и получить на срезе насадка поток близкий к одномерному развитому течению плазмы;
2. Разработан кюветный интерферометр;
3. Проведены измерения характеристик потока плазмы на начальном участке канала каскадной дуги;
4. Выполнен численный расчет характеристик начального участка канала плазматрона и проведено сравнение результатов расчета с полученными экспериментальными данными;

**Практическая ценность работы:**

1. Обобщены экспериментальные данные на начальном участке канала каскадной дуги, полученные в данной работе и в работах других авторов;
2. Разработан катодный насадок и кюветный интерферометр;
3. Усовершенствованы устройства для зондового измерения напряженности электрического поля;
4. Корректно определены характеристики потока плазмы на начальном участке канала плазматрона и сделаны практические рекомендации.

**На защиту выносятся:**

1. Конструкция катодного насадка, разработанного для стабилизации горения дуги у катода;
2. Результаты экспериментальных измерений статического давления, градиента статического давления, напряженности электрического поля и условий реализации ламинарности течения плазмы;
3. Характеристики потока плазмы в зависимости от изменения тока дуги и расхода газа;
4. Результаты численного расчета и сравнения их с экспериментальными данными;

**Апробация работы.** Материалы диссертации докладывались и обсуждались на: X Международном Симпозиуме по плазмохимии (Бохум, Германия 1991), II Европейском Конгрессе по термической плазмообработке (Париж, Франция, 1992), II Международной Конференции "Физика плазмы и плазменные технологии" (Минск, Беларусь, 1997), на научных семинарах Института физики НАН КР.

**Основные результаты** опубликованы в 18 работах.

**Структура работы.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, библиографии (98 наименований). Работа содержит 118 страницы машинописного текста, 34 рисунка, 8 таблицы.

**Во введении** отражена актуальность диссертационной работы, ставится цель и задача исследований, сформулированы результаты, отражающие новизну и практическую ценность работы, а также положения, выносимые на защиту. Выполнен краткий обзор литературы в данной области исследования.

**В первой главе** описывается экспериментальная установка и рассматриваются методы исследования параметров плазменного потока.

Для получения достоверных результатов в эксперименте необходимо иметь стабильный, крупномасштабный источник низкотемпературной плазмы с контролируемым составом, позволяющим проводить измерения характеристик без сильного возмущения потока. В качестве такого устройства используется каскадная электрическая дуга постоянного тока, стабилизированная холодными стенками канала диаметром  $2R=3$  см, и длиной  $L/2R=60\pm 65$ , набираемыми из медных водоохлаждаемых шайб с зазором между ними 1 мм и глубиной 2 мм. Данная экспериментальная установка разработана сотрудниками Института высоких температур АН СССР и усовершенствована в Институте физики Национальной Академии Наук Кыргызской Республики. Для достижения на начальном участке канала каскадной дуги течения близкого развитому разработан катодный насадок рис. 1.

Проведены зондовые измерения распределения электрического потенциала на начальном участке каскадной дуги (рис. 2). Зондом служила вольфрамовая проволочка диаметром 0,2 мм, пересекающая струю плазмы перпендикулярно ее оси. Скорость перемещения зонда ( $\sim 0,5$  м/с) такова, что в плазме он оставался "практически холодным". Поэтому эмиссией электронов с поверхности зонда можно пренебречь. В приводимых экспериментах ток дуги изменялся  $I=60, 90, 100$  А, напряжение  $U=325, 340, 365$  В, расход газа  $G=1, 2, 3$  г/с, а расход газа через насадок поддерживался постоянным  $G_0=0,01$  г/с. Сигнал зонда регистрировался с помощью двух лучевым осциллографом С1-69. Включенное последовательно зонду сопротивление 5 МОм устраняло влияние сопротивления холодной оболочки, окружающей зонд, на результаты измерений и обеспечивало работу зондовой схемы в режиме вольтметра. Зондовые измерения проводились на расстоянии 12 см от среза катодного насадка при постоянных скоростях развертки осциллографа- и не выявили высокочастотных пульсаций электрического сигнала. Типичные осциллограммы зондового сигнала показаны на рис. 2.

Характерной для области начального участка течения "Полученные для  $d=3$  см результаты, нанесены на рис. 3. Представленные величины  $E$  и

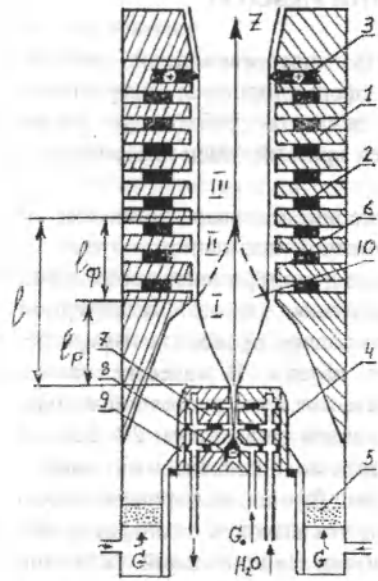


Рис.1. Схема экспериментальной установки каскадной дуги с катодным насадком: 1-водоохлаждаемые шайбы, 2-изолирующие кольца, 3-анод, 4-катодный насадок, 5-спрямляющая решетка, 6-специальная шайба, 7-водоохлаждаемые шайбы, 8-катод, 9-изолирующие кольца, 10-поток плазмы.

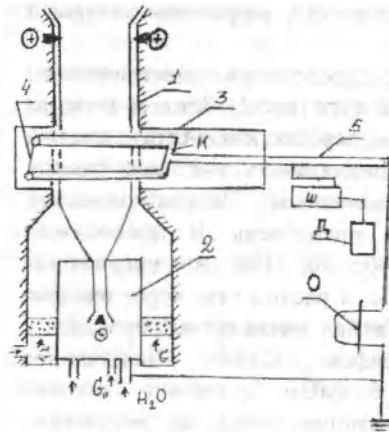
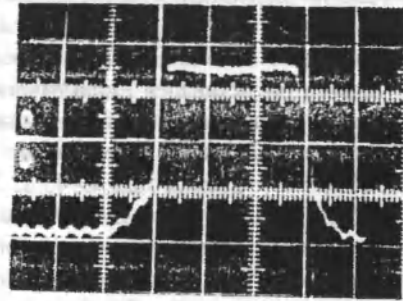


Рис.2. Схема каскадной дуги и устройства для зондовых измерений: 1-каскадная дуга, 2-катодный насадок, 3-специальная шайба, 4-вольфрамовая проволока, 5-зонд, Ш-щиток, К-контакт, О-осциллограф, Д-синхронный двигатель. Типичные осциллограммы потенциала зонда на расстоянии 12 см от катодного насадка.



В результате обработки осциллограмм построено распределение электрического потенциала, который регистрирует зонд в струе плазмы

Экспериментально установлено, что на поверхность катодного сопла осуществляется возврат части испарившихся атомов: из латунного корпуса происходит перенос атомов латуни на поверхность меди. Поэтому, заглублиение катода позволяет увеличить его ресурс работы. Аналогичные результаты наблюдались в экспериментах М.Ф.Жукова, А.Н.Тимошевского, Э.К. Урбаха и др. (ИТПМ СО РАН).

Во второй главе проводится цикл экспериментов по определению характеристик ламинарного потока плазмы аргона атмосферного давления истекающего из катодного насадка в канал каскадной дуги; длина канала  $L \sim 2$  м, радиус  $R=15$  мм ток дуги  $I=60,75,100$  А, расход газа  $G=1,2,3$  г/с. Для исключения влияния электрода и при электродных процессах на характеристики потока плазмы полагается, что внутренний электрод (катод) имеет достаточно протяженный цилиндрический (катодный) насадок длиной  $L_0 = 22$  мм, через который пропускают "малый расход" газа  $G_0 = 0,01$  г/с. Основной расход газа подается коаксиально в канал через спрямляющуюся решетку.

На срезе насадки формируется практически одномерный поток плазмы, который втекает в цилиндрический канал и стабилизируется однородным коаксиальным течением холодного газа. Дуга расширяется вниз по потоку и на некотором расстоянии нагретый газ достигает стенок канала. Взаимодействие плазмы со стенками канала приводит к тому, что с удалением от начального сечения все характеристики потока постепенно перестраиваются до асимптотического вида. Наличие катодного насадка дает возможность корректного сравнения экспериментальных данных с теоретическим расчетам. Расход газа в катодном насадке подается равным не более  $0,01$  г/с, что позволяет получить на выходе из сопла близкое к одномерному и развитому ламинарное течение плазмы. Отмечено, что при расходах газа в катодном сопле, меньших  $0,01$  г/с, наблюдается неустойчивость горения дуги и ее погасание. Следовательно, значение расхода равное  $0,01$  г/с в катодной насадке является критическим для реализации устойчивого стабильного ламинарного потока как в катодной насадке, так и на начальном участке канала плазматрона.

Потенциал шайбы относительно одного из электродов (катод) дуги  $\varphi(z)$  измерялся цифровым вольтметром. Напряженность поля характеризующего удельный энерговклад в столб дуги  $E=d\varphi/dz$ , определялась из наклона прямолинейной части продольного распределения  $\varphi(z)$ , характерной для области начального участка течения. Полученные для  $d=3$  см результаты, нанесены на рис.3. Представленные величины  $E \cdot d$

для дуг с разными  $d$  определяются величиной  $I/d$ . Функциональный рост  $E \cdot d$ , а значит и энерговыход на единицу длины дуги, с увеличением  $d$  (при  $I/d = \text{const}$ ) связан с усилением роли радиационных потерь в энергетическом балансе. Определенный вклад в расщепление кривых (в особенности при малых  $I/d$ ) играют по-видимому излучение и наличие тепловой неравновесности дуговой плазмы. Видно, как по мере прогресса газа в дуге напряженность изменяется от больших величин до асимптотических значений  $E_\infty$ . Величина  $E(z)$  на начальном участке при  $z/G \approx 5 \text{ см} \cdot \text{г}/\text{с}$  практически на 50% больше значения  $E_\infty$ .

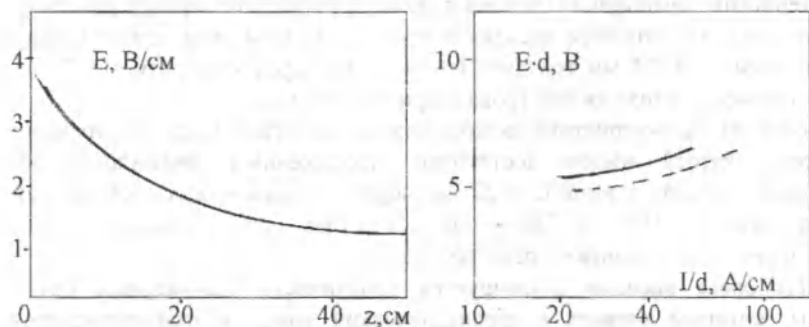


Рис.3. Продольное изменение  $E$ ,  $E \cdot d$  от  $I/d$ :  $d=3 \text{ см}$ ,  $G=2 \text{ г}/\text{с}$  (пунктир - измерения Э.И. Асиновского, Е.П. Пахомова).

Координата  $z$ , где отличие  $E(z)$  от  $E_\infty$  не превышает 1%, принимается за длину теплового начального участка  $l(E)$ . Продольная координата  $z$  отсчитывалась от среза сопла. Как показали работы Е.П. Пахомова, В.М. Лелевкина, В.С. Энгельшта, длина начального участка, определяемая по изменению осевой температуры дуги соизмерима с длиной определяемой по изменению напряженности электрического поля  $l_T \approx l(E)$ . Длина  $l_T$  определялась по измерениям продольных распределений электрического потенциала по шайбам дугового канала. Величина гидродинамического начального участка устанавливалась на основе измерения градиента газостатического давления  $dp/dz$ . При экспериментальном исследовании газостатического давления, измерения проводились в 25-ти сечениях по всей длине каскадной дуги (150 см) и в 23-х сечениях на расстоянии 50 см от катодного насадка. Измерение статического давления осуществлялось в зазоре между шайбами канала дуги микроманометром наклонной трубкой типа ММН - 240. Результаты измерений при  $I=60 \text{ А}$ ;  $75 \text{ А}$ ;  $100 \text{ А}$ ; и  $d=3 \text{ см}$ , приведена на рис.4. Координата по оси  $z$  точки перехода кривых  $(P_i - P_k)/G = f(z, G, I)$  к единой (для  $I = \text{const}$ ) линейной зависимости, определяет длину начального гидродинамического участка дуги -  $l_H$ . Максимальная величина  $l_H$  не превышает 100 см при расходе  $G=3 \text{ г}/\text{с}$  для

исследованных значений тока дуги, что соответствует результатам измерений, полученных Э. И. Асиновским, Е.П. Пахомовым и И. М. Ярцевым в различных сечениях канала дуги при силе тока  $I=160 \text{ А}$ .

Типичные результаты измерений напряженности статического и градиента газостатического давления представлены на рис.4.

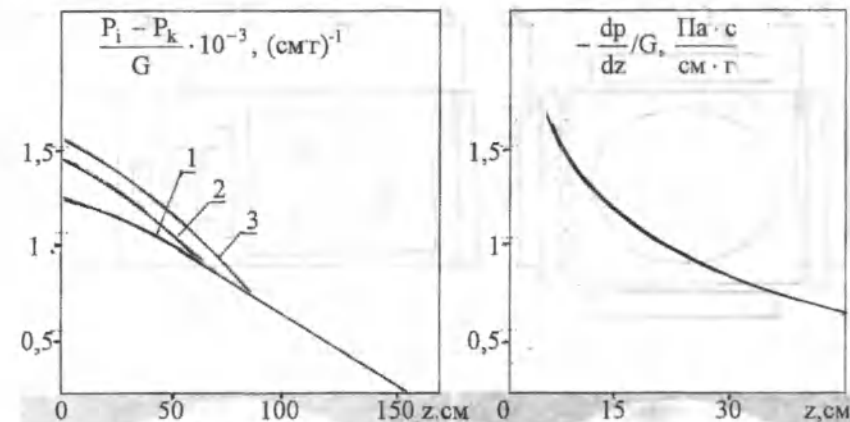


Рис.4. Продольное распределение статического давления  $(P_i - P_k) / G$ :  $d=3 \text{ см}$ ,  $I=75 \text{ А}$ ,  $G=1(1)$ ,  $2(2)$ ,  $3(3) \text{ г}/\text{с}$ .

Полученные характеристики отнесены к соответствующим значениям для установившегося потока с целью сопоставления результатов измерений при разных  $z$  и  $G$ . Получено следующее: значения  $l_T$  и  $l_H$  в пределах погрешностей измерений прямо пропорциональны величине расхода  $G$ ; длина гидродинамического начального участка существенно превышает длину теплового; при увеличении тока дуги наблюдается тенденция уменьшения длины начального участка. В условиях измерений относительная длина гидродинамического начального участка составляет  $l_H/G=40 \div 60 \text{ см} \cdot \text{с}/\text{г}$ , а длина теплового  $l_T/G=25 \div 35 \text{ см} \cdot \text{с}/\text{г}$ . Полученные соотношения ( $l_H/G = \text{const}$ ) справедливы в ограниченном диапазоне расходов газа  $0,5 \leq G \leq 3 \text{ г}/\text{с}$ . При больших и малых  $G$  величина  $l_H$  стремится к конечному пределу. В первом случае это связано с развитием турбулентного характера течения, а во втором из-за производительности катодного сопла  $G_0$ . При  $G > 3 \text{ г}/\text{с}$  обнаруживается тенденция уменьшения  $l_H(E)/G$ . Полученные измерения согласуются с данными Э. И. Асиновского, Е. П. Пахомова, И. М. Ярцева.

Исследования характера течения потока плазмы на начальном участке дуги для определения перехода ламинарного режима течения в турбулентный проводились шпирен-интерферометрическим методом на приборе с помощью коветного интерферометра. Данное устройство (Рис.5) разработано в

лаборатории неравновесных процессов Институт Физики Национальной Академии Наук Республики Беларусь и лаборатории плазменных технологий Институт Физики Национальной Академии Наук Кыргызской Республики.

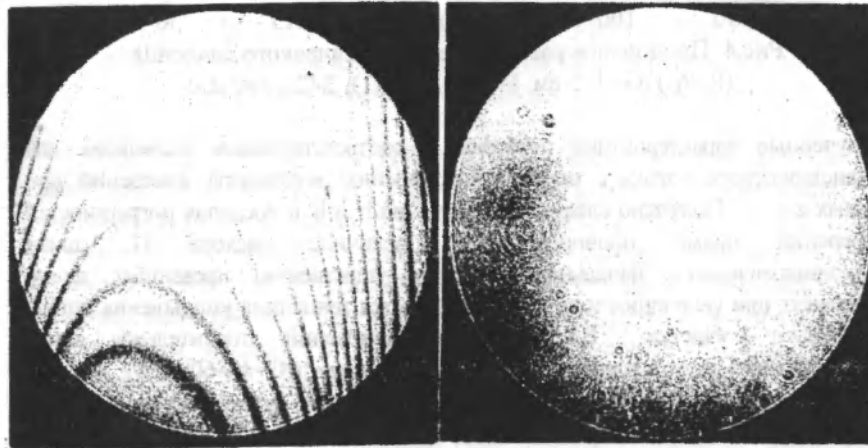
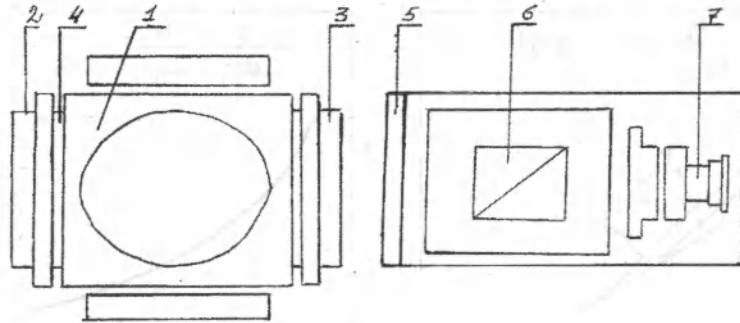


Рис.5. Кубический интерферометр (вид сверху) и шпирен интерферограммы:  $I=60$  А,  $G=1$  и  $3,5$  г/с 1 - кубический ковет, 2,3 - полупрозрачные зеркала, 4 - резиновые прокладка, 5 - объектив, 6 - светоделительный кубик, 7 - микрообъектив.

Типичные шпирен-интерферограммы потока плазмы для расходов  $G=1; 2; 3; 3,5$  г/с приведены на рис. 5, на которых видны турбулентные и ламинарные режимы течения плазмы. Анализ интерферограмм позволяет

заклчить, что при расходах аргона менее  $3$  г/с, поток плазмы ламинарен. С увеличением расхода газа  $G>3$  г/с происходит размазывание интерференционных полос. Это обстоятельство можно

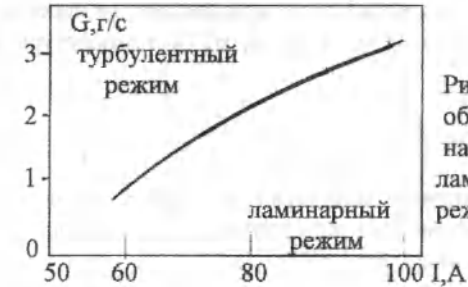


Рис.6. Влияние расхода плазмообразующего газа и силы тока на границу перехода течения от ламинарного в турбулентный режимы течения.

объяснить как переход ламинарного потока в турбулентный режим течения. Результаты исследований на начальном участке дуги (рис.6) позволили установить границу перехода ламинарного режима течения в турбулентное.

В третьей главе рассматривается математическая модель, учитывающая основные механизмы нагрева и ускорения газа электрической дугой на начальном участке канала и методика численного решения системы магнитогидродинамических уравнений электродуговой плазмы в приближении пограничного слоя (В.Н.Ветлущий, А.И.Ивлютин, В.М.Лелевкин, В.Ф.Семенов и др.). Предполагается, что процессы стационарны, течение ламинарное, плазма атмосферного давления представляет собой сплошную деформируемую квазинейтральную среду и находится в состоянии локального термодинамического равновесия, излучение объемное, работа сил давления и вязкая диссипация не учитываются, при электродные процессы не оказывают влияния на характеристики течения.

Для теоретического описания потоков электродуговой плазмы используются уравнения энергии, движения, непрерывности, Максвелла в цилиндрической системе координат:

$$\text{энергии - } \rho_p \left( u \frac{\partial T}{\partial z} + v \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \sigma E^2 - \psi,$$

$$\text{движения - } \rho \left( u \frac{\partial u}{\partial z} + v \frac{\partial u}{\partial r} \right) = - \frac{\partial}{\partial z} \left( p + \mu_0 \frac{H^2}{2} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \eta \frac{\partial u}{\partial r} \right),$$

$$\text{непрерывности - } \frac{1}{\alpha} (r \rho v) + \frac{\partial}{\partial r} (\rho u) = 0,$$

Максвелла - 
$$j_r = -\frac{\partial H}{\partial z} \quad H = \frac{E}{r} \int_0^r \sigma dr,$$

Система дополняется интегральными соотношениями сохранения тока дуги, расхода газа, законом Ома и зависимостями коэффициентов переноса и теплофизических свойства плазмы ( $\rho$ ,  $c_p$ ,  $\lambda$ ,  $\eta$ ,  $\sigma$ ,  $\psi$ ) от температуры и давления:

$$I = 2\pi E \int_0^R \sigma r dr, \quad G = 2\pi \int_0^R \rho u r dr, \quad P = P_0 + \int_0^z (dp/dz) dz + \mu_0 E \int_0^R \sigma H dr$$

Для решения системы уравнений задаются граничные условия в начальном сечении, на оси симметрии и на "холодных стенках" канала:

$$\begin{aligned} z=0, \quad 0 \leq r \leq R: \quad T &= T(r, 0), \quad u = u(r, 0); \\ z > 0, \quad r = 0: \quad \partial T / \partial r &= 0, \quad \partial u / \partial r = 0, \quad v(0, z); \\ r = R: \quad T(R, z) &= T_R, \quad u(R, z) = 0. \end{aligned}$$

При записи уравнений использованы общепринятые обозначения:

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м - магнитная постоянная;  $u, v, E, j, H$  - компоненты векторы скорости, напряженности электрического поля, плотности электрического тока и напряженности магнитного поля,  $T$  - температура,  $\rho$  - плотность,  $c_p$  - теплоемкость при постоянном давлении,  $\lambda$  - теплопроводность,  $\mu$  - вязкость,  $\sigma$  - электропроводность,  $\psi$  - излучательная способность. Решения системы нелинейных МГД уравнений пограничного слоя проводится методом конечных разностей (метод сеток).

Как показали численные исследование (Рис.7) в дуге можно выделить три характерные области: расширения, переходная, асимптотическая.

**Область расширения** I обеспечивает электрическую связь от среза катодного сопла через холодный окружающий коаксиальной с пучком поток с дуговым столбом, размеры которого соизмеримы с диаметром стабилизирующего канала каскадной дуги. Вследствие прогрева газа увеличивается вниз по потоку радиус дуги, уменьшаются напряженность электрического поля и температура на оси дуги. Аксиальная компонента скорости, наоборот, вначале возрастает, достигает максимального значения, а затем уменьшается. Это объясняется тем, что на первых слоях собственные электромагнитные силы ускоряют поток плазмы и заметно превосходят вязкие, а далее все большую роль в формировании потока играют градиент давления и вязкое трение, тормозящее движение плазмы в ядре дуги и ускоряющее газ на периферии. Подсос газа в дуговой разряд определяется совместным действием электромагнитных и вязких сил. Количество газа внутри токопроводящего канала  $G \sim I^{3/4}$  и не зависит

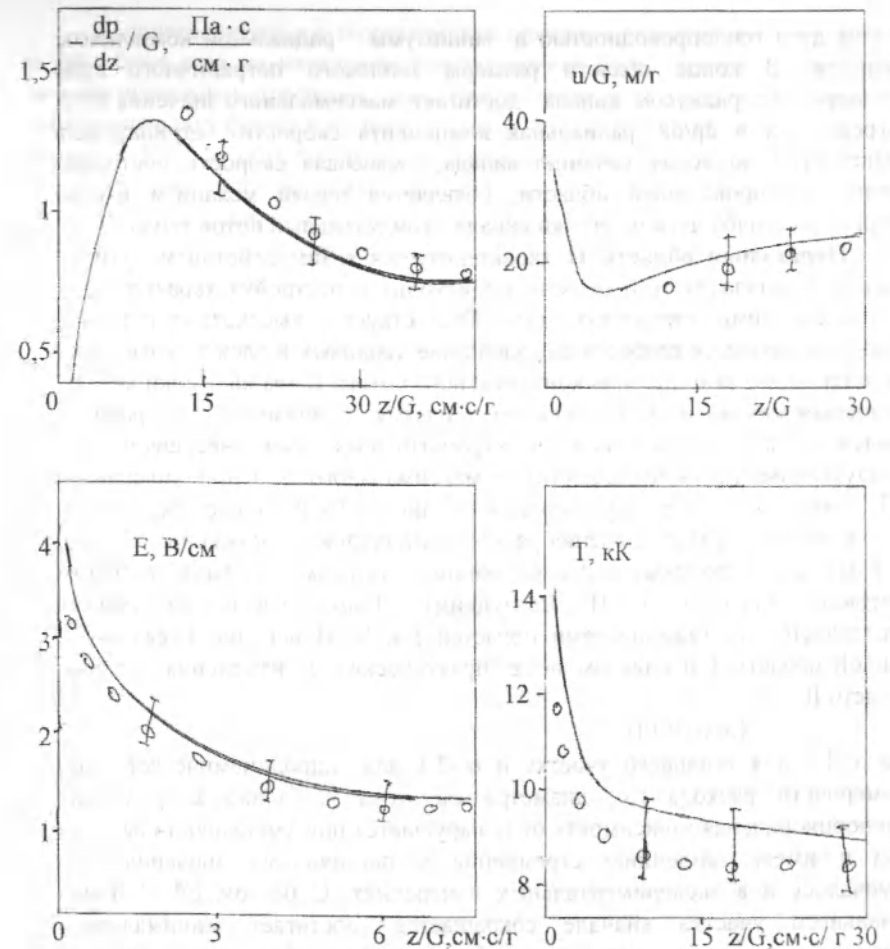


Рис.7. Аксиальное изменение осевой температуры, напряженности электрического поля, осевой скорости и градиента давления ( $I=75\text{А}$ ,  $d=3\text{см}$ ,  $G=1\text{г/с}$  сплошные линии - расчет, точки - эксперимент).

от изменении расхода. Массовая компонента скорости непостоянна по сечению канала: имеет максимумы на оси дуги и у стенок канала, минимум - вблизи токопроводящей границы. Радиальные профили температуры и скорости потока плазмы имеют гладкое асимптотическое сопряжение с внешним изотермическим потоком газа. Вблизи границы токопроводящего канала наблюдается максимум кондуктивного потока тепла, выносимого из



столба дуги теплопроводностью и минимумы радиальной компоненты скорости. В конце области размеры теплового пограничного слоя соизмеримы с радиусом канала достигает максимального значения КПД нагрева газа и  $dp/dz$ , радиальная компонента скорости отрицательна практически по всему сечению канала, массовая скорость постоянна внутри токопроводящей области, появляется новый механизм отвода энергии из столба дуги на стенки канала - кондуктивный поток тепла.

**Переходная область II** характеризуется взаимодействием дуги со стенками канала. В этой области происходит перестройка характеристик потока до асимптотического вида. Отсутствует высокотемпературное ядро, наблюдается слабое взаимодействие тепловых и электромагнитных характеристик, заметна роль кондуктивного потока тепла на стенки канала. Основным механизмом ускоряющим плазму является градиент давления, а действие электромагнитных сил не существенно. Кондуктивный поток тепла достигает максимального значения, локальный КПД нагрева газа стремится к нулю. Полученные результаты обобщаются на другие значения расхода газа (условия растяжения:  $Gz$ ,  $Gd$ ,  $GdP/dz$ ) при постоянных  $I$ ,  $d$  и подобном начальном профиле скорости (впервые отмечено В. Н. Ветлущким). Длина начального участка определяется протяженностями областей I и II. Изменение  $L$  связано с длиной области I и сдвигом по  $z$  (практически без изменения) длины области II

$$L = \alpha G(d/I)^{0.5}$$

где  $\alpha=1.3$  для теплового участка и  $\alpha=2.3$  для гидродинамического при размерности расхода г/с, диаметра см, тока А, длина  $L$  в метрах. Пропорциональная зависимость от  $G$  нарушается при уменьшении расхода газа и имеет тенденцию стремления к постоянному значению что отмечалось и в экспериментальных измерениях. С ростом  $I/d$   $L$  длина начального участка вначале сокращается, достигает минимального значения, а затем возрастает. Это можно объяснить обратной зависимостью вязкости от температуры.

**В асимптотической области** канала плазматрона III (то же самое и на срезе катодного насадка) характеристики потока плазмы не зависят от граничных условий начального сечения и постоянны вдоль аксиальной координаты. Джоулево тепло полностью отводится на стенки канала теплопроводностью и излучением. Постоянный градиент газостатического давления идет на преодоление касательного напряжения, вызванного вязким трением потока о стенки канала. Скорость потока пропорциональна расходу газа и определяется распределением температуры через вязкость и плотность.

Удовлетворительное теоретическое описание развития дуги, нагрева и ускорения газа на начальном участке может быть получено в случае задания начальных профилей, адекватно отражающих условия на входе в канал, поскольку форма и степень развития начальных распределений  $T$ ,  $u$  наряду с  $I$ ,  $G$ ,  $d$  обуславливает дальнейшую динамику газа и дугового столба. Длина гидродинамического начального участка практически в 2 раза превышает длину теплового, т.е. динамические процессы являются определяющими для достижения полностью развитого режима течения в каналах с электрической дугой. Отсюда следует, что минимальная длина установки, необходимая для реализации установившегося течения, определяется гидродинамическими параметрами и составляет  $z/G=40$  см·с/г при  $I=100$  А что согласуется с экспериментальными данными.

Рассмотрена зависимость характеристик начального участка канала плазматрона от расхода газа, тока дуги и диаметра канала. Аксиальный поток холодного газа стабилизирует столб дуги в области I и играет роль холодных стенок канала. Прогрев газа происходит на расстояниях, пропорциональных  $G$ . Такая же зависимость наблюдается для аксиальной компоненты скорости и градиента газостатического давления. Полученные результаты позволяют обобщить данные на другие значения расхода газа при постоянных параметрах  $I$ ,  $d$  и подобном профиле скорости в начальном сечении. Собственные электромагнитные силы в начальных сечениях области I нарушают пропорциональность растяжения по  $G$  и это особенно заметно при больших токах дуги и малых расходах газа. В случае, например,  $I=75$  А,  $G<0.2$  г/с,  $d=3$  см расход газа  $G<G(z)$  приближение пограничного слоя не позволяет определить характеристики потока плазмы от среза насадка. Как показали расчёты на основе полном МГД системы уравнений (В. М. Лелевкин, Д. В. Невелёв, Э. Б. Кулумбаев, В. Ф. Семенов) в канале плазматрона возникают вихревые течения, так как ядро потока движется в направлении оси, а вблизи стенок канала холодный газ подсасывается в столб дуги и течет обратно. Следовательно, произвольное задание  $I$ ,  $d$ ,  $G$ ,  $d_0$ ,  $G_0$  ограничено применимостью МГД модели пограничного слоя.

С увеличением расхода газа от 0.5 до 3 г/с максимум локального КПД нагрева газа увеличился всего примерно на 20%. С ростом  $I$  тока локальное и интегральное значение КПД уменьшаются из-за увеличения потерь тепла излучением и теплопроводностью на стенки канала, и максимум смещается вдоль оси пропорционально. Как следует из результатов расчета изменение газостатического давления с точностью ~20 % аппроксимируется выражением

$$P_R(z) = 1250 (G/d^2)^2 (I/d)^{0.5} (1-z/l), \text{ Па.}$$

Результаты проведенных экспериментальных и теоретических исследований положены в основу рекомендаций для выбора оптимальных параметров режима работы каскадной дуги.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные результаты работы сформулируем следующим образом:

1. Разработан катодный насадок позволяющий получить на срезе сопла одномерное, близкое к развитому течение плазмы;
2. Предложен кюветный интерферометр и усовершенствовано устройство для измерения напряженности электрического поля - зонд и специальная шайба;
3. Экспериментально определен характер течения потока плазмы на начальном участке канала протяженной каскадной электрической дуги постоянного;
4. Экспериментально доказано существование ламинарного режима течения от зависимости расхода газа;
5. Измерены значения статического давления, напряженности электрического поля и определены условия предельного зажигания каскадной дуги на начальном участке канала;
6. Проведено численное исследование характеристики потока плазмы на основе решения системы МГД-уравнений в приближении ламинарного пограничного слоя;
7. Теоретические исследования показали, что результаты расчета находится в согласии с опытными данными, при адекватных граничных условиях.

Полученные результаты могут быть использованы при в диагностике плазмы, для конструирования и разработке новых типов плазматронов.

Основные содержания диссертации опубликовано в работах:

1. **Макешова К.К., Мукалаев К.О.** Влияние неизотермичности обтекания на аэродинамическое сопротивление сферы в плазме. Материалы IX межреспубликанской научной конференции молодых ученых. Фрунзе: 1988. с. 78-80.
2. **Джумалиев П.Р., Кадыралиев С., Абдразаков А., Асаналиев М. К., Мукалаев К.О., Усенканов Дж. О.** Интерферометрическое исследование сварочной дуги. -Тез. докл. I Всесоюзного семинара

“Оптические методы исследования потоков”. Новосибирск, 1989. с. 221-227.

3. **Asanaliev M.K., Zheenbaev Zh.Zh., Leliiovkin V.M., Mukalaev K.O., Semionov V.F., Urusov R.M.** Determination of laminar plasma characteristics in the channel of a cascade arc. “10th international symposium of plasma chemistry”. Bochum, 1991. 1.1-23 p.1 - 1.1-23 p.5.
4. **Asanaliev M.K., Zheenbaev Zh.Zh., Konavko R.I., Leliiovkin V.M., Mukalaev K.O., Sabaev K.U.** Diagnostics of a high current arc in the gas flow. “Second European Congress on Thermal Plasma Processing” Paris-France, 1992.
5. **Мукалаев К.О., Асаналиев М.К., Жеенбаев Ж.Ж., Семенов В.Ф.** Исследование характеристик ламинарного потока плазмы в канале каскадной дуги. Известия НАН КР. “Эхо науки” №3-4. 1995. с.78-80.
6. **Борт В.Б., Жеенбаев Ж.Ж., Лелевкин В.М., Мукалаев К.О., Семенов В.Ф.** Определение предельных характеристик зажигания каскадной дуги. Материалы конференции “Физика плазмы и плазменные технологии (ФППТ-2)”. т.1. Минск, 1997 с. 111-114.
7. **Жеенбаев Ж.Ж., Татыбеков А., Джанибеков Т.Д., В.Б. Борт., Сабаев К.У., Мукалаев К.О.** Применение плазменной горелки в процессе пиролиза бытовых отходов. -Там же, т. 4. с. 646-650.
8. **Жеенбаев Ж.Ж., Татыбеков А., Сабаев К.У., Мукалаев К.О., Борт В.Б., Джанибеков Т.Д.** Эффект плазматрона при проведении физико-химического анализа продуктов пиролиза сложных веществ. -Там же, т. 4. с.650-653.
9. **Tatybekov A., Nikanorov V.J., Zheenbaev Zh.Zh., Mukalaev K.O., Bort V.B., Djanibekov T.D., Sabaev K.U.** Plasmatronic heat and stem generating in stallations. “III International workshop”. Novosibirsk, 1997.
10. **Татыбеков А., Никоноров В. И., Жеенбаев Ж. Ж., Джанибеков Т. Д., Борт В.Б., Мукалаев К.О., Сабаев К.У.** Плазменный метод получения озонированного водяного пара. -Сб. трудов международной конференции “Традиции и новации в культуре университетского образования”. КТУ. ч.2. Бишкек, 1998. с. 90-94.
11. **Татыбеков А., Никоноров В.И., Жеенбаев Ж.Ж., Кенешов Т.С., Борт В.Б., Джанибеков Т.Д., Мукалаев К.О., Сабаев К.У.** Плазматронная парогенераторная установка. Известия НАН КР “Эхо науки” № 2-3.1998. с.14-17.
12. **Татыбеков А., Жеенбаев Ж.Ж., Сабаев К.У., Мукалаев К.О., Борт В.Б., Джанибеков Т.Д.** Плазматронная теплогенераторная установка и исследования химического состава отходящих газов. “Материалы 9-й школы по плазмохимии для молодых ученых России и стран СНГ”. г.Иваново, 1999. с. 216-220.

13. Татыбеков А., Никоноров В.И., Жеенбаев Ж.Ж., Мукалаев К.О., Джанибеков Т.Д., Сабаев К.У., Борт В.Б. Применение плазменной радиации для процесса пиролиза твердых бытовых отходов. Сб.-тез. докл. конференция по радиационной физике КРФ-99. Бишкек-Каракол, 1999. с. 104-105.
14. Татыбеков А., Никоноров В.И., Жеенбаев Ж.Ж., Мукалаев К.О., Джанибеков Т.Д., Сабаев К.У., Борт В.Б. Применение плазменной радиации для форсированного капельно-пленочного испарения жидкости. Там же. с.105-106.
15. Татыбеков А., Жеенбаев Ж. Ж., Джанибеков Т.Д., Борт В.Б., Мукалаев К.О., Сабаев К.У. Особенности оптического теплового излучения в плазменной горелке. -Сб. научных трудов "Проблемы спектроскопии и спектрометрии". Екатеринбург, 1999. с.41-45.
16. Татыбеков А., Никоноров В.И., Жеенбаев Ж.Ж., Кенешов Т.С., Джанибеков Т.Д., Борт В.Б., Сабаев К.У., Мукалаев К.О. Плазмотронная теплогенераторная установка. Известия НАН КР, №3. Бишкек: 1999. с.17-20.
17. Мукалаев К.О., Жеенбаев Ж.Ж. Зондовые измерения в начальном участке каскадной дуги. Известия НАН КР. №1. Бишкек: 2000. с. 58-60.
- Мукалаев К.О., Борт В.Б., Лелевкин В.М., Семенов В.Ф. Измерение статического давления, градиент статического давления в канал каскадной дуги. -Там же, с. 60-62.

### АННОТАЦИЯ

Исследованы характеристики потока плазмы на начальном участке канала каскадной дуги.

Установлено, что на основе разработанной конструкции катодного насадка, на срезе сопла реализуется практически одномерное ламинарное течение плазмы.

Проведено экспериментальное исследование по определению статического давления и напряженности электрического поля. Показано, что в пределах измерения расхода газа  $G < 3,5$  г/с течение ламинарное, а при расходах  $G_0 < 0,01$  г/с в катодном насадке дуга гаснет.

Рассмотрена математическая модель численного решения системы уравнений в приближении магнитогидродинамического пограничного слоя. Результаты расчёта находятся в удовлетворительном согласии с экспериментальными данными.

### АННОТАЦИЯ

Каскад каналадагы жаанын баштапкы бөлүктөгү плазманын агымынын мүнөздөмөсү изилденген.

Ойлонуп табылган катод насадканын конструкциясынын негизинде соплонун кесилишинде плазманын агымы бир тектүү ламинардуу экендиги аныкталган.

Электр талаасынын чыалуусун жана статикалык басымды аныктоо үчүн эксперименталдык изилдөө жүргүзүлгөн. Среп кылынган газ  $G < 0,01$  г/с өлчөмүндөгү өзгөрүшү ламинардуу агым экендиги, ошондой эле  $G_0 < 0,01$  г/с өлчөмүндөгү катод насадксындагы жаанын өчүшү көрсөтүлгөн.

Магнитогидродинамикалык чек ара катмарына жакындочу теңдемелер системасынын сандык чыгарлышынын математикалык модели каралган. Эсептөөнүн жыйынтыгы менен эксперименталдык маалымат канааттандырарлык дал келет.

### ABSTRACT

It is investigated the characteristics of plasma flow in the beginning region of cascade arc channel.

On the base of the elaborated construction of cathode nozzle, it was determined that the uniform laminar plasma flow is almost obtained on the nozzle cut of the channel.

Experimental researches are held on determination of static pressure and electrical field tensivity. It is showed that within the gas expenditure of  $G < 3.5$  g/s the flow is laminar and when the  $G_0 < 0.01$  g/s the arc in the cathode nozzle goes out.

The mathematical model and numerical solving of the equation systems in approach of magnet-hydrodynamic border layer are considered. The result of the calculation is in a satisfied consent with the experimental data.