

На правах рукописи

Аверьянова Светлана Андреевна

**Численное моделирование потока газа в дугогасительном
устройстве высоковольтного выключателя**

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико–математических наук

Санкт-Петербург – 2005

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт–Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Акатнов Николай Иванович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Лукьянов Герман Александрович
доктор физико-математических наук, профессор
Исаев Сергей Александрович

Ведущая организация: Физико-технический Институт им. А.Ф. Иоффе РАН

Защита состоится «_____» _____ 200__ г. в _____ час _____ мин на заседании диссертационного совета Д 212.229.07 при ГОУ ВПО «Санкт–Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт–Петербург, ул. Политехническая, д.29, кор.1, аудитория кафедры «Гидроаэродинамика».

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт–Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан «_____» _____ 200__ г.

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

Зайцев Д.К.

Общая характеристика работы.

Актуальность темы. Настоящая работа посвящена созданию методики расчетов термо–газодинамических потоков в проточной части дугогасительного устройства (ДУ) высоковольтного газового выключателя (ВВ) при наличии электрической дуги на оси ДУ. Газовые ВВ используют как основное силовое коммутационное оборудование в электроэнергетических системах высокого напряжения. Разработка новых, модернизация существующих образцов ВВ, а также их экспериментальные исследования сопряжены с большими временными и материальными затратами. Поэтому создание математических моделей, позволяющих описывать поведение сильно неизотермического потока газа в проточной части ВВ и взаимодействие его с электрической дугой, чрезвычайно актуально.

Цель диссертационной работы состояла в создании математической модели, описывающей течения гасящего дугу газа в реальных ДУ, а также процесс гашения турбулентной электрической дуги, возникающей в ДУ ВВ между контактами при отключении больших токов. Конкретно были поставлены следующие задачи:

- численное моделирование процессов взаимодействия дугогасящего потока газа со стационарной электрической дугой, горящей на оси ДУ ВВ, форма которой максимально приближена к реальной;
- численное моделирование процесса гашения электрической дуги и восстановления электрической прочности газа в межконтактном промежутке.

Научная новизна. В работе представлены следующие новые результаты:

- сформулирована замкнутая математическая модель, ориентированная на описание взаимодействия турбулентной электрической дуги со спутным потоком холодного газа и базирующаяся на полной системе уравнений газовой динамики, дополненной законом Ома и таблицами физических свойств плазмы (в предположении локального термодинамического равновесия). На базе сформулированной модели создана расчетная программа;
- показаны причины интенсивного роста кинетической энергии турбулентности и коэффициента турбулентной вязкости в дуге при быстром убывании тока; как следствие, выявлены причины непригодности стандартной « k - ε » мо-

дели для расчетов гашения дуги;

— предложена новая алгебраическая модель турбулентности для расчета турбулентной вязкости в стационарной и гаснущей дуге, взаимодействующей со спутным потоком в ДУ ВВ при произвольном угле натекания осесимметричного потока на дугу, а так же новая формула коэффициента лучистой теплопроводности, учитывающая зависимость излучения дуги от температуры, давления в плазме дуги и от радиуса дуги;

— установлено, что в процессе гашения дуги возникает участок дуги (удлиняющийся по мере приближения тока к нулю), на котором температура газа убывает наиболее быстро, становясь ниже порогового значения, после чего на этом («холодном») участке начинается восстановление электрической прочности газа;

– показана возможность расширения гипотезы о том, что напряжение пробоя между расходящимися контактами ВВ пропорционально длине «холодного» участка на случай теплового пробоя. Предложена и обоснована, путем сопоставления с опытом, линейная зависимость напряженности пробоя от давления и времени, прошедшего с момента обращения тока в ноль.

Практическая ценность. Практическая значимость диссертационной работы состоит в том, что созданные в процессе работы математическая модель и вычислительные средства позволяют проводить предварительные оценочные расчеты проточных частей вновь проектируемых и создаваемых газовых ВВ.

Достоверность результатов основана:

– на использовании известных, апробированных численных методов и на результатах тестовых расчетов;

– на сравнении расчетов с опытными данными.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на:

– 4th Czech-Russian Seminar “Electrophysics and Thermophysics Processes in Low-Temperature Plasma” (Brno, 2000);

– Политехнический симпозиум «Молодые ученые – промышленности Северо-западного региона»: «Компьютерные технологии, коммуникации, численные методы и математическое моделирование», (Санкт – Петербург, 2001);

– 3-я всероссийская конференция по теплообмену (Москва, 2002г.),

– XIV Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А. И. Леонтьева (Рыбинск, 2003 г),

– XV Symposium on Physics of Switching Arc (Brno, 2003);

– XVI Symposium on Physics of Switching Arc (Brno, 2005);

а так же на научно–технических конференциях профессорско–преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов СПбГПУ в 2001–2005г., и на технических семинарах ОАО «НИИВА» в 1999–2003гг.

Публикации. Основные результаты работы опубликованы в 8 работах.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, шести приложений и списка литературы. Объем диссертации составляет 166с. текста, список литературы содержит 82 наименования.

Содержание работы.

Введение. Дано описание области применения и принципов действия газовых ВВ. Обоснована актуальность проблемы изучения взаимодействия дуги со спутным потоком. Кратко изложено содержание работы.

В первой главе дано описание работы ВВ, приведены схемы рассматриваемых в работе потоков и математическая постановка задачи. На рис. 1 пока-

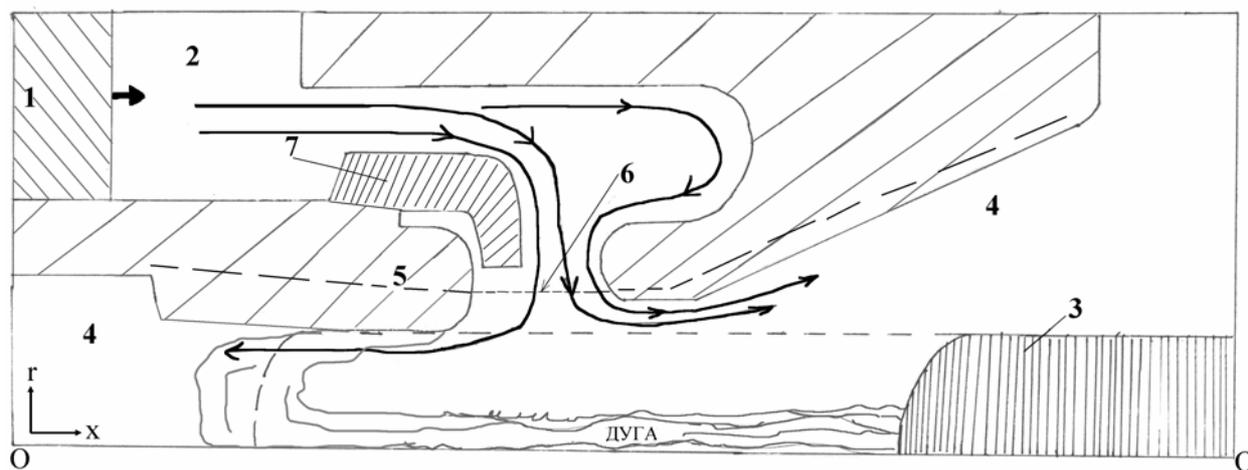


Рис. 1 – Схема проточной части ДУ ВВ

зана схема проточной части ДУ ВВ, обладающего осевой симметрией относительно оси x (линия OO'). Светлые (незаштрихованные) области соответствуют проточной части. Работает ДУ ВВ следующим образом: при необходимости выключения тока на привод поршня 1 поступает сигнал, и поршень 1 начинает двигаться, сжимая газ в камере 2. Одновременно с поршнем (синхронно с ним)

начинает двигаться вправо контакт 3 (штриховой линией показано начальное положение контакта 3, плотно входящего в неподвижный кольцевой контакт 5, сплошной линией – положение его в некоторый момент времени в процессе гашения дуги), который, сместившись правее горловины правого сопла, открывает выходное сечение кольцевого радиального сопла 6, и газ начинает поступать из камеры 2 в сопло 4, соединенное слева и справа с баком большого объема, в котором газ покоится при определенном давлении. Когда подвижный контакт 3 оказывается правее неподвижного кольцевого контакта 5, между контактами возникает электрическая дуга, которая гасится потоком газа из камеры 2 в момент перехода тока через ноль. В некоторых конструкциях левая стенка радиального сопла образуется грибообразной насадкой 7 с узким Г-образным зазором между насадкой и стенкой 5.

При стремлении тока к нулю, газ в дуге, обдуваемой спутным потоком, остывает неравномерно по длине дуги, и к моменту прохождения тока через ноль образуется участок дуги, на котором температура газа значительно меньше ее среднего по длине значения. После прохождения тока через ноль начинает возрастать напряжение противоположенного знака – так называемое «восстанавливающееся» напряжение. Под действием этого напряжения в дуге возникает относительно небольшой по величине ток. В дуге начинают действовать два конкурирующих физических процесса: нагрев газа дуги джоулевым теплом от восстанавливающегося тока и его остывание за счет турбулентной теплопроводности. Если преобладает охлаждение дуги, то с уменьшением температуры газа дуги ее электрическое сопротивление будет расти, а ток, соответственно, уменьшаться до полного исчезновения. В противном случае возникает тепловой пробой.

Для оценки величины напряжения пробоя U_{np} , приложенного к контактам ВВ (Э1 и Э2 на рис. 2), использовалась гипотеза:

$$U_{np}(t) = L(t)E_{np}, \quad (1)$$

где $L(t)$ определяется как длина «холодного» участка оси дуги, в пределах которого температура газа меньше некоторого порогового значения: $T < T_{np}$; E_{np} – напряженность пробоя (пороговое значение напряженности, при превышении которого в дуге возобновляется большой ток), величина T_{np} , в соответствии с

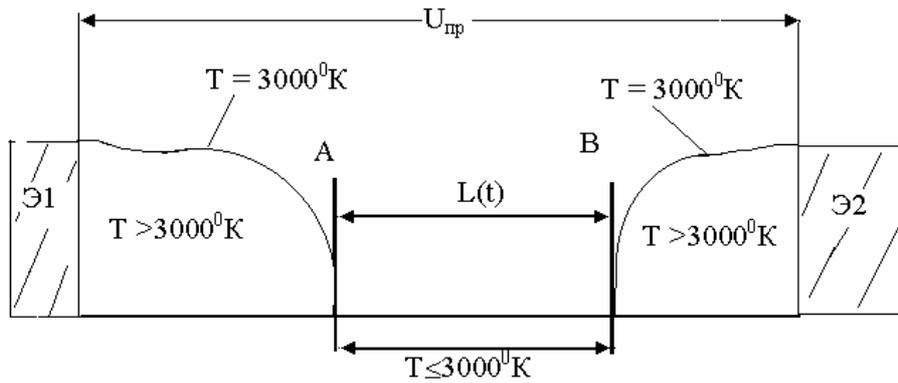


Рис. 2. – Определение длины «холодного» участка $L(t)$ в предположении $T_{пр}=3000^0\text{K}$.

имеющимися опытными данными, принята равной 3000^0K . В настоящей работе принята гипотеза о линейном поведении напряженности пробоя со временем, а именно:

$$E_{пр}(t) = k_0 \left(\frac{p}{p_a} \right) \cdot \left(\frac{t}{t_0} \right) \quad (2)$$

здесь $k_0 = 3,25 [\text{кВ}/\text{мм}]$; p – среднее давление газа на «холодном» участке; $p_a = 1 \text{ атм}$; t – время, прошедшее с момента обращения тока в ноль; $t_0 = (dI/dt)/I_{\text{max}}$ – характерное время, определяемое скоростью падения тока – dI/dt и максимальным током I_{max} .

Рассматривались две основных конфигурации потока взаимодействующего с дугой. Первая схема, для течения с дугой в сопле Лавалья, приведена на рис. 3. Один из контактов (левый) расположен во входном сечении сопла, а второй (правый), вынесен за пределы канала.

Вторая схема, для течения в ДУ, показана на рис. 4. Данная геометрия соответствует проточной части реального ДУ, ограниченной радиальным соплом

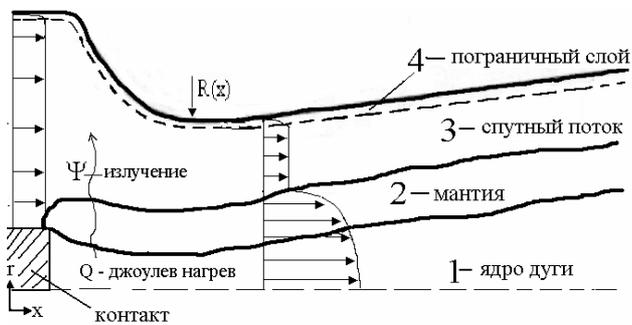


Рис. 3. – Схема течения газа в дуге, находящейся в сопле Лавалья.

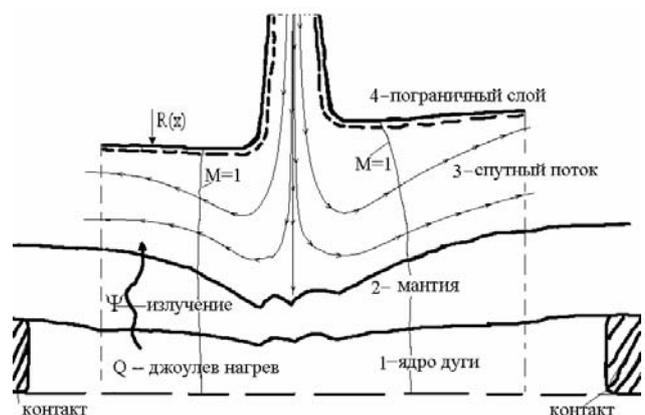


Рис. 4. – Схема течения газа в проточной части ДУ.

б и длинными штриховыми линиями на рис. 1. Принимается, что дуга и поток обладают осевой симметрией. Контакты вынесены за пределы канала и неподвижны. Расположение дуги вдоль оси соответствует случаю, когда подвижный контакт (на рис. 1) вышел за пределы правого диффузора и имеет место основная фаза гашения в окрестности момента нуля тока.

В обоих случаях считается, что мантия (область 2) и ядро дуги (область 1) являются турбулентными. На входе в сопло спутный поток холодного газа (область 3) принимается нетурбулентным. Пограничный слой (область 4) на стенках относительно тонок и в рамках данной работы полагается ламинарным. Принято также предположение, что процессы, происходящие на поверхности контактов, не влияют на среднюю часть дуги, где происходит основной процесс гашения, поэтому влияние приконтактных процессов на течение в дуге в данной работе не рассматривается.

Ток в ВВ переменный и изменяется синусоидально. Однако в рассматриваемых в данной работе задачах предполагается иная зависимость тока от времени; а именно: сначала, в течение некоторого, достаточно длительного, промежутка времени Δt ток постоянен (стационарное значение обозначается через I_0). Далее в течение короткого промежутка времени Δt_1 ток убывает до нуля с заранее заданной скоростью $-dI/dt$. Достигнув нуля, ток не возобновляется. Данный вариант изменения тока соответствует реализованному в экспериментальных работах, по данным которых настраивалась и тестировалась расчетная модель.

Для описания потока использовалась полная система осредненных по Рейнольдсу газодинамических уравнений, дополненная законом Ома. Источниковый член в уравнении энергии записывался в виде: $Q = \sigma E^2 - \Psi$, где σ – коэффициент электропроводимости; E – напряженность электрического поля; Ψ – потери тепла на излучение.

Для расчетов дуг, горящих в потоках, параллельных их оси, применялась также и параболизированная система газодинамических уравнений.

Алгебраическая модель для коэффициента турбулентной вязкости μ_t основана на предположении о суперпозиции двух механизмов возникновения турбулентности в потоке при наличии стационарной электрической дуги на оси

канала – неустойчивости Рэлея-Тейлора (первый член подкоренного выражения) и сдвиговой неустойчивости (второй член подкоренного выражения):

$$\mu_t = (\rho\rho_e)^{0.5} v_t$$

$$v_t = \delta_\sigma f_1 f \sqrt{\left[\left(C \delta_\sigma \frac{v_\Delta}{\Delta} \right)^2 + (C_1 (u_{\max} - u_\Delta))^2 \right]} \quad (3),$$

здесь $C=10^{-1}$; $C_1=4,9 \cdot 10^{-3}$, ρ_e – плотность холодного газа вне мантвии дуги в текущем сечении; δ_σ – средний по координате x радиус дуги; где Δ – значение координаты r , соответствующее точке вне дуги (в расчетах было принято, что $\Delta \approx 1,5 \cdot r_{0,15}$, $r_{0,15}$ – радиус дуги, определенный как радиус, на котором проводимость достигает 15% от максимальной проводимости газа на оси дуги), f, f_1 – эмпирически подобранные функции, обеспечивающие уменьшение турбулентной вязкости в спутном потоке.

Известно, что при быстром убывании тока наблюдается рост кинетической энергии турбулентности в единице объема в дуге. В результате анализа уравнения баланса энергии турбулентности в работе показано, что причиной этого роста является обычно не учитываемый в стандартных моделях член, пропорциональный du/dt , являющийся в случае быстро убывающего тока генерационным. Этот вывод позволяет также объяснить, почему при использовании « k - ϵ » модели для расчетов гашения дуги приходится менять значения стандартных коэффициентов модели: стандартные коэффициенты « k - ϵ » модели подобраны для сдвиговых течений при условиях сравнительно слабой нестационарности и близости к равновесию. В гаснущей же дуге эти условия явно нарушены.

В пренебрежении в правой части уравнения баланса энергии турбулентности всеми членами, кроме члена с du/dt , на основе теории пути смешения с привлечением соотношения Невзглядова-Драйдена, в работе показано, что:

$$\frac{d\mu_t}{dt} \sim \left\{ 0,6\sqrt{\rho}l^2 \frac{\partial u}{\partial r} \right\} \frac{d\sqrt{\rho}}{dt} \quad (4)$$

Поскольку максимальная скорость u_{\max} и толщина дуги убывают, а плотность газа ρ возрастает в период падения тока, поэтому можно предположить, что произведение в скобках слабо меняется во время убывания тока. Это пред-

положение было проверено и подтверждено прямыми расчетами произведения в скобках в (4). В этих условиях установлено, что изменение μ_t в основном определяется изменением $\sqrt{\rho}$. Как следствие, в работе было принято, что кинематический коэффициент турбулентной вязкости ν_t , определяемый выражением (3), в течение малого промежутка времени, соответствующего падению тока и последующей фазе восстановления электрической прочности газа, остается неизменным во времени и равным тому стационарному значению, которое он имел в момент начала падения тока. Рост же μ_t в этот период происходит за счет увеличения $\sqrt{\rho}$.

В работе учитывалось также влияние турбулентных пульсаций температуры на проводимость, сильно зависящую от температуры. Для этого принималось, что:

$$\sigma = 0.5 \left[\sigma(T-T') + \sigma(T+T') \right] \quad T' = l \left| \frac{\partial T}{\partial r} \right| \quad (5)$$

где $l=C_p \cdot (r_{0.9} - r_{0.15})$; $r_{0.9}$ – значение поперечной координаты r , при котором температура определяется выражением $T=0.9 \cdot (T_{ось})$; $C_p = 0,2$.

Коэффициент турбулентного переноса энтальпии определяется выражением $k_t = \frac{\mu_t}{Pr_t}$, где $Pr_t = 0,75$ – турбулентное число Прандтля.

Модель излучения основана на приближении лучистой теплопроводности:

$$\vec{q}_{луч} = -\lambda_{луч} \nabla T, \quad \Psi = div(\vec{q}_{луч}) \quad (6)$$

где $\lambda_{луч}$ – коэффициент лучистой теплопроводности. Для входящего в уравнение баланса энтальпии коэффициента $k_\psi = \lambda_{луч} / c_p$ принята формула:

$$k_\psi = C_\psi \frac{\bar{p}_{ось}}{(\bar{p}_{ось})_{стат}} \frac{\delta_\sigma}{(\delta_\sigma)_{стат}} f \quad (7)$$

где $f=0$ при $T_{ср} < T_s$ и $f=(T_{ср}/T_s-1)^3$ при $T_{ср} \geq T_s$, $C_\psi = 1,68 \cdot 10^{-6} \rho_0 u_0 H [(Вт \cdot кг)/(м \cdot Дж)]$; ρ_0 , u_0 , H – характерные величины, с помощью которых уравнение приводится к безразмерному виду (ρ_0 – плотность заторможенного газа при температуре заторможенного газа $T_0=300^0K$; u_0 – скорость звука в заторможенном газе; H – ра-

диус горловины сопла); $\bar{p}_{ось}$ – среднее значение давления вдоль оси дуги, $(\bar{p}_{ось})_{стат}$, $(\delta_\sigma)_{стат}$ – являются средними значениями давления и радиуса дуги вдоль оси дуги в стационарном состоянии. T_{cp} – среднее значение температуры газа на оси; T_s – температура ниже которой газ не излучает.

В главе 2 изложены методы численного решения уравнений переноса. Для решения полной газодинамической системы уравнений использовался метод Бима и Уорминга, с определением конвективных слагаемых по схеме Роу с первым порядком точности и аппроксимацией временной производной по схеме Кранка-Николсона. Для решения параболизированной системы уравнений использовался комбинированный метод, представляющий собой комбинацию метода обратной задачи в области горловины и метода Симуни (с модификацией Поспелова для $M > 1$) для всей остальной области. Проведено тестирование программ на двух задачах: течение невязкого газа в сопле Лавалья и течение вязкого газа в круглой трубе. Для обоих тестов полученные расчетные распределения хорошо согласуются с аналитическими решениями.

В главе 3 дана постановка задачи о дуге, которая находится в спутном потоке азота, образованном соплом Лавалья, а также описаны привлекаемые экспериментальные данные. Представлены результаты тестирования сеточной сходимости, определены константы в моделях турбулентности и излучения. Показано, что выбор температуры спутного потока (температура изменялась в интервале $500^0\text{K} \div 700^0\text{K}$) оказывает незначительное влияние на характеристики дуги.

Представлены результаты расчетов стационарной (при силе тока $I=2\text{kA}$) и нестационарной (угасающей при $dI/dt=-23,5\text{A}/\text{мксек}$ от значения $I=2\text{kA}$) электрических дуг, находящихся в потоке газа, сформированном соплом Лавалья. Результаты расчетов, сопоставлены с опытными данными. Получено удовлетворительное согласие расчетных и экспериментальных кривых. На рис. 5 представлено распределение расчетного и измеренного в опытах радиуса стационарной дуги; профиль сопла, $R(x)$, приведен на том же рисунке. На рис. 6 представлено сравнение расчетных и опытных распределений температуры и напряженности электрического поля вдоль оси сопла. Показано, что газ быст-

рее всего остывает в области горловины – это согласуется с фотографиями угасающей дуги. На рис. 7 представлено распределение средней температуры вдоль оси сопла при линейном убывании тока и переходе его через ноль. Сплошной линией показано рассчитанное распределение температуры ($t=0$ – момент достижения током нуля). Расчет дает несколько заниженные значения температуры по сравнению с экспериментальными данными.

Далее представлены результаты расчета стационарной дуги в сопле Лаваля в параболизированной постановке. Приведены результаты тестирования сеточной сходимости. Определено значение константы C_p в формуле (5), показано, что в целом учет влияния турбулентных пульсаций на проводимость слабо сказывается на результатах расчетов. Проведено сопоставление результатов расчетов в полной и параболической постановках. Показано, что обе постановки приводят к одинаковым расчетным данным в области холодного газа; в области дуги наблюдаются расхождения, не превышающие 10-12%.

Глава 4 посвящена моделированию процессов, происходящих в каналах, чья форма приближена к форме реального образца ДУ ВВ (см. рис. 4): здесь дугогасящий поток элегаза (шестифтористой серы SF_6) меняет свое направление с радиального на входе на осевое на выходе. Описаны экспериментальные данные, привлекаемые для проведения расчетов. Параметрические расчеты приведены в предположении симметрии течения относительно средней плоскости радиального сопла подачи газа. На основе сопоставления с экспериментальными данными определена константа в модели предельно допустимого восстанавливающегося напряжения. Обоснован выбор значения константы в модели турбулентности для члена, отражающего вклад неустойчивости Рэля-Тейлора.

Показано, что увеличение силы тока в дуге оказывает сильное влияние на распределение стационарных характеристик течения в канале. При величине тока 1500А значение числа Маха уменьшается в 1,5 раза по сравнению со значением, полученным в отсутствии дуги. Описана динамическая картина размыкания дуги в канале (при давлении на входе 6,8атм) при прохождении тока через ноль. В расчетах получено, что при убывании тока температура дуги уменьшается неравномерно вдоль ее оси, и в некоторый момент времени на оси дуги возникает «холодный» участок с $T < 3000^0K$ (см. рис. 8), причем длина это-

го участка увеличивается со временем. Местоположение «холодного» участка качественно согласуется с результатами экспериментальных наблюдений. Обнаружено, что полученное в результате расчетов время задержки (время, прошедшее с момента обращения нуля тока в ноль до момента начала образования «холодного» участка) удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными. На основе принятой гипотезы о пропорциональности величины напряжения пробоя длине «холодного» участка и напряженности пробоя получены кривые роста напряжения пробоя, которые удовлетворительно согласуются с опытными данными (рис. 9 и рис. 10).

С использованием представленных моделей для $I=12\text{kA}$ проведены также расчеты стационарной электрической дуги в ДУ с реальной несимметричной геометрией проточной части. Особенности полей числа Маха и температуры иллюстрируются на рис. 11.

В заключении изложены основные результаты, полученные в работе.

- Сформулирована замкнутая математическая модель, ориентированная на описание взаимодействия турбулентной электрической дуги со спутным потоком холодного газа.
- Разработана алгебраическая модель турбулентности для расчета турбулентной вязкости при произвольном угле натекания гасящего потока на дугу.
- Объяснена причина интенсивного роста кинетической энергии турбулентности в единице объема в дуге при быстром убывании тока.
- Предложена формула для коэффициента лучистой теплопроводности, учитывающая зависимость излучения от температуры и давления плазмы в дуге, а так же от ее радиуса.
- На основе разработанной математической модели создана программа для расчетов взаимодействия электрической дуги с потоком газа в осесимметричной проточной части ДУ ВВ, включая процесс гашения дуги.
- Проведены расчеты взаимодействия стационарных и угасающих дуг в сопле Лавая. Получено удовлетворительное согласие с экспериментальными данными по изменениям параметров потока на оси дуги. Установлено, что при быстром убывании тока непосредственно за горловиной сопла образуется участок дуги, на котором она остывает наиболее быстро, что согласуется с визуализа-

цией угасающих дуг в опытах. Получено согласие результатов расчетов течения в стационарной дуге в полной и параболизированной постановках.

- Проведены расчеты стационарной и угасающей дуги, горящей в канале переменного сечения с радиальным вдувом газа на входе. Показано, что увеличение силы тока в дуге оказывает сильное влияние на распределение стационарных характеристик течения в канале. Описана динамическая картина размыкания дуги в канале при прохождении тока через ноль.
- Показано, что расчетное время, прошедшее от нуля тока до момента начала восстановления электрической прочности, удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными. Предложена полуэмпирическая формула для определения напряженности пробоя, учитывающая линейную зависимость ее от давления и от времени, и определен эмпирический коэффициент в этой модели. Полученные на основе этой модели расчетные кривые роста напряжения пробоя находятся в удовлетворительном согласии с экспериментальными данными.
- Проведены расчеты взаимодействия стационарной электрической дуги со спутным потоком в ДУ реальной конструкции. Полученные поля согласуются с общепринятыми представлениями о поведении дуги в каналах с радиальной подачей дугогасящего потока.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Averianova S., Tonkonogov E., Akatnov N. Thermal interruption mode in HV SF₆-blast interrupters // 4th Czech-Russian Seminar “Electrophysics and Thermophysics Processes in Low-Temperature Plasma”, Brno, October 23-27, 2000. – с.178-180
2. Аверьянова С. А. Математическое моделирование процесса гашения электрической дуги в высоковольтных элегазовых выключателях // Политехнический симпозиум «Молодые ученые – промышленности Северо-Западного региона», материалы конференции «Компьютерные технологии, коммуникации, численные методы и математическое моделирование», Санкт – Петербург, СПбГТУ, 30 ноября 2001. – с.15-16
3. Аверьянова С. А., Акатнов Н. И., Тонконогов Е. Н. Моделирование теплообмена при взаимодействии потока газ с электрической дугой отключения в

высоковольтных элегазовых выключателях // Труды 3-й всероссийской конференции по теплообмену, Москва, 21-25 окт. 2002г. – т.2. – с.37-40.

4. Аверьянова С. А. Влияние пульсаций температуры на характеристики электрической дуги // ВМУ Прикладная математика и механика. – 2002, №1. – с.87-91.

5. Аверьянова С. А., Акатнов Н. И., Тонконогов Е. Н. Анализ электрической дуги отключения в области нуля тока // в книге «Электрические аппараты высокого напряжения с элегазовой изоляцией» под ред. Вишневого Ю.И. – СПб: Энергоатомиздат. – 2002. –с.118-137.

6. Аверьянова С. А. Расчет стационарной и угасающей электрической дуги на основе алгебраической модели турбулентности и в приближении лучистой теплопроводности // Труды XIV школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А. И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» 26-31мая, 2003г. – т.1. – с.17-20.

7. Averianova S., Akatnov N., Tonkonogov E., Numerical Modeling of the Interrupting Arc in HV SF6-blast Interrupters //XV Symposium on Physics of Switching Arc. – Brno (Czech Republic), 22-26 Sept., 2003. – Vol.1. – pp. 3-6.

8. Averianova S., Akatnov N., Tonkonogov E. Numerical Modeling of the Thermal Interruption Mode in HV SF6-blast Arc Devices //XVI Symposium on Physics of Switching Arc. – Brno (Czech Republic), 5-9 Sept., 2005. – Vol.1. – pp. 13-17.

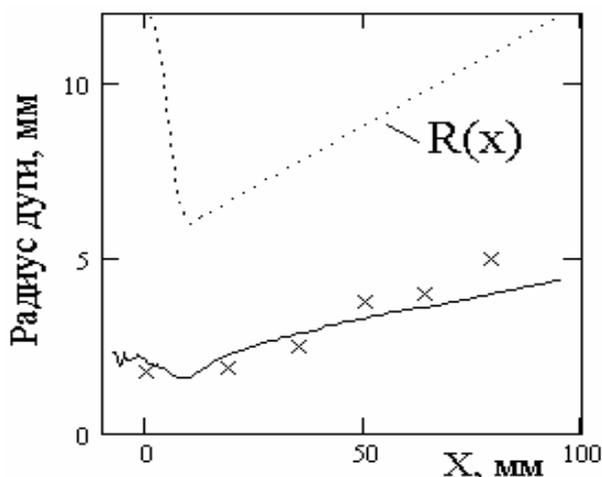


Рис.5 Сравнение расчетного распределения радиуса дуги вдоль оси канала (сплошная линия) с опытом (символы).

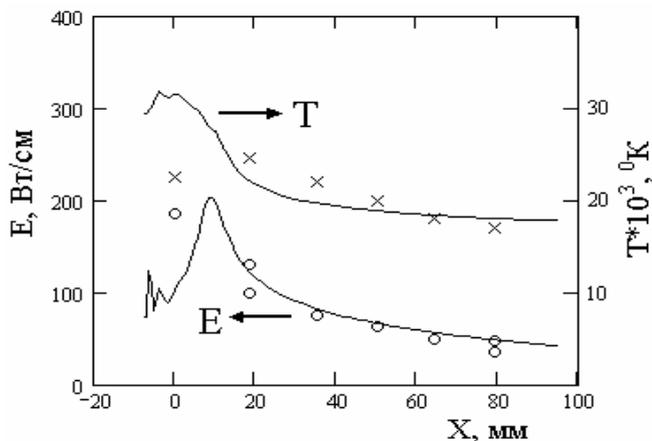


Рис.6 Сравнение расчетного распределения напряженности электрического поля и температуры (сплошные линии) с опытом – символы.

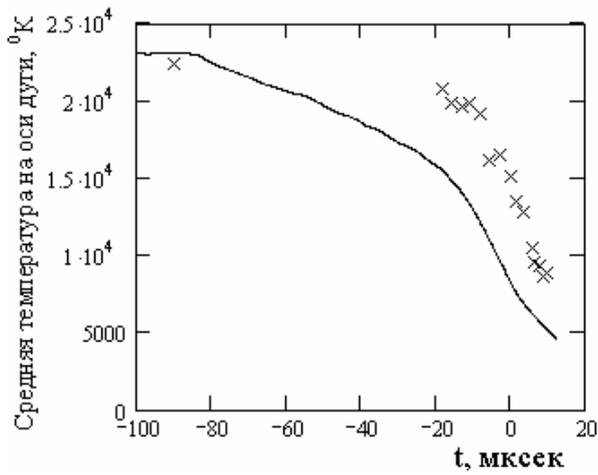


Рис. 7 – Средняя температура на оси дуги: эксперимент – символы, расчет – сплошная линия.

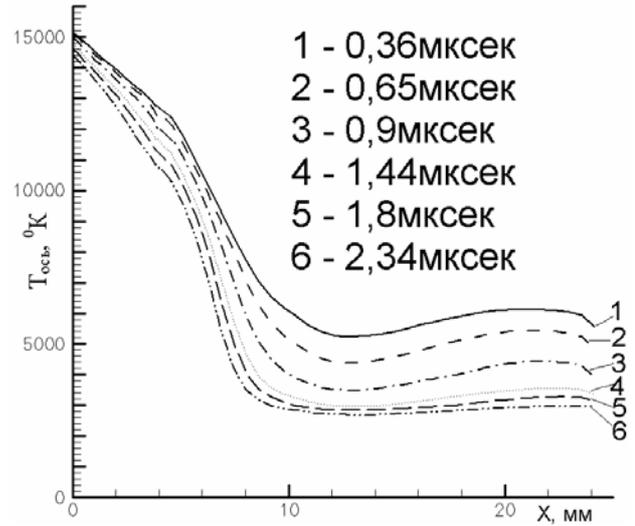


Рис. 8 Распределение температуры вдоль оси канала в различные моменты времени

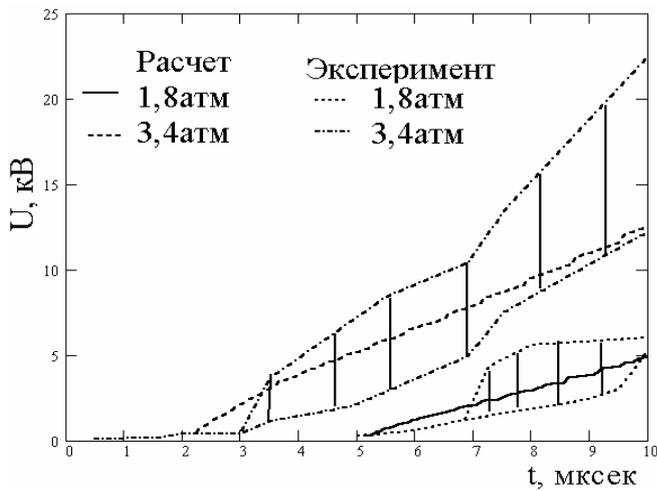


Рис.9 – Зависимость напряжения пробоя от времени после нуля тока для двух значений давления на входе 1,8атм и 3,4атм.

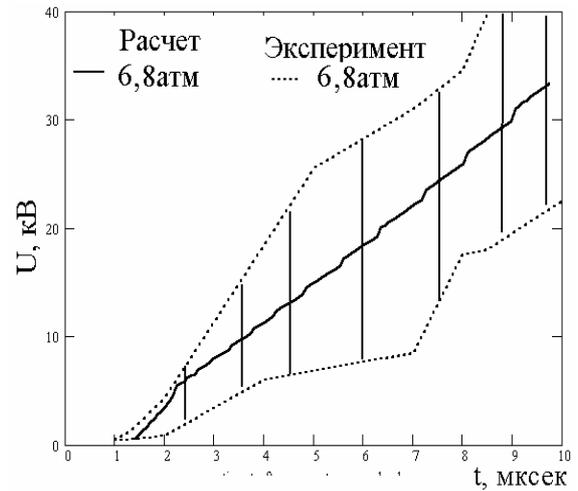


Рис. 10 – Зависимость напряжения пробоя от времени после нуля тока для давления газа на входе 6,8атм.

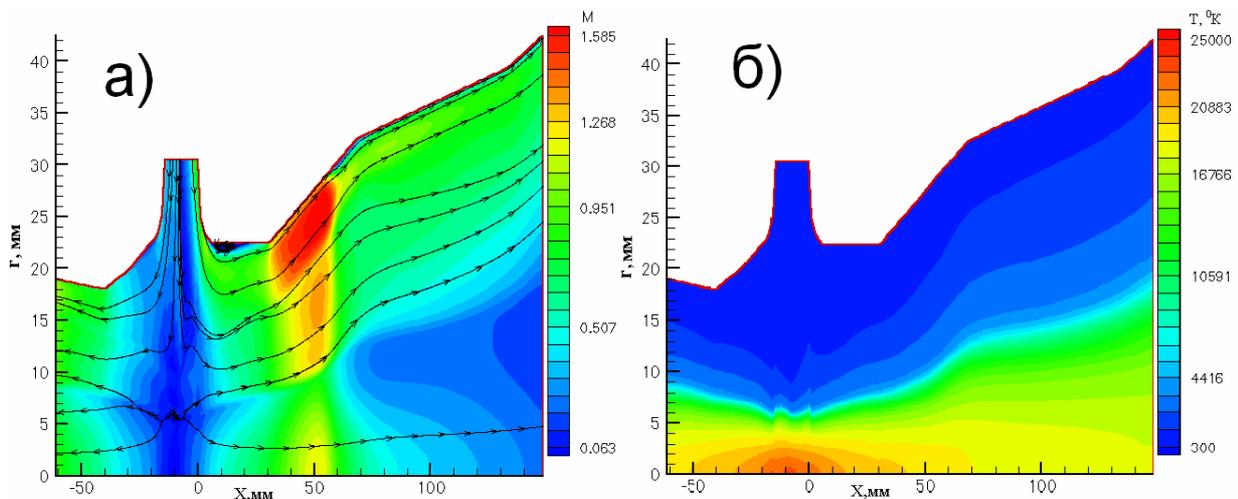


Рис. 11 – Поля числа Маха (а) и температуры (б) стационарной электрической дуги в ДУ с реальной геометрией проточной части.