

ИЛЬИН АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ ГАШЕНИЯ ДУГИ В ПОТОКЕ ЭЛЕГАЗА (SF_6) В
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТАХ

Специальность 05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты»
Специальность 05.14.12 – «Техника высоких напряжений»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург - 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», в Уральском энергетическом институте (УралЭНИИ), на кафедре «Техника высоких напряжений», г. Екатеринбург

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор Шипицын Виктор Васильевич

Официальные оппоненты: - доктор технических наук, профессор
Овсянников Александр Георгиевич
- кандидат технических наук, доцент
Гайворонский Александр Сергеевич

Ведущее предприятие ЗАО «Энергомаш (Екатеринбург)-
Уралэлектротяжмаш», г. Екатеринбург

Защита диссертации состоится 29 февраля 2012 года в **14-15** на заседании диссертационного совета **Д 212.285.03** при Уральском федеральном университете имени первого Президента России Б.Н. Ельцина по адресу: г.Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. Э 406

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н.Ельцина

Сведения о защите и автореферате диссертации размещены на официальном сайте ВАК Министерства образования и науки РФ <http://www.vak.ed.gov.ru>.

Отзывы в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью просим направить по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, УрФУ, К-2, ученому секретарю совета.

Автореферат разослан **25 января 2012**

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.285.03
д.т.н., доцент

Зюзев А.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время при увеличении потребляемой мощности от энергосистемы резко возросла необходимость расширять техническую базу таких энергосистем. А в ряде случаев требуют замены существующие элементы цепи. При модернизации или реконструкции высоковольтных подстанций различные организации делают выбор в пользу элегазового оборудования. Масляные и маломасляные выключатели имеют высокую степень пожаро- и взрывоопасности дугогасительной среды, а также обладают и рядом коммутационных недостатков, в их числе и довольно низкий коммутационный ресурс.

Данная проблема касается всего комплекса высоковольтного оборудования. Однако если в случае трансформаторов тока и разъединителей вопрос разработки новых концепций выглядит не очень сложным, то по тематике высоковольтных выключателей возникает большое количество вопросов. Наиболее важными являются вопросы, связанные с методиками оценки коммутационной способности проектируемого выключателя.

Сложности возникают при попытке описать данный процесс с физической точки зрения, так как процессы коммутации представляют собой некий узел физико-химических и термо-газодинамических процессов, взаимодействующих с электродинамическими явлениями. Сложность расчета заключается не только в том, что процесс гашения дуги в элегазе (SF_6) включает в себя 19 химических компонентов и более 60 реакций с ними, но и в том, что процессы дугообразования и ионизации являются вероятностными.

Развитие производства элегазовых коммутационных аппаратов сегодня не вызывает споров. На сегодняшний день обоснований к применению в качестве дугогасительной среды шестифтористой серы более чем достаточно. И это обусловлено физико-химическими свойствами этого газа, и все мировые производители сегодня предлагают на рынке высоковольтную аппаратуру преимущественно с применением именно этой среды, более того, последние разработки в области комплектных распределительных устройств выполнены так же с применением элегаза.

В современных экономических условиях конечные заказчики, в эксплуатации которого будут находиться коммутационные аппараты, влияющие на надежность его энергосистемы, уделяют особое внимание качеству предлагаемого оборудования в соответствии с его стоимостью. На сегодняшний день в эксплуатации находится более 50% изношенного сетевого оборудования различных классов напряжения и большая часть из них требует немедленной замены. Учитывая рост энергопотребления и срок желаемого использования, требуются новые аппараты с более высокой способностью отключения токов КЗ, и большим коммутационным ресурсом.

Известно, что создание нового коммутационного аппарата методом физического моделирования с последующим проведением коммутационных испытаний весьма дорогостоящий способ, кроме того, он требует и большого временного ресурса, так как организация и проведение повторных испытаний

требует времени. Поэтому в настоящее время весьма актуально стоит вопрос о возможностях моделирования процессов коммутации в высоковольтной аппаратуре с целью сокращения затрат на исследование опытным путем сложных газодинамических, термодинамических и электродинамических процессов. Этим вопросом занимались такие ученые как Белянин Н.М. и Зыричев И.А. в конце 60-х годов прошлого века, позже Авдонин А.В., Егоров В.Г., Серяков К.И., Борин В.Н. – в 70-х и в 80-х Бородинский Г.Я. Много внимания именно физико-химическим свойствам элегаза уделял в своих работах Бортник И.М. Их работы шли параллельно с зарубежными авторами, такими как Хохрайнер, Шварц, Тхиел, Грютц.

В настоящее время, ввиду актуальности тематики, продолжаются публикации СИГРЭ, например Джорджис Бернанд в 1995 занимался коммутацией за счет автогенерации, а о численном моделировании процессов гашения дуги в 2003 году докладывал целый ряд зарубежных ученых на международной конференции в Нью-Йорке, такие как Лионел, Родригес-Медина.

Большой вклад в развитие моделирования дуги в потоке газа внесли ученые: Рагаллер, Нимейер, Шаде, Александров и другие.

Объектом исследования является дугогасительное устройство выключателя высокого напряжения с заданной геометрией дугогасительных сопел, состоящее из подвижного и неподвижного контактов в момент отключения токов короткого замыкания в определенных режимах сети.

Предмет исследования: режимы отключения токов короткого замыкания выключателем высокого напряжения с элегазовой (SF_6) дугогасящей и изоляционной средой с заданной геометрией дугогасительных сопел.

Цель работы: разработка метода поведения элементарных газовых объемов в процессе гашения дуги, разработка математической и компьютерной модели процесса дугогашения, позволяющей учесть геометрию дугогасительного устройства и параметры дугогасящей среды, а также сравнить рассчитанные параметры с реально полученными при испытаниях значениями.

Идея работы заключается в создании нового метода моделирование процесса дугогашения – метода пошагово-расширяющихся ячеек, позволяющего оценить развитие процесса в динамике, максимально приближенной к реальному режиму. Численная реализация данного метода выполнена в виде программы для ЭВМ.

Решаемые задачи:

1. Анализ существующих моделей, позволяющих определить поведение элементарных объемов плазмообразующего газа в осесимметричной дугогасительной камере, численная реализация.
2. Получение метода, описывающего поведение элементарных газовых объемов. Учет конфигурации геометрии элементов дугогасительной камеры, построение и разработка математической модели с учетом допущений в соответствии с разработанной методикой поведения элементарных объемов. Разработка упрощенного ввода характеристик дугогасительной среды и дугогасительной камеры, характеристики работы привода, построение удобного интерфейса ввода данных для возможности применения при конструировании новых устройств и расчетов промежуточных этапов на стадии испытаний физических образцов.

3. Выполнение расчетов процессов отключения разных токов в существующих дугогасительных камерах с использованием полученной программы и методики с целью сравнения полученных результатов с результатами испытаний физических моделей.

Методы исследования. Для анализа входящих в систему уравнений модели величин применялись: операторный метод расчета ПВН, расчет и упрощение дифференциальных уравнений в программе MathCad Enterprises 11, трехмерное моделирование в пакете SolidWorks, методы дифференциального и интегрального исчислений, для решения системы уравнений модели была применена теория подобия физических процессов. Численное решение системы уравнений модели было реализовано в среде Delphi 3.0, результатом чего была получена «Программа моделирования термогазодинамических процессов гашения дуги в дугогасительной камере заданной геометрии, применительно к высоковольтной аппаратуре (Программа моделирования процессов дугогашения)», Свидетельство об официальной регистрации программы ЭВМ № 2006612254 от 30 июня 2006 года.

Научная новизна:

- разработан и обоснован новый метод пошагово-расширяющихся ячеек столба дуги для анализа процесса дугогашения с учетом параметров электрической цепи и геометрии дугогасительной камеры;

- разработана математическая модель процесса гашения дуги;

- впервые получена методика расчета параметров физического состояния дугогасительной камеры в различных процессах течения гашения дуги за счет динамического расширения ячеек с переносом физических параметров.

Практическая ценность исследований заключается в следующем:

- разработанный метод пошагово-расширяющихся элементарных объемов позволяет создать программу моделирования процессов дугогашения, учитывающую графическую интерполяцию дифференциальных зависимостей плазмообразующего газа от энергии газа;

- разработана компьютерная программа для разработки новых современных дугогасительных устройств коммутационных аппаратов, в которых в качестве дугогасительной и изоляционной среды используется элегаз (SF_6), создан графический интерфейс программы для облегченного ввода параметров конструируемого дугогасительного устройства, кроме того, программа может быть дополнена соответствующими модулями и применена с иными начальными параметрами среды и дугогасительного устройства для расчетов аэродинамических процессов в трубах, инжекторах, других областях, где востребованы модели потоков газов высоких скоростей;

- данная программа, включающая в себя модель, позволяет значительно сократить время на проектирование нового дугогасительного устройства, позволяя определить характеристику профиля дугогасительного сопла при заданных начальных параметрах. Таким образом, можно сократить число дорогостоящих экспериментов и ускорить разработку нового коммутационного аппарата;

- впервые проведены расчеты существующего дугогасительного устройства элегазового бакового выключателя типа ВЭБ-110, производимого на ЗАО

«Энергомаш (Екатеринбург) – Уралэлектротяжмаш» и сравнение полученных результатов с экспериментальными данными из протоколов испытаний;

- впервые проведены расчеты на коммутационную способность по максимальному току отключения для дугогасительного устройства колонкового элегазового выключателя типа ВГТ-110, производимого на ЗАО «Энергомаш (Екатеринбург) – Уралэлектротяжмаш» и сравнение полученных результатов с номинальным значением тока отключения (40 кА).

Реализация

1. Результаты исследования процессов отключения токов короткого замыкания выключателями типа ВГТ 110 и ВЭБ 110 переданы в ЗАО «Энергомаш (Екатеринбург) – Уралэлектротяжмаш».

2. Результаты работы будут использованы при анализе коммутационных испытаний и создании новых элегазовых выключателей высокого напряжения в ЗАО «Энергомаш (Екатеринбург) – Уралэлектротяжмаш».

3. Разработанный метод анализа поведения элементарных объемов реализован в модели, выраженной в форме программы для ЭВМ (Программа моделирования процессов дугогашения), Свидетельство об официальной регистрации программы ЭВМ № 2006612254 от 30 июня 2006 года.

4. Результаты работы используются на кафедре Техники высоких напряжений УрФУ в учебном процессе, при курсовом и дипломном проектировании, проведении научных исследований и лабораторных работ.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается корректным использованием методов расчета при общепринятых допущениях моделирования в подобных процессах, а также удовлетворительным совпадением результатов теоретических исследований, полученных с помощью программы моделирования процессов дугогашения, с экспериментальными данными.

Апробация. Основные теоретические положения, результаты и выводы диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях:

- ежегодные практические конференции УГТУ-УПИ, 2001-2009;
- международная научно-техническая конференция «Состояния и перспективы развития электротехнологии». Иваново: Х Бенардосовские чтения, 2003;
- всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий». Екатеринбург, 2006;
- VIII научно-практическая конференция с международным участием, «Энергосберегающие техника и технологии», Екатеринбург, 2005;
- всероссийская научно-практическая конференция «Энерго- и ресурсосбережение и нетрадиционные возобновляемые источники энергии». Екатеринбург, 2003;
- V Международная научно-практическая конференция «Проблемы и достижения в промышленной энергетике». Екатеринбург, 2005;

- всероссийская научно-практическая конференция «Энерго- и ресурсосбережение и нетрадиционные возобновляемые источники энергии». Екатеринбург, 2004;
- всероссийская научно-практическая конференция «Энерго- и ресурсосбережение и нетрадиционные возобновляемые источники энергии». Екатеринбург, 2005;
- семинар ученого совета Всероссийского Электротехнического Института им. Ленина, Москва, 2009;
- семинар ученого совета ОАО «Электrozавод». Москва, 2010;
- семинар ученого совета Всероссийского Электротехнического Института им. Ленина, Москва, 2011;
- XI Международная научно-техническая конференция «Интеллектуальная электроэнергетика, автоматика и высоковольтное коммутационное оборудование», Москва: Ассоциация ТРАВЭК, 2011;
- семинар ученого совета кафедры ТЭВН Московского Энергетического Института. Москва, 2011;
- XVII Всероссийская научно-техническая конференция «Энергетика: Эффективность, надежность, безопасность». Томск, 2011.
- семинар ученого совета кафедры ТЭВН Томского Государственного Технического Университета, Томск, 2011.

Публикации. По результатам работ опубликовано 20 печатных трудов, из них 12 статей опубликованы в рецензируемых изданиях, в том числе, 3 статьи опубликованы в изданиях, входящих в Перечень российских рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ.

Личный вклад автора состоит в разработке метода пошагово-расширяющихся элементарных объемов плазмообразующего газа, разработке модели дуги и ее численная реализация в программе для ЭВМ; участие в коммутационных испытаниях бакового элегазового выключателя, типа ВЭБ-110.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы. Содержит 147 с. основного текста, 66 иллюстраций, 1 таблицу, 14 с. списка литературы из 140 наименований. Общий объем работы составляет 161 с., 2 приложения.

Соответствие темы исследования паспорту специальности. Соответствие паспорту специальности 05.09.01 «Электромеханика и электрические аппараты»:

1. Анализ и исследование физических явлений, лежащих в основе функционирования электрических, электромеханических преобразователей энергии и электрических аппаратов.

2. Разработка научных основ создания и совершенствования электрических, электромеханических преобразователей и электрических аппаратов.

3. Разработка методов анализа и синтеза преобразователей электрической и механической энергии.

4. Разработка методов анализа и синтеза электрических аппаратов.

5. Разработка подходов, методов, алгоритмов и программ, обеспечивающих проектирование, надежность, контроль и диагностику функционирования

электрических, электромеханических преобразователей и электрических аппаратов в процессе эксплуатации, в составе рабочих комплексов.

Соответствие паспорту специальности 05.14.12 «Техника высоких напряжений»:

1. Исследование физических закономерностей и разработка методов расчета электрических разрядов в условиях, характерных для электроустановок высокого напряжения (молнии и другие атмосферные явления).

2. Разработка принципов выбора и конструирования изоляции электроустановок высокого напряжения.

4. Разработка научных основ техники использования высоких напряжений для технологических процессов, разработка оборудования для технологий, использующих высокое напряжение.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы ее цели, произведен краткий обзор существующих методов и проведенных ранее работ по теме диссертации.

В первой главе проведена постановка задачи математического моделирования процесса дугогашения. Проведен анализ состояния вопроса и обзор существующих моделей. Даны понятия участков физической модели дугогасительной камеры, проведено рассмотрение каждой зоны с точки зрения взаимодействия дуги с обдуваемым газовым потоком. Выведены основные допущения, используемые при математическом моделировании процесса.

Проведен анализ электро- и теплофизических свойств дугозарядной плазмы, а так же приведены физико-химические свойства элегаза. Приведены приближенные математические модели газо-термодинамических процессов при дуговом разряде в потоке плазмообразующего газа, использованные ранее, и выведены уточнения к ним, в результате чего получилась обобщенная модель в форме системы дифференциальных уравнений (уравнение сплошности потока (неразрывности), уравнение сохранения импульса и уравнение сохранения энергии) и приведены предпосылки для вывода основной системы уравнений модели дуги:

$$-\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \sigma_0 E^2 - P_{uz} = c_p \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial z}, \quad (1)$$

$$r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \mu(r) V(r) \right) - \frac{\partial P}{\partial z} = 0, \quad (2)$$

приняв допущение, что $\frac{\partial P}{\partial z}$ не зависит от r , заменим частные производные по z конечными приращениями, учтем, что $V(R)=0$, можно записать (1) в усредненной форме, а (2) проинтегрировать, причем ввести значение расхода $G = 2\pi \int_0^R V_z \rho dr$,

среднемассовую энтальпию h , μ – среднемассовый расход газа и функцию теплового потенциала $S(T)$, получим окончательную систему уравнений:

$$-\frac{\partial^2 S}{\partial r^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial S}{\partial r} + \sigma(S)E^2 - P_{uz}(S) = G \frac{h - h_0}{L\pi R^2}, \quad (3)$$

$$V(r) = \frac{\Delta P}{L} \int_r^R \frac{r dr}{2\mu(S(r))}, \quad (4)$$

$$I = 2\pi E \int_0^R \sigma dr, \quad (5)$$

где: L – слой, по которому производится расчет скоростей и температур, для граничных условий:

$$r = R \Rightarrow S = S_w, \quad (6)$$

$$r = 0 \Rightarrow \frac{\partial S}{\partial r} = 0. \quad (7)$$

Можно решить эту систему уравнений и методом конечных разностей, но в данной работе решение было проведено новым методом пошагово-расширяющихся элементарных объемов газа ячеек для поля ячеек на рис. 2, при этом, рассматриваемая скорость (4) будет дополнена компонентой, зависящей от условия обдува внутренней полости сопел за счет работы дугогасительного устройства. В результате, была обоснована актуальность проблематики, а также сформулированы следующие задачи исследований:

1) исследование возможных математических описаний различных потоков газа, их взаимодействие с электрической дугой, критерии гашения;

2) разработка математической модели, ее численная реализация, позволяющая изучить:

- явление газового потока в дугогасительной камере различной геометрической конфигурации;
- явления взаимодействия дуги с потоком плазмообразующего газа;
- развитие обдуваемого дугового разряда в дугогасительной камере и его гашение потоком газа;

3) адаптация математических моделей к экспериментальным данным;

4) влияние внешнего электрического контура на процессы гашения и развития электрической дуги в элегазовых высоковольтных выключателях в форме кривой ПВН.

По обзору выполненных ранее работ и поставленным задачам были сформулированы основные допущения, принятые при создании модели:

1) Полагаем, что поступающий в дуговой промежуток газ химически чист и однороден по составу. Это означает, что будем пренебрегать теми изменениями в химическом составе плазмы, источником которых является плавящийся и испаряющийся электрод. Будем учитывать лишь изменение концентрации газа, образующего электрическую прочность промежутка.

2) Будем рассматривать дугогасящую среду как однокомпонентный газ в состоянии

локального термодинамического равновесия. Приближение такого газа к дугоразрядной плазме достигается эффективными значениями плотности, энтальпии, теплоемкости, теплопроводности, вязкости и электропроводности, рассчитанными с учетом равновесных процессов ионизации и диссоциации. 3) Для плазмы, как системы из невзаимодействующих частиц, допускаем уравнение состояния совершенного газа. Система уравнений, описывающих газовый поток, должна быть дополнена уравнениями электродинамики Максвелла и законом Ома.

4) При давлениях, близких к атмосферному, излучение не играет заметной роли в рассеянии энергии, однако, в случае применения элегаза, влияние излучения имеет большее значение ввиду свойств прозрачности элегаза и другого процесса образования градиента температур. Данное влияние мы будем учитывать, применив коэффициент излучения, полученный эмпирическим путем или расчетным.

5) Допускается отсутствие внешних магнитных полей.

6) Следствием пренебрежения магнитными полями является пренебрежение токами индукции и Холла в выражении обобщенного закона Ома. Кроме того, можно показать и правомочность пренебрежения током конвекции по сравнению с током проводимости.

7) Также оценим величину избыточного электрического заряда по отношению к величине заряда, переносимого током проводимости по третьему уравнению системы Максвелла.

Таким образом, в отличие от задач магнитной гидродинамики, в которых движение проводящего газа в электромагнитном поле проявляется в 2 эффектах – лоренцевой силе и джоулевом тепловыделении, расчет процессов в дугоразрядных камерах сводится к газодинамической задаче при наличии лишь одного электромагнитного эффекта – джоулева тепловыделения.

Вторая глава посвящена интегральным моделям процессов теплообмена дугового разряда с газовым потоком, где и было предложено решение системы уравнений (3-5). Было проведено математическое моделирование электрической дуги каналовой моделью применительно к моделированию процессов дугогашения в высоковольтной аппаратуре, что позволило получить систему уравнений каналовой модели:

$$\sigma_0 \cdot \pi \cdot r_0^2 = \frac{I}{E};$$

$$\int_{s_w}^{s_0} \sigma ds = - \int_R^0 \frac{\sigma}{r} \left(\int_r^R \sigma E^2 r dr \right) dr;$$

$$\int_{s_w}^{s_0} \sigma ds = \frac{I^2}{4\pi^2 r_0^2}.$$

Так как аналитический метод исследования даже упрощенной каналовой модели будет приводить к громоздким выражениям, то, очевидно, что требуется иное решение подобных и более сложных систем, которое целесообразно проводить при применении ЭВМ.

Далее модель усложнялась комплексами, зависящими от характера движения газового потока, моделируя турбулентное и ламинарное движение среды, например

для участка с характеристикой движения (рис.1) были получены комплексы скоростей по координатам X, Y, Z:

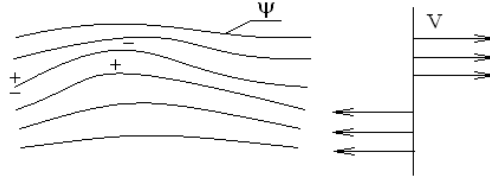


Рис.1. Схема линий тока газа

$$u = \bar{U} + U', \quad v = \bar{V} + V', \quad w = \bar{W} + W';$$

$$\bar{U} = \frac{1}{t_0} \int_{\tau-t_0/2}^{\tau+t_0/2} u d\tau; \bar{U}' = \frac{1}{t_0} \int_{\tau-t_0/2}^{\tau+t_0/2} U' d\tau \equiv 0; \overline{U'V'} = \frac{1}{t_0} \int_{\tau-t_0/2}^{\tau+t_0/2} U'V' d\tau; \text{ и для кинетической энергии:}$$

$$E_t = \frac{1}{2} \left[(\bar{U}')^2 + (\bar{V}')^2 + (\bar{W}')^2 \right].$$

Учет турбулентности для (4) выполнялся аппроксимацией расширяющихся ячеек, рассматривая скорости по направлениям оси OY и оси OX, определяя параметры для каждой ячейки по выражениям:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \frac{\xi \cdot \rho \cdot v^2}{2}, \quad (8)$$

где $\xi \sim \frac{1}{\eta}$, а $\eta = \frac{R}{d}$ - так для каждого слоя по направлениям оси OY и оси OX.

турбулентную вязкость так же можно определять так:

$$\eta = Cn(z - z_t)(v_1 - v_2), \quad (9)$$

где Cn - турбулентная теплоемкость, которая - берется по графику методом интерполяции, z - координаты горловины сопла, v₁ и v₂ скорости.

Далее:

$$\frac{d}{dy} \left(\nu + \text{Pr} \rho \eta \frac{dv}{dy} \right), \quad (10)$$

где ρ – плотность, берется по графику, ν – вязкость, вычисляется из условия постоянства расходов (сплошность потока) по выражению:

$$\nu = fvt, \quad (11)$$

где f – сечение, t – время.

Процедура применения уравнения постоянства расходов приведена в приложении 2.

Для упрощенного рассмотрения процессов было принято решение по применению модели, в которой за основу была взята идея крупных частиц, предложенная Белоцерковским О.М. в публикации (Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М. «Метод крупных частиц в газовой динамике.», Москва, Наука, 1982.), однако модель была изменена, например, вместо рассмотрения узловой сетки, рассматривалось поле ячеек, кроме того, основным параметром ячейки была ее энергия.

Рассмотрение данной модели следует начать с газодинамической части. Оригинальность ее заключается в принципиально другой математической аппроксимации поведения объемных сегментов среды дугогасительного устройства. Если представить осесимметричную дугогасительную камеру в разрезе и предположить, что все процессы будут происходить симметрично, то есть перейти от трехмерной модели к двумерной (от объемных сегментов – к ячейкам), то можно рассмотреть плоскость, на которой выделены эти мельчайшие квадратные ячейки, при этом параметры задавать не для узла, а для полученной ячейки, то мы получим набор малых плоскостей с одинаковыми площадями. В каждой такой малой плоскости задаются начальные параметры: масса M , температура T , начальная скорость V_0 , плотность ρ , проводимость σ в момент времени t . Принимая во внимание радиальное увеличение сегментов в объемной модели, следует учитывать увеличение их масс пропорционально объему по мере удаления от оси симметрии, в данной модели, при переходе к плоскости, это обстоятельство учитывается ростом теплоемкости и массы в зависимости от расстояния от оси симметрии. Принимая во внимание все исходные данные и вводимые параметры тока и напряжения, решаем систему уравнений (12), являющуюся выводом из системы уравнений (3-5) и описывающую в упрощенном виде взаимодействие малых объемов, при этом расчет давления и скорости выполнен с учетом турбулентности, методом, описанным в (8-11). После чего параметры каждой ячейки будем считать определенными, и сами ячейки будут ограничены равными по длине сторонами.

В следующем шаге (итерации) модели будет проявляться эффект «расширения» ячеек с заданной скоростью V и скоростью звука \vec{a} – как показано на рис.2. Расширение ячеек выражается в массопереносе части газа ячейки с определенными ниже параметрами. Таким образом, каждая ячейка совершает обмен импульсами, оказывая влияние на соседнюю ячейку своими параметрами.

$$a = \sqrt{\frac{\gamma k T}{m_e}},$$

$$dQ_o - dQ_c = d(W_e \cdot m_e) + p dV,$$

$$dQ_c = dU_n + dU_k, dU_n = dU_p + dU_m + dU_{вк}, \frac{U_k}{m} = \frac{\omega^2 dt}{2}, \frac{U_p}{m} = \frac{P}{\rho}, \quad (12)$$

$$\frac{U_m}{m} = zg, \frac{U_{вк}}{m} = \frac{c_v T}{m}, dQ_o = k \cdot U_o \cdot I_o dt, m_e = \frac{pV}{R_e T},$$

где k - постоянная Больцмана, γ - постоянная адиабаты, T – температура, m – масса газа, Q_c – энергия, отводимая конвективно, Q_o – энергия, подводимая дугой, U_n – потенциальная энергия газа, U_k – кинетическая энергия газа, U_p – энергия газа от давления, U_m – энергия газа от массы, $U_{вк}$ – внутренняя кинетическая энергия газа, ω – скорость газа в данном сечении, z – координата горловины сопла, g – ускорение свободного падения, V – объем газа, C_p – теплоемкость газа при постоянном давлении, T – температура газа, R – универсальная газовая постоянная, C_v – объемная теплоемкость, p – давление газа.

Для определения описанного выше массопереноса газа в дополнении к выражению (4) и обмена импульсами, рассмотрим заданную квадратную сетку газа

со сторонами *boxsize* в момент времени t_0 , когда произошло определение параметров газа по уравнениям, упрощенно показанных в (12) а значения энергий более полно показано в приложении 2.

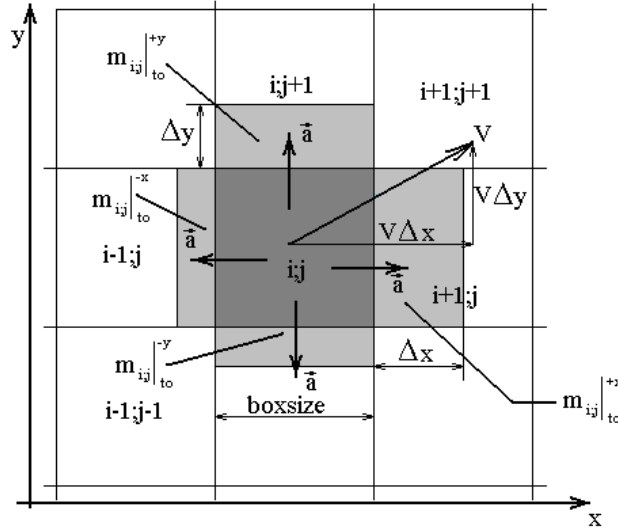


Рис.2. К расчету массопереноса ячеек

В момент времени t_0 происходит массоперенос газа рассматриваемой ячейки $i;j$ с площадью S (см. рис.2) в соседние ячейки. На этот процесс оказывает воздействие заданная скорость, которую можно разложить на x и y компоненты ($V_{\Delta x}$ и $V_{\Delta y}$). Вектор скорости массопереноса (скорости расширения ячейки через свою границу) обозначим \vec{a} и для случая «расширения» в вакууме эта скорость будет равна скорости звука. Далее определим величину такого «расширения» с учетом того, что по мере удаления от оси симметрии масса ячейки будет возрастать. Для этого назовем величину элементарного «расширения» (глубина проникновения газа в соседнюю ячейку) h_{part} , которая связана с определенными в (12) параметрами через скорость \vec{a} . Величина h_{part} будет определена для направления по оси абсцисс и оси ординат (3).

$$S_{i;j} = boxsize^2, \quad (13)$$

где *boxsize* – длина и ширина ячейки, в соответствии с рис. 1.

При наличии заданного вектора скорости (например, от воздействия поршня с заданной характеристикой хода от времени) можно получить иное значение расширения для координат x и y . Выполним это, например, для координаты y и, зная теперь глубину массопереноса, определим его площадь:

$$h_{part} = a \cdot \Delta t, \quad (14)$$

$$\Delta y = \Delta t \cdot \left| \vec{V}_{\Delta y} + \vec{a} \right|, \quad (15)$$

$$\Delta s_{i;j} \Big|_{t_0}^{+y} = \Delta y \cdot boxsize, \quad (16)$$

где $\Delta s_{i;j} \Big|_{t_0}^{+y}$ - площадь массопереноса ячейки $i;j$ по координате y , то есть в сторону ячейки $i;j+1$, при этом, конечно, следует учесть и расширения других ячеек, то есть произвести суммирование площадей и скоростей ячеек, с учетом их характеристик, таких как плотность, температура и др. Для чего необходимо применить уравнения сложения скоростей и площадей для левой (l_{part}) и правой (r_{part}) частей

расширения. Сделаем это, например, для того же момента времени t_0 , предположив, что вектор скорости сегмента направлен вправо, как указано на рис.2.:

$$\begin{cases} r_{part} = \frac{2 \cdot h_{part}}{1 + \frac{a}{(a + V_{\Delta x})}} \\ l_{part} = 2 \cdot h_{part} - r_{part}, \end{cases} \quad (17)$$

после чего запишем выражение для вычисления массы $m_{i;j} \Big|_{t_0+\Delta t}^{+x}$, части газа при массопереносе:

$$m_{i;j} \Big|_{t_0+\Delta t}^{+x} = \frac{s_{i;j} \Big|_{t_0}^{+x} \cdot m_{i;j} \Big|_{t_0}^{+x}}{boxsize^2}. \quad (18)$$

Таким образом, масса газа, оставшегося в данной ячейке, будет вычисляться по выражению:

$$M_{i;j} \Big|_{t_0+\Delta t} = M_{i;j} \Big|_{t_0} - \sum_{i,j} m_{i;j} \Big|_{t_0}^{\pm(x,y)}. \quad (19)$$

И, наконец, получим выражение скорости, соответствующее уравнению сохранения импульса:

$$V_{i;j} \Big|_{t_0+\Delta t} = \frac{(V_{i+1;j} \Big|_{t_0} \cdot M_{i+1;j} \Big|_{t_0} + V_{i;j} \Big|_{t_0} \cdot m_{i;j} \Big|_{t_0+\Delta t})}{M_{i+1;j} \Big|_{t_0} + m_{i;j} \Big|_{t_0+\Delta t}}. \quad (20)$$

Уравнения (18, 19, 20) являются основными уравнениями, описывающими взаимодействие между ячейками посредством массопереноса и обмена импульсами.

В общем виде уравнение передачи массы в декартовых координатах представляется уравнением неразрывности (сплошности) потока:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho + \frac{\partial}{\partial x} (\rho \cdot u) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho \cdot v) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho \cdot w) = 0, \quad (21)$$

где ρ – плотность газа; u, v, w – скорости по ординатам.

Часть удельной энергии по массе, отведенную конвективно, газовым потоком, можно определить по выражению:

$$\frac{Q_c}{m} = \frac{P}{\rho} + \frac{c_v T}{m} + \frac{\omega^2 dt}{2} + zg. \quad (22)$$

Дополнить данную систему необходимо уравнениями электродинамики и законом Ома. Для этого определяется Джоулева мощность, выделяющаяся на дуге (W_d) из выражения:

$$W_d = \sigma_3 \cdot E^2 - \frac{4\lambda T_0}{R_d^2} - P_{изл}, \quad (23)$$

где σ_3 – проводимость среды при заданных условиях; λ – теплопроводность; R_d – радиус дуги (или текущий радиус ячейки, как координата); T_0 – начальная температура; $P_{изл}$ – мощность, затраченная на излучение.

Данное уравнение можно записать выражением обобщенного закона Ома

$$\vec{j} = \sigma(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} - \frac{1}{\rho_{e_1}} \vec{j} \times \vec{B}) + \rho_u \vec{v}, \quad (24)$$

где $\rho_{e1}=n_{e1}e$ – плотность зарядов электронов, ρ_u – избыточный электрический заряд дугоразрядной плазмы.

Тогда уравнение энергии примет вид:

$$c_p \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + c_p \cdot \rho \cdot u \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = \sigma_y E^2 - \frac{\partial}{\partial y} \left(y \cdot \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) - P_{из}, \quad (25)$$

где c_p – теплоемкость элегаза при постоянном давлении, ρ – плотность элегаза в ячейке, u – скорость в данном месте, T – температура в ячейке, σ_y – электропроводность элегаза в ячейке, λ – коэффициент теплопроводности элегаза в ячейке, $P_{из}$ – мощность, затраченная дугой на излучение, x, y – координаты, t – время шага, E – напряженность электрического поля.

Уравнение передачи импульсов в общем виде можно выразить уравнением баланса количества движения (импульса), что подтверждает второе начало термодинамики (где закон сохранения импульса является следствием):

$$-F \frac{d}{dx} p = M \frac{d}{dx} w + \Pi \cdot \tau_0 + F \cdot g \cdot \rho \cdot \sin(\beta), \quad (26)$$

где: w – скорость; ρ – плотность; F – площадь поперечного сечения канала; Π – периметр канала, граничащий с другой средой; τ_0 – касательное напряжение на стенке (напряжение трения на стенке); β – угол наклона канала к горизонту; x – расстояние в направлении движения; M – удельный массовый расход (массовая скорость); g – ускорение свободного падения.

Таким образом, система уравнений (21,24-26) описывает процессы поведения газа в замкнутой области при воздействии температуры и скорости.

После преодоления момента времени t_0 , когда параметры массопереноса и обмена импульсами определены, и взаимодействие ячеек произошло, наступает следующий момент времени t_1 , для которого заново разбивается сетка с квадратными ячейками с учетом новых параметров ячеек. Процесс расчета повторяется и так происходит каждый временной шаг (итерация), величина которого задается в интерфейсе программы моделирования.

Численная реализация изложенной модели выполняется по алгоритму:



Рис.3. Алгоритм определения энергии газа

В процессе численного моделирования процесса определяются основные параметры каждой ячейки, энергия газа ячейки, что служит новым начальным условием для последующей итерации. Проверяется выполнение критерия пробоя ($R_{кр}$ – сопротивление критическое), сравнивая рассчитанные значения электрической прочности дугового промежутка ($R_{пр}$) с критическим значением. При условии сопротивления промежутка менее критического ($R_{пр} < R_{кр}$) возникнет пробой (или дуга не погаснет). Предварительная проверка поведения газа без дуги показывает хорошее соответствие законам физики в условиях высоких температуры и давления, при наличии дуги удовлетворяет уравнению (25), при этом мощность дуги, рассеянная за счет излучения, вводится коэффициентом излучения в процентах от мощности энергии дуги, которую можно выбрать в соответствии с результатами опытов, отмеченными в работах авторов, например в работе Hermann W., Kogelschatz U., Ragaller K., Shade E. Investigation of cylindrical, axially blown, high-pressure arc, J.Phys.D: Appl.Phys. 1974г., том 7., стр. 607-619.

После достижения температуры диссоциации элегаза, его плотность падает до минимума и при дальнейшем повышении температуры элегаз разлагается. Таким образом, полностью отражается физическая картина снижения концентрации частиц элегаза и разложения элегаза на компоненты по мере приближения к стволу дуги.

В третьей главе описывается интерфейс полученной программы, реализующей математическую модель численным методом, применяя метод расширяющихся ячеек, сравнение результатов, полученных расчетным путем с результатами экспериментов. Впервые реализован графический ввод геометрии дугогасительного сопла (рис.4) и вводится в растровом режиме. Естественно, конфигурация дугогасительного сопла является know how каждого изготовителя, поэтому реальные размеры в работе не приводятся, лишь растровые картинки, полученные с чертежей, не передающие масштабность и размеры.

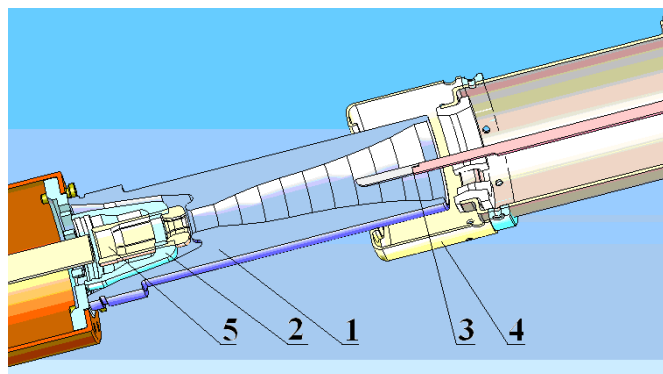


Рис. 4. Конфигурация дугогасительной камеры, состоящей из 5 основных деталей

Проведен расчет процесса отключения тока короткого замыкания 30 кА баковым элегазовым выключателем типа ВЭБ-110 кВ. По результатам расчета процессов отключения был проведен визуальный контроль (рис 5). В результате анализа

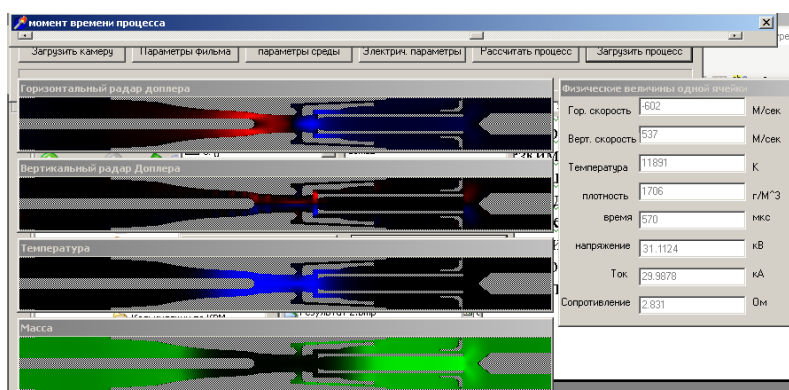


Рис.5. Визуальное наблюдение за развитием процесса

обдуваемого потоком газа дугового разряда для 6 сечений (рис.6) была получена характеристика скорости (рис.7), также возможно получить зависимости критерия Рейнольдса Re , критерия Пекле Pe и температуры (рис.8).

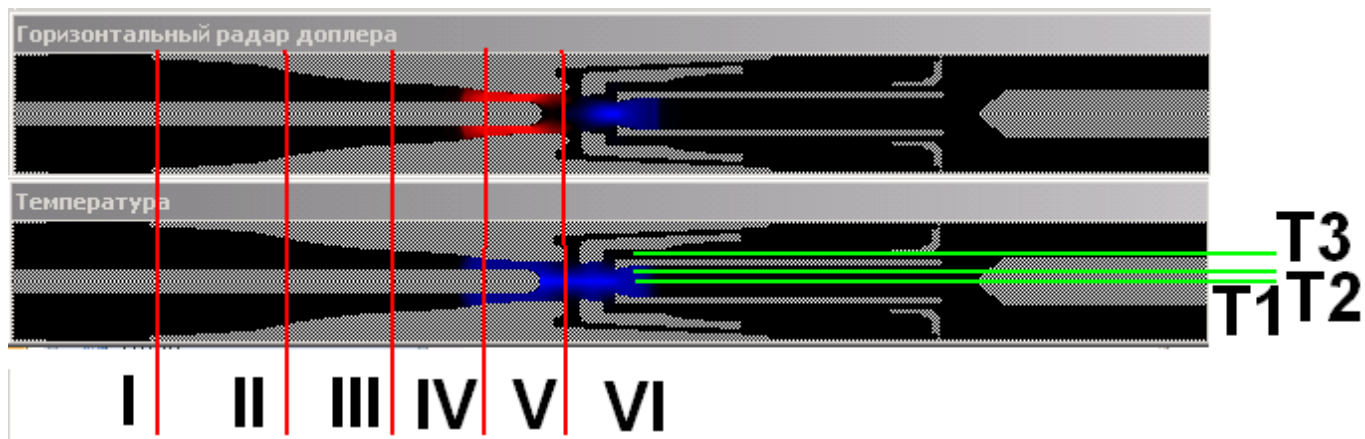


Рис.6. Сечения для анализа характеристик сопла и температурного профиля дуги

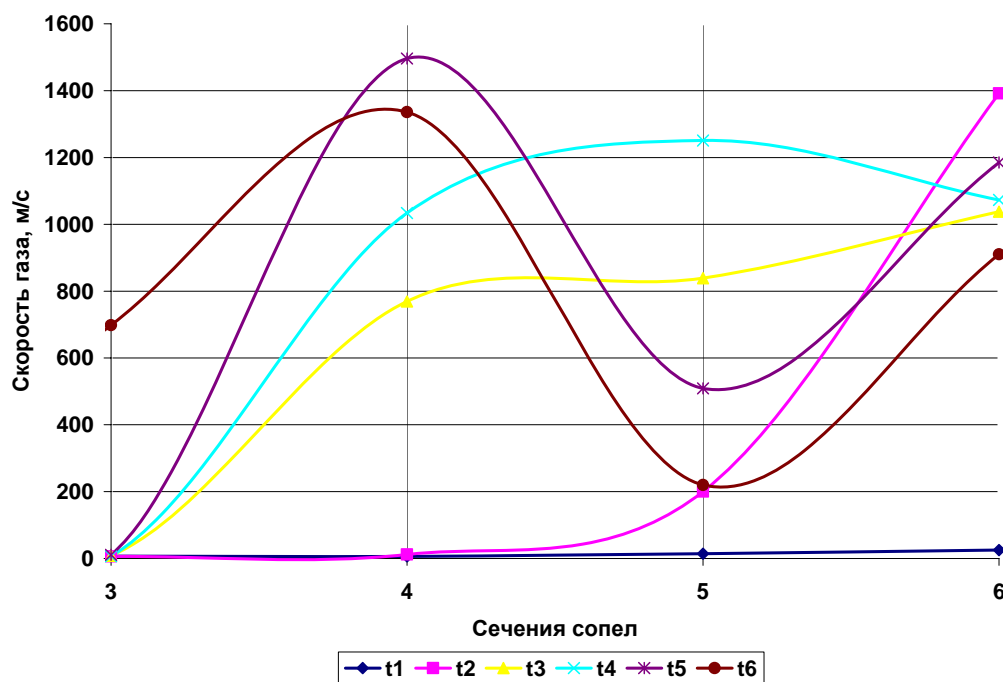


Рис.7. Графики зависимости скоростей газа (м/с в различные моменты времени) в различных сечениях сопла

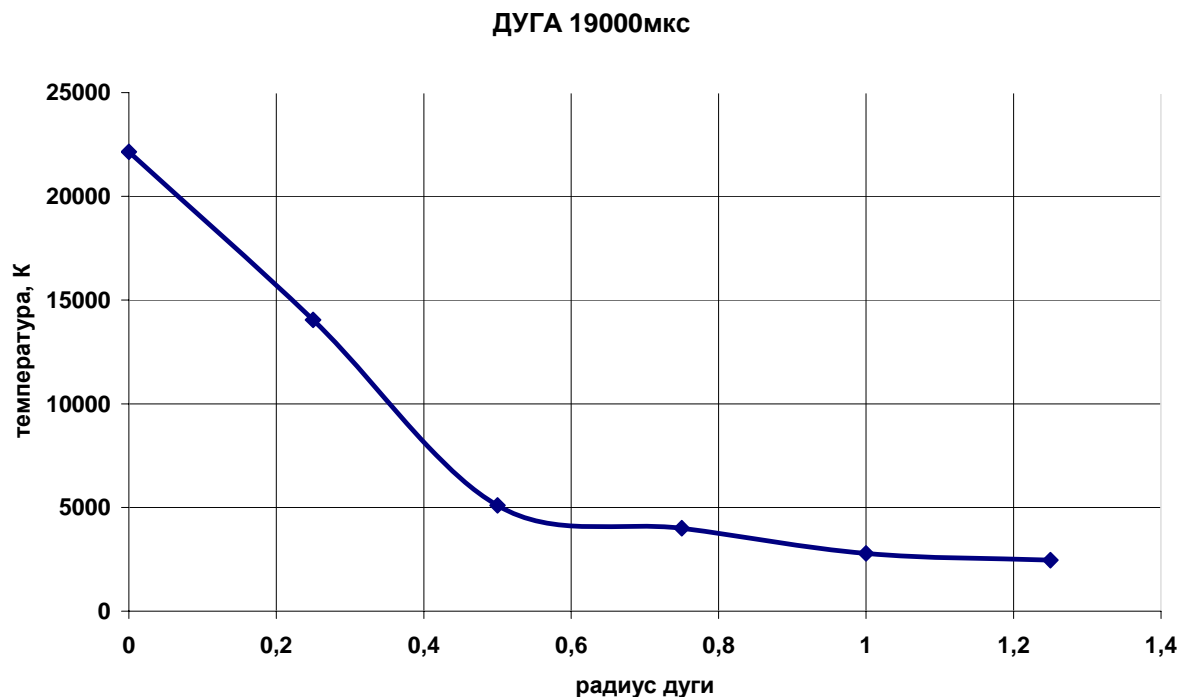


Рис.8. Распределение температуры по сечению дуги, диаметра r в момент времени 19 мс

Полученная зависимость температуры хорошо согласуется с результатами работы “Application of High Current and Current Zero Simulations of High-Voltage Circuit Breakers” C.M. Franck, M. Seeger, Contib. Plasma Phys. 46, No.10, 787-797 (2006)

При этом были получены значения тока и напряжения. График зависимости отключаемого тока и ПВН указаны на рис.9 и рис. 10. После получения результатов было проведено сравнение расчетных данных с экспериментальными данными методом наложения расчетных кривых на осциллограммы эквивалентных испытаний. Расчет кривой ПВН может быть произведен отдельно операторным методом, как показывалось в тексте диссертационной работы, или с применением современных математических пакетов, автором использовался MathCAD Enterprises edition 11. Наложение тока отключения расчетного и реально полученного при осциллографировании приведено на рис.12-15. Для анализа результаты сравниваемых токов последние полуволны токов в момент отключения дуги были помещены в один масштаб (рис.15). В реальности форма кривой отключаемого тока также является синусоидой, однако при проведении синтетических испытаний, последняя полуволна искажается контуром затягивания дуги. При сравнении это видно, однако это нельзя считать несовпадением, так как воздействие на испытуемый объект подвергается воздействию именно синусоидальной полуволны. Данное сравнение не имеет физического смысла, а лишь показывает, что программа показывает чистое воздействие, а осциллограмма фиксирует работу контура затягивания дуги.

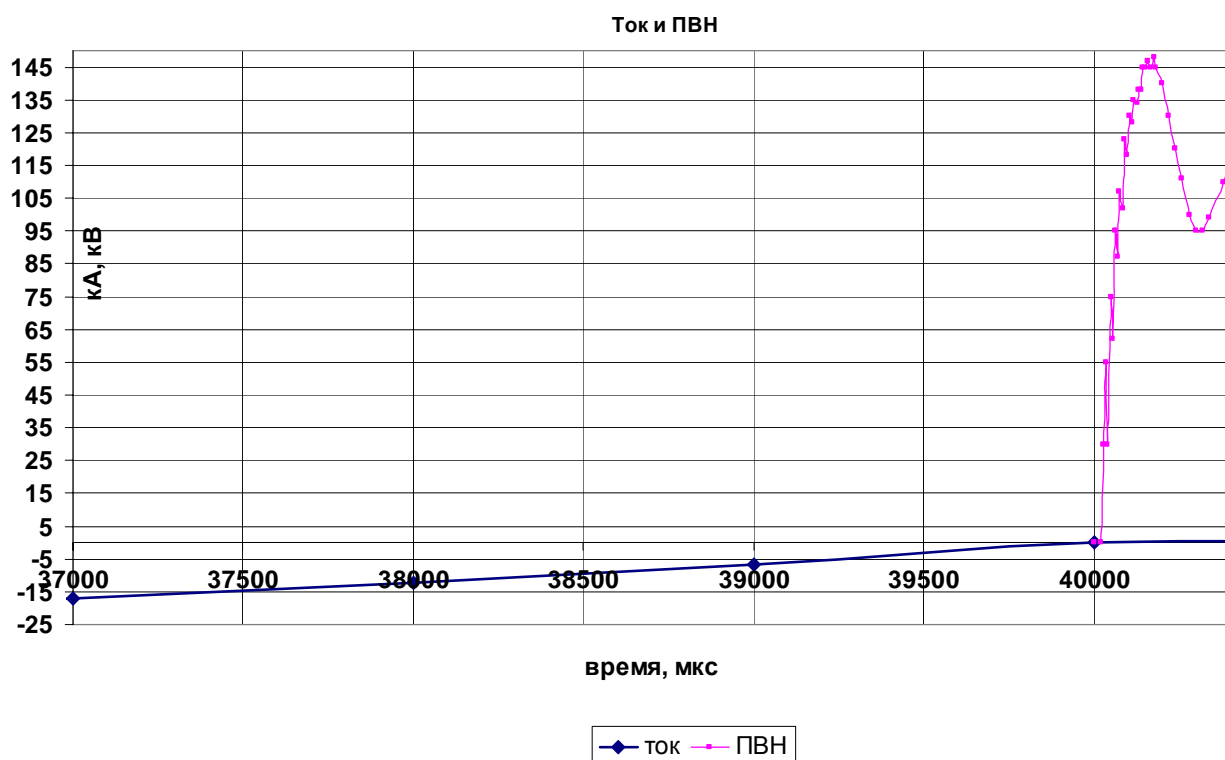
Во время последней полуволны тока в синтетической схеме запускается контур продления дуги, который вызывает искажение кривой отключаемого тока, что и видно на рис.14. Расчетные данные не учитывают этот эффект, так как это не

является отражение реальной действительности при отключении такого режима в сети. В то же время, программа в неявном виде учитывает индуктивную составляющую внешнего контура в момент предгашения, что существенно загроубляет точность расчета для этого режима и фактическая точность без учета искажения кривой тока (а в этом случае совпадение синусоид будет полным) будет составлять примерно 20% по величине сопротивления дугового промежутка, что отразится на температуре плазмообразующего газа.

Наложение кривой ПВН произведем аналогичным образом. Для процесса возникновения ПВН погрешность не превышает 15%, что подтверждает эффективность графического ввода параметров.

Приведем пример процесса, в котором параметры дугогашения были заданы, таким образом, чтобы отключение не прошло, например, введем значение отключаемого тока равным 50 кА для выключателя, типа ВГТ-110 с током отключения 40 кА. Приведем графические результаты обработки полученной выборки по данному процессу (рис.16, 17).

Из приведенных рисунков видно, что после пересечения тока нулевой линии, ток продолжает увеличиваться и гашения не происходит. Недостаток электрической прочности промежутка и эффективности охлаждения канала дуги не позволяют прервать процесс нарастания тока.



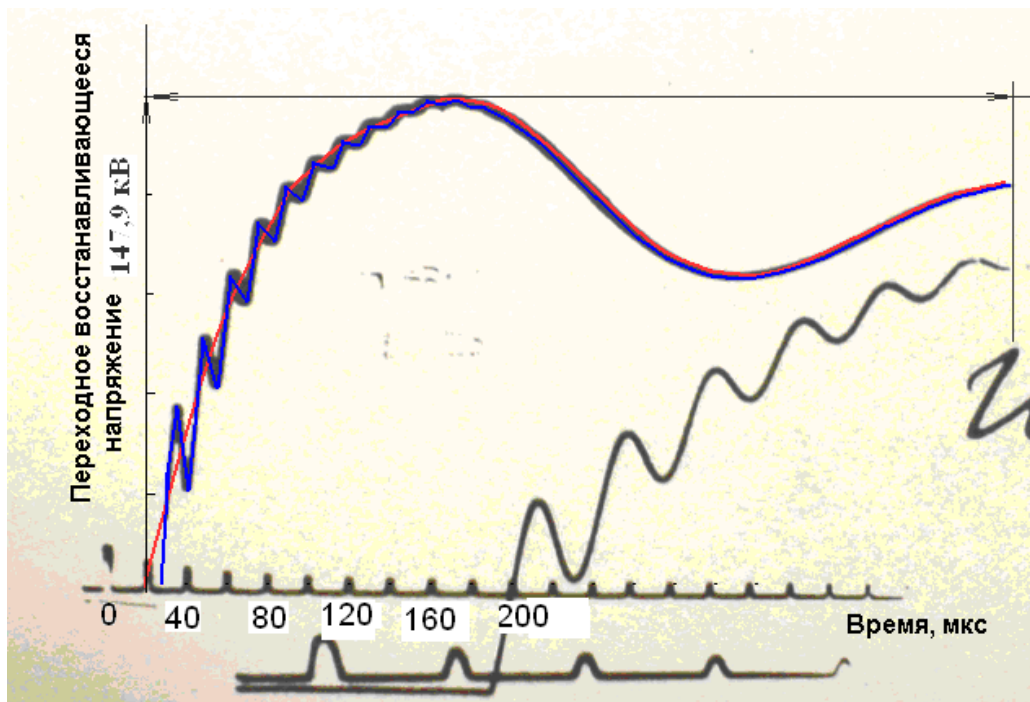


Рис.10. Наложение кривых ПВН

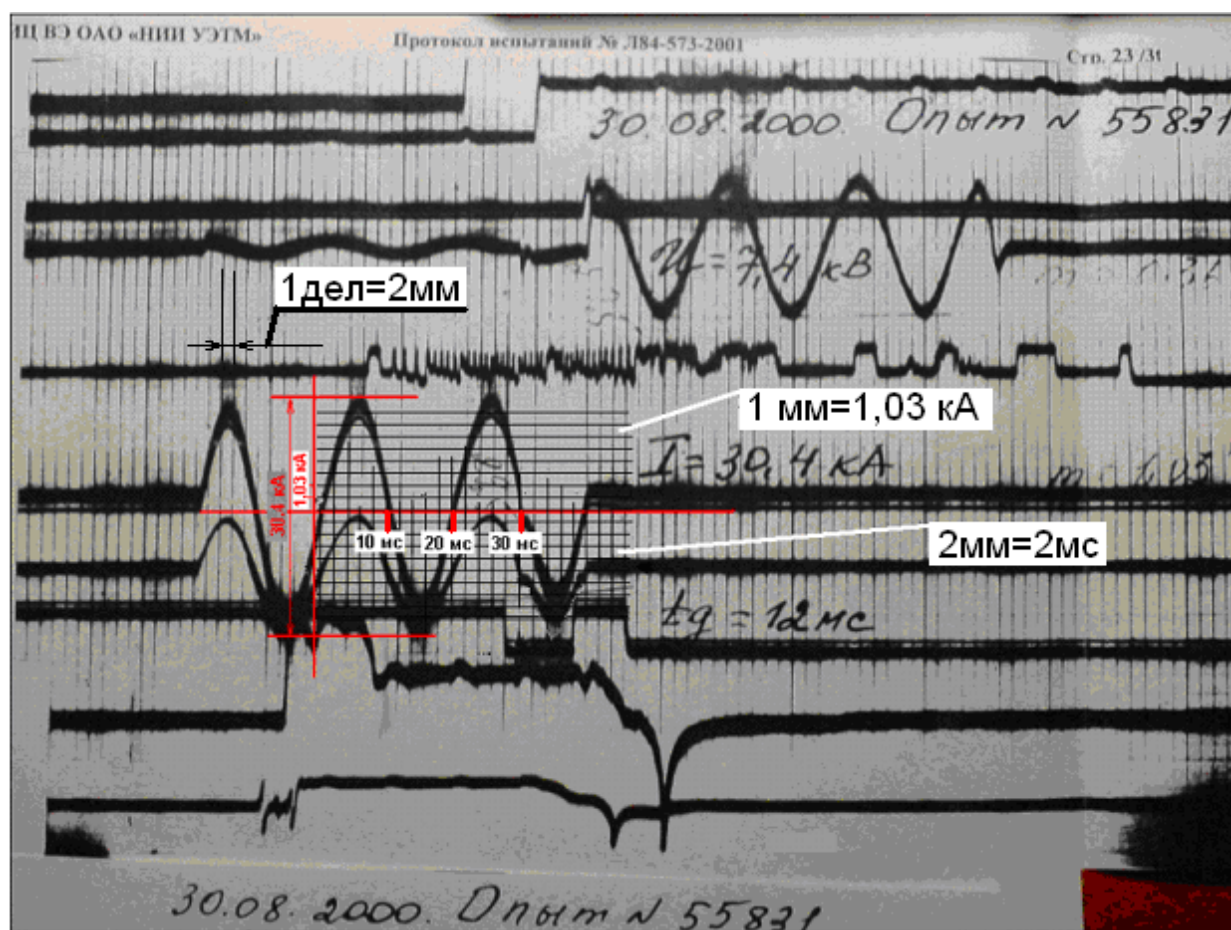


Рис.11. Наложение на осциллограмму расчетного тока отключения

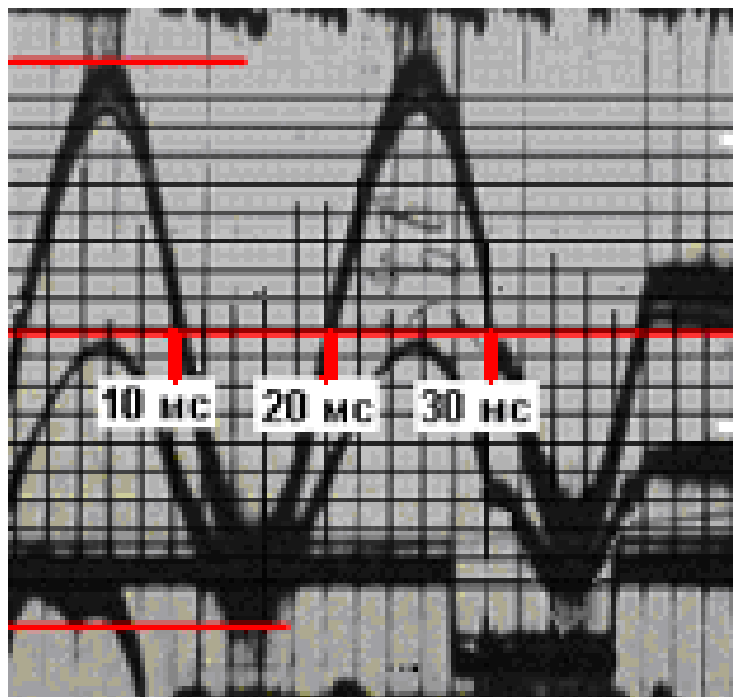


Рис.12. Последняя полуволна токов отключения

Наложение расчетных данных на эксперимент

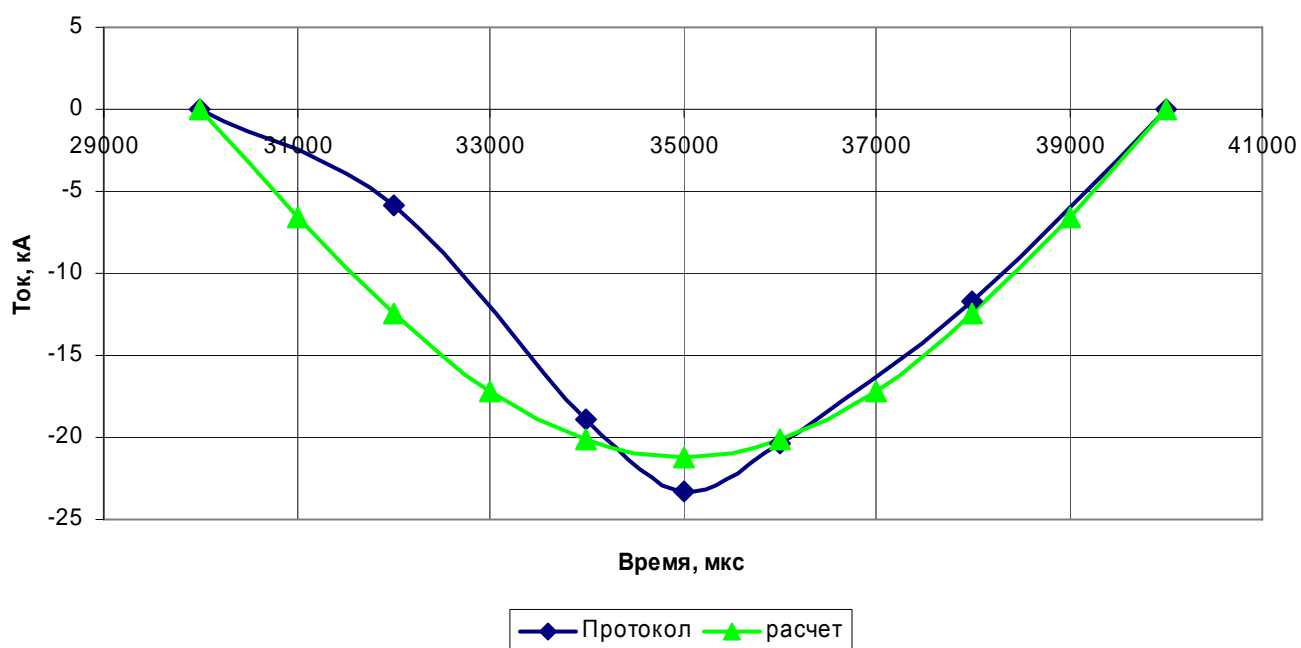


Рис.13. Сравнение рассчитанной последней полуволны тока и экспериментальной кривой, полученной с протокола испытаний

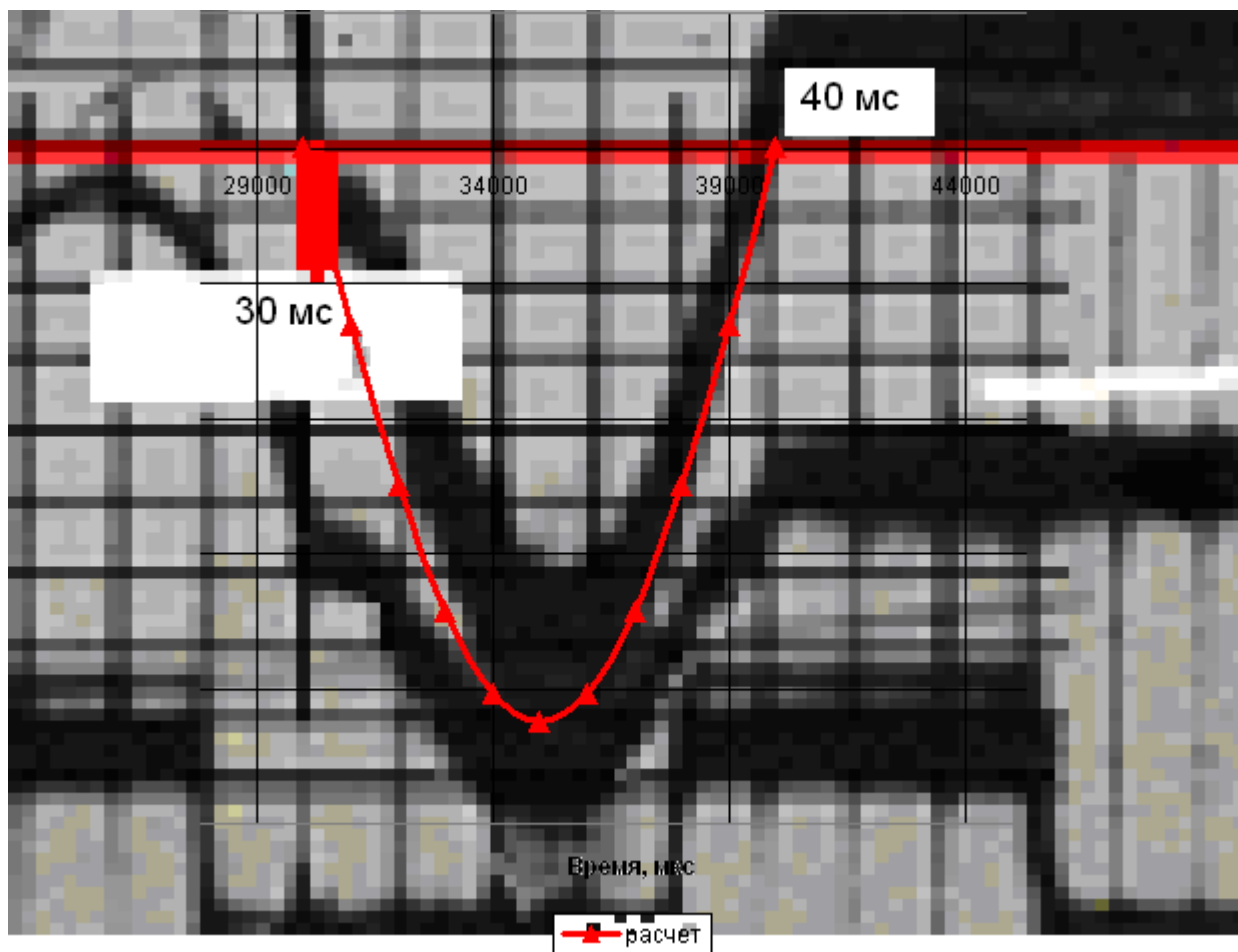


Рис.14. Наложение последней полуволны на фотографию в протоколе в масштабе

Так как процесс отключения тока 50 кА не входил в программу испытаний выключателя номинальным током отключения 40 кА, то осциллограмм такого отключения нет. В этом случае сопоставление результатов произвести не удастся. Приведем графические результаты обработки полученной выборки по данному процессу.

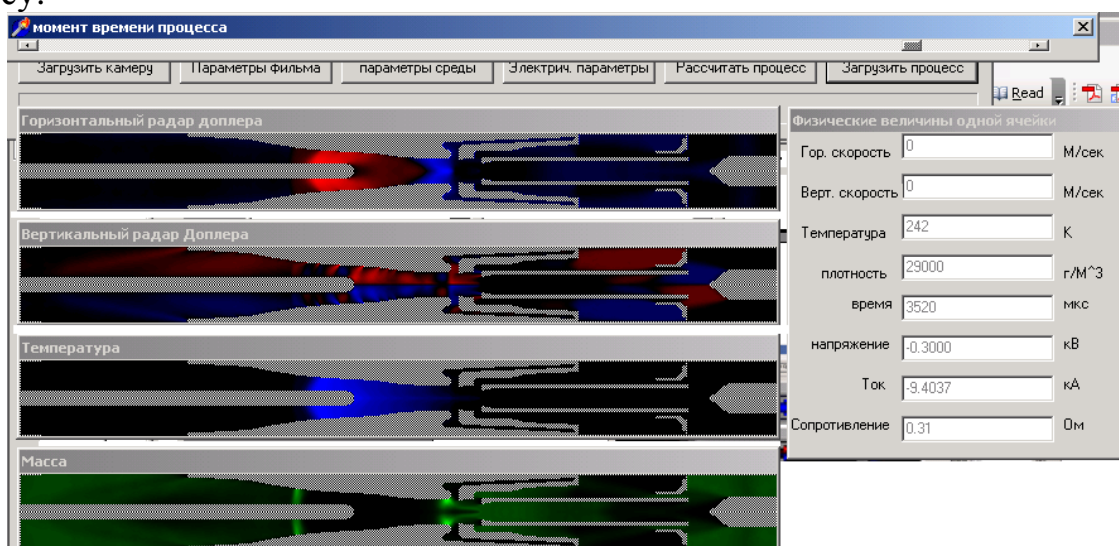


Рис. 15. Возникновение тока дуги после нуля тока

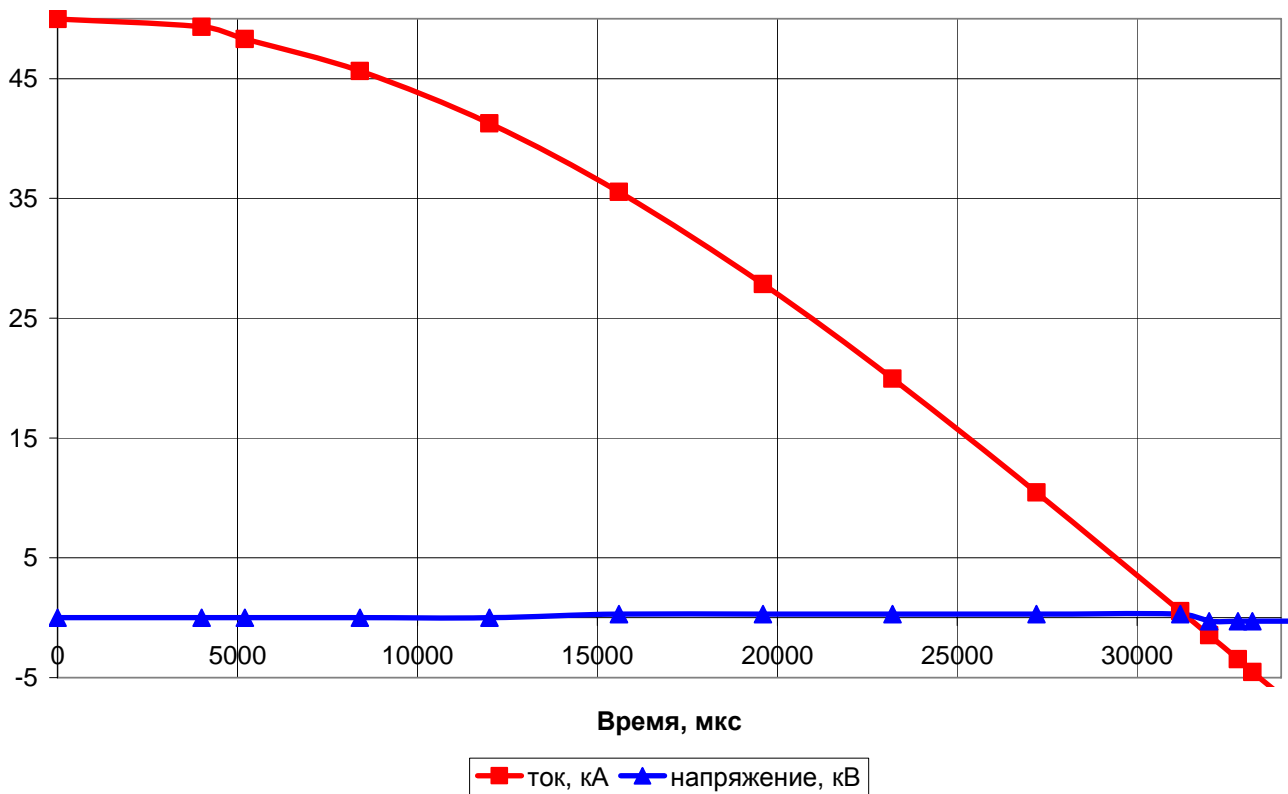


Рис. 16. Последняя полуволна отключаемого тока

Далее ставилась задача определить максимальную коммутационную способность по току отключения выключателя, имеющего такую же конструкцию дугогасительного устройства, а именно ВГТ-110. Методом последовательного приближения были выбраны значения токов отключения 60кА, 50кА, при которых расчеты показали не успешное гашение. Далее было принято значение 45кА, при котором было получено успешное отключение, однако, значение тока пост-дуго в этом случае составило -5 кА. При значениях тока отключения 47кА и 46кА было получено не успешное гашение. Результаты вычислений можно видеть в Таблице 1:

Таблица 1. Результаты вычислений отключения разных токов

Полное время отключения, мс	40,18	60,18	50,18	45,18	47,18	46,18
Принятое сопротивление критическое по алгоритму на рис. 3, мОм	18	18	18	18	18	18
Ток отключения, кА	40	60	50	45	47	46
Ток пост-дуго, кА	-2,76	Пробой	Пробой	-5,0	Пробой	Пробой
Результат: О – отключен, Н – не	О	Н	Н	О	Н	Н

отключен						
----------	--	--	--	--	--	--

Реальный выключатель ВГТ-110 сконструирован, испытан на максимальный ток отключения 40кА, учитывая коммутационный ресурс выключателя при отключении подобных токов, который составляет 20 циклов отключения, можно утверждать, что расчетные данные достаточно точные. Полученные результаты в виде интерактивной картины процесса коммутации для каждого случая показывают также хорошее соответствие по профилю температуры, если принять коэффициент рассеивания энергии дуги на излучение равным 80%, что хорошо согласуется с “Numerical Arc Model Parameter Extraction for SF₆ Circuit Breaker Simulations” Lionel R. Orama-Exclusa, Bienvenido Rodriguez-Medina, International Conference on Power Systems Transients – IPST 2003 in New Orleans, USA.

Далее исследовалось влияние геометрии дугогасительного устройства на процесс отключения полного тока короткого замыкания 40 кА. Для этого: был увеличен внутренней диаметр горловины сопла и выполнено прямолинейным расширение конфузора. Все остальные параметры были приняты как для стандартного дугогасительного сопла выключателя типа ВГТ-110.

Результатом было не успешное отключение номинального тока отключения.

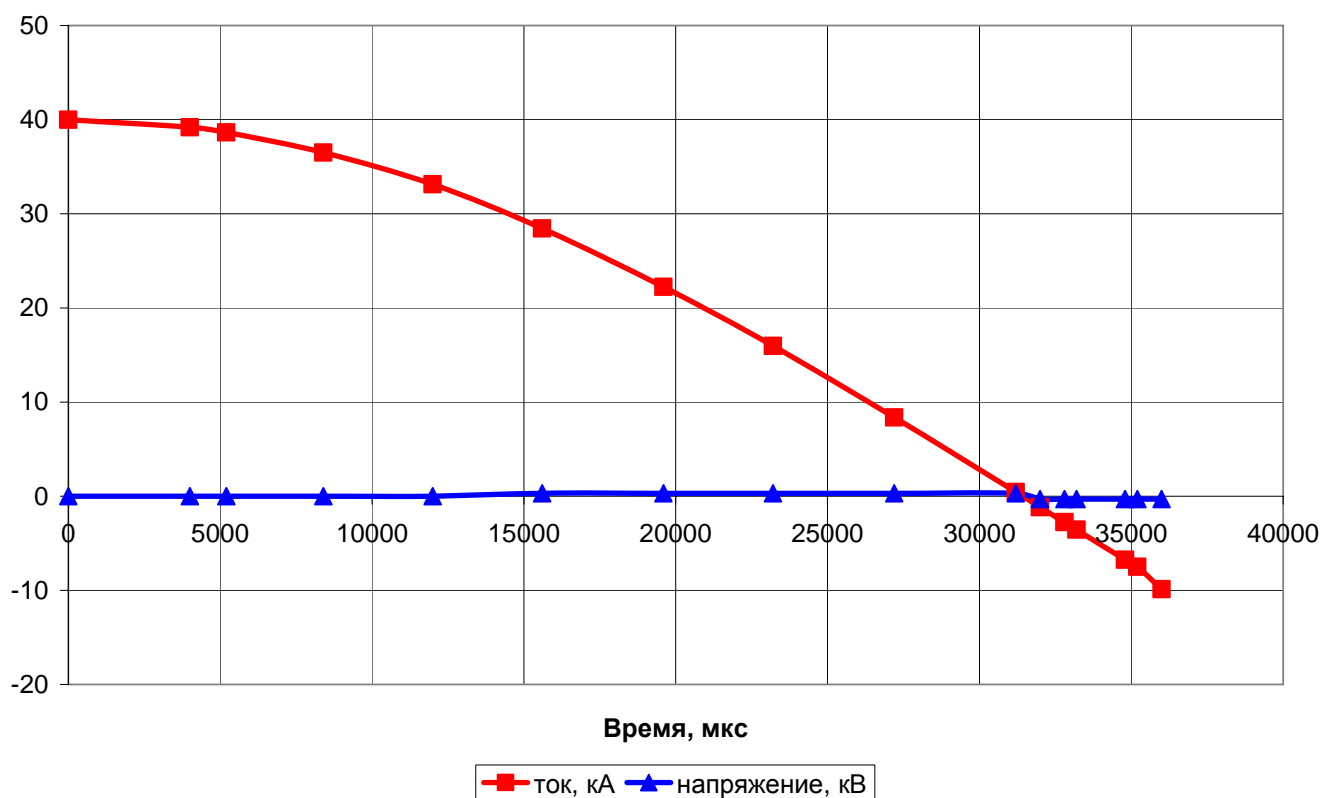


Рис. 17. Не успешное отключение тока 40 кА с применением измененного сопла

Для анализа было проведено сравнение температурных профилей дуги в момент времени 23600 мкс, когда охлаждение должно быть наиболее эффективным:

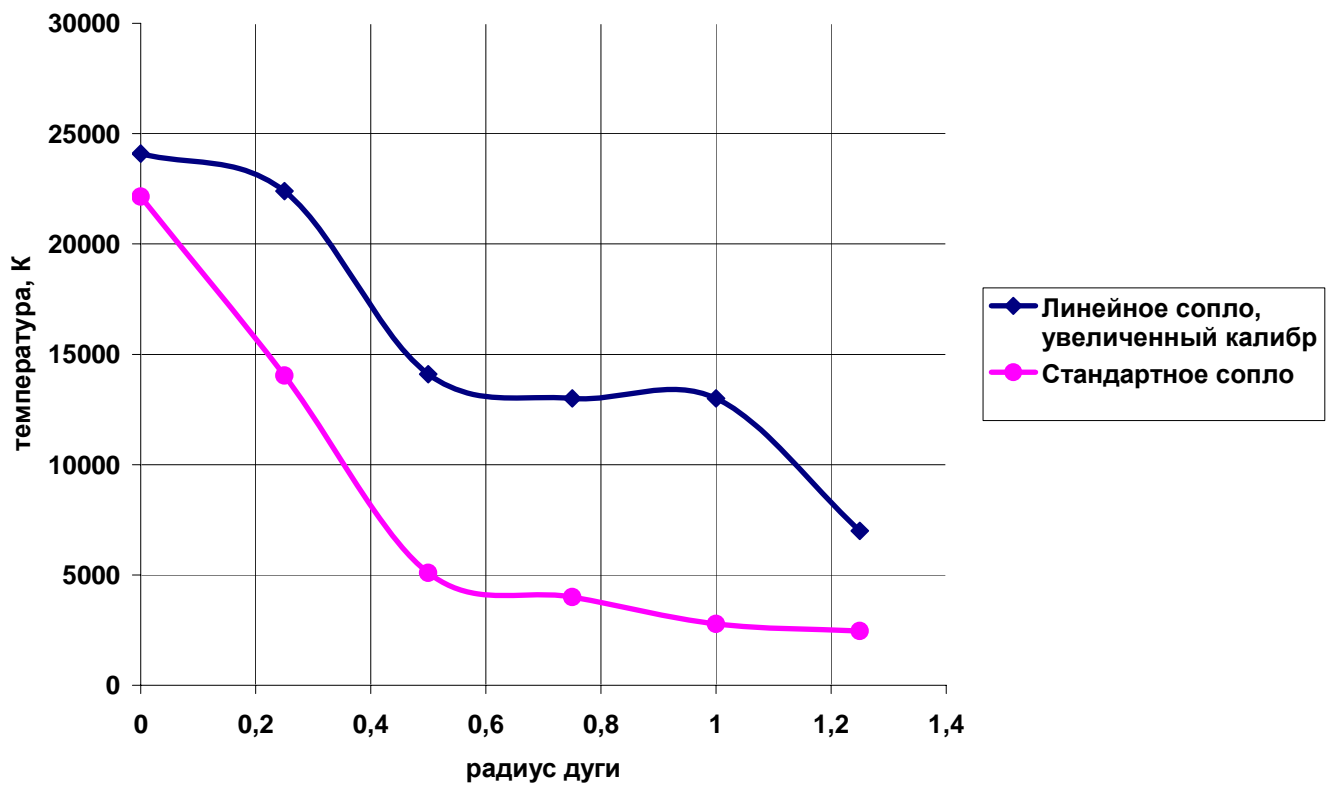


Рис. 18. Сравнение температурных профилей дуги
в момент времени 23600 мкс

Очевидно, что охлаждение стандартным соплом выключателя типа ВГТ-110 значительно эффективнее сопла с расширенным прямолинейным профилем.

Так же для данного опыта было проведено сравнение распределения температуры по длине дуги:

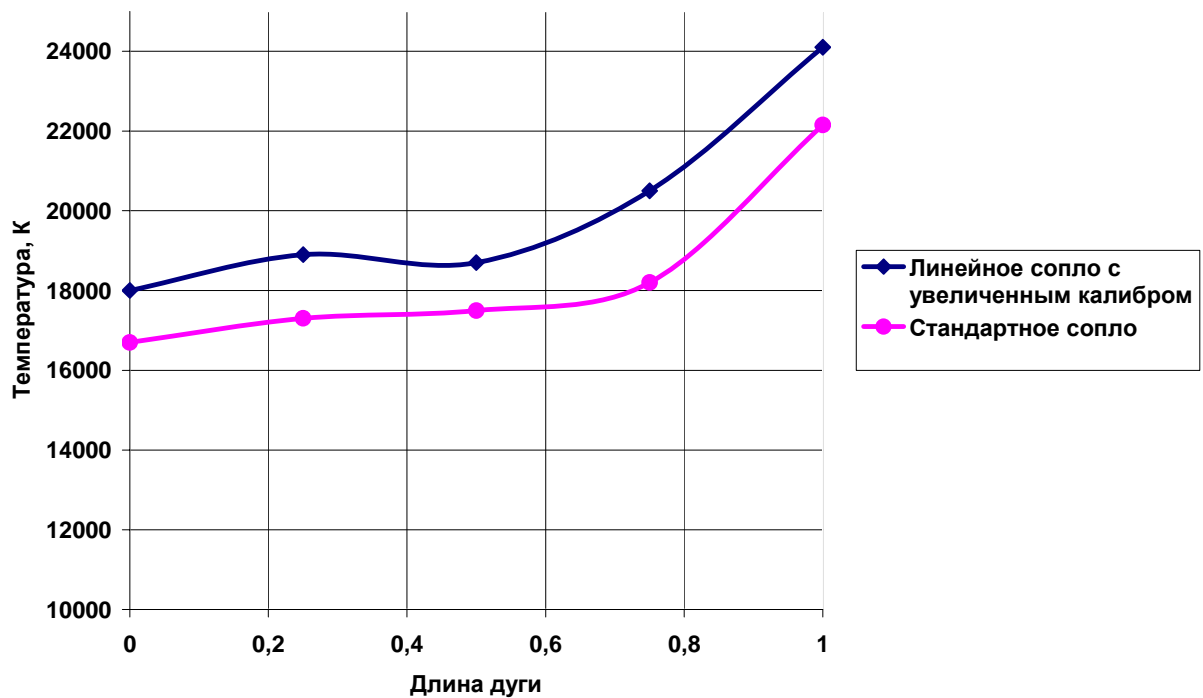


Рис. 19. Сравнение распределения температуры по длине дуги в момент
времени 23600 мкс

Из полученного графика видно, что температура распределяется по длине дуги не равномерно, что может быть объяснено эффектом конвективного массопереноса, прикатодным падением напряжения.

Так же для полученных расчетных значений процессов успешного гашения и теплового пробоя было проведено сравнение с результатами работы: Knobloch H., Habedank U. Arc resistance at current zero: a tool to describe the breaking capacity of SF6 circuit-breakers at short-line faults // Proc. Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering (ISH-99). 1999. (Conf. Publ. No. 467). vol. 3, pp. 205-208 | DOI: 10.1049/cp:19990735. Результат сравнения сопротивления в случае успешного гашения был наложен на графики Кноблока и Хабеданка, в случае сравнения значений сопротивления дуги в окрестности точки пересечения нуля током для случая успешного гашения дуги приведено на рис. 20. Сравнение результатов, рассчитанных с помощью программы, сопротивлений дуги в принулевой области для случаев успешного гашения и случаев термических пробоев с результатами, полученных Кноблоком и Хабеданком при расчетах коммутаций тока 40 кА реальными элегазовыми выключателями на класс напряжения 145 кВ приведено на рис. 21.

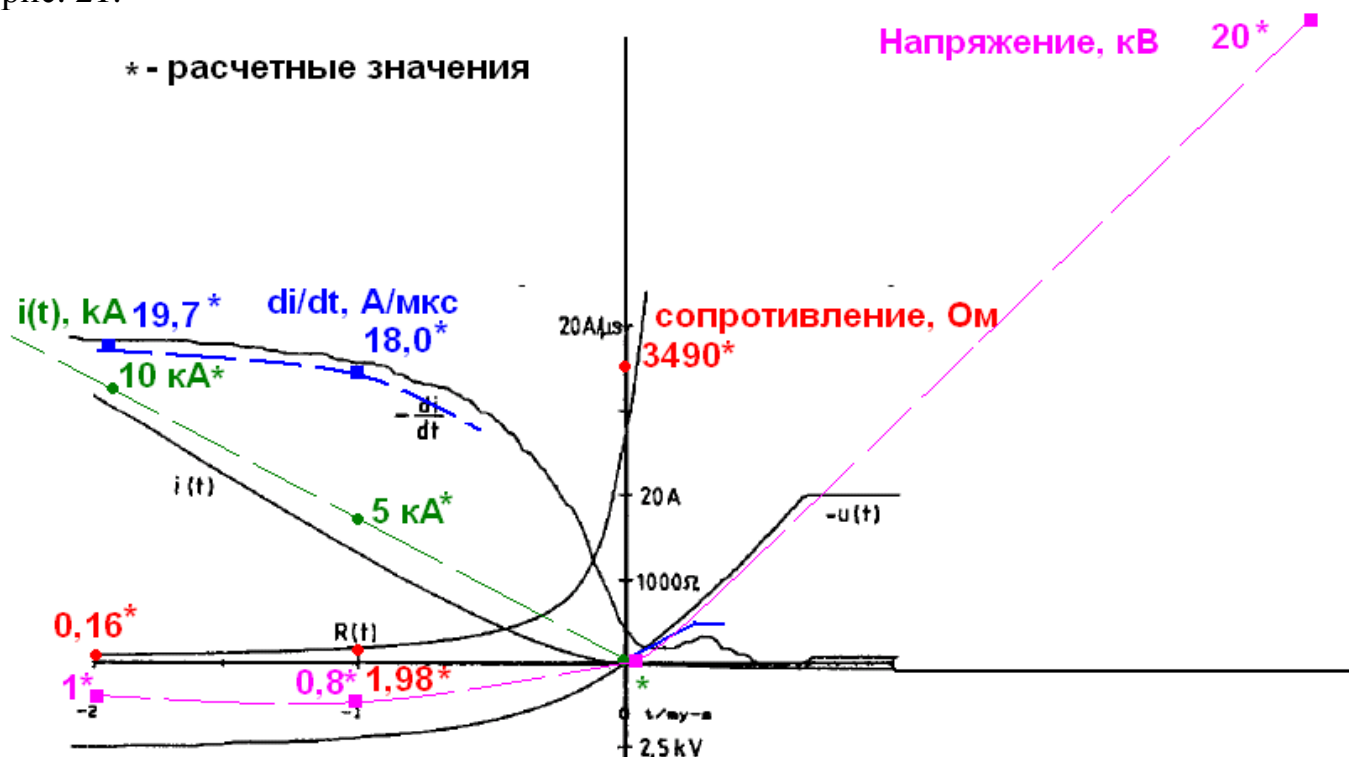


Рис. 20. Сравнение рассчитанного сопротивления дуги в принулевой области тока с результатами Кноблока и Хабеданка

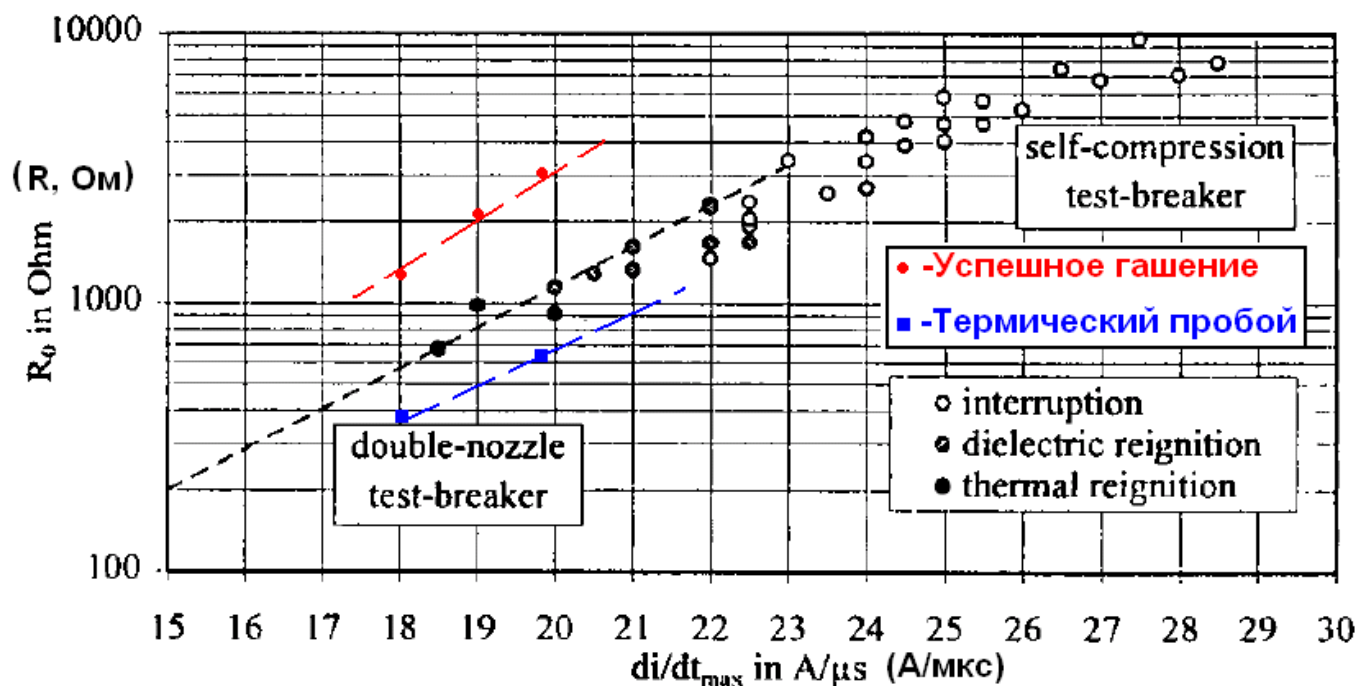


Рис. 21. Сравнение рассчитанного сопротивления дуги в принулевой области тока в случаях успешного и не успешного гашения с результатами Кноблока и Хабеданка

Очевидно, что для полученных расчетных значений сопротивлений дуги выполняется условие, предположенное Кноблоком и Хабеданком о том, что успешное гашение в подобных аппаратах возможно при наличии сопротивления дуги значением более 2000 Ом в приведенный момент времени.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертационной работе представлен новый подход к решению проблемы математического моделирования процессов гашения дуги в условиях обдуваемого потока элегаза, применительно к высоковольтным выключателям. При этом были получены следующие основные результаты:

1. Стало возможно визуально и качественно оценить эффективность охлаждения канала дуги потоком газа в дугогасительной камере заданной геометрии, построить температурный профиль дуги в любой точке в любой момент времени.
2. Разработан метод расширяющихся ячеек, позволяющий более реально смоделировать физический процесс тепло- и массообмена газа, имеющего разные физико-химические показатели в сетке дискретизации.
3. Получена математическая модель, позволяющая учитывать геометрию дугогасительных сопел без введения громоздких математических выражений геометрии.
4. Разработана программная оболочка, алгоритм и математическая реализация численного метода в программе, разработанной в среде Delphi 3.0 (Свидетельство об официальной регистрации программы ЭВМ № 2006612254 от 30 июня 2006 года).

5. Благодаря разработанной программе впервые реализован графический ввод характеристик дугогасящей среды, характеристики привода, кривой ПВН.
6. Разработанная программа облегчает процесс расчета и конструирования новых дугогасительных устройств высоковольтных выключателей, а так же обработку результатов экспериментов, тем самым, снижая количество необходимых экспериментов для создания стабильного испытательного объекта.
7. Внедрение разработанной программы в конструирование новых дугогасительных устройств на производстве приведет к сокращению затрат на испытания и потребление энергии на испытания.
8. Таким образом, разработанная программа позволяет спрогнозировать коммутационный процесс для дугогасительного устройства заданной геометрии и оценить эффективность самого гасителя. Для расчета других режимов гашения или другой геометрической конфигурации камеры необходимо делать перерасчет параметров, заводимых в программу. Учитывая большое количество вероятностных явлений в дуговых процессах, очевидно, что применение математического моделирования процессов дугогашения не исключает необходимость проведения экспериментальных исследований, однако данные разработки весьма облегчают работу исследователя, сокращая число экспериментов, помогая анализировать полученные результаты, корректируя вводимые данные и физическую модель.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. **Ильин А.С., Шипицын В.В.**, Актуальные проблемы дугогашения // Сборник докладов конференции, УПИ 2001, г. Екатеринбург.
2. **Ильин А.С., Шипицын В.В.** Преимущество выключателей бакового типа по сравнению с выключателями колонкового типа // Научные труды III отчетной конференции молодых ученых ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, Екатеринбург, 2002, С.381-382.
3. **Ильин А.С., Шипицын В.В.** Влияние геометрии и материала элементов ДК на процессы гашения дуги в высоковольтной аппаратуре // Сборник докладов международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии», «Х Бенардосовские чтения», г. Иваново, 2001, С.82-83.
4. **Ильин А.С., Шипицын В.В.** Различные влияния на характеристику дуговых процессов в дугогасительных камерах элегазовых выключателей // Научные труды I отчетной конференции молодых ученых ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, Екатеринбург, 2001, С.267-268.
5. **Ильин А.С., Шипицын В.В.** Влияние геометрии и материала элементов дугогасительной камеры на процессы гашения дуги в высоковольтной аппаратуре // Научные труды II отчетной конференции молодых ученых ГОУ ВПО УГТУ-УПИ,

Екатеринбург, 2002, С.411-412.

6. **Ильин А.С., Шипицын В.В.** Основные параметры для расчета газового потока при моделировании процессов дугогашения // Научные труды V отчетной конференции молодых ученых ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, Екатеринбург, 2004, С.441.

7. **Ильин А.С., Шипицын В.В.** Обобщенные вольтамперные характеристики дугового разряда, охлаждаемого продольным потоком газа и радиальной теплопроводностью // Научные труды VI отчетной конференции молодых ученых ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, Екатеринбург, 2005.

8. **Ильин А.С., Шипицын В.В.** Применение модели раздельного течения газов при моделировании процессов дугогашения // Научные труды VII отчетной конференции молодых ученых ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, Екатеринбург, 2005, С.71-74.

9. **Ильин А.С., Шипицын В.В., Ягов Д.А.** Моделирование газодинамических и термодинамических процессов при гашении дуги в элегазе // V-я научно-практическая конференция с международным участием «Проблемы и достижения в промышленной энергетике» Екатеринбург, 2005 г., С.171-174.

10. **Ильин А.С., Шипицын В.В.** Оценка лидерного канала в элегазе // Научные труды VIII отчетной конференции молодых ученых ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, Т1., 2005 г. С.216-217.

11. **Ильин А.С., Шипицын В.В.** Моделирование электрической дуги каналовой моделью применительно к моделированию процессов дугогашения в высоковольтной аппаратуре // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Энерго- и ресурсосбережение и нетрадиционные возобновляемые источники энергии», Екатеринбург, 2004.

12. **Ильин А.С., Шипицын В.В.** Применение теоремы подобия физических процессов в расчетах газодинамических процессов при гашении дуги в высоковольтной аппаратуре // Научные труды IX отчетной конференции молодых ученых ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, Т1., 2005, С.308-310.

13. **Ильин А.С., Шипицын В.В.** Определение скорости газового потока при расчетах процессов дугогашения в высоковольтной аппаратуре // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Энерго- и ресурсосбережение и нетрадиционные возобновляемые источники энергии», Екатеринбург, 2005, С.70-72.

14. **Ильин А.С., Шипицын В.В.** Турбулентность газового потока в дугогасительных устройствах высоковольтной аппаратуры // Материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий», Екатеринбург, 2006, С.302-305.

15. **Ильин А.С., Шипицын В.В.** Основные критериальные уравнения, используемые при расчетах газодинамических процессов дугогашения // Сборник докладов по материалам VIII научно-практической конференции с международным участием «Энергосберегающие техника и технологии», Екатеринбург, 2005, С.96-98.

16. **Ильин А.С.** Численное моделирование процессов гашения дуги в высоковольтном выключателе / Электротехника, №12, Москва, 2011, С 36-42.

17. **Ильин А.С.** Численное моделирование процессов гашения дуги в элегазовом выключателе высокого напряжения и сравнение результатов с реальными испытаниями // Научно-технический вестник Поволжья, №5, Казань, 2011, С.140-146.

18. Ильин А.С. Применение численного моделирования при расчетах процессов дугогашения в газовой среде в выключателях высокого напряжения // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность, №1 Москва, 2012.
19. «Программа моделирования термогазодинамических процессов гашения дуги в дугогасительной камере заданной геометрии, применительно к высоковольтной аппаратуре (Программа моделирования процессов дугогашения)», Свидетельство об официальной регистрации программы ЭВМ № 2006612254 от 30 июня 2006 года.
20. Ильин А.С., Шипицын В.В., Ягов Д.А. Моделирование газодинамических и термодинамических процессов при расчетах дугогасительного устройства в высоковольтных выключателях // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Энерго- и ресурсосбережение и нетрадиционные возобновляемые источники энергии», Екатеринбург, 2004, С.139-141.
21. Ильин А.С. Определение максимальной коммутационной способности элегазового выключателя высокого напряжения с помощью численного моделирования процессов дугогашения // Энергетика: Эффективность, надежность, безопасность: материалы XVII Всероссийской научно-технической конференции, ТПУ, Томск, 2011, С. 31-33.