

На правах рукописи

ПАШИН ИГОРЬ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ

**УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА
ПОЛЯ И ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ В ЗАДАЧАХ
ИМПУЛЬСНОЙ СТРИМЕРНОЙ КОРОНЫ**

Специальность 05 14 12 – Техника высоких напряжений

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



МОСКВА – 2007

Работа выполнена на кафедре Техники и электрофизики высоких напряжений
Московского энергетического института (технического университета)

- Научный руководитель:** — кандидат технических наук, доцент
Белогловский Андрей Анатольевич
- Официальные оппоненты:** — доктор физико-математических наук, профессор
Синкевич Олег Арсеньевич
- кандидат технических наук
Пашин Михаил Михайлович
- Ведущая организация:** — НТЦ Электроэнергетики

Защита диссертации состоится «22» июня 2007 года в 16 ч 30 мин
в аудитории F-200 на заседании диссертационного совета Д 212 157 03 Московского
энергетического института (технического университета) по адресу г Москва,
ул Красноказарменная, д 17

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим
присылать по адресу 111250, Москва, ул Красноказарменная, д 14, Ученый совет
МЭИ (ТУ)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МЭИ (ТУ)

Автореферат разослан «21» мая 2007 г

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 212 157 03
кандидат технических наук, доцент



Бердник Е Г

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы определяется тем, что импульсная стримерная корона сопровождает многие процессы, протекающие в устройствах высокого напряжения при импульсных воздействиях. Она играет важнейшую роль в развитии лидерного разряда, в том числе лидера молнии. Одним из элементов теоретической базы, на которой основывается анализ подобных процессов, является математическая модель импульсной стримерной короны.

Развитие импульсной стримерной короны в высоковольтных электротехнологических установках протекает в воздухе в условиях, имеющих ряд особенностей. Коронирующие электроды имеют форму протяженных проводников (проводов) или игл с малым радиусом кривизны поверхности, высокие значения градиента напряженности электрического поля вблизи коронирующих электродов, высокие значения напряженности поля у их поверхности (около 100 кВ/см и более) и средней напряженности в разрядном промежутке (5 кВ/см и более), длительности фронта и импульса питающего высокого напряжения измеряются десятками или сотнями наносекунд. В подобных условиях стримеры интенсивно ветвятся, следствием чего является сложная трехмерная структура распределения электрических зарядов и напряженности поля в межэлектродном пространстве. Их экспериментальное исследование является сложной и дорогостоящей, а на современном уровне техники, зачастую, трудноразрешимой или неразрешимой проблемой. Это определяет актуальность совершенствования методов расчета распределений поля и заряженных частиц в задачах импульсной стримерной короны.

Распределения заряженных частиц в стримерах имеют следующую особенность: в головке стримера для них характерны высокие градиенты концентрации, а в канале она слабо изменяется. Это определяет требования к методам решения уравнений, описывающим распределение концентрации заряженных частиц в стримерах: в описанных условиях они должны быть устойчивыми, монотонными и обладать минимальной численной диффузией (т.е. адекватно отражать фактическое распределение концентрации в областях с большими градиентами последней). Кроме того должна обеспечиваться устойчивость процесса совместного расчета распределений концентраций заряженных частиц и напряженности поля.

Применяемые численные методы должны быть экономичными, т.к. расчет совместного распространения множества стримеров является очень ресурсоемкой вычислительной процедурой (т.е. требует от реализующего компьютера высокого быстродействия и большого объема памяти). Поэтому сокращение времени расчета является актуальной задачей, решение которой обеспечивает практическую применимость разработанных методов.

Целью данной работы является совершенствование методов расчета электрического поля и движения частиц для использования в комплексной математической модели положительной импульсной стримерной короны, что делает возможным ее реализацию в различных системах электродов, в том числе протяженных.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

1. Учитывая сложную трехмерную структуру электрического поля от индуцированных поверхностных зарядов электродов и объемных зарядов стримеров, необходимо разработать экономичную численную методику расчета трехмерного элект-

трического поля с целью сокращения времени расчета на ЭВМ при обеспечении необходимой точности

2 В математической модели отдельного стримера необходимо произвести обоснование выбора метода расчета динамики заряженных частиц, обладающего высокой точностью и быстродействием, и обеспечивающего устойчивость итерационного процесса совместного решения уравнений, описывающих движение заряженных частиц и распределение электрического поля, непосредственно при моделировании распространения стримеров

3 Поскольку совершенствование методов расчета поля и движения частиц осуществляется для использования в комплексной математической модели положительной импульсной стримерной короны, для проверки их работоспособности, отладки и проверки корректности необходимо программно реализовать комплексную модель короны в системах электродов с коронирующей иглой и с протяженным коронирующим электродом. Принимая во внимание крайнюю затруднительность расчета при современном уровне развития ЭВМ параметров стримерной короны в протяженных коаксиальных системах электродов вследствие ее сложной пространственной структуры, необходимо разработать методику сведения такой структуры к упрощенным регулярным расчетным схемам

4 Посредством реализованной комплексной модели стримерной короны необходимо провести серию расчетов для сопоставления полученных на их основе результатов с доступными в литературе экспериментальными данными с целью проверки корректности усовершенствованных методов

Методы исследования включают в себя анализ феноменологии положительной импульсной стримерной короны, разработку и совершенствование методов расчета ее развития, создание комплекса вычислительных алгоритмов и проблемно-ориентированного программного обеспечения, проведение численных исследований распространения стримерной короны, оценку достоверности их результатов на основе сопоставления с экспериментальными данными. Для решения поставленных задач использовались новейшие достижения и базовые положения теории газового разряда, математическое моделирование на ЭВМ известные и новые численные методы, результаты экспериментальных исследований, полученные другими авторами

Научная новизна работы состоит в следующем

1 В рамках метода эквивалентных зарядов для расчета трехмерных электрических полей с объемным зарядом, широко используемого в задачах в области техники высоких напряжений, предложена новая методика оптимального размещения эквивалентных зарядов в виде множества точечных зарядов, сгруппированных в протяженные цепочки, замещаемые затем эквивалентными сосредоточенными зарядами

2 Разработан соответствующий предложенной методике экономичный алгоритм расчета суммарного поля всей совокупности зарядов

3 Показано, что при моделировании распространения стримера конечно-объемный численный метод Ван-Лира «среднее гармоническое» второго порядка точности обеспечивает наиболее высокую точность и устойчивость итерационного

процесса совместного решения уравнений, описывающих динамику заряженных частиц и распределение электрического поля

4 Разработана методика сведения сложной пространственной структуры стримерной короны в протяженных коаксиальных системах электродов к упрощенным регулярным расчетным схемам, позволяющим рассчитывать процессы формирования импульсной стримерной короны

Практическая значимость заключается в следующем.

1. Разработан пакет прикладных программ для расчета параметров стримерной короны в характерных для высоковольтных устройств системах электродов

2 Разработанная методика была использована для расчета стримерной зоны положительного лидера при решении задач оценки электрической прочности длинных воздушных промежутков, выполненных в рамках НИР «Разработка физически обоснованной модели лидера для расчета и анализа электрической прочности и молниезащиты энергетических объектов» с РАО «ЕЭС России»

На защиту выносятся:

1 Оригинальная методика расчета трехмерных электрических полей с объемным зарядом, разработанная в рамках широко используемого в задачах в области техники высоких напряжений метода эквивалентных зарядов, и включающая в себя следующие компоненты новую методику оптимального размещения эквивалентных зарядов в виде множества точечных зарядов, сгруппированных в протяженные цепочки, замещаемые затем эквивалентными сосредоточенными зарядами, соответствующий предложенной методике экономичный алгоритм расчета суммарного поля всей совокупности зарядов

2 Результаты анализа точности и устойчивости конечно-разностных схем в итерационном процессе совместного решения уравнений, описывающих динамику заряженных частиц и распределение электрического поля, показавшие, что при моделировании распространения стримера конечно-объемный численный метод Ван-Лири «среднее гармоническое» второго порядка точности обеспечивает наиболее высокую точность и устойчивость

3 Методика сведения сложной пространственной структуры стримерной короны в протяженных коаксиальных системах электродов к упрощенным регулярным расчетным схемам, позволяющим рассчитывать процессы формирования импульсной стримерной короны

4 Пространственно-временные, полевые и токовые характеристики стримерной короны и особенности ее структуры в процессе развития в системах электродов с коронирующей иглой и проводом

Апробация работы:

Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (Иваново, 2005 г), на Восьмой, девятой, десятой, одиннадцатой, двенадцатой и тринадцатой Международных научно-технических конференциях «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, 2002-2007 г г), на Международной научно-технической конференции, посвященной 80-летию гражданской авиации России «Гражданская авиация на современном этапе развития нау-

ки, техники и общества» (Москва, 2003 г.), на научном семинаре и заседании кафедры ТЭВН МЭИ (ТУ)

Публикации По материалам диссертации опубликовано 5 статей в периодических изданиях, 13 тезисов докладов

Структура и объем диссертации диссертация общим объемом 227 страниц, состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы (144 наименования) Содержит 149 страниц основного текста, 93 рисунка, 6 таблиц

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования

Проведенный в первой главе обзор работ, посвященных теоретическим и экспериментальным исследованиям импульсного стримерного разряда, показал следующее Математическая модель стримерного разряда базируется на гидродинамическом описании процессов, в рамках которого накопление и движение заряженных частиц описывается уравнениями неразрывности потока частиц, а распределение электрического поля – уравнением Пуассона К настоящему времени разработаны и обоснованы основные элементы комплексной математической модели стримерной короны модель накопления начальных электронов, инициирующих старт первичных стримеров, модель ветвления стримеров, модель совместного распространения первичных стримеров и ветвей в разрядном промежутке «игла-плоскость» В то же время, недостаточное быстродействие известных методов расчета трехмерного электрического поля с объемным зарядом, а также неоднозначность выбора точного и устойчивого при моделировании стримерного разряда метода расчета движения и накопления заряженных частиц не позволяет за приемлемое время производить расчет характеристик короны, состоящей из десятков стримеров и их ветвей, и имеющей трехмерную несимметричную структуру в пространстве, особенно в протяженных системах электродов

Обзор численных методов, применяемых при математическом моделировании стримерной короны, показал, что в качестве метода расчета трехмерного поля с объемным зарядом в межэлектродном пространстве целесообразно использовать метод эквивалентных зарядов (МЭЗ) как обладающий наилучшим сочетанием простоты построения алгоритмов на его основе, точности, быстродействия, требований к объему оперативной памяти компьютера и предоставляющий возможности для дальнейшего его совершенствования с целью ускорения расчета Суть МЭЗ заключается в замещении реального непрерывного распределения заряда по поверхности электродов системой сосредоточенных эквивалентных зарядов (ЭЗ), расположенных внутри электродов Значения ЭЗ определяются из условий эквипотенциальности поверхности электродов Объемный заряд, распределенный в пространстве, также замещается сосредоточенными ЭЗ, поле которых влияет на распределение зарядов электродов и учитывается при записи граничных условий

Из множества методов расчета движения заряженных частиц в настоящее время широкое применение нашли явная схема, метод потоковой коррекции и конечно-объемные методы Имеющиеся данные показывают, что явная схема обладает большой численной диффузией, а применение метода потоковой коррекции может

приводить к образованию ступенек на экспоненциальных профилях концентрации частиц, характерных для фронта ионизации в стримере, что приводит к нарушению устойчивости расчета. Кроме того, имеются указания на существенную зависимость параметров рассчитываемого стримера от выбранного метода расчета движения частиц. Существующие работы не позволяют однозначно определить метод, наиболее подходящий для моделирования стримерного разряда с точки зрения точности, устойчивости и экономичности.

Для возможности сопоставления расчетных и экспериментальных данных проанализированы результаты экспериментальных исследований стримерного разряда в воздухе. Определены характерные для высоковольтных электротехнологических установок диапазоны параметров стримера и стримерной короны.

На основании проведенного обзора уточнены задачи настоящего исследования.

Вторая глава посвящена программной реализации комплексной математической модели стримерной короны в системах электродов с коронирующей иглой и протяженных системах, необходимой для проверки работоспособности и достоверности усовершенствованных методов расчета поля и движения частиц.

Математическое описание стримерного разряда основывается на гидродинамической модели движения заряженных частиц. Она включает в себя уравнения неразрывности потока заряженных частиц (1)-(3), описывающие их баланс, и уравнение Пуассона для расчета распределения потенциала поля (4)

$$\partial N_+ / \partial t + \operatorname{div}(N_+ \bar{V}_+) = \alpha N_e |\bar{V}_e| - \beta_{e+} N_e N_+ - \beta_{\pm} N_+ N_- + S_{ph}, \quad (1)$$

$$\partial N_e / \partial t - \operatorname{div}(N_e \bar{V}_e) = (\alpha - \eta) N_e |\bar{V}_e| + \alpha_p N_- |\bar{V}_-| - \beta_{e+} N_e N_+ + S_{ph}, \quad (2)$$

$$\partial N_- / \partial t - \operatorname{div}(N_- \bar{V}_-) = \eta N_e |\bar{V}_e| - \alpha_p N_- |\bar{V}_-| - \beta_{\pm} N_+ N_-, \quad (3)$$

$$\Delta \varphi = -e N_s / \epsilon_0, \quad (4)$$

$$\bar{E} = -\operatorname{grad}(\varphi), \quad (5)$$

где (5) представляет собой известное уравнение связи между вектором напряженности электрического поля \bar{E} и его потенциалом φ . Здесь N_+ – концентрация положительных ионов, N_e – концентрация электронов, N_- – концентрация отрицательных ионов, \bar{V}_+ , \bar{V}_e , \bar{V}_- – их скорость, $N_s = N_+ - N_e - N_-$ – избыточная концентрация положительных заряженных частиц, $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная. Правые части уравнений определяют число частиц (положительных ионов, электронов и отрицательных ионов соответственно), появившихся в единице объема в единицу времени благодаря процессам ударной ионизации (коэффициент α), прилипания электронов (коэффициент η), развала отрицательных ионов (α_p), ионно-ионной (β_{\pm}) и электронно-ионной (β_{e+}) рекомбинации, фотоионизации (S_{ph}). Концентрации частиц, потенциал и напряженность поля являются функциями времени t и пространственных координат.

В уравнениях (1)-(3) зависимости обобщенных коэффициентов элементарных процессов и скорости дрейфа электронов и ионов от напряженности поля, а также интенсивность фотоионизации S_{ph} определяются в соответствии с рекомендациями, данными в литературе.

Система уравнений (1)-(5) дополняется начальными и граничными условиями для концентраций частиц, отражающими физические представления об условиях

развития стримера, которые закладываются в модель, а также граничными условиями для потенциала на электродах. Начальные условия для значений N_+ , N_e и N_- соответствуют тому, что до приложения напряжения $U(t)$ в межэлектродном промежутке присутствуют лишь положительные и отрицательные ионы с концентрацией $N_{0+}=N_{0-}$. Граничные условия для N_+ , N_e , N_- соответствуют предположению о том, что непосредственно на поверхностях электродов отсутствуют источники заряженных частиц, а электрическое поле обеспечивает полный унос положительных ионов от поверхности анода и электронов и отрицательных ионов – от катода. Граничные условия для φ соответствуют тому, что при $t \geq 0$ потенциал анода равен $U(t)$, а потенциал катода равен нулю.

Принятая в работе комплексная модель стримерной короны основана на следующих положениях

1 Формирование стримерной короны начинается с появления вблизи коронирующего электрода начальных электронов, возникающих из-за развала отрицательных ионов в сильном электрическом поле

2 Из начальных электронов возникают лавины и далее стримеры, которые развиваются в суммарном электрическом поле, созданном объемными зарядами стримеров и поверхностными зарядами электродов

3 На определенном этапе развития стримеров происходит их ветвление. Оно инициируется малой случайной неоднородностью в распределении электронов в зоне ионизации перед головкой стримера. Эта неоднородность в процессе ионизационного развития в сильном поле головки накапливает заряд, который создает превышение поля над средним уровнем напряженности в головке стримера. Такое локальное усиление поля дает начало формированию новой ветви

4 Развитие этого коллектива стримеров и ветвей ограничивается уменьшением напряженности суммарного поля на фронте короны до уровня ниже необходимого для поддержания интенсивной ударной ионизации или по достижении противоположного электрода

Математическая модель отдельного стримера, ориентированная на применение в модели стримерной короны, основана на квазидвумерной модели стримера с фиксированным радиусом. В ней предполагается, что параметры стримера (напряженность электрического поля, концентрации заряженных частиц) в его поперечном сечении остаются постоянными, а их изменение происходит только в направлении распространения стримера. Расчет поля в канале стримера в рамках его модели осуществляется методом дисков, являющимся частным случаем МЭЗ.

При расчете развития стримерной короны в системах электродов с протяженным коронирующим электродом – проводом (далее такие системы называются протяженными) – необходим расчет электрического поля от объемного заряда стримеров и зарядов электродов, распределенных по всей длине системы, что в отсутствие упрощающих методик приводит к неприемлемым требованиям не только к быстродействию, но и к объему оперативной памяти реализующего компьютера.

Стримерная корона обладает случайной нерегулярной структурой, в том числе и в протяженных системах. Однако в системах, в которых расстояние между коронирующим проводом и заземленным электродом неизменно (например, «провод-плоскость», «коаксиальные цилиндры» и т.д.), характерных для электротехнологиче-

ских установок), старт стримеров происходит почти одновременно, расстояния вдоль провода между соседними стримерами варьируются в узких пределах, и параметры развивающихся стримеров близки. Это дает возможность заменить случайную трехмерную структуру стримерной короны в ее модели упорядоченной регулярной структурой, что позволяет моделировать развитие ограниченного числа уникальных стримеров, полагая остальные стримеры им подобными. Это обеспечивает существенное сокращение времени, требуемого для численного моделирования развития стримерной короны в протяженных системах.

В качестве примера на рис. 1 приведена система «коаксиальные цилиндры», в которой от коронирующего провода в различных направлениях распространяются стримеры короны. В принятой модели предполагается, что равномерное заполнение разрядного промежутка стримерами происходит в двух случаях расположения стримеров (рис. 1, а, б). Такое предположение позволяет анализировать распространение единственного уникального стримера (рис. 1, стример 1), учитывая влияние остальных стримеров (рис. 1, стримеры 2, 3, 4 и т.д.) только через их поле, рассчитываемое методом суперпозиции.

В системах электродов с коронирующей иглой и протяженных системах реализована комплексная математическая модель импульсной стримерной короны, основанная на указанных выше положениях и включающая в себя описание накопления эффективных начальных электронов, инициирующих появление стримеров, формирование и распространение последних вблизи коронирующего электрода, их многократное ветвление, совместное развитие стримеров и ветвей в суммарном электрическом поле, созданном зарядами электродов и стримерной короны. Модель позволяет рассчитывать параметры короны с учетом ее структуры.

На языке программирования C++ разработана соответствующая программа расчета импульсной стримерной короны в системах электродов «игла-плоскость», «стержень на плоскости во внешнем поле», «провод-плоскость», «коаксиальные цилиндры», в которой используются универсальные модули, как для расчета трехмерного поля, так и для расчета параметров стримеров и их ветвей.

Для проверки допустимости использования в модели короны квазидвумерной модели отдельного стримера был проведен анализ влияния радиуса стримера R_s на его расчетные параметры. Исследование проводилось для следующего из литературы диапазона значений $R_s=0,015-0,025$ см, характерного для нормальных атмосферных условий и коротких воздушных промежутков (до ~ 5 см) со средней напряженностью поля в разрядном промежутке до 7 кВ/см. Было установлено, что вариации значений R_s в указанном диапазоне не искажают основные закономерности распространения стримера и не приводят к неприемлемым погрешностям в амплитудных значениях его параметров: увеличение R_s в 1,67 раза приводит к уменьшению амплитуды скорости стримера не более чем на 15% и увеличению амплитуды разрядного тока менее 30% при длительности фронта импульса напряжения 50 нс и выше. Это подтверждает допустимость использования квазидвумерной модели стримера при моделировании развития импульсной стримерной короны и позволяет использовать в указанных условиях среднее значение $R_s=0,02$ см.

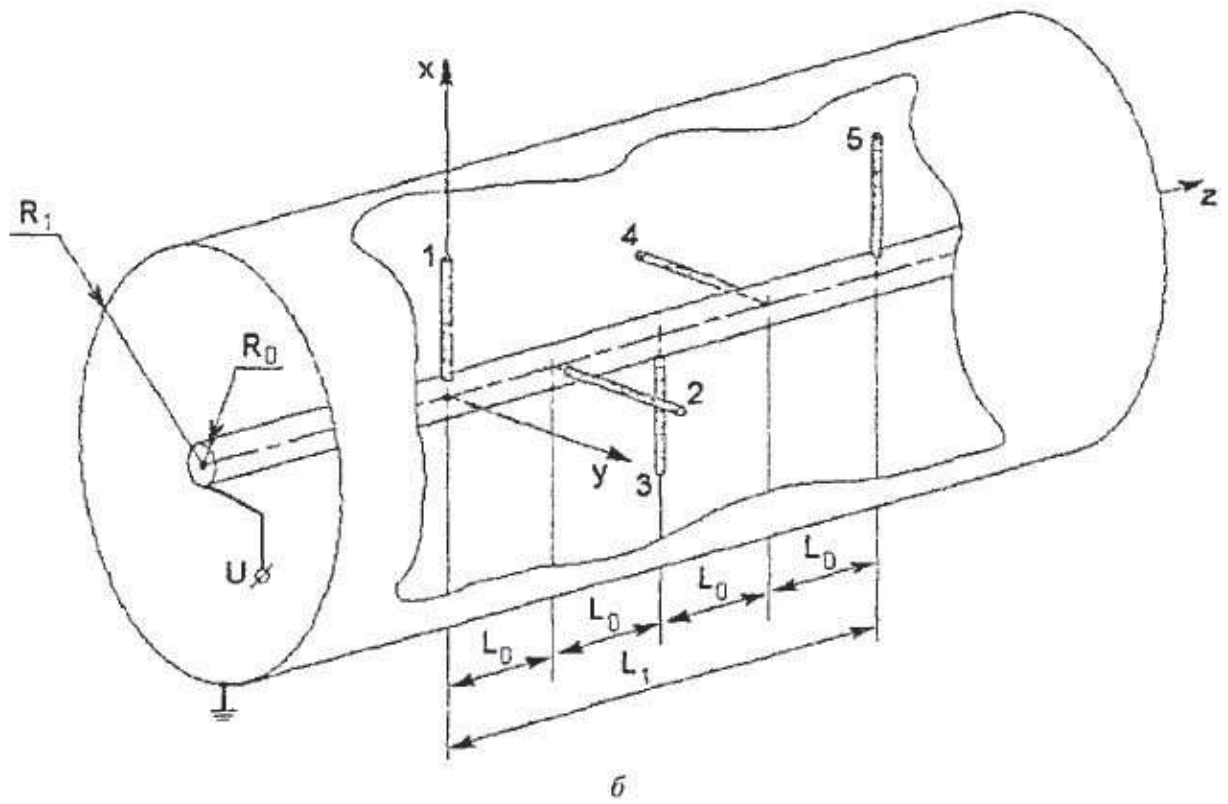
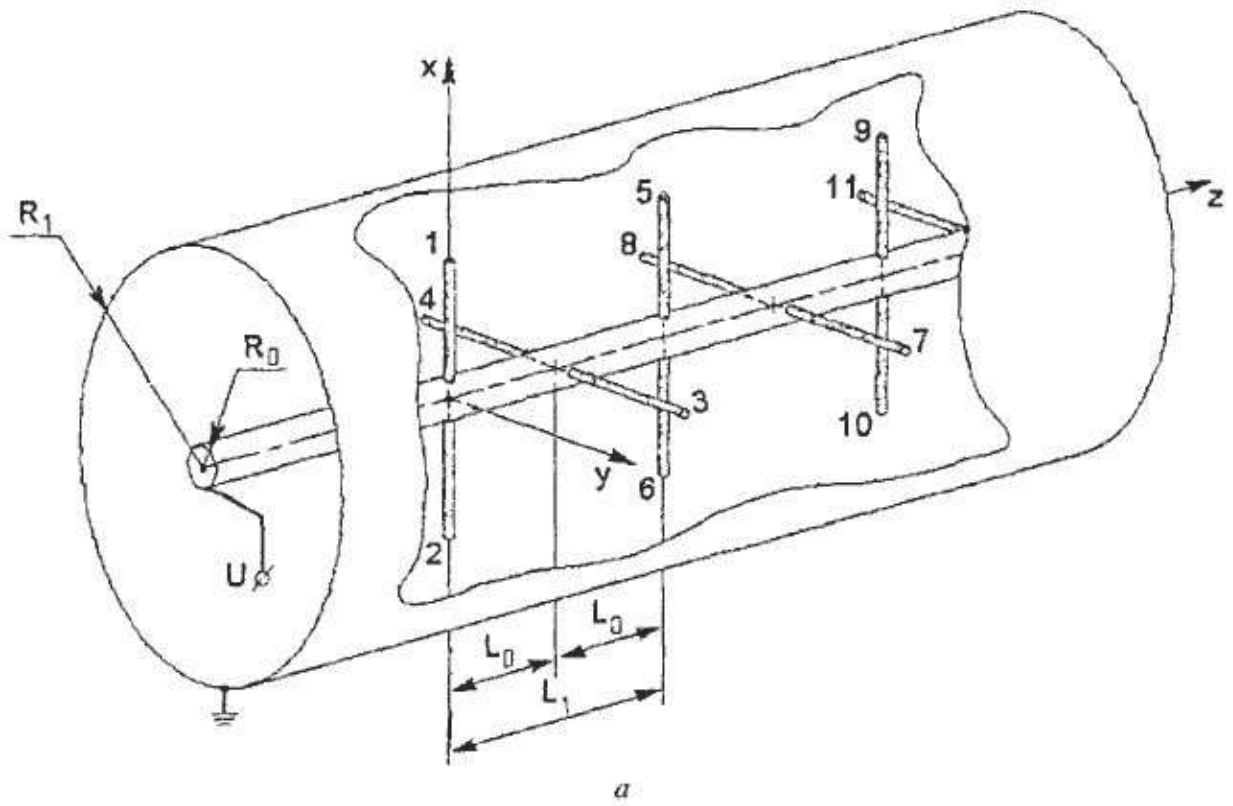


Рис 1. Модель стримерной короны в системе электродов «коаксиальные цилиндры»
a – случай расположения стримеров «полярно крест-накрест», *b* – случай расположения стримеров «подиночке спиралеобразно»

Опыт применения разработанной программы расчета развития стримерной короны в системах электродов с коронирующей иглой показал, что на современных персональных компьютерах время моделирования может составлять тысячи часов, причем в итерационном процессе совместного решения уравнений (1)–(5) большая часть времени (около 90%) затрачивается на расчет поля в межэлектродном пространстве. Для протяженных систем это время увеличивается еще в несколько раз. Это определило необходимость разработки упрощенной методики расчета трехмерного поля с объемным зарядом.

В третьей главе решается задача разработки экономичной методики расчета трехмерного электрического поля с объемным зарядом и упрощенной методики расчета поля протяженных систем, имеющих регулярную структуру.

Для расчета полей, имеющих регулярную структуру, автором предложена экономичная методика, базирующаяся на МЭЗ: все заряды системы заменяются точечными эквивалентными зарядами, в регулярной структуре выделяется минимальный характерный элемент, повторением которого заданное число раз образуется целостная система (рис. 1, элемент длиной L_1), расчет зарядов по МЭЗ производится только в центральном элементе системы, заряды других элементов полагаются равными соответствующим зарядам центрального, поле системы рассчитывается методом суперпозиции как суммарное поле всех элементов. Такой способ позволяет не только экономично рассчитывать в протяженных системах развитие стримерной короны, содержащей десятки стримеров и их ветвей, но также осуществлять экономичный расчет поля любых трехмерных регулярных структур.

Выработаны рекомендации по расстановке эквивалентных зарядов в протяженных системах, обеспечивающие погрешности расчета не более 1–3% в значениях напряженности поля. Установлено, что такие параметры, как общая расчетная длина системы L_{sys} и расстояние между зарядами вдоль системы электродов $\Delta L_{\text{сст}}$ влияют на общий уровень погрешностей в межэлектродном промежутке и мало влияют на уровень погрешностей вблизи электродов. Следует выбирать L_{sys} более четырех длин разрядного промежутка $L_{\text{рп}}$ для обеспечения погрешностей расчета менее 3%, и $L_{\text{sys}} > 6L_{\text{рп}}$ для погрешностей менее 1% в значениях напряженности поля в середине системы. Отношение расстояния между точечными зарядами в поперечном сечении протяженного электрода ΔL к его радиусу R и отношение глубины залегания точечных зарядов в электроде H к ΔL определяют погрешности расчета поля лишь вблизи рассматриваемого электрода. Рекомендуется принимать соответствующие значения $\Delta L/R = 0,1–0,2$ и $H/\Delta L \approx 2$. Значение параметра $\Delta L_{\text{сст}}$ предлагается выбирать близким к ΔL соответствующего электрода.

С целью ускорения расчета трехмерных электрических полей разработана экономичная методика, концепция которой заключается в замещении группы точечных зарядов, находящихся на удалении от расчетной точки (РТ), на суммарный «укрупненный» заряд. Это замещение должно выполняться так, что возникающая вследствие него погрешность расчета поля в РТ не превышала бы заданного значения.

Для реализации описанной концепции автор предлагает рассматривать распределение точечных зарядов в пространстве в виде протяженных цепочек (рис. 2). Это позволяет рассматривать единственный вид групп зарядов и ограниченное число распределений значений зарядов по ним, и определить зависимость максимальной

допустимой длины укрупняемой цепочки $l(r)$ от расстояния r между цепочкой и РТ при заданной предельной погрешности расчета напряженности поля $(\delta E)_{\max}$

Проведенные исследования показали следующее

Укрупняемые цепочки должны содержать заряды одного знака, поскольку укрупнение цепочек, объединяющих заряды различных знаков, приводит к неконтролируемым погрешностям

Наиболее рациональным является размещение укрупненного заряда не в геометрическом центре цепочки, а в «центре масс» значений зарядов цепочки, когда координаты укрупненного заряда определяются с учетом значений зарядов цепочки через весовые коэффициенты Это позволяет укрупнять более длинные цепочки зарядов при фиксированном значении $(\delta E)_{\max}$

На погрешности, обусловленные укрупнением цепочки точечных зарядов, влияют четыре фактора

– Геометрическая форма цепочки Наихудшей формой, при которой погрешности расчета напряженности поля наибольшие, является прямолинейная цепочка (рис 3) Укрупнение искривленной цепочки (более компактной в пространстве) той же длины приводит к меньшим погрешностям.

– Ориентация цепочки в пространстве Наибольшие погрешности характерны для прямолинейной цепочки, лежащей на прямой, проходящей через ее геометрический центр и РТ (рис 3)

– Распределение значений зарядов вдоль цепочки К наибольшим погрешностям приводит равномерное распределение

– Число зарядов в цепочке По этому критерию наихудшим случаем является цепочка, состоящая из двух равных зарядов, находящихся на ее концах (рис 4)

Таким образом, к максимальным погрешностям расчета напряженности поля в РТ приводит укрупнение прямолинейной цепочки, лежащей на прямой, проходящей через ее геометрический центр и РТ, состоящей из двух равных зарядов, находящихся на ее концах

Для наихудшего по всем критериям вида цепочки зарядов получены зависимости $l(r)$ для заданных значений $(\delta E)_{\max}$, лежащих в диапазоне 0,1–10% Показано, что они подчиняются линейному закону $l(r) = K_{\text{enlarg}} \cdot r$ (рис 5) Была построена аппроксимация функциональной зависимости $K_{\text{enlarg}} = f[(\delta E)_{\max}]$

$$K_{\text{enlarg}} = 0,112 \sqrt{(\delta E)_{\max}} - 0,004 (\delta E)_{\max} \quad (6)$$

На основе полученных результатов разработан алгоритм экономичного расчета поля, позволяющий однозначно производить укрупнение пространственных групп точечных зарядов, представленных в виде цепочек Вначале, исходя из заданного значения $(\delta E)_{\max}$ по (6) определяется коэффициент укрупнения K_{enlarg} Затем, в соответствии с расстоянием r от РТ до укрупняемой цепочки определяется ее длина $l = K_{\text{enlarg}} \cdot r$ и вычисляется положение и значение замещающего цепочку укрупненного

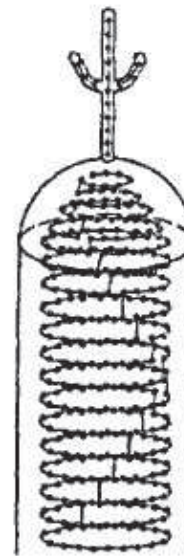


Рис. 2. Схематическое представление эквивалентных точечных зарядов стержня и ветвящейся стримерной короны в виде цепочек

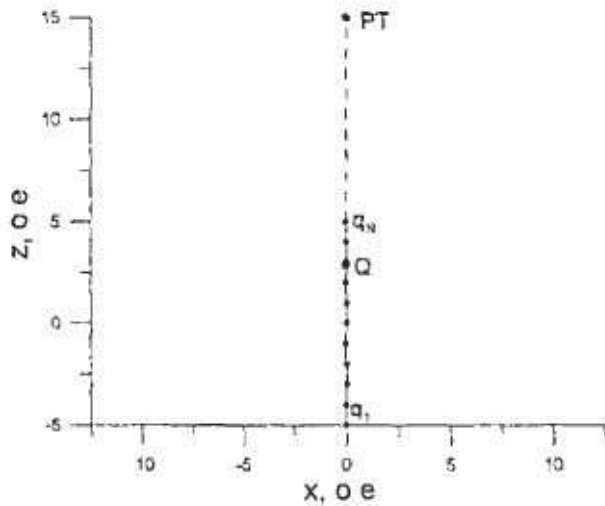


Рис. 3. Расположение прямолинейной цепочки зарядов, соответствующее наибольшей погрешности расчета напряженности поля в расчетной точке РТ при укрупнении. Цепочка длиной 10 о е состоит из $N=11$ зарядов $q_i, i=1, 2, \dots, N, Q$ – укрупненный заряд

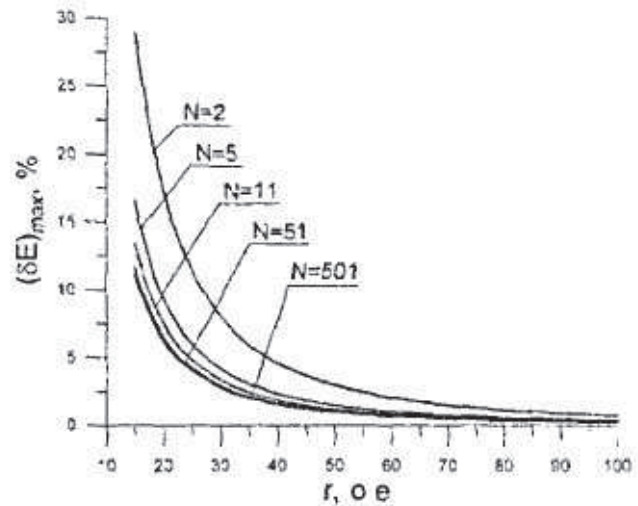


Рис. 4. Зависимости максимальной погрешности расчета напряженности поля $(\delta E)_{\max}$ от расстояния r между цепочкой и РТ при различном числе зарядов N в прямолинейной цепочке длиной 10 о е с равномерным распределением значений зарядов вдоль нее

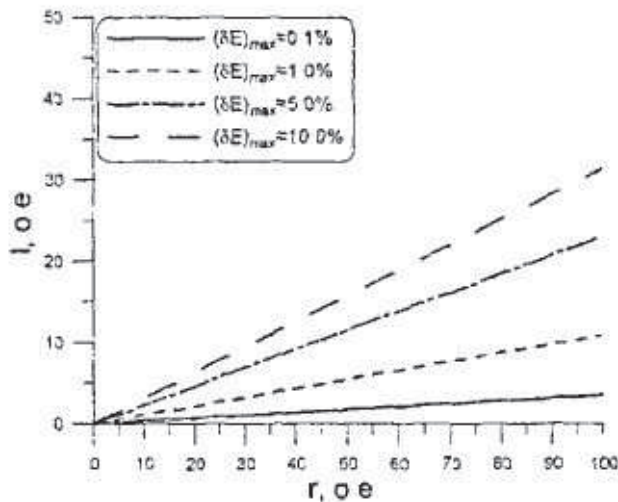


Рис. 5. Зависимости максимальной допустимой длины $l(r)$ укрупняемой прямолинейной цепочки, состоящей из двух равных зарядов, находящихся на ее концах, от расстояния до расчетной точки r при различной предельной погрешности расчета напряженности поля $(\delta E)_{\max}$

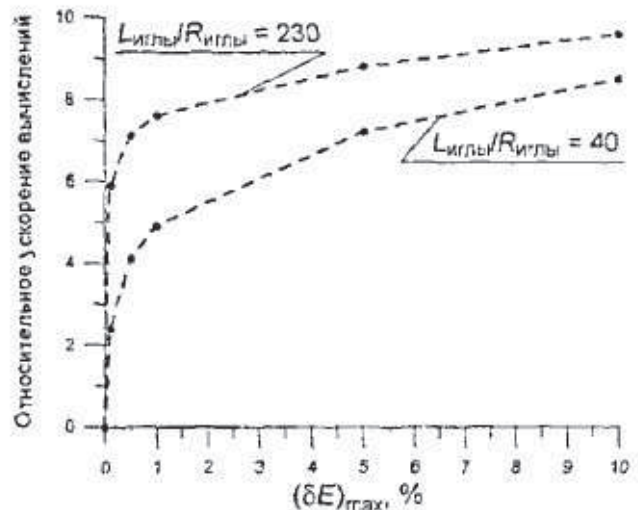


Рис. 6. Пример зависимостей относительного ускорения вычислений от предельной погрешности расчета напряженности поля $(\delta E)_{\max}$ в системах электродов с иглой

заряда. Наконец, рассчитывается поле в РТ от укрупненного заряда. Аналогично укрупняются оставшиеся заряды.

Анализ ускорения расчета поля в различных системах электродов с использованием описанной методики и без нее (т.е. относительного ускорения расчета) показал, что наибольший прирост скорости счета наблюдается при $(\delta E)_{\max} \leq 1\%$. Это относительное ускорение зависит от геометрии электродов и количества ЭЗ в них и при $(\delta E)_{\max} = 1\%$ может достигать 8 раз (рис. 6).

При расчете развития стримерной короны с использованием экономичной методики расчета поля при $(\delta E)_{\max} \leq 1\%$ различия расчетных параметров короны (скорость, разрядный ток, максимальная напряженность на головках стримеров, время развития разряда), как правило, не превышают $(\delta E)_{\max}$ по сравнению с расчетом без использования экономичной методики. При $(\delta E)_{\max} > 1\%$ заметно увеличивается расхождение параметров стримеров, а в протяженных системах также может наблюдаться нарушение устойчивости расчета. Поэтому не рекомендуется использовать экономичную методику с $(\delta E)_{\max} > 1\%$ при моделировании развития стримеров.

Ускорение моделирования развития стримерной короны при использовании экономичной методики с рекомендуемыми значениями $(\delta E)_{\max}$ составляет в среднем 3-4 раза, что позволяет рассчитывать на персональных компьютерах параметры короны, содержащей десятки стримеров и их ветвей (рис. 7).

В четвертой главе обоснован выбор метода решения уравнений (1)-(3), обеспечивающего малые искажения, монотонность и устойчивость, достаточную для расчета многосантиметровых стримеров. Рассмотрено 12 конечно-разностных схем первого и второго порядка точности. Выбор производится в два этапа.

На первом этапе изучались свойства конечно-разностных на примере расчета дрейфа скоплений электронов с прямоугольным и гауссовым профилем распределения концентраций (первый отражает предельный случай градиента концентрации, а последний характерен для стримерной головки). Дрейф происходил в однородном электрическом поле с напряженностью от 25 кВ/см до 150 кВ/см (первое значение близко к начальному значению напряженности поля в воздухе при нормальных атмосферных условиях, а второе типично для головки стримера).

Исследования показали, что применение конечно-разностных схем первого порядка точности приводит к сильной численной диффузии решения уравнений неразрывности («размыванию» фронта распределений концентрации). Для рассмотрен-

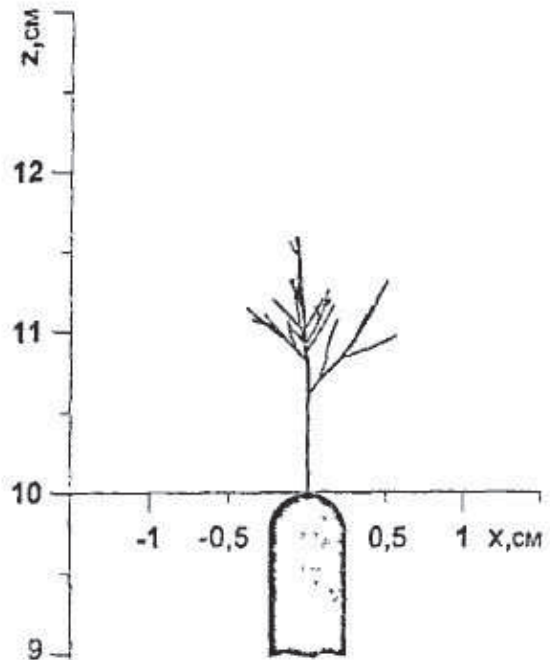


Рис. 7. Расчетная структура положительного ветвящегося стримера в системе электродов «стержень на плоскости во внешнем электрическом поле». Стержень длиной 10 см с радиусом закругления 0,25 см находится во внешнем поле с напряженностью 4 кВ/см.

чных конечно-объемных схем второго порядка точности свойственна на порядок меньшая численная диффузия, но при их использовании может происходить как расширение, так и сжатие гауссова профиля волны электронов. Наилучшие свойства из рассмотренных монотонных схем продемонстрировали явная схема и схемы Ван Лиры «среднее гармоническое» (HARM) и с монотонизированной центральной разностью (MCD). Для первой характерна наименьшая численная диффузия среди конечно-разностных схем первого порядка, а для двух последних – практически полное отсутствие искажений гауссова профиля среди конечно-объемных схем второго порядка. Полученные результаты расчетов для схем HARM и MCD отличаются менее чем на 1%, поэтому в дальнейшем используется только HARM.

На втором этапе исследовалось влияние выбора метода решения уравнений (1)-(3) на результаты моделирования развития стримера. Показано, что применение явной схемы приводит к значительным погрешностям в расчетных значениях параметров стримера, а именно к значительному завышению значений скорости, напряженности поля на головке (до 20%), значений плотности избыточного заряда (до 50%). Это, в свою очередь, приводит к нарушению некоторых известных из экспериментов свойств стримера (ускорению стримера в слабом однородном поле с напряженностью менее 4,5–5 кВ/см, в котором он должен терять скорость). Указанные недостатки практически отсутствуют у конечно-объемной схемы HARM.

Анализ устойчивости итерационного процесса совместного численного решения уравнений (1)-(5) в рамках квазидвумерной модели стримера показал, что применение схемы HARM обеспечивает лучшую устойчивость расчета по сравнению со схемами первого порядка точности. В определенных условиях схемы первого порядка не могут обеспечить устойчивость расчета (например, явная схема неустойчива при $R_s \leq 0,01$ см).

Таким образом, из всех рассмотренных методов решения уравнений неразрывности для моделирования развития стримерной короны была выбрана конечно-объемная схема Ван Лиры «среднее гармоническое» второго порядка точности как обеспечивающая наилучшее сочетание точности и устойчивости совместного численного решения уравнений (1)-(5).

В пятой главе проверяется точность разработанных экономичных методик расчета поля и выбранного метода расчета движения частиц в процессе совместного решения уравнений (1)-(5) посредством проведения расчетов развития импульсной стримерной короны в различных системах электродов и сопоставления полученных результатов с экспериментальными данными, приводимыми в литературе.

Прежде чем переходить к сопоставлению расчетных и экспериментальных данных, в работе производится сопоставление результатов расчета развития стримерной короны в коаксиальной системе электродов при использовании двух различных случаев расположения стримеров (рис. 1, а, б). Показано, что при одинаковой средней плотности стримеров на единицу длины коронирующего электрода отличия в расчетных параметрах стримеров, как правило, не превышают 1%. Практически совпадает и распределение электрического поля в пространстве между стримерами вдоль системы. Поэтому в дальнейшем использовалась только модель, показанная на рис. 1, б, как более точно соответствующая экспериментальным данным о структуре стримерной короны в этой системе.

Выполнены расчеты распространения стримерной короны в системах электродов «игла-плоскость», «провод-плоскость» и «коаксиальные цилиндры». Сопоставление полученных результатов с доступными в литературе экспериментальными данными продемонстрировало достаточно высокую точность первых. Так, например, сопоставление расчетных и экспериментальных зависимостей скорости распространения фронта стримерной короны от ее длины в системах электродов «игла-плоскость» (рис 8, а) и «провод-плоскость» (рис 8, б) показало, что в первом случае расхождение в максимуме не превышает 15%, а на спаде – 10%, а во втором – в максимуме различия составляют менее 10%, в середине промежутка – 15%. Такое соответствие можно считать вполне удовлетворительным.

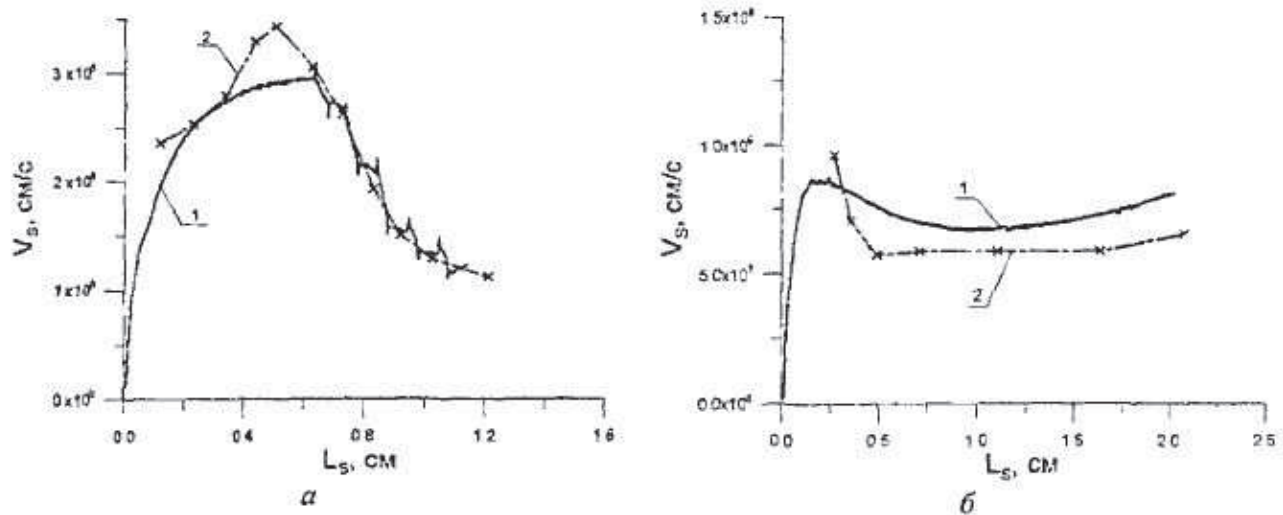


Рис. 8. Зависимость расчетной (1) и экспериментальной (2) скорости распространения фронта стримерной короны от ее длины в системах «игла-плоскость» (а) и «провод-плоскость» (б)

К игле, имеющей радиус острия 0,01 см, прикладывается импульс напряжения с амплитудой 25 кВ, к проводу с радиусом 0,03 см прикладывается импульс напряжения с амплитудой 30 кВ в обоих случаях плоскость заземлена, межэлектродное расстояние составляет 3,5 см, импульс напряжения имеет экспоненциальную форму с постоянной времени 40 нс

В совокупности это говорит о высокой скорости и точности расчета, а также устойчивости совместного решения уравнений (1)-(5) с использованием разработанных экономичных методик расчета поля и выбранного метода решения уравнений неразрывности во всех упомянутых системах при моделировании неветвящихся и ветвящихся стримеров

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные в работе исследования дали следующие основные результаты

1 Выполненный автором обзор экспериментальных и теоретических исследований положительной импульсной стримерной короны показал следующее

1.1 На сегодняшний день накоплен большой объем экспериментальных данных о структуре, пространственно-временных и электрических характеристиках положительной стримерной короны. Обоснована и разносторонне исследована физико-математическая модель одиночного стримера, основанная на гидродинамическом

описании процессов в нем. Предложены и обоснованы элементы модели стримерной короны: модель накопления начальных электронов, ветвления стримеров, совместного распространения стримеров и ветвей в разрядном промежутке.

1.2 Математическое моделирование положительной стримерной короны сталкивается с серьезными трудностями, особенно в системах с протяженными коронирующими электродами (проводами). Дело в том, что применявшиеся до сих пор численные методы расчета электрического поля не обладали достаточным быстродействием и точностью для того, чтобы обеспечивать расчет совместного распространения множества многосантиметровых стримеров. Кроме того, имеются также указания на существенную зависимость результатов расчета параметров стримеров от выбора метода расчета движения и накопления заряженных частиц.

2. Предложена базирующаяся на методе эквивалентных зарядов экономичная методика расчета электростатических полей и полей с объемным зарядом, которые имеют регулярную (повторяющуюся) структуру. При этом заряд, распределенный по поверхностям электродов, замещается точечными эквивалентными зарядами (ЭЗ), размещенными под этими поверхностями. Объемный заряд, распределенный в пространстве, также аппроксимируется совокупностью точечных зарядов.

2.1 Предложенная методика предусматривает следующее. В исследуемой системе электродов и объемных зарядов в межэлектродном пространстве выделяется минимальный характерный повторяющийся элемент структуры, повторением которого заданное число раз образуется целостная система. Поле системы рассчитывается как суперпозиция полей составляющих ее отдельных элементов. В приложении к моделированию стримерной короны с протяженных электродов такой подход позволяет анализировать распространение ограниченного числа уникальных стримеров (возможно, одного), учитывая влияние остальных им подобных стримеров только через их поле, рассчитываемое методом суперпозиции. Это дает возможность существенно сократить время, требуемое для численного моделирования стримерной короны в таких электродных системах, как «коаксиальные цилиндры», «провод-плоскость» и т.д., где структура короны в первом приближении регулярна.

2.2 Уточнены рекомендации по размещению ЭЗ в протяженных системах электродов, обеспечивающие погрешности расчета не более 1–3% в значениях напряженности поля.

3. Разработана упрощенная экономичная методика расчета электрического поля, созданного совокупностью точечных ЭЗ.

3.1 Ускорение расчета обеспечивается благодаря замещению группы точечных ЭЗ единственным укрупненным зарядом так, чтобы погрешность определения напряженности электрического поля в расчетной точке не превышала бы заданной величины. В качестве таких групп зарядов выбраны цепочки ЭЗ, аппроксимирующих поверхностные заряды электродов и объемные заряды стримеров. Показано, что наиболее рациональным является размещение укрупненного заряда в «центре масс» значений зарядов цепочки.

3.2 Найдена зависимость предельной длины укрупняемой цепочки ЭЗ от расстояния между цепочкой и расчетной точкой при заданной предельной погрешности определения напряженности поля в расчетной точке. Показано, что эта зависимость является линейной, а ее наклон однозначно определяется заданной предельной по-

грешностью расчета напряженности Построены аналитические выражения для функции, определяющей связь этого наклона с погрешностью расчета

3.3 Полученные функции позволяют без дополнительных исследований однозначно производить укрупнение удаленных ЭЗ, что дает возможность сократить их общее число и благодаря этому уменьшить время расчета поля от 2 до 8 раз в зависимости от заданной предельной погрешности расчета (первое значение соответствует предельной погрешности 0,1%, а последнее – 1%)

3.4 Проведенные численные эксперименты по моделированию распространения стримеров в различных системах электродов показали, что устойчивость алгоритма совместного решения уравнений неразрывности и Пуассона обеспечивается, если связанная с укрупнением предельная погрешность расчета напряженности поля не превышает 1% Это позволяет добиться ускорения расчета поля при помощи разработанной методики не менее чем в 3-4 раза

4 Предложен порядок выбора численного метода решения уравнений неразрывности потока заряженных частиц в математической модели стримера и выбран наиболее эффективный метод

4.1 Выбор производится в два этапа На первом этапе анализируется движение скопления частиц с заданным профилем концентрации в неизменном электрическом поле (при этом собственное поле скопления заряженных частиц не учитывается) На этом этапе отбрасываются методы, обладающие избыточной численной диффузией, недостаточной точностью, приводящие к появлению ступенек в распределениях концентраций, а также немонокотные методы В данной работе были использованы скопления электронов с прямоугольным и гауссовым профилем концентрации, поскольку они наиболее близко отражают распределение частиц в головке стримера На втором этапе исследуется распространение стримера в самосогласованном электрическом поле По результатам этого исследования исключаются методы, применение которых приводит к нарушению устойчивости получаемого решения, а также к отклонениям решения от известных закономерностей распространения стримера

4.2 На основе сопоставления 12 конечно-разностных схем показано, что по сравнению с другими численными методами первого и второго порядка точности конечно-объемная схема Ван-Лири «среднее гармоническое» второго порядка обеспечивает не только высокую точность решения в областях с большими градиентами концентраций заряженных частиц, но и высокую точность и устойчивость расчета распространения многосантиметрового стримера

5 Реализована комплексная математическая модель положительной импульсной короны в системах электродов с коронирующей иглой и протяженных системах электродов, включающая в себя описание накопления эффективных начальных электронов, инициирующих появление стримеров, формирование и распространение последних вблизи коронирующего электрода, их многократное ветвление, совместное развитие стримеров и ветвей в суммарном электрическом поле Базовым элементом модели является квазидвумерная модель отдельного стримера На языке программирования C++ разработана соответствующая программа расчета импульсной короны в системах «игла-плоскость», «стержень на плоскости во внешнем поле», «провод-плоскость», «коаксиальные цилиндры» В ней используются универ-

сальные модули, реализующие вышеупомянутые численные методы, как для расчета трехмерного поля, так и для расчета развития стримеров и их ветвей

6 С использованием разработанной программы был выполнен большой объем расчетов параметров положительной импульсной стримерной короны, целью которых была проверка соответствия результатов расчетов доступным в литературе экспериментальным данным

6.1 Установлено, что вариации радиуса стримера в рамках квазидвумерной модели, который является ее параметром, в случае, если его значение лежит в следующем из литературы диапазоне, не искажает характер основных закономерностей распространения стримера и не приводит к неприемлемым погрешностям в амплитудных значениях его параметров. Этот результат подтверждает допустимость использования квазидвумерной модели стримера для моделирования развития импульсной стримерной короны

6.2 Показано, что влияние взаимного расположения стримеров в модели короны в системе «коаксиальные цилиндры» на расчетные значения ее параметров и структуру электрического поля не существенно расхождения в значениях максимальной напряженности в головке стримера, минимальной и средней напряженности в его канале, средней напряженности в стримерной зоне, разрядного тока в расчете на один стример, суммарного тока и скорости распространения фронта стримерной короны, как правило, не превышают 1%. Это позволяет использовать при моделировании только один случай расположения стримеров (рис 1, б)

6.3 Проведенное сопоставление результатов моделирования развития стримерной короны с соответствующими данными экспериментов показало, что полученные расчетные параметры короны и особенности ее развития находятся в хорошем соответствии с экспериментальными данными, известными из литературы. Это позволяет сделать заключение о достоверности реализованной математической модели и программы расчета импульсной стримерной короны, а также показывает высокую точность и быстродействие усовершенствованных методов расчета поля и движения заряженных частиц при моделировании стримерного разряда, высокую устойчивость итерационного алгоритма совместного решения уравнений Пуассона и неразрывности потока частиц при их использовании, и возможность их применения в широком круге задач моделирования разрядных процессов

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах

1 Верещагин И П, Пашинин И В, Белогловский А А Математическое моделирование процессов в импульсной стримерной короне о методах решения уравнений неразрывности потока частиц // Вестник МЭИ – 2004 – № 2 – С 43-53

2 Математическое моделирование процессов в импульсной стримерной короне структура электрического поля и параметры короны в системе «острие-плоскость» / Верещагин И П, Белогловский А А, Гусев А А., Пашинин И В, Белосов С В // Вестник МЭИ – 2004 – №3 – С 26-34

3 Пашинин И В Математическая модель импульсной стримерной короны в системе электродов «коаксиальные цилиндры» // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Десятая международная научно-техническая конференция студентов и

аспирантов Тезисы докладов в 3-х т – М. Издательство МЭИ, 2004 – Т 3 – С 322-323

4 Пашинин И В, Силантьев Д А, Белогловский А А Анализ параметров импульсной стримерной короны в воздухе в системе электродов «коаксиальные цилиндры» // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика Десятая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов Тезисы докладов в 3-х т – М Издательство МЭИ, 2004 – Т 3 – С 323-324

5 Пашинин И В Выбор параметров разрядной камеры устройства для очистки топочных газов ТЭС // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика Десятая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов. Тезисы докладов в 3-х т. – М.. Издательство МЭИ, 2004 – Т.3 – С 324

6 Пашинин И В Методика и программа расчета трехмерных электрических полей сложной конфигурации // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика Одиннадцатая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов Тезисы докладов в 3-х т – М Издательство МЭИ, 2005 – Т 3 – С 367-368

7. Пашинин И В Расчет импульсной стримерной короны с игольчатых и цилиндрических электродов // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XII Бенардосовские чтения) – Иваново Издательство ИГЭУ, 2005. – Т 1. – С 31

8 Пашинин И В Математическое моделирование импульсной стримерной короны влияние системы электродов и импульса напряжения на структуру и параметры короны // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика Двенадцатая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов Тезисы докладов в 3-х т – М Издательство МЭИ, 2006 – Т 3. – С. 461-462

9. Описание процесса накопления начальных электронов в математических моделях наносекундной стримерной короны / Белогловский А А, Тиматков В В, Верещагин И П, Соколова М В, Пашинин И В // Электричество – 2006 – № 3 – С 22-29

10 Пашинин И В Упрощенная методика расчета трехмерного электрического поля методом эквивалентных зарядов // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика Тринадцатая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов Тезисы докладов в 3-х т – М Издательство МЭИ, 2007 – Т.3 – С 403-404

Подписано в печать 16.06.07 Зак. 176 Тир. 100 П.л. 1,25
 Полиграфический центр МЭИ (ТУ)
 Красноказарменная ул., д. 13