

# ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА НА ДИССЕРТАЦИЮ

на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук  
**Семенюк Натальи Степановны**

Нестационарная кинетика начальной стадии высоковольтного пробоя  
газоразрядных промежутков

Специальность: 05.27.02 – вакуумная и плазменная электроника

**Актуальность темы исследования.** Диссертация Семенюк Натальи Степановны посвящена теоретическому исследованию ключевых механизмов и численному моделированию генерации заряженных частиц с акцентом на убегающие электроны на ранних стадиях нестационарного электрического разряда в газе. Актуальность задачи определяется сложностью экспериментального изучения этих процессов из-за малой длительности и крутых фронтов импульса и недостаточностью их теоретического анализа. Убегающие электроны играют важную роль в формировании разряда, влиянии на электрическую прочность высоковольтных узлов, а также при генерации рентгеновского излучения.

## **Оценка структуры и содержания работы.**

Диссертация имеет структуру, соответствующую рекомендациям ВАК. Она состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа содержит 139 страниц текста, 88 рисунков, библиографический список из 143 наименований.

**Во введении** обосновывается актуальность работы, формулируются цели и задачи исследования, а также научная новизна и практическая важность работы. Приводится краткое содержание глав диссертации. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** приведен обзор экспериментальных, теоретических и расчетных работ по электрическому пробое газоразрядных промежутков с высоким перенапряжением при высоком и низком давлении газа с появлением убегающих электронов. на динамику разряда.

**Вторая, третья и четвертая главы** содержат описания нескольких гибридных моделей, сочетающих дрейфово-диффузионную гидродинамическую модель на основе теории Таундсена, включающую уравнение сохранения плотности тока с учетом внешней цепи, и кинетическую модель плазмы газового разряда на основе одномерного столкновительного кинетического уравнения Больцмана. Приведены численные решения для разных геометрий разрядного промежутка, сортов газа и давлений и их анализ.

Во второй главе рассмотрена гибридная модель, где плазма описывается дрейфово-диффузионной моделью, а ускоренные электроны – кинетической. Получены решения для

плоского промежутка при низком давлении азота, для коаксиального диода с азотом при атмосферном давлении и коаксиального диода с элегазом SF<sub>6</sub> при атмосферном давлении. Во всех случаях наблюдаются убегающие электроны, проведен анализ их динамики, имеется согласие с экспериментом. Аналогичным образом проведено моделирование реального газового трехэлектродного диода с азотом атмосферного давления и анализ результатов.

Следующая гибридная модель приведена в третьей главе. В ней электроны и плазмы и пучка описаны кинетической моделью, а электрическое поле находится из уравнения сохранения полного тока. Проведен расчет кинетики электронов в коаксиальном диоде с азотом в разряде при атмосферном давлении. Исследовалось влияние крутизны фронта импульса напряжения, давления газа и радиуса кривизны катода на характеристики убегающих электронов, проведено сравнение с экспериментом. Дополнительно исследовался радиальный пробой коаксиальной линии в поле высоковольтного импульса бегущей волны. Разряд инициировался автоэлектронной эмиссией с катода. Исследовалось влияние эмиссионной способности катода на разряд и убегающие электроны. Рассматривалось также влияние сокращения длительности импульса на прочность коаксиального зазора. Отдельно исследовалось влияние упругих столкновений электронов с атомами на формирование разряда и убегающие электроны.

В четвертой главе описано несколько моделей, том числе полностью кинетическая модель плазмы, включающая ионы плазмы, для учета их движения и влияния на динамику разряда в азоте низкого давления. Цель – исследование механизмов ускорения положительных ионов к аноду с набором кинетической энергии, превышающей напряжение на диоде, наблюдаемого в экспериментах с дуговой плазме. Сравняются случаи неподвижных ионов, дрейфового движения ионов и полного учета ионов в кинетическом уравнении. Реализовано моделирование механизма ускорения ионов «горбом» электрического потенциала, проведен его детальный анализ.

**В заключении** кратко сформулированы полученные результаты. Особо следует отметить тщательный авторский анализ всех деталей наблюдаемых процессов с физическими комментариями по поведению частиц, потоков, полей и потенциалов.

#### **Соответствие содержания диссертации заявленной специальности и теме диссертации**

Содержание диссертации полностью соответствует заявленной специальности и теме диссертации по поставленным задачам и методам их решения. Методами численного моделирования рассмотрен важный раздел вакуумной и плазменной электроники. Тема убегающих электронов, возникающих на начальных стадиях высоковольтного пробоя,

является отдельным разделом в физических журналах и на конференциях. В диссертации решены некоторые основные вопросы этой темы.

#### **Соответствие автореферата диссертации её содержанию**

Содержание автореферата достаточно полно соответствует диссертации.

#### **Личный вклад соискателя в получении результатов исследования**

В получении результатов диссертации личный вклад соискателя является определяющим. Постановка научных задач, обсуждение и анализ результатов проводились совместно с научным руководителем, профессором д.ф.-м.н. А.В. Козыревым. Численные алгоритмы отрабатывались и корректировались с участием д.ф.-м.н. В. Ю. Кожевникова. Автором лично сформированы и отлажены вычислительные коды, выполнены все расчеты, обработаны и проанализированы их результаты, готовился материал для научных публикаций, лично написан текст диссертации и сформулированы выводы.

#### **Степень достоверности результатов исследования**

Достоверность результатов обеспечивается использованием апробированных численных алгоритмов решения математических уравнений; согласием результатов моделирования, полученных разными методами; сравнением авторских результатов с полученными другими авторами; согласием результатов расчетов с экспериментальными данными и согласованностью теоретических тенденций с экспериментами при изменении условий задачи.

Результаты работы докладывались и обсуждались на 14 международных конференциях, опубликованы в 26 печатных работах, из них 23 в индексируемых изданиях, в том числе в 7 статьях в журналах перечня ВАК.

#### **Теоретическая и практическая значимость полученных автором диссертации результатов**

Работа имеет реальное практическое значение, позволяя детально исследовать структуру и динамику разрядов низкого и повышенного давления в широком диапазоне параметров и условий. Исследовано явление генерации убегających электронов, существенно влияющих на развитие разрядов в газе, и рассмотрены пути управления их параметрами. Проведенные расчеты дают теоретически обоснованные ответы на многие вопросы, возникающие в технической и экспериментальной практике данных разрядов.

#### **Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации**

Разработанные численные модели могут быть применены при разработке и расчете параметров газоразрядных систем вакуумной и плазменной электроники. Полученные результаты, их физическая трактовка и выводы необходимо учитывать при анализе

работы подобных систем. Эти результаты могут быть также использованы при проектировании источников коротких импульсов рентгеновского излучения с использованием убегających электронов.

### **Новизна полученных результатов**

Научные результаты, перечисленные в соответствующем разделе диссертации, являются новыми.

Сформулированы и реализованы гибридные численные модели, использующие одномерное кинетическое уравнение Больцмана с правой частью и уравнения полного тока для электрического поля в системе, включая плазму, позволившие промоделировать нестационарную кинетику компонент плазмы, в том числе убегających электронов, в газовом разряде в широкой области параметров.

Проведено численное моделирование радиального пробоя газонаполненного коаксиального промежутка в поле бегущей волны длинной линии с учетом дискретной автоэлектронной эмиссии с катода и ионизации газа плазменными и убегającими электронами. Результаты хорошо согласуются с экспериментальными.

Решена одномерная задача нестационарной кинетики электронов и ионов в начальной стадии разряда низкого давления, прослежен механизм формирования ионного потока на анод, в том числе с аномально высокими кинетическими энергиями ионов.

### **Замечания по диссертационной работе**

Поставленные цели достигнуты полностью. Сформулированы новые вычислительные модели, получены новые интересные результаты, проведен их детальный анализ, сделан существенный вклад в получении новых знаний.

В основном, работа написана понятным и ясным языком. Из замечаний, в первую очередь, отмечу заметное количество грамматических и синтаксических ошибок и опечаток, которые, как правило, не препятствуют пониманию работы.

Из других замечаний следует отметить следующие.

1. Совпадение обозначений символом  $R$  разных величин, стр.43 и 46.
2. Указан цвет линии "синие" для черно-белого рисунка 2.4 на стр.49.
3. Не согласуются комментарии на стр.61 к рисунку 2.17 с подписями к нему. Из них следует, что убегające электроны уходят через катодную фольгу. Или рисунок не тот, или перепутаны катод и анод.
4. Указана "начальная концентрация заряженных частиц ...  $10^{-3} \text{ см}^{-3}$ " Для объема расчетной области в  $\sim 0.6 \text{ см}^3$  её явно мало. Опечатка?
5. На стр.113, второй абзац: "... он накапливается..." – кто "он" – непонятно.
6. На стр.113 описываются локальные пики потенциала, которых на Рис.4.4 нет.

7. В полной кинетической модели, включающей и все электроны плазмы, применение "жесткого" упругого рассеяния электронов по принципу "вперед-назад", вынужденного для одномерной модели, кажется сомнительным для убегающих электронов, в модели возвращающихся назад и в результате вносящих вклад в пространственный заряд там, куда они не должны попадать. Следует отметить, что автор понимает этот недостаток модели, в конце раздела 4.3 рассматривая необходимость его корректировки при развитии модели.

Считаю, что эти недостатки не снижают ценности представленной работы. Диссертация удовлетворяет требованиям ВАК, а ее автор, Семенюк Наталья Степановна, достойна присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Отзыв составил

Старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И.Будкера Сибирского отделения академии наук, кандидат технических наук,

В.Г. Астрелин

Ученый секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И.Будкера Сибирского отделения Российской академии наук,

кандидат физико-математических наук

31.03.2022



А.В.Резниченко