

## **Отзыв**

официального оппонента, д.ф.-м.н. Синкевича Олега Арсеньевича, профессора кафедры инженерной теплофизики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ", на диссертационную работу Швыдкого Георгия Вячеславовича «Характеристики высокочастотного емкостного разряда в квазирадиальном магнитном поле», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности: 1.3.9 Физика плазмы

### **Актуальность темы**

Емкостной высокочастотный разряд (ЕВЧР) низкого давления является одним из наиболее интересных с физической точки зрения типов газового разряда, который изучается уже много десятилетий. Диссертация Г.В. Швыдкого посвящена изучению новой модификации ВЧ разряда, а именно емкостного ВЧ разряда, помещенного во внешнее поперечное магнитное поле. Постановка такой задачи вызвана практической потребностью изучения возможности замены разряда постоянного тока на ЕВЧР в устройствах типа стационарного плазменного двигателя, использующих магнитное поле с преимущественной радиальной составляющей.

Работа Г.В. Швыдкого является естественным продолжением работ по исследованию ВЧ разряда, более полувека ведущихся на кафедре физической электроники физического факультета МГУ. Диссертант использует накопленные до начала его работы знания, развивая и применяя их для систематических исследований новой модификации ВЧ разряда. Полученные в рецензируемой работе результаты представляют интерес, как с фундаментальной, так и с практической точек зрения. Так, обнаруженный эффект слабого влияния величины индукции магнитного поля на параметры разряда при значениях индукции более 140 Гс, безусловно, станет предметом многочисленных будущих исследований.

Применение емкостного ВЧ разряда в качестве рабочего процесса электроракетного двигателя открывает возможность для использования его для полетов космических аппаратов на сверхнизких околоземных орбитах, где в перспективе предполагается использовать воздух в качестве рабочего газа. В земных технологиях возможно использование рассмотренного диссертантом типа разряда для ионного ассистирования, очистки и поверхностной модификации материалов.

Диссертационная работа Швыдкого Г.В. «Характеристики высокочастотного емкостного разряда в квазирадиальном магнитном поле» проясняет физическую картину процессов, происходящих в новой модификации емкостного ВЧ разряда, формулирует

основы для разработки прототипа нового устройства, которое может быть использовано в земных и космических технологиях. В связи с этим считаю, что работа Швыдкого Г.В. является востребованной и актуальной.

### **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций**

Поставленные задачи, на основе критического анализа литературы, включающие в себя экспериментальное определение вольт-амперных характеристик и импеданса разряда, распределения плотности плазмы вдоль разрядного канала, энергии ускоренных ионов на выходе из источника плазмы в зависимости от схемы организации разряда, частоты ВЧ генератора и величины индукции магнитного поля, а также исследование проводимости электронов вдоль разрядного канала на основании разработанной численной модели исследуемого разряда, представляются обоснованными и выполненными на высоком научно-техническом уровне. Список использованной литературы содержит 109 наименований. Выводы и экспериментальные результаты, полученные диссертантом, сравниваются там, где это возможно, с результатами, полученными другими авторами.

### **Достоверность и новизна исследования, полученные результаты, выводы и рекомендации сформулированные в диссертации**

Новизна результатов, полученных автором диссертации, подтверждается:

- результатами исследований интегральных характеристик емкостного высокочастотного разряда при наличии квазирadiaльного магнитного поля в геометрии СПД-70 в зависимости от схемы подключения разряда, частоты ВЧ генератора и величины индукции магнитного поля;

- результатами измерений локальных параметров емкостного высокочастотного разряда при наличии квазирadiaльного магнитного поля в геометрии СПД-70 в зависимости от схемы подключения разряда и величины индукции магнитного поля;

- результатами расчетов с помощью разработанной автором численной модели изучаемого разряда на основе классической проводимости электронов поперек магнитного поля.

Большинство результатов, представленных в диссертации, получены автором впервые.

Выводы и результаты, полученные диссертантом, обоснованы и достоверны, так как опираются на сравнение экспериментальных и расчетных данных, а также на сравнение, там, где это возможно, с результатами других авторов.

## **Значимость для науки и практики полученных автором результатов**

Экспериментальные результаты, полученные Швыдкого Г.В. при исследовании емкостного высокочастотного разряда при наличии квазирадиального магнитного поля в геометрии СПД, могут быть использованы для создания источников плазмы, позволяющих получать потоки ускоренных ионов с заданными параметрами ионного пучка для наземных технологий и в качестве перспективных моделей электрических ракетных двигателей. Это позволяет говорить о практической ценности полученных результатов.

Не менее важную роль играют экспериментальные исследования интегральных и локальных параметров ЕВЧР, проясняющие особенности ЕВЧР при наличии квазирадиального магнитного поля. В сочетании с численной моделью, данные, полученные Швыдким Г.В. могут быть использованы для прояснения вопроса о транспорте электронов вдоль канала источника поперек магнитного поля. Это определяет научную ценность работы.

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

Результаты диссертации могут быть использованы для расширения фундаментальных представлений о физических процессах, протекающих в емкостном высокочастотном разряде, помещенного в квазирадиальное магнитное поле, а также - для оптимизации и разработки электрических ракетных двигателей на основе ЕВЧР.

## **Содержание диссертации**

Диссертация Швыдкого Г.В. состоит из введения, четырех глав, заключения/выводов, списка используемых источников и благодарности.

**Первая** глава диссертации посвящена обзору литературы по теме исследования. Обзор начинается с описания физических основ и принципа работы СПД. Повествуется об основных трудностях, возникших при разработке этого двигателя, а также о путях решения этих проблем. Приведены факторы, которые влияют на параметры двигателя, в частности, на величину разрядного тока. Ссылаясь на современные исследования показано, что проводимость электронов вдоль разряда не описывается классической столкновительной проводимостью и имеет место аномальная проводимость. Перечислены недостатки СПД, а для их устранения предлагается использовать емкостной высокочастотный разряд вместо разряда постоянного тока. Далее детально излагается физика ЕВЧР, возможность его применения в СПД и работа, которая уже была выполнена по этой теме. Рассмотрены способы организации ЕВЧР, его эквивалентные схемы, вольт-амперные характеристики

ЕВЧР, механизмы поглощения мощности, влияние частоты на параметры разряда и его импеданс. На основании этой информации обосновывается выбор данного разряда в качестве основного рабочего процесса двигателя и выполняется постановка задачи исследования.

Во **второй** главе описывается методика эксперимента. Разряд изучался в вакуумной камере с использованием сертифицированного оборудования. Приводятся три схемы организации ЕВЧР с детальным описанием особенностей подключения ВЧ генератора. Далее приведены методики измерений параметров разряда, среди которых измерение вольт-амперных характеристик с последующим расчетом импеданса цепи, зондовые измерения локальных параметров плазмы, спектральные измерения и определение энергии ионного пучка с помощью энергоанализатора.

Экспериментальным результатам и их обсуждению посвящена **третья** глава диссертации. В ней проводится систематическое исследование интегральных и локальных параметров ЕВЧР в квазирадиальном магнитном поле. Прежде всего рассматриваются ВАХ, распределение плотности плазмы вдоль разрядного канала, плотность и энергия ионного пучка для различных схем организации разряда. Отмечаются существенные отличия этих параметров. Важным результатом является определение распределения плотности плазмы вдоль разрядного канала для каждой схемы подключения ЕВЧР, который показал смещение максимума плотности на срез канала при замыкании электродов по постоянному току. Дальнейшее рассмотрение интегральных параметров происходило в зависимости от рабочей частоты ВЧ генератора (2, 4 и 13.56 МГц), где было показано, что с увеличением частоты увеличиваются амплитуды ВЧ напряжений и токов, а также энергия ионного пучка. Далее автором работы изучается влияние величины индукции магнитного поля на физические свойства разряда. Отмечается, что магнитное поле главным образом стабилизирует разряд и слабо влияет на интегральные и локальные параметры плазмы. В завершении главы определяются технические параметры, которые позволяют сравнивать данный источник с действующими ЭРД. Показано, что максимальные энергии были получены для рабочих газов криптон и воздух (350 эВ), а для извлечения 1 Ампера тока на криптоне требуется вложить 460 Вт мощности.

В последней, **четвертой** главе рассматривается вопрос проводимости электронов поперек магнитного поля в исследуемом разряде. Для этого была создана численная модель разряда, основанная на классической проводимости электронов и проведены экспериментальные измерения импеданса разряда в зависимости от схемы организации разряда, рабочей частоты и величины магнитной индукции. Сравнивая результаты

численной модели и эксперимента, Швыдкий Г.В. делает вывод о неприменимости классической столкновительной модели проводимости и предполагает о существовании аномальной проводимости. Кроме этого, экспериментальное измерение импеданса показало его немонотонный характер в зависимости от концентрации плазмы.

### **Достоинства и недостатки работы**

Диссертация Швыдкого Г.В. является законченной работой, в которой исследованы интегральные и локальные характеристики емкостного высокочастотного разряда при наличии квазирадиального магнитного поля в геометрии СПД-70 в зависимости от схемы подключения разряда, частоты ВЧ генератора и величины индукции магнитного поля. Измеренные аксиальные зависимости зондового ионного тока насыщения иллюстрируют качественную картину перестройки разряда при изменении схемы его организации. На основе сопоставления экспериментальной зависимости импеданса разряда от концентрации плазмы с результатами численного моделирования сделан вывод о невозможности описания переноса электронов с помощью классической проводимости плазмы. Достоинством работы является сочетание фундаментальных исследований разряда на основе экспериментов и численного моделирования, а также изучение возможностей практического применения модификации ЕВЧР. В совокупности, полученные Швыдким Г.В. результаты проясняют физическую картину процессов, происходящих в ЕВЧР, помещенном в радиальное магнитное поле, в частности в понимании влияния внешних параметров на характеристики разряда и механизма электронной проводимости, и являются значимым шагом в направлении построения его физико-математической модели.

Можно ожидать, что полученные результаты будут использованы в организациях, занимающихся разработкой и исследованием электроракетных двигателей: МФТИ, АО ГНЦ «центр Келдыша», МАИ и т.д. и в наземной промышленности для создания технологических установок.

Вместе с тем работа не свободна от недостатков:

1. При рассмотрении распределения плотности разряда вдоль канала в зависимости от подаваемой ВЧ мощности, можно заметить небольшое несоответствие с ранее снятыми этими характеристиками. Так, положение максимума различается минимум на 1 сантиметр. Автор не поясняет, является ли это погрешностью эксперимента или это возникло вследствие влияния внешних параметров.

2. Ни в методике эксперимента, ни в экспериментальной части для некоторых методик эксперимента не приводятся характерный пример сигнала, получаемого с измерительного оборудования.

3. В дальнейшем желательно дополнить численную модель разряда оценками емкости приэлектродных слоев, которая зависит от концентрации электронов. Это должно привести к изменению вида зависимости действительной и мнимой частей импеданса от плотности плазмы.

4. Хотелось бы, чтобы в диссертации было уделено больше внимание объяснению полученных частотных зависимостей характеристик разряда.

5. Полагаю, что следовало бы более детально обсудить возможность аномальной проводимости и оценить значения бесстолкновительного затухания Ландау.

В целом, отмеченные недостатки не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы и являются, по сути, пожеланиями для дальнейшего развития сделанной работы. Диссертация Швыдкого Г.В. является законченной научно-квалификационной работой, посвященной исследованию физических особенностей ЕВЧР при наличии внешнего квазирадиального магнитного поля. Диссертация написана логичным, ясным языком. Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

Содержание диссертации полно отражается в публикациях. Статьи опубликованы в изданиях, индексируемых в международных реферативных базах.

Представленная работа соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а ее автор Швыдкий Г.В. заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы.

Доктор физико-математических наук,

профессор кафедры инженерной теплофизики

ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

Синкевич О.А.

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 г.

111250, Россия, г. Москва, вн.тер.г. муниципальный округ Лефортово, ул. Красноказарменная, д.14, стр.1

Телефон: +7 (095) 362-70-73 e-mail: [oleg.sinkevich@itf.mpei.ac.ru](mailto:oleg.sinkevich@itf.mpei.ac.ru)

Подпись Синкевича О.А. удостоверяю

Начальник управления по работе с

персоналом

Н.Г. Савин