

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

СТЕНОГРАФИЧЕСКИЙ ОТЧЕТ

заседание диссертационного совета Д 002.110.02
при Федеральном государственном бюджетном учреждении наук
Объединенном институте высоких температур Российской академии наук
от 6 апреля 2016 г. (протокол №3)

Повестка дня:

Защита диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Чернышёва Тимофея Владимировича

на тему

«Экспериментальные и численные исследования нарушения стационарности горения интенсивных разрядов с замкнутым дрейфом электронов»

Специальность 01.04.08 – Физика плазмы

Москва – 2016

СТЕНОГРАММА

заседания диссертационного совета Д 002.110.02
при Федеральном государственном бюджетном учреждении наук
Объединенном институте высоких температур Российской академии наук
Протокол №3 от 6 апреля 2016 г.

Председатель – Зам. председателя диссертационного совета Д 002.110.02
чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор Канель Г.И.

Секретарь – Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.110.02
к.ф.-м.н., с.н.с. Васильев М.М.

Председатель:

Уважаемые члены Совета, кворум имеется. Совет утверждён в составе **31** человека.
На заседании присутствуют **22** члена совета, из них докторов наук по профилю рассматриваемой диссертации – **11**.

| | | | | |
|-----|------------------|--------------------------|----------|--------------|
| 1. | Фортов В.Г. | академик | 01.04.08 | отсутствует |
| 2. | Канель Г.И. | чл.-корр. РАН, профессор | 01.04.14 | присутствует |
| 3. | Андреев Н.Е | д.ф.-м.н., профессор | 01.04.14 | присутствует |
| 4. | Васильев М.М. | к.ф.-м.н., с.н.с. | 01.04.08 | присутствует |
| 5. | Агранат М.Б. | д.ф.-м.н. | 01.04.14 | присутствует |
| 6. | Амиров Р.Х. | д.ф.-м.н., с.н.с. | 01.04.08 | присутствует |
| 7. | Баженова Т.В. | д.ф.-м.н., профессор | 01.04.08 | присутствует |
| 8. | Вараксин А.Ю. | чл.-корр. РАН, профессор | 01.04.14 | присутствует |
| 9. | Васильев М.Н. | д.т.н., профессор | 01.04.14 | отсутствует |
| 10. | Василяк Л.М. | д.ф.-м.н., профессор | 01.04.08 | присутствует |
| 11. | Ваулина О.С. | д.ф.-м.н., профессор | 01.04.08 | отсутствует |
| 12. | Воробьев В.С. | д.ф.-м.н., профессор | 01.04.08 | присутствует |
| 13. | Голуб В.В. | д.ф.-м.н., профессор | 01.04.14 | присутствует |
| 14. | Гордон Е.Б. | д.ф.-м.н., профессор | 01.04.08 | отсутствует |
| 15. | Грязнов В.К. | д.ф.-м.н., профессор | 01.04.14 | присутствует |
| 16. | Зейгарник Ю.А. | д.т.н., с.н.с. | 01.04.14 | присутствует |
| 17. | Еремин А.В. | д.ф.-м.н., профессор | 01.04.14 | отсутствует |
| 18. | Иванов М.Ф. | д.ф.-м.н., профессор | 01.04.14 | отсутствует |
| 19. | Иосилевский И.Л. | д.ф.-м.н., профессор | 01.04.08 | присутствует |
| 20. | Кириллин А.В. | д.ф.-м.н., профессор | 01.04.14 | присутствует |
| 21. | Лагарьков А.Н. | академик | 01.04.08 | отсутствует |
| 22. | Ломоносов И.В. | д.ф.-м.н., профессор | 01.04.14 | присутствует |

| | | | | |
|-----|-------------------|--------------------------|----------|--------------|
| 23. | Медин С.А. | д.т.н., профессор | 01.04.14 | присутствует |
| 24. | Норман Г.Э. | д.ф.-м.н., профессор | 01.04.08 | присутствует |
| 25. | Петров О.Ф. | чл.-корр. РАН, профессор | 01.04.08 | присутствует |
| 26. | Полежаев Ю.Ю. | чл.-корр. РАН, профессор | 01.04.14 | отсутствует |
| 27. | Савватимский А.И. | д.т.н. | 01.04.14 | присутствует |
| 28. | Сон Э.Е. | чл.-корр. РАН, профессор | 01.04.08 | присутствует |
| 29. | Старостин А.Н. | д.ф.-м.н., профессор | 01.04.08 | присутствует |
| 30. | Храпах А.Г. | д.ф.-м.н., профессор | 01.04.14 | отсутствует |
| 31. | Якубов И.Т. | д.ф.-м.н., профессор | 01.04.08 | присутствует |

На повестке дня защита диссертации научного сотрудника Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский электротехнический институт им. В.И.Ленина» (ФГУП ВЭИ) Чернышёва Тимофея Владимировича на тему «Экспериментальные и численные исследования нарушения стационарности горения интенсивных разрядов с замкнутым дрейфом электронов». Диссертация впервые представлена на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – Физика плазмы. Диссертация выполнена в отделе 21030 (ионно-плазменные технологии) Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский электротехнический институт им. В.И.Ленина» (ФГУП ВЭИ) (111250, Россия, Москва, ул. Красноказарменная 12.).

Научный руководитель:

Коваленко Юрий Алексеевич, д.ф.-м.н., генеральный директор Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский электротехнический институт им. В.И.Ленина», г. Москва.

Официальные оппоненты:

1. **Ким Владимир Павлович** – гражданин РФ, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник отдела стационарных плазменных двигателей государственного научно-исследовательского института прикладной механики и электродинамики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московского авиационного института (национального исследовательского университета)», г. Москва

2. **Шагайда Андрей Александрович** – гражданин РФ, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник отдела № 120 (электрофизики) государственного научного центра федерального государственного унитарного предприятия «Исследовательский центр имени М.В. Келдыша», г.Москва.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН) (Россия 634055 г. Томск проспект Академический, 2/3, тел. (3822) 491-544, hcei.tsc.ru, e-mail - contact@hcei.tsc.ru).

На заседании присутствуют: официальные оппоненты: д.т.н., профессор Ким Владимир Павлович, к.ф.-м.н., Шагайда Андрей Александрович, научный руководитель Чернышёва Т.В. д.ф.-м.н. Коваленко Юрий Алексеевич.

Есть возражения по повестке дня? Нет. Повестка дня утверждается единогласно. Слово предоставляется ученому секретарю Васильеву М.М.

Ученый секретарь: *Зачитывает данные о соискателе по материалам личного дела и сообщает о соответствии представленных документов требованиям ВАК Минобрнауки РФ.*

Председатель: Есть ли вопросы по документам? Нет. Слово предоставляется Чернышёву Тимофею Владимировичу для изложения основных положений диссертационной работы.

Чернышёв Т.В.: *Докладывает диссертационную работу (выступление не стенографируется, доклад Чернышёва Т.В. прилагается).*

Председатель: Время истекло. Спасибо, Тимофей Владимирович. Пожалуйста, вопросы.

Голуб В.В.: Не понял, вы сказали, что у вас тяга определялась балансом давлений?

Чернышёв Т.В.: Тяга может интерпретироваться как дисбаланс давлений поля по обе стороны витка, грубо говоря (можно я тогда сейчас поясню). Ионы ускоряются электрическим полем, но.

Голуб В.В.: То есть две компоненты должны быть, правильно?

Чернышёв Т.В.: Не совсем понял вопрос.

Голуб В.В.: Тяга состоит из двух компонент. Во-первых, разница давлений, как вы правильно сказали, и естественно, ещё поток массы ионов и нейтралов которые выходят из ускорителя, правильно.

Чернышёв Т.В.: Да.

Голуб В.В.: Вы это учитывали?

Чернышёв Т.В.: Здесь как получается, тяга целиком определяется потоком ионов (нейтралы не учитываем, так как они с очень маленькой скоростью летят), но передача импульса происходит благодаря этому дисбалансу давлений. Потому что электрическое поле, оно не привязано к каким-то электродам, оно самосогласованное.

Голуб В.В.: Хорошо, понятно. Последний вопрос. КПД какое электрической энергии в ту тягу, которую вы получаете.

Чернышёв Т.В.: В исследуемом макете или модели?

Голуб В.В.: И там и там, если можно.

Чернышёв Т.В.: В макете 46%, в модели получилось, что при 300В около 75%, а, соответственно, если повышаем напряжение, то КПД увеличивается.

Вараксин А.Ю.: В продолжение вопроса, немножко пару слов скажите, потому что двигатель с анодным слоем вещь в принципе известная, где это применяется, некоторые характеристики. Потому что у вас всё больше звучало про силу тока, напряжение. Тем не менее, что по скоростям, по давлению. Параметры самой струи.

Чернышёв Т.В.: Ну по тяге я могу сказать, и по самой струе. Саму струю я мерил, тут не привожу конкретные кривые, мерил угловую расходимость. Угловая расходимость получилась небольшая, порядка десяти градусов. Тяга от одного до четырёх грамм в зависимости от напряжения и расхода. Магнитные поля 200300 Гаусс, расход давали от 0.66 до Ампер по ксенону до 1.66.

Савватимский А.И.: Относительно катода, можно ли говорить что у вас импульсно-накаливаемый катод?

Чернышёв Т.В.: Нет, там просто подогревная спиралька под ним.

Савватимский А.И.: Т.е. это постоянный накал, не импульсный?

Чернышёв Т.В.: Не импульсный, просто там спиралька.

Савватимский А.И.: Понятно. Почему я вопрос этот задал, что бы просто можно было понять почему, потому что известно, что при импульсном нагреве может возникать аномальная электронная эмиссия. Но у вас, поскольку не импульсный накал, вы объясняете, что у вас в момент зажигания разряда выброс анодного тока в начале обеспечивается быстрой ионизацией плотного газа.

Чернышёв Т.В.: Да.

Савватимский А.И.: Что значит «быстрой ионизацией»? Вы дальше пишете, в момент зажигания разряда формируется плотная плазма. Как понимать, есть ли какие ни будь оценки и характеристики этой плазмы. Насколько быстро это ионизируется.

Чернышёв Т.В.: Судя по расчётам, получается, что плазма формируется с концентрацией равной концентрации нейтрального газа. Потому что весь газ в плазму перерабатывается. А насколько быстро, порядка 10, 20, 30 микросекунд.

Савватимский А.И.: Не так уж и быстро...

Чернышёв Т.В.: Ну тут же дело в том, что этот катод, когда он просто стоит в вакууме, без разряда, он анод не видит, с него тока никакого нет.

Савватимский А.И.: Спасибо.

Воробьев В.С.: У вас в диссертации физмат наук, вы довольно детально описали экспериментальные данные для специфической установки. Назовите, какой физический результат, который вы получили в своей работе, наиболее существенный.

Чернышёв Т.В.: Наиболее существенно, что для корректного описания зажигания разряда необходимо учитывать размагничивание плазмы собственным полем азимутального тока. До этого в моделях динамический эффект этот не учитывался. Иногда учитывали в стационаре, закладывали искажение магнитного поля, а в динамике это не учитывалось.

Васильев М.М.: Скажите, вы использовали в работе ксенон, с чем связан выбор?

Чернышёв Т.В.: Легко ионизировать и он медленный. Тяжёлые атомы медленно летят.

Васильев М.М.: Вы пробовали сравнивать ваши результаты при использовании более стандартных газов, например аргона?

Чернышёв Т.В.: Ну для этих двигателей ксенон стандартный газ, мы на аргоне не пускали, но другие работы со схожими движками, там и на аргоне пускают. Там всё похуже, конечно, потому что на аргоне надо плотность тока больше, точнее расход повышать. Иначе интенсивного ионизационного выгорания не достигнешь, другая форма слоя будет.

Вараксин А.Ю.: Тут слово «турбулентный», в принципе это хорошо известное понятие в гидродинамике, я надеюсь, что оно по тексту диссертации, в автореферате, и во всех документах используется только в кавычках.

Чернышёв Т.В.: Да.

Вараксин А.Ю.: И, всё таки, ксенон, вы сказали они медленно движутся, с какими скоростями в струе и какие числа Рейнольдса?

Чернышёв Т.В.: Нет, здесь турбулентность получается исключительно в кавычках, как детально невоспроизводимое возбуждение многих колебаний в плазме. Газ здесь бесстолкновительно движется, за исключением выгорания.

Вараксин А.Ю.: С какой скоростью примерно?

Чернышёв Т.В.: Сейчас скажу, десять в четвёртой, по моему.

Вараксин А.Ю.: Десять в четвёртой чего?

Чернышёв Т.В.: Сантиметров в секунду. Обычный тепловой разлёт.

Председатель: Последний вопрос, поскольку всё время упоминался двигатель, естественно мы ждём, что в итоге будет сказано, какое значение имеет исследование вот этих неустойчивостей для двигателя.

Чернышёв Т.В.: Для двигателя, во-первых, что бы двигатель какой то новый создать надо все эти неустойчивости знать, а во вторых вот здесь предложен механизм как всё таки КПД у движка повысить, потому что все эти аномальные механизмы, эта аномальная проводимость, она увеличивает ток через двигатель и снижает КПД, так как он впустую расходуется. Соответственно, здесь предложен вариант, как можно попытаться сделать чисто на классических механизмах ток замкнуть. Потому что там получается, что даже при небольшом напряжении ток электронный снаружи всего 10% от полного тока, а если увеличим напряжение до 500В там вообще около 2%. Т.е. Можно вплоть до самостоятельного разряда в таком режиме получать.

Председатель: Хорошо, спасибо. Дальше у нас слово предоставляется научному руководителю, Коваленко Юрию Алексеевичу.

Коваленко. Ю.А.: Добрый день, члены учёного совета. Я не знаю как у вас принято, в некоторых советах принято просто зачитывать отзыв научного руководителя, но я от этого отступлю и расскажу своими словами, а соответствующий отзыв имеется в деле соискателя.

Итак, прежде всего по поводу актуальности и по поводу некоторых вопросов, которые здесь задавались. Режим, который исследовал автор он не гидродинамический, длина свободного пробега здесь сравнима или превышает размеры системы. Поэтому ни о каком классическом гидродинамическом понятии турбулентности здесь речи идти не может. Это

не гидродинамика, это кинетика в чистом виде. Я просто отвечаю, может быть не очень точно дал ответ аспирант.

Председатель: Юрий Алексеевич, вообще-то от руководителя мы ждём отзыв о человеке.

Коваленко. Ю.А: Я сейчас немного об актуальности, а потом о работе самого аспиранта. Актуальность связана с тем, что до сих пор ни одна из теоретических работ не позволяет предсказать или рассчитать заранее двигатель с заданными характеристиками. Всегда получается наоборот. Сначала люди делают модель, потом её обсчитывают и показывают, что всё более-менее в порядке. Поэтому для того что бы развиваться дальше, и эти двигатели могли повышать КПД и так далее, необходимо провести эксперименты соответствующие и разработать адекватные теоретические модели. Это очень сложно, потому что нестационарную кинетическую модель с учётом размагничивания никто до автора не пытался посчитать, более того, в момент зажигания. Обычно, всегда предполагают какое-то стационарное распределение, а провести кинетический расчёт с самого начала, когда подаётся напряжение и просто газ, это требует огромного количества вычислений.

Автор показал себя, во-первых, прекрасным экспериментатором, потому что померить на работающем двигателе холловскую составляющую тока и попытаться объяснить её поведение связав с соответствующими теоретическими моделями, это достаточно кропотливая и серьёзная экспериментальная работа. И с точки зрения владения экспериментом, я не просто доволен работой, а могу сказать, что он проявил себя с самой лучшей стороны, владея современной техникой. Более того, не только техникой, но и технологией, если вы обратили внимание, в этом двигателе впервые, не только он один, совместно с сотрудниками лаборатории, использовали анод в виде графита, газовая прозрачность которого регулировалась с помощью специальной технологии пиролиза, и не использовались не очень технологичные всякие полости и дырочки. Это позволяло получить достаточно однородный поток, а с другой стороны, а с другой стороны это процесс очень технологичный. Можно создавать аноды с любой заданной прозрачностью. Поэтому, как экспериментатор он показал себя с наилучшей стороны, ну а если говорить о теоретической части работы, я вообще поразился его работоспособности. Потому что проводить такое количество вычислений... Во-первых, модель надо было сделать грамотно, с учётом размагничивания. А с учётом того что эта модель требовала вычислений с самого начала процесса, вот он показал тут какие-то конкретные модели которые он рассчитал, но это требовало огромного количества времени, настойчивости ну и искусством владения современной техникой и аппаратом. Работоспособность у человека просто потрясающая. Т.е. за 4 года (2 года из-за проблем с советами человек не мог защититься), за 4 года он проделал огромный объём работы, в том числе и вычислительной и экспериментальной. И самое интересное и важное для будущего учёного, я не сомневаюсь, что Тимофей и дальше будет продолжать в этом направлении работу, что он все свои экспериментальные результаты пытался объяснить с помощью предложенной теоретической модели, дать адекватное объяснение на том уровне понимания, на котором позволяла вся эта модель. Пото-

му что она с точки зрения полной адекватности всё-таки нельзя её считать до конца, потому что она в координатном пространстве одномерна. Для того что бы учесть все неустойчивости азимутальные, которые возникают, там могут быть и другие эффекты. Я надеюсь, что он сможет работу продолжить и сделать свою модель трёхмерную в пространстве скоростей как минимум двухмерной в координатном пространстве. Это позволит уже рассчитывать конкретные двигатели. Моя точка зрения как научного руководителя, что он несомненно сложившийся экспериментатор, владеет современным теоретическим аппаратом, современными вычислительными методами и заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук.

Председатель: Спасибо, Алексей Юрьевич. Вопросов нет? Михаил Михайлович, пожалуйста, отзывы на диссертацию и автореферат.

Ученый секретарь: В деле имеется заключение организации. С вашего позволения я зачитывать не буду, а на вопросы готов ответить. В качестве ведущей организации был предложен **Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук**. В деле имеется отзыв, отзыв положительный. В отзыве описаны актуальность, основные результаты, структура и объём диссертации и имеется ряд замечаний:

1. Анализ осциллограмм на рисунках 2.5, 2.6, 2.8 затрудняется тем, что не указана шкала по оси времени, приведены лишь численные значения в соответствующие моменты зажигания разряда. Поэтому невозможно оценить временные характеристики возникающих при горении разряда модуляций тока, хотя эти модуляции существенны.

2. Автор не приводит экспериментальных данных по прямому измерению импульсного изменения давления в межэлектродном промежутке при его зажигании, да и сделать такие измерения чрезвычайно сложно. Однако в выводах раздела 2.2 стр.40 однозначно, но бездоказательно указано, что выброс тока в момент зажигания разряда обусловлен повышенной концентрацией атомов в зоне ионизации по сравнению с рабочим режимом и их быстрым выгоранием.

3. В главе 4 представлена предложенная автором конфигурация магнитопровода с размагничивающими катушками, в которой внешнее магнитное поле быстро спадает за срезом разрядного канала, и расчёт стационарного режима в этой конфигурации. Из диссертации не ясно, была ли эта конфигурация реализована на практике, и проводилось ли сравнение экспериментальных данных с расчётом.

Отмеченные недостатки не носят принципиального характера и не снижают ценности работы в целом. Указано количество опубликованных работ рекомендованных ВАК – 4 журнала, 5 тезисов докладов на конференциях. Отзыв обсуждён на заседании семинара лаборатории плазменной эмиссионной электроники и прикладной электроники в ИСЭ СО РАН и подписан завлаб плазменной эмиссионной электроники Ковалем и завлаб прикладной электроники Соловьёвым.

Так же на разосланный автореферат поступило два отзыва, отзывы положительные, имеются замечания. Первый отзыв поступил из **исследовательского центра имени Келдыша**, отзыв положительный, к недостаткам автореферата можно отнести следующее:

1. В автореферате не приведено подробного описания использовавшегося в работе ускорителя с замкнутым дрейфом электронов, его соответствия или отличий от известных конструкций подобных ускорителей/(двигателей), поэтому не понятна возможность перенесения полученных результатов на другие конструкции и режимы работы.

2. Научная новизна утверждения «Показано, что при постоянном напряжении с увеличением магнитного поля анодный ток уменьшается до некоторого минимума, при этом тяга максимальна, а разряд стационарен (оптимальная точка работы), дальнейшее увеличение магнитного поля приводит к незначительному уменьшению тока и возникновению сильных низкочастотных ионизационных колебаний», (стр.6 автореферата) имеет слишком общий характер. Подобная зависимость известна и широко опубликована, в автореферате не приведено в чем конкретно состоит новизна результатов автора.

3. Используются аббревиатуры («ХЭРД») и термины, («Н-слой», «Е-слой»), которые не являются общеупотребимыми и физический смысл которых не раскрыт.

Указанные недостатки не ставят под сомнение основные результаты и выводы, сделанные автором, работа выполнена на высоком научном уровне, её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук.

Отзыв подписан начальником отделения 3 ГНЦ ФГУП «центр Келдыша», д.т.н. Семёнкиным А.В. и заверен учёным секретарём ФГУП «центр Келдыша», кандидатом военных наук Смирновым Ю.Л..

Второй отзыв поступил из центрального **научно-исследовательского института машиностроения (ЦНИИмаш)**, отзыв положительный, имеются замечания в небрежном оформлении автореферата, наличия орфографических и синтаксических ошибок, сбой в нумерации рисунков. Данные замечания не снижают ценности полученных в работе результатов. Отзыв подписан и.о. начальника управления ФГУП ЦНИИмаш, к.т.н. Твердохлебовой и заверен главным учёным секретарём ЦНИИмаша, доктором технических наук, профессором Смагиным.

Председатель: Спасибо, Михаил Михайлович. Пожалуйста, Тимофей Владимирович, вам слово отвечать на замечания и вопросы.

Чернышёв Т.В.: На первый вопрос по поводу самого ускорителя я в принципе уже ответил, ближе всего он к ЦНИИмашевскому Д38М, на самом деле даже вся установка наша верифицировалась на этом Д38М с известными характеристиками, а потом всё это дальше проверялось на нашем ускорителе. Там всё очень похоже, просто этот Д38М не загоняли в плохие режимы, потому что анод начинает греться и его можно расплавить.

Второе замечание касалось области существования, зависимость действительно широко известна, а здесь её мы сняли для множества разных расходов и целиком всю область замэппили а не только отдельно одну характеристику.

Насчёт модели – это только модель, первоначально предполагалось сделать всю эту штуку с размагничивающими катушками в эксперименте, но, начальство сказал, что надо сначала всё это дело промоделировать, поэтому я всё это дело промоделировал, а до эксперимента, к сожалению, не дошло.

Председатель: Там были ещё вопросы по оформлению, с которыми вы, наверное, согласны.

Чернышёв Т.В.: Ну да, там, к сожалению, есть опечатки, даже в одном месте очень нехорошая опечатка, но уже поздно исправлять.

Председатель: Дальше мы переходим к отзывам оппонентов. Слово предоставляется официальному оппоненту, профессору Владимиру Павловичу Киму, институт прикладной механики и электродинамики...

Ким В.П.: МАИ, Московский авиационный институт.

(Зачитывает отзыв, письменный отзыв имеется в деле).

Председатель: Спасибо, Владимир Павлович, Тимофей Владимирович, пожалуйста.

Чернышёв Т.В.: Ну действительно, на одном датчике не померяешь, поэтому действительно это в порядке гипотезы, я это обосновываю тем, что в силу баланса сил, холловский ток, скорее всего движется, потому что очень сложно его так нарушить, что бы холловский ток находясь в своём прежнем положении резко сбрасывался так. Больше похоже на резкое изменение положения. Второй момент, да действительно по ДАСам мало данных, но вообще то говоря есть данные когда измеряли характеристики внутри слоя и, собственно, как раз этот *H*-слой мерили. В частности, например японцы, их группа, Наоджи Ямомото и другие, они продольное распределение потенциала мерили и очень похожее на такое распределение потенциала там намеряли. Всё.

Председатель: Спасибо, второй оппонент у нас Андрей Александрович Шагайда, пожалуйста.

Шагайда А.А.: *(Зачитывает отзыв, письменный отзыв имеется в деле).*

Председатель: Спасибо, Андрей Александрович. Оппоненты сегодня у нас очень хорошо расставили акценты. Спасибо. Тимофей Владимирович, пожалуйста.

Чернышёв Т.В.: На первый вопрос отвечу сразу, на счёт токов в цепях и т.д.. Во первых, там стоял RC-фильтр так что бы на всех характерных частотах отфильтровать... Грубо говоря, у нас на всех переходных процессах разрядное напряжение практически стационарное. Во вторых, насчёт того что ток с катода интерпретируется как ток эмиссии потому что когда катод такой помещаем в плазму ток с этого катода ограничивается пространственным зарядом как корень из M к m на ток ионов который из плазмы идёт. Для ксенона этот корень из M к m будет 500, т. е. Ток электронов будет в 500 раз больше чем ток ионов которые на этот катод попадают и пространственный заряд там компенсируют. Поэтому просто пренебрегаем этим моментом. Потому что хоть и поверхность развитая этих катодов, всё равно она маленькая по сравнению с общей поверхностью струи через которую весь остальной ток замыкается, большая часть струи она на камеру уходит.

Второй момент насчёт гидродинамики. Действительно, можно так сказать, но на самом деле у нас гидродинамика или хотя бы сплошная среда начинается тогда, когда у нас характерный размер неоднородности становится меньше чем характерный градиент плазменных параметров. Если у нас система бесстолкновительная, то у нас гидродинамика, конечно, полностью работать не будет, но, если мы сильное магнитное поле приложим, то

будут маленькие ларморовские радиусы, и если параметры плазмы меняются слабо на расстояниях этих ларморовских радиусов, то можно это считать гидродинамикой. Потому что можно какие то усреднённые величины вот этим электронам, которые в области с ларморовским радиусом болтаются приписать. На расстояниях меньше ларморовского радиуса у нас это вообще работать не будет, на расстояниях больше ларморовского радиуса можно гидродинамические модели использовать. Естественно, там может быть немаксвелловская функция распределения, какая-то другая. Но хотя бы сам математический аппарат можно использовать. А в данном случае, когда непосредственно такие слои, тут размер слоя порядка одного ларморовского радиуса, поэтому в нём в принципе гидродинамика никак работать не будет.

Касательно опечатки, там действительно опечатка, изначально всё написал по v (вектор) на d по $d \times$ (вектор), а потом так как модель одномерная, оставил координату, а у v компоненту иксую забыл написать, вектор оставил.

И последний вопрос касательно области существования, действительно, вся область не была снята. Просто потому что очень тяжело это сделать. Поэтому я просто ограничился тем что сильно увеличил магнитное поле и получил что там идёт разбалтывание, теряется структура колебаний и нарушается баланс сил. И сильно уменьшил напряжение, и тоже увидел, что баланс сил сильно нарушается. Целиком всю область не замэппил, т. е. Получил тут только магнит-амперную и вольт-амперную характеристику. Просто из-за того что это считать очень долго и тяжело. Всё.

Председатель: Спасибо. У нас время для дискуссии.

Василяк Л.М.: Я ознакомился с диссертацией, поскольку я её представлял в этом учёном совете, поэтому я не задавал вопросы, но я хотел бы изложить своё мнение. Несомненно, работа очень хорошая. Она касается очень важной темы, это двигатель, который применяется в космонавтике. Примерно месяц назад новый директор ЦНИИмаша Горшков Олег Анатольевич, он собирал больше совещание-собрание, на котором я присутствовал на физтехе, где как раз обсуждались эти проблемы. Было сказано, что эти двигатели перспективны, будут применяться. Но сегодня нет теоретических моделей, просчитать очень сложно, требуются суперкомпьютеры. Были ведущие специалисты, могут ли они взяться за разработку и расчёт? Второе. Многие двигатели они работают, но параметры плазмы просто неизвестны. Необходимо измерение, просто измерение того что происходит. Скажем 45й движок, который стоит на физтехе тоже под вопросом, поскольку измерения нужны. Одна диагностика – лазерно-индуцированная флуоресценция, вторая – зондовая методика в сильных полях и когда ионная функция распределения имеет большую направленную скорость, несколько километров в секунду, а электроны бесстолкновительны, и чрезвычайно трудно даже вообще что ни будь измерить.

Поэтому то что мы сегодня слышим это актуально, и второе – несомненно, полезно для практики. Что сделал автор, он не пытался исследовать вообще всё для того что бы повысить удельный импульс или удельную тягу. Он попытался исследовать те проблемы, которые принципиально меняют характер тех процессов, которые есть. А именно – неус-

тойчивости. И учитывая что две есть диагностики и он приложил ещё одну – это несомненно есть большой шаг вперёд. Он с помощью этой диагностики сумел показать, он показал фактически очень важный момент. Есть соблазн, давайте увеличим магнитное поле, тогда электрическое поле увеличится, тяга увеличится. Он говорит – нет, по моим данным, увеличиваете магнитное поле – всё наступает неустойчивость и идёт срыв. Он и экспериментально и построил модель и сумел её просчитать, поскольку он считал конкретные параметры получающейся неустойчивости, у него получилась замкнутая работа, которая очень хорошая с точки зрения физики и, несомненно, полезна для практики. Я считаю, что мы должны поддержать соискателя, я буду голосовать за и предлагаю членам совета также проголосовать за эту работу.

Председатель: Спасибо, Леонид Михайлович. Тут уже оппоненты и Леонид Михайлович высказались положительно, так что мы, наверное, уже не можем изменить наше мнение. В таком случае, заключительное слово. Тимофей Владимирович, пожалуйста.

Чернышёв Т.В.: Во-первых, хотел бы поблагодарить совет, что пришли и всё это выслушали, оппонентов и руководителя. А во-вторых, очень бы хотелось поблагодарить всех тех, кто помогал делать (*показывает слайд, перечислены: Шумилин А.П., Шумилин В.П. Сапронова Т.М., Солдатенко, А.Ф., Ермилов А.Н., Ульянов К.Н., Королёв С.В., Коваленко Ю.А., Новичков Д.Н., Ерошенков В.Ф.*). Потому что тяжело было работать, очень хотелось бы поблагодарить, например, Шумилина Александра Павловича, он своими золотыми руками позволил это вообще всё хорошо сделать. Он и катоды делал, и установку в порядок приводил. Без него всё бы это не получилось сделать. И, конечно, всех остальных, потому что и на эксперименте мне помогали, и с кодом помогали ошибки искать (а ошибок было очень много) и просто за полезные обсуждения всего этого дела. То же зажигание разряда совершенно случайно обнаружили, когда поменяли источник питания, и оказалось, что разряд не зажигается – потому что дугозащита срабатывает.

Председатель: Спасибо. Для проведения тайного голосования предлагается избрать счетную комиссию в составе: Иосилевского И.Л. (председателем счётной комиссии), Ломоносова И.В., Савватимского А.И. Я думаю, возражений нет? (*Счетная комиссия выбирается единогласно*). Мы приступаем к голосованию, но я предлагаю не расходиться, а сразу при подсчёте голосов остальные пункты нашей повестки рассмотреть. (*Проводится процедура тайного голосования*).

Иосилевский И.Л.: Уважаемые коллеги, результаты такие по работе Тимофея Владимировича Чернышёва: роздано бюллетеней **22**, осталось не розданным бюллетеней **9**, оказалось в урне бюллетеней **22**. Результаты голосования такие: **за присуждение** ученой степени кандидата физико-математических наук **Чернышёву Тимофею Владимировичу** проголосовало **22**, против – **нет**, недействительных – **нет**.

Председатель:

Мы должны утвердить протокол счетной комиссии. Кто «за»? Прошу голосовать. (*Протокол счетной комиссии утверждается единогласно*). Тимофей Владимирович, мы вас поздравляем. Дальше проект заключения.

(Члены диссертационного совета обсуждают проект заключения).

Предлагается принять заключение с обсужденными нами изменениями. Прошу голосовать. *(Утверждается единогласно открытым голосованием)*. Заседание диссертационного совета объявляется закрытым.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

О присуждении Чернышеву Тимофею Владимировичу, гражданину Российской Федерации ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Экспериментальные и численные исследования нарушения стационарности горения интенсивных разрядов с замкнутым дрейфом электронов» в виде рукописи по специальности 01.04.08 физика плазмы, принята к защите 23.12.2015, протокол №18, диссертационным советом Д 002.110.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр.2, jiht.ru, (495) 485-8345), утвержденного Приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 11.04.2012г. № 105/нк.

Соискатель Чернышев Тимофей Владимирович 1987 года рождения, в 2009 году окончил Московский Авиационно-технологический Институт – Российский Государственный Технический Университет им. Циолковского (МАТИ-РГТУ).

В 2013 году окончил заочную аспирантуру Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский электротехнический институт им. Ленина» (ФГУП ВЭИ).

Работает научным сотрудником отдела 21030 (ионно-плазменные технологии) Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский электротехнический институт им. Ленина» (ФГУП ВЭИ).

Диссертация выполнена в отделе 21030 (ионно-плазменные технологии) Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский электротехнический институт им. Ленина».

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, генеральный директор ФГУП ВЭИ, Коваленко Юрий Алексеевич.

Официальные оппоненты:

Ким Владимир Павлович, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник отдела стационарных плазменных двигателей Государственного Научно-Исследовательского Института Прикладной Механики и Электродинамики Федерального Государственного Бюджетного Образовательного Учреждения Высшего Образования «Московский Авиационный Институт (национальный исследовательский университет)», Ленинградское ш., 5, г. Москва, 125080, тел. (499) 158-00-20, mai.ru, riame@sokol.ru;

Шагайда Андрей Александрович, к.ф.–м.н., ведущий научный сотрудник отдела 120 (электрофизика) Государственного Научного Центра Федерального Государственного Унитарного Предприятия «Исследовательский Центр Имени М.В. Келдыша», 125438, г. Москва, Онежская ул., 8, тел. (495) 456-46-08, kerc.msk.ru, kadr@kerc.msk.ru; дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное Государственное Бюджетное Учреждение Науки «Институт Сильноточной Электроники Сибирского Отделения Российской Академии Наук» (ИСЭ СО РАН), 634055, г. Томск проспект Академический, 2/3, тел. (3822) 491-544, hcei.tsc.ru, contact@hcei.tsc.ru, в своем положительном заключении составленном заведующим лабораторией плазменной эмиссионной электроники, доктором технических наук, профессором Ковалем Николаем Николаевичем и исполняющим обязанности заведующего лабораторией прикладной электроники, кандидатом технических наук Соловьёвым Андреем Александровичем (утвержденном директором ИСЭ СО РАН доктором физико-математических наук, член-корреспондентом РАН Рахтиным Н.А.), указала что:

1. Экспериментально исследован процесс зажигания разряда в ускорителе с анодным слоем. Установлено, что в момент зажигания разряда анодный ток может на порядок превышать значения характерные для установившегося режима. Показано, что величина «выброса» анодного тока зависит от тока эмиссии с катода компенсатора.
2. Показано, что при фиксированном расходе рабочего газа и различных комбинациях разрядного напряжения и индукции магнитного поля разряд горит в одном из двух режимов: «ускорительном» или «турбулентном». Экспериментально исследована область существования ускорительного режима в зависимости от величины магнитного поля и разрядного напряжения при различных расходах газа. Показано, что при постоянном напряжении с увеличением магнитного поля анодный ток уменьшается, и возникают сильные низкочастотные ионизационные колебания. При большем увеличении магнитного поля разряд переходит в метастабильное состояние, при котором разряд через ограниченные промежутки времени хаотически переключается в режим с резким увеличением тока.
3. Впервые в ускорителях с анодным слоем проведено бесконтактное измерение переменной составляющей азимутального тока. Показано, что низкочастотные колебания анодного тока сопровождаются колебаниями азимутального тока, причём максимум анодного тока сопровождается резким минимумом сигнала азимутального тока.
4. Построена кинетическая, нестационарная, численная модель газового разряда в скрещенных полях с неявной схемой решения уравнений движения в одномерном по координатам и трёхмерном по скоростям приближении. При этом учтён эффект размагничи-

вания плазмы собственным магнитным полем азимутального тока в нестационарной постановке.

5. Показано, что в области малых магнитных полей разряд неустойчив к спонтанному увеличению азимутального тока и сильному размагничиванию. Это приводит к резкому возрастанию частоты ионизации и переходу разряда в импульсный режим. В области больших магнитных полей разряд неустойчив к накоплению избыточного отрицательного пространственного заряда, что приводит к ионизационным колебаниям.

Результаты диссертации могут быть применены в Исследовательском центре имени М.В.Келдыша, Московском авиационном институте (национальном исследовательском институте), Московском государственном техническом университете имени Н.Э.Баумана, Национальном исследовательском Томском политехническом университете, Всероссийском электротехническом институте имени В.И.Ленина и других организациях.

Соискатель имеет 4 статьи в реферируемых журналах из списка ВАК и 5 тезисов в сборниках трудов конференций.

Основные работы:

1. Новичков Д. Н., Ермилов А. Н., Сапронова Т. М., Чернышев Т. В. Исследование тяговых характеристик макета холловского реактивного двигателя с полым анодом // ТВТ. 2013. Т. 51, № 3. С. 375–380.
2. Ермилов А.Н., Ерошенков В.Ф., Коваленко Ю.А., Королёв С.В., Чернышёв Т.В., Шумилин А.П. Особенности зажигания интенсивного несамостоятельного разряда в скрещенных полях с термоэмиссионным катодом // Теплофизика высоких температур. 2013. Т. 51, № 4. С. 497.
3. Ермилов А.Н., Ерошенков В.Ф., Новичков Д.Н., Коваленко Ю.А., Сапронова Т.М., Королёв С.В., Чернышёв Т.В., Шумилин А.П. Экспериментальное исследование области существования интенсивного несамостоятельного разряда в скрещенных полях // Теплофизика высоких температур. 2013. Т. 51, № 5. С. 670.
4. Ермилов А.Н., Ерошенков В.Ф., Новичков Д.Н., Коваленко Ю.А., Сапронова Т.М., Чернышёв Т.В., Шумилин А.П. Об осцилляциях холловского тока в двигателе с анодным слоем // Теплофизика высоких температур. 2014. Т. 52, № 3. С. 371–380.

На диссертацию и автореферат поступили **отзывы:**

1. **Государственный Научный Центр Федеральное Государственное Унитарное Предприятие «Исследовательский центр имени М.В. Келдыша», г. Москва** (отзыв подписан доктором технических наук, начальником отделения 3 Семенкиным А.В.) – отзыв положительный с замечаниями:

- В автореферате не приведено подробного описания использовавшегося в работе ускорителя с замкнутым дрейфом электронов.
- Научная новизна утверждения «Показано, что при постоянном напряжении с увеличением магнитного поля анодный ток уменьшается до некоторого минимума, при этом тяга максимальна, а разряд стационарен (оптимальная точка работы), дальнейшее увеличение магнитного поля приводит к незначительному уменьшению тока и возникновению сильных низкочастотных ионизационных колебаний.», стр.6 автореферата имеет слишком общий характер. Подобная зависимость известная и широко опубликована, в автореферате не приведено в чём конкретно состоит новизна результатов автора.
- Используются аббревиатуры («ХЭРД») и термины («Н-слой», «Е-слой»), которые не являются общеупотребимыми, и физический смысл которых не раскрыт.

2. Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный Научно-Исследовательский Институт Машиностроения» (ФГУП ЦНИИмаш), г. Королёв, Московская область (отзыв подписан к.т.н., и.о. начальника Управления ФГУП ЦНИИмаш Твердохлёбовой Е.М. и и.о. начальника отдела ФГУП ЦНИИмаш Сизовым А.А.) – отзыв положительный, в качестве замечания указаны небрежности в оформлении автореферата.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается проводимыми ими исследованиями по теме диссертации.

Выбор Кима Владимира Павловича в качестве оппонента обосновывается тем, что он является известным ученым в области стационарных плазменных двигателей:

1. Архипов А.С., Ким В., Сидоренко Е.К. Результаты исследования характеристик струй стационарных плазменных двигателей (СПД), работающих на различных режимах //ЖТФ, т.82. №5, 2012, с. 42-51
2. В. П. Ким, А. С. Архипов, А. М. Бишаев, Д. В. Меркурьев, Е. К. Сидоренко, Исследование формирования потоков ионов перезарядки вблизи выхода из ускорительного канала стационарного плазменного двигателя // Физика плазмы. 2014. Т. 40. №10. С. 937-945.
3. Ким В.П. Конструктивные признаки и особенности рабочих процессов в современных стационарных плазменных двигателях Морозова // ЖТФ, 2015, т. 85, №3, с. 45-59.

Выбор Шагайды Андрея Александровича в качестве оппонента обосновывается тем, что он является признанным специалистом в области ионно-плазменных двигателей:

32. О.А. Горшков, Д.А. Томилин, А.А. Шагайда. «Экспериментальное исследование структуры высокочастотных возмущений за срезом разрядного канала СПД с высоким удельным импульсом» // Физика плазмы, 2012, Т. 38, № 3, с.298-304.
33. А.А. Шагайда, О.А. Горшков, Д.А. Томилин. «Влияние эрозии стенок разрядного канала на эффективность работы стационарного плазменного двигателя» // Журнал технической физики, 2012, том 82, вып. 8, с.42-49.
34. Andrey Shagayda. “Stationary electron velocity distribution function in crossed electric and magnetic fields with collisions,” // Phys. Plasmas 19, 083503 (2012). (doi: 10.1063/1.4744971).

Выбор Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН)» в качестве ведущей организации обусловлен тем, что ИСЭ СО РАН является многопрофильной организацией, проводящей обширные исследования, в том числе в области интенсивных газовых разрядов:

1. E.M. Oks and A. Anders. Boron-rich plasma by high power impulse magnetron sputtering of lanthanum hexaboride // Journal of Applied Physics. – 2012. – V. 112(8). – p. 086103-086103-3.
2. Y.D. Korolev, O.B. Frants, N.V. Landl, I.A. Shemyakin, and V.G. Geyman. High-Current Stages in a Low-Pressure Glow Discharge with Hollow Cathode. – IEEE Trans. Plasma Sci. – 2013. – V. 41(8). – p. 2087-2096.
3. E. Oks, V. Burdovitsin, A. Medovnik, Y. Yushkov. Plasma electron source for the generation of wide-aperture pulsed beam at forevacuum pressures // Rev. Sci. Instrum. – 2013. – V. 84 (2). – p. 023301.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработана одномерная по координатам и трёхмерная по скоростям, нестационарная, кинетическая модель интенсивного разряда с замкнутым дрейфом электронов, учитывающая размагничивание плазмы замкнутым азимутальным током;

предложен механизм измерения переменной составляющей замкнутого азимутального тока;

с помощью эксперимента и численного моделирования показано, что в момент зажигания влияние собственного магнитного поля азимутального тока велико, а величина разрядного тока определяется эмиссионным током катода.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

Построена полностью кинетическая, нестационарная, численная модель газового разряда в скрещённых полях с неявной схемой решения уравнений движения в одномерном по координатам и трёхмерном по скоростям приближении. Впервые учтён эффект размагничивания плазмы собственным магнитным полем замкнутого азимутального тока в нестационарной постановке, который приводит к возникновению положительной обратной связи, способствующей переходу разряда в нестационарный режим.

Значение полученных соискателем результатов **исследования для практики подтверждается** тем, что:

Результаты численных экспериментов качественно согласуются с экспериментальными результатами и показывают необходимость учета эффекта размагничивания плазмы собственным магнитным полем замкнутого азимутального тока при разработке устройств на основе интенсивных разрядов с замкнутым дрейфом электронов.

Результаты диссертационного исследования могут быть рекомендованы для использования в Исследовательском центре имени М.В. Келдыша, ЦНИИмаш, Московском авиационном институте, ОКБ «Факел» и во многих других научных учреждениях.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

их достоверность на основании совпадения результатов экспериментальных и теоретических исследований автора, с одной стороны, и согласования с ранее известными результатами, с другой стороны.

Личный вклад соискателя состоит в непосредственном участии в выборе темы исследования и постановке задачи. Автор принимал активное участие в подготовке, проведении экспериментов и обработке экспериментальных данных. Автором написан расчётный код (одномерной, нестационарной, учитывающей размагничивание) кинетической модели и проведены расчёты различных режимов разряда и их анализ.

Апробация результатов исследования проводилась на 4 российских и международных конференциях и симпозиумах, в которых соискатель принимал личное участие.

Диссертационным советом сделан вывод о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, соответствует критериям пункта 9, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г.

На заседании от 06.04.2016г. диссертационный совет Д 002.110.02 принял решение присудить Чернышёву Т.В. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 22 человек, из них 11 докторов наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы и 10 докторов наук по специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника, участво-

вавших в заседании, из 31 человека, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 22, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Зам. председателя диссертационного совета Д 002.110.02,
чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.110.02
к.ф. - м.н.




Г.И. Канель

М.М. Васильев

М.П.