

ОТЗЫВ НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

о работе Чернышева Тимофея Владимировича по диссертации «Экспериментальные и численные исследования нарушения стационарности горения интенсивных разрядов с замкнутым дрейфом электронов», представленной к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 Физика плазмы.

Диссертация Чернышева Тимофея Владимировича «Экспериментальные и численные исследования нарушения стационарности горения интенсивных разрядов с замкнутым дрейфом электронов» посвящена актуальной проблеме - исследованию физики интенсивного газового разряда низкого давления с замкнутым дрейфом электронов.

Значительные достижения в исследовании таких разрядов привели к их широкому использованию в электрореактивных двигателях и в технологических источниках ионов. Однако до настоящего времени остаются неизученными некоторые принципиальные вопросы физики их устойчивого горения. В таких разрядах часто возбуждаются высокочастотные градиентно-дрейфовых азимутальные волны. Эту неустойчивость привлекают для объяснения аномальной проводимости в областях, где столкновительный механизм диффузии электронов подавлен. Она возникает преимущественно тогда, когда циклотронный радиус электрона много меньше размера области, занимаемой разрядом (т.е. в гидродинамическом режиме). В условиях, когда эта область максимально сжата (в двигателях с анодным слоем – ДАС) и имеет размеры, близкие к электронному циклотронному радиусу, азимутальная неустойчивость не является необходимым механизмом замыкания электронного тока. Поэтому, для объяснения физики таких разрядов, необходимо искать решение с классической проводимостью.

Кроме того, недостаточно изучено поведение азимутального тока во время различных нестационарных процессов и его влияние на устойчивость разряда. Даже малое его изменение может перевести разряд из стационарного режима в нестационарный. Недостаточно изучен процесс зажигания разряда. Многочисленные экспериментальные исследования касаются в основном СПД, данных о горении разряда в ДАС мало, несмотря на то, что он в перспективе может обладать большим КПД за счёт отсутствия стока тепла на стенки канала. В связи с этим представляется актуальной задачей всестороннее экспериментальное исследование нестационарных процессов горения разряда в ДАС, особенно тех, в которых происходит наиболее сильная модуляция токов; определение областей параметров, в которых они появляются; их математическое моделирование и определение условий существования стабильной формы разряда.

Существует множество гидродинамических, кинетических и гибридных моделей интенсивного разряда в скрещённых полях, однако, ни в одной из них не учитывается влияние собственного магнитного поля азимутального тока на динамику разряда. Кроме того, именно за счёт искажения внешнего магнитного поля собственным магнитным полем азимутального тока происходит передача реактивного импульса ионов на корпус магнитопровода. Следовательно, не учитывающие собственное магнитное поле модели не могут считаться в полной мере самосогласованными, и разработка самосогласованной модели интенсивного разряда в скрещённых полях так же является актуальной задачей. Имеет смысл создание физически адекватной модели интенсивного разряда с классической проводимостью в коротком канале и поиск условий стабильного существования такой конфигурации разряда.

В процессе работы над диссертацией автор экспериментально исследовал процесс зажигания разряда. Впервые показал, что параметром, определяющим величину выброса анодного тока, является ток эмиссии с катода компенсатора. Причём, независимо от того, быстро или медленно происходит зажигание разряда, количество заряженных частиц, участвующих в импульсе тока, остаётся практически постоянным.

Экспериментально исследовал область существования ускорительного режима в координатах магнитного поля и разрядного напряжения при различных расходах газа. Показал, 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. Ещё большее увеличение магнитного поля приводит разряд в метастабильное состояние, характеризующееся тем, что ограниченные промежутки времени разряд горит в нормальном режиме, хаотически переключаясь в режим с резким увеличением тока, подобный тому, который происходит при зажигании. Параметрические кривые напряжение-магнитное поле, определяющие границы режимов, подобны кривым постоянного размагничивания. Впервые для ДАС провел бесконтактное измерение переменной составляющей азимутального тока. Показал, что низкочастотные колебания анодного тока сопровождаются колебаниями азимутального тока, причём максимум анодного тока сопровождается резким минимумом сигнала азимутального тока. Это связано с периодическим смещением положения центра масс азимутального тока. Разработал полностью кинетическую, нестационарную, численную модель газового разряда в скрещённых полях с неявной схемой решения уравнений движения в одномерном по координатам и трёхмерном по скоростям приближении, в которой впервые учтён эффект размагничивания плазмы собственным магнитным полем замкнутого

азимутального тока в нестационарной постановке (с классической проводимостью). С помощью этой модели провел большое количество численных экспериментов и показал, что в процессе зажигания разряда и перехода его в установившийся режим, определяющую роль играет размагничивание плазмы собственным полем азимутального тока. В момент зажигания азимутальный ток значительно ослабляет приложенное магнитное поле, формируется катодный слой. Но разряд быстро угасает, так как частота ионизации в нём превышает частоту поступления нейтрального газа. Показал, что при определённом магнитном поле в коротком канале существует стационарный режим горения разряда в режиме Н-слоя. Стационарный режим существует, когда частота ионизации меньше или равна частоте поступления газа и отсутствует накопление заряда. Показал, что в области малых магнитных полей разряд неустойчив к спонтанному увеличению азимутального тока и сильному размагничиванию. Это приводит к резкому возрастанию частоты ионизации (возникает положительная обратная связь) и переходу разряда в импульсный режим. В области больших магнитных полей разряд неустойчив к накоплению избыточного отрицательного пространственного заряда, что приводит к ионизационным колебаниям. Рассчитанные осциллограммы разрядных токов качественно согласуются как с экспериментом, так и с предшествующими численными моделями.

Автору принадлежит основная роль в получении экспериментальных результатов и написании расчётного кода. Все результаты, составляющие научную новизну диссертации и выносимые на защиту, достаточно полно представлены в опубликованных работах, оригинальны и получены автором лично.

При выполнении данной диссертации автор проявил себя сформировавшимся, высококвалифицированным физиком-исследователем, способным самостоятельно ставить и решать сложные экспериментальные и теоретические задачи.

Данная научная работа является результатом большого объема экспериментальных и теоретических исследований, выполненных на высоком научном уровне, а её автор достоин присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Научный руководитель:

Генеральный директор ВЭИ, д.ф.-м.н.

КоваленкЮ.А.

Подпись Ю.А.Коваленко заверяю:

Первый заместитель генерального директора ВЭИ

Кудрявцев И.Е.

