

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертацию Хмелевского Ивана Александровича
«Физические особенности двух устойчивых режимов разряда
холловского двигателя»,

представленную к защите на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук по специальности
01.04.08 – Физика плазмы.

В диссертации изучаются два устойчивых режима горения разряда холловского двигателя (ХД), между которыми могут происходить скачкообразные перестроения режима горения разряда при малом изменении входных параметров. Исследование проведено на двух моделях холловских двигателей гибридной схемы с разными средними диаметрами разрядного канала. Упомянутым устойчивым режимам в работе присвоены названия «спица» и «колокол» из-за характерного внешнего вида плазменной струи. При этом по совокупности выходных параметров режим «спица» является для ХД гибридной схемы предпочтительным, в то время как длительная работа в режиме «колокол» невозможна: при перестроении из режима «спица» в режим «колокол» увеличивается ток разряда, снижается тяговая эффективность, увеличивается температура конструктивных элементов. Возможность перестроения разряда в нежелательный режим снижает выходные параметры ХД и препятствует построению обоснованного прогноза длительности устойчивой работы ХД при эксплуатации в составе космических аппаратов. В настоящее время отсутствует физическая модель различных режимов горения разряда ХД и перестроения между ними. Диссертация посвящена исследованию физической картины названных перестроений и электронных дрейфовых волн в разрядном канале холловского двигателя как возможной их причины. Полученные результаты позволяют дать физическое обоснование выбора режимов работы и режимов горения разряда в двигателе, что определяет **актуальность** темы диссертации.

В первой части диссертации приводятся результаты огневых параметрических испытаний. Для двух лабораторных моделей холловских двигателей гибридной схемы со средним диаметром разрядного канала 60 мм и 77 мм в режимах горения «спица» и «колокол» измерены ток разряда, тяга, удельный импульс тяги, КПД двигателя. С помощью трехсеточного зонда была исследована величина тока ионов, истекающих из двигателя и показано, что доля электронного тока в режиме работы «колокол» значительно выше,

чем в режиме «спица» и сделан вывод о том, что это увеличение может быть связано с развитием неустойчивостей в плазме и их влиянием на перенос электронов поперек магнитного поля. В результате проведенного анализа полученных данных показано, что основным фактором, определяющим границу перехода от одного режима горения разряда ко второму является напряженность магнитного поля. Показано также, что при переходе от режима «спицы» к режиму «колокола» происходит смещение распределения потенциала в сторону анода и сужение зоны ускорения с основным падением потенциала. Таким образом, получена общая картина изменения распределений параметров плазмы в разряде, позволяющая, в частности заключить, что при таком изменении должны возрасти потери ионов и электронов на стенках. Это подтверждается полученными в работе увеличением температуры стенок и электронной составляющей разрядного тока, а также снижением тяги и тягового КПД на сопоставимых режимах работы двигателя.

Во второй части работы приводятся результаты экспериментального исследования спектров и амплитуд колебаний плавающего потенциала плазмы в разрядном канале. Измерения проводились с помощью набора ленгмюровских зондов и выполнен анализ задержек между сигналами для различных зондов, расположенных на разных расстояниях друг от друга в азимутальном направлении. На основании полученных результатов автором показано, что на режиме горения разряда «колокол» резко возрастает интенсивность колебаний в диапазоне частот 5-150 МГц и делается вывод о том, что исследуемые колебания по своим характеристикам соответствуют азимутальным электронным дрейфовым волнам, способным увеличить подвижность электронов поперек магнитного поля, что было обнаружено при проведении исследований, описанных в главе 1.

В заключительной части работы с помощью численного моделирования методом частиц в ячейках проводится исследование дисперсионных характеристик азимутальных волн в плазме холловского двигателя. Показано, что получаемые при моделировании плазменные волны по своим характеристикам сходны с волнами, исследованными в экспериментальной части работы, и что их дисперсионные характеристики подобны и имеют линейный характер. Это свидетельствует о том, что волны с различной частотой, распространяются в азимутальном направлении с одинаковой скоростью, сопоставимой со скоростью, близкой к скорости дрейфа электронов, создавая азимутальные электрические поля, синхронизированные с движением дрейфующих электронов. В свою очередь это создает предпосылки для повышенного перемещения электронов поперек магнитного поля под действием азимутальных электрических полей, создаваемых названными волнами.

На защиту автором работы выносятся следующие положения:

- выводы из результатов, полученных в ходе экспериментальных измерений интегральных параметров холловских двигателей, распределений локальных параметров плазмы в разрядном канале и параметров ионного потока в струе двигателя на различных режимах работы и горения разряда;
- выводы из результатов измерений и анализа параметров азимутальных волн в разрядном канале холловского двигателя при различных режимах горения разряда;
- выводы из результатов, полученных в ходе численного моделирования процессов в плазме холловского двигателя и азимутальных электронных дрейфовых волн.

Следует также отметить, что экспериментальная часть работы проведена ее автором достаточно последовательно и тщательно. **Достоверность и обоснованность** полученных результатов, защищаемых положений, выводов и рекомендаций определяется использованием апробированных средств измерений и методов их обработки и анализа, соответствием результатов определения интегральных параметров двигателя, полученных прямыми их измерениями и измерениями в струе, соответствием численной модели и методов расчета современному уровню моделирования процессов в ХД и соответствием полученных результатов результатам других авторов, полученных с использованием иных подходов к исследованию, аккуратным тестированием программ расчета.

Научная новизна результатов исследования распределений локальных параметров плазмы, а также характеристик колебаний в его разрядном канале и параметров ионных потоков в струе, состоит в том, что получена достаточно полная картина физических их отличий на режимах горения разряда со «спицей» и с «колоколом», которая проанализирована в работе и может анализироваться и изучаться в дальнейших исследованиях. Новизна исследования электронных дрейфовых волн состоит в том, что автором показана линейность дисперсионных их характеристик.

Практическая значимость полученных результатов определяется тем, что получено достаточное полное физическое обоснование выбора режима «спица» горения разряда в качестве предпочтительного режима для исследованных двигателей. Кроме того, введенные автором усовершенствования методики моделирования процессов в ХД могут быть использованы при проведении дальнейших исследований ХД.

Можно отметить следующие недостатки работы:

1. Первая экспериментальная часть сосредоточена исключительно на двух конкретных моделях холловского двигателя с гибридной схемой разрядного канала. В частности, не анализируется вопрос о справедливости полученных закономерностей по отношению к холловским двигателям с классической схемой разрядного канала.
- 2 При моделировании не учитывается взаимодействие плазмы со стенками разрядного канала, что кроме всего прочего не позволяет учесть процессы пристеночной проводимости и затрудняет сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными.

Однако указанные недостатки не снижают ценность работы и не ставят под сомнение полученные автором результаты.

Работа выполнена на высоком научном уровне и представляет собой законченное научно-квалификационное исследование, содержащее новые научные и полезные практические результаты. Диссертация Хмелевского Ивана Александровича «Физические особенности двух устойчивых режимов разряда холловского двигателя» соответствует требованиям, предъявляемым Положением о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова к диссертациям на соискание ученой степени кандидата-физико-математических наук. Автор рассмотренной диссертации Хмелевский Иван Александрович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – Физика плазмы.

Главный научный сотрудник НИИ прикладной механики и электродинамики Московского авиационного института (национального исследовательского университета)(НИИ ПМЭ МАИ), доктор технических наук,

Адрес: 125080, г. Москва, Ленинградское шоссе д.5, а/я 43,

адрес электронной почты: riame4@sokol.ru

Подпись В.П.Кима «удостоверяю»

Начальник отдела кадров НИИПМЭ МАИ



В.П. Ким

О.М. Могоулкина