

ОТЗЫВ

официального оппонента

о диссертации ФРОЛОВОЙ Юлии Леонидовны

«Влияние давления остаточной атмосферы вакуумной камеры на расходимость струи стационарного плазменного двигателя», представленную в диссертационный совет № Д212.125.08, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергетические установки летательных аппаратов.

Диссертационная работа Фроловой Юлии Леонидовны посвящена решению актуальной научной проблемы обеспечения устойчивого функционирования космического аппарата (КА) с электроракетной двигательной установкой (ЭРДУ) на борту в течении всего срока активного существования (САС) КА. Ранее установлено, что при работе ЭРД генерируются не только высокоскоростные остронаправленные потоки плазмы, но и большое количество сравнительно медленных ионов, которые разлетаются в широком диапазоне углов. Эти периферийные потоки могут оказывать негативное влияние на бортовые системы, на материалы внешних поверхностей, вызывать их распыление, эрозию, загрязнение. Эти эффекты в результате могут привести к снижению эффективности работы КА и сокращению его САС. В диссертации оценены эффекты влияния давления среды, в которую происходит истечение плазменной струи ЭРД, на плотность периферийных потоков. **Актуальность** диссертационной работы Фроловой Ю.Л. становится более очевидной, если учесть, что на современном этапе развития космических систем применение ЭРД рассматривается необходимой опцией не только для геостационарных спутников (где такие двигатели практически безальтернативны), но и для низкоорбитальных КА, в том числе и для многоспутниковых низкоорбитальных систем. В этих условиях двигатель априори будет работать в условиях сравнительно высокого фонового давления. Поэтому методический аппарат для оценки негативных эффектов не только актуален, но имеет и высокую **практическую значимость**

Отдел документационного
обеспечения МАИ

«07» / 12 / 2020

Цель исследований соискатель формулирует как состоящую в разработке «методики переноса результатов измерений параметров плазменной струи СПД, полученных в стендовых условиях, на условия натурной эксплуатации».

Для достижения цели соискатель решает следующие задачи:

- Разработать программу и методику измерений параметров плазменной струи высокоимпульсного СПД, получить экспериментальные данные об угловом и энергетическом распределении ионов струи в различных условиях.
- Провести обработку и анализ полученных данных, выявить закономерности изменений параметров струи в зависимости от давления в вакуумной камере, расстояния от двигателя и других условий эксперимента.
- На основании выявленных закономерностей разработать методику переноса результатов измерений параметров струи, полученных в стендовых условиях, на условия натурной эксплуатации. Определить параметры струи высокоимпульсного СПД для условий натурной эксплуатации.
- Разработать рекомендации по порядку проведения измерений параметров плазменных струй СПД для получения данных в объеме, достаточном для последующей экстраполяции на условия натурной эксплуатации.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, показана новизна исследования и практическая значимость работы, отражен личный вклад автора в выполнение экспериментальных исследований и получение результатов диссертации, представлены результаты апробирования материалов диссертации на научных конференциях и семинарах.

Первая глава написана на основе собственного анализа автора ранее выполненных исследований в части оценки влияния давления в вакуумной камере на параметры струи СПД. Показано, что существующие модели струи СПД строятся по результатам измерений в вакуумной камере. При этом в результате влияния стенок вакуумной камеры и воздействия фонового давления на процессы формирования и распространения плазменной струи возникают значительные ошибки измерений, которые не в полном объеме учитываются в существующих моделях. Приводится анализ существующих математических моделей разлета

плазменной струи СПД, методов измерения давления в вакуумной камере и результатов измерения параметров струи в зависимости от давления в вакуумной камере. На основе анализа сделаны выводы, в частности показано, что существует некий парадокс, влияющий на «доверие» к используемым моделям струи: модель струи строится по результатам измерений в вакуумной камере, при этом в результате влияния стенок вакуумной камеры и воздействия фонового давления на процессы формирования и распространения плазменной струи возникают значительные ошибки измерения. Поэтому расчеты воздействия плазменной струи на КА, выполненные с помощью таких моделей, могут приводить к сильно завышенным/заниженным значениям параметров взаимодействия, что ухудшает эксплуатационные характеристики КА, а в некоторых случаях исключает возможность реализации той или иной компоновки. В связи с этим одной из задач исследования диссертант видит в повышении точности модели струи СПД и, как следствие, повышение точности расчетов воздействия плазменной струи СПД на КА.

Вторая глава посвящена описанию постановки экспериментальных работ, используемого оборудования и результатов измерений. Автор сформулировал основные технические задачи исследования струи холловского двигателя следующим образом:

- восстановление истинного значения плотности ионного тока по измеренному току коллектора;
- получение экстраполяции параметров струи в область остаточного давления, соответствующего условиям работы двигателя на орбите.

Исследования проводились в двух организациях – АО «ИСС» имени академика М. Ф. Решетнёва» и ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», регулярно занимающихся исследованиями параметров струи и имеющих для этого аттестованную экспериментальную базу и сертифицированное оборудование. В интересах диссертационной работы в этих экспериментах была применена методика измерений, разработанная соискателем. Учет влияния остаточной атмосферы в вакуумной камере на работу самого двигателя и на ионный поток в струе применен дифференциальный метод, измеряя непосредственно динамику интегральных характеристик двигателя при изменении давления в камере и зависимость тока на

зонд, изменяя расстояние до двигателя. В ходе экспериментальных исследований был получен массив данных в диапазоне давлений от 1,1 до 4,3 мПа (по ксенону) с шагом 1,1 мПа. Полученные данные автор использовал для последующего построения моделей струй, реализуемых при различных условиях испытаний.

В третьей главе приводится анализ результатов измерений относительно таких параметров струи, как плотность потока, энергия ионов, расходимость потока. На основании анализа полученных экспериментальных данных установлено, что

1. С увеличением давления происходит уменьшение угла расходимости струи и увеличение плотности ионного тока на оси струи.
2. Энергетический состав ионов струи при изменении давления меняется незначительно.
3. По мере удаления от двигателя угол расходимости увеличивается, а средняя энергия ионов струи уменьшается.
4. Угол расходимости струи в камере АО ИСС значительно выше, чем в камере ИЦК.
5. Средняя энергия ионов струи в камере АО ИСС значительно ниже, чем в камере ИЦК. Энергетические спектры ионов струи в этих двух камерах значительно отличаются.
6. Плотность тока ионов на оси струи в обеих камерах примерно совпадает.

Таким образом, автор делает вывод, что давление в камере оказывает существенное влияние на параметры струи СПД в связи с чем, для определения параметров струи, реализуемой в космосе, необходимо применять процедуру экстраполяции. Кроме этого, экспериментальные данные показывают, размеры вакуумной камеры, применяемые для измерений зонды-энергоанализаторы и СПУ двигателя могут оказывать значительное влияние на параметры струи.

На основе большого количества экспериментальных данных соискателем выведены 17 эмпирических зависимостей параметров струи от давления в камере и расстояния от двигателя.

В четвертой главе приводятся результаты анализа влияния давления в вакуумной камере на параметры плазменной струи высокоимпульсного СПД.

Анализ был проведен по 17 моделям струи, построенным по результатам стендовых измерений. На основании анализа установлено следующее: с увеличением давления в диапазоне от 0 (натурные условия) до 4 мПа происходит уменьшение угла расходимости струи на 20-25°, увеличение плотности ионного тока на оси струи в 2-3 раза и уменьшение плотности тока в периферийной зоне струи в 10-100 раз. Энергетический состав струи не чувствителен к величине давления в камере.

Автор обосновал необходимость применения методики экстраполяции для оценки параметров струи, генерируемой на орбите, по результатам измерений этих параметров в вакуумной камере.

В пятой главе представлена методика экстраполяции параметров струи на условия натурной эксплуатации. Для повышения точности и достоверности результатов экстраполяции из исходных тормозных характеристик были исключены ионы перезарядки. Выводы, полученные автором на основе применения методики экстраполяции, а именно, что влияние давления на центральную часть струи незначительно, совпадают с ранее проведенными работами и с результатами экспериментальных исследований. Вместе с тем изменения плотности тока ионов на оси струи не сказываются на результатах прогнозирования воздействия струи на КА, поскольку нахождение элементов конструкции КА в ядре струи исключено. Изменения же в периферийной зоне могут существенно повлиять на результаты прогнозирования, поэтому применение процедуры экстраполяции является необходимым условием получения высокой точности расчетов и гарантированных оценок воздействия СПД на КА. В заключительной части главы представлены рекомендации по методике измерения параметров струи в условиях стенда, позволяющие получить данные, необходимые для получения достоверных оценок параметров плазменной струи СПД в условиях натурной эксплуатации

В заключении обобщены основные результаты проведенных исследований.

Практическая значимость работы заключается в том, что результаты, полученные Ю.Л. Фроловой, могут быть использованы в ходе проектирования облика КА с ЭРДУ и при наземной отработке электроракетных двигателей. Разработанная методика позволяет на этапе экспериментальной отработки новых моделей ЭРД дать прогноз достаточно высокой точности эксплуатационных

характеристик ЭРД на орбите в течение всего САС КА. Кроме этого, с применением разработанной методики можно оценить возможные негативные эффекты работы ЭРД за счет воздействий периферийной части плазменной струи на бортовые системы КА и материалы внешних покрытий.

Проведенные исследования являются **новыми**, а результаты, выносимые автором на защиту, впервые получены лично автором и **новизна** их также не вызывает сомнений. В частности, соискателем впервые:

- на основе обширного экспериментального материала выявлены закономерности изменения угла расходимости, углового и энергетического распределений потоков ионов струи высокоимпульсного СПД при изменении давления в вакуумной камере и расстояния от двигателя.

- разработана методика переноса результатов наземных измерений параметров струи СПД на условия натурной эксплуатации, в которой учитывается ослабление потока ионов в вакуумной камере и исключены индуцированные ионы перезарядки из тормозных характеристик зондов-энергоанализаторов.

Достоверность полученных автором положений, выводов и заключений, обеспечивается обоснованностью принятых допущений в математических моделях и экспериментальных измерениях; применением современных методов измерений и математической обработки их результатов, а также совпадением с ранее полученными другими методами экспериментальными результатами.

Достоверность научных результатов исследования подтверждена применением современной и проверенной аппаратной базы, апробированных методик измерения, а также многократной проверкой полученных результатов с использованием различных способов и измерительных приборов.

Научный уровень полученных в диссертации результатов экспериментальных исследований влияния давления остаточной атмосферы вакуумной камеры на расходимость струи стационарного плазменного двигателя и разработанной на их основе методики переноса результатов наземных измерений параметров струи СПД на условия натурной эксплуатации достаточно высокий.

В целом, диссертация оставляет хорошее впечатление. Результаты прошли **апробацию** на международных научных конференциях, **опубликованы** в 5ти работах: в том числе 3 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Вместе с тем, на мой взгляд, в представленной диссертационной работе можно отметить ряд недостатков:

1. При описании многофракционной модели струи не учтен вклад многозарядных ионов, хотя в ранее выполненных работах было показано, что вклад двух- и трехзарядных ионов может достигать до 10%.
2. Автор справедливо утверждает, что ионы с промежуточными энергиями являются ионами струи (а не фонового газа), но в качестве механизма их образования не рассмотрела ранее установленный факт, что энергия ионов зависит от «точки» их образования в ускорительном канале. «Размытость» энергетического спектра ионов является характерной чертой СПД, имеющих достаточно протяженную зону ионизации.

Тем не менее, перечисленные выше замечания имеют рекомендательный характер и не сказываются на общей оценке качества работы. Принципиальных замечаний по существу работы нет.

Рассматриваемая диссертация представляет собой законченный, выполненный на высоком уровне научный труд, содержит результаты, обладающие научной новизной и практической значимостью. Выводы достоверны и основаны на большом фактическом материале. Все основные защищаемые положения отражены в публикациях. Работа в целом и библиография, в частности, свидетельствуют о широком научном кругозоре и высоком уровне компетентности автора в рассматриваемой предметной области.

Автореферат соответствует основному содержанию диссертации. Выводы по диссертации соответствуют выводам, опубликованным в автореферате. Содержание диссертации Ю.Л. Фроловой соответствует специальности 05.07.05 «Тепловые, электроракетные двигатели и энергетические установки летательных аппаратов» (технические науки): диссертационная работа посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию влияния давления фонового газа на основные характеристики электроракетного двигателя и его выхлопной плазменной струи, а также разработке методики переноса результатов наземных измерений параметров струи СПД на условия натурной эксплуатации. Отраженные в диссертации научные положения соответствуют области исследования специальности 05.07.05.

Считаю, что диссертационная работа Фроловой Юлии Леонидовны представляет собой законченную научно-квалификационную работу, отвечающую требованиям п.9 «Положения о порядке присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор – ФРОЛОВА ЮЛИЯ ЛЕОНИДОВНА - заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 «Тепловые, электроракетные двигатели и энергетические установки летательных аппаратов» (технические науки).

Официальный оппонент

Твердохлебова Екатерина Михайловна

Заместитель начальника Центра автоматических космических систем и комплексов Акционерного общества «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения»,

кандидат технических наук

(140070, г. Королев, Московской обл.,

ул. Пионерская, 4.

раб. тел.: 8(495) 513-59-23.

e-mail: tverdohlebovaem@tsniimash.ru)

Е.М. Твердохлебова
01.12.20

Е.М. Твердохлебова

Подпись Твердохлебовой Екатерины Михайловны заверяю

Главный ученый секретарь Акционерного общества «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения»,

доктор технических наук,

профессор



Ю.Н.Смагин

С отзывами ознакомлена 09.12.20

Ю.Н. Смагин