

# ДВИГАТЕЛИ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

---

УДК 533.9.07

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЦИОНАРНОГО ПЛАЗМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА РЕЖИМАХ РАБОТЫ С ВЫСОКИМИ РАЗРЯДНЫМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ

Ким В.П., Грдличко Д.П., Меркурьев Д.В., Смирнов П.Г., Шилов Е.А.

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия  
e-mail: riame4@sokol.ru*

---

Приведены результаты исследования интегральных характеристик лабораторных моделей стационарных плазменных двигателей типа СПД-100ПМ и типа СПД-140ПМ с наружными диаметрами ускорительного канала соответственно 100 мм и 140 мм, модифицированных для работы с высокими разрядными напряжениями. Показана возможность снижения отрицательного влияния уменьшения расхода рабочего вещества через ускорительный канал при увеличении разрядного напряжения на тяговые характеристики за счет уменьшения ширины ускорительного канала и оптимизации магнитного поля, а также возможность получения в модели типа СПД-140ПМ эффективных скоростей истечения истекающего из него потока или «анодных» удельных импульсов тяги двигателя до 40 км/с на режимах работы с разрядной мощностью не более 5 кВт и разрядными напряжениями до 1400 В.

*Ключевые слова:* стационарный плазменный двигатель, модифицированная лабораторная модель, режимы работы, мощность разряда, высокие разрядные напряжения, эффективная скорость истечения, удельный импульс тяги.

---

### Введение

Стационарные плазменные двигатели (СПД) Морозова успешно используются в системах коррекции орбит как отечественных, так и зарубежных космических аппаратов (КА). При этом разработки СПД в СССР находились на самом высоком уровне, и высокий уровень этих работ сохраняется в России. Подтверждением этого является то, что отечественные СПД разработки опытного конструкторского бюро (ОКБ) «Факел» экспортируются за рубеж и используются в составе ряда иностран-

ных КА. Вместе с тем существующие серийные двигатели этого типа обеспечивают эффективные скорости истечения рабочего тела из них не более 16 км/с. А для современных геостационарных КА со сроком активного существования до 15–17 лет необходимы удельные импульсы тяги до 25–30 км/с. Поэтому актуальной является задача повышения удельного импульса тяги СПД. С учетом изложенного, исследование и разработка СПД с повышенными удельными импульсами тяги и разработка летных образцов таких двигателей ведутся как в

России, так и за рубежом. Такие исследования уже многие годы проводятся и в НИИПМЭ МАИ. Результаты этих исследований были опубликованы ранее в ряде работ и обобщены в работе [1]. В данной статье приводятся новые результаты этих исследований, полученные в последние годы.

### **1. Состояние разработки стационарных плазменных двигателей с повышенными удельными импульсами тяги**

Как уже отмечалось, в России и за рубежом ведутся разработки СПД с повышенными удельными импульсами тяги. Так, в США разработан и применяется СПД типа ВРТ-4000 с удельным импульсом тяги до 20 км/с [2]. В исследовательском центре имени М.В. Келдыша (далее «Центр Келдыша») разработан летный образец двигателя КМ-60 с удельным импульсом тяги 20 км/с [3]. В настоящее время в ОКБ «Факел», а также в центре Келдыша разрабатываются опытные образцы СПД с удельными импульсами тяги до 27,0—27,5 км/с [1, 3]. Однако даже после создания этих двигателей необходимо продолжение работ по повышению удельного импульса тяги СПД, поскольку для реализации полетов в дальний космос, а также для решения перспективных транспортных задач в космосе необходимы электроракетные двигатели с удельными импульсами тяги не менее 30 км/с.

К сказанному следует добавить, что наряду с СПД в настоящее время за рубежом широко используются ионные двигатели (ИД), обеспечивающие удельные импульсы тяги в диапазоне 25—45 км/с. Принципиальная схема и конструкция СПД существенно проще, чем у ИД. Поэтому электроракетные двигательные установки (ЭРДУ) на основе СПД по меньшей мере в несколько раз дешевле, чем ЭРДУ на основе ИД. С учетом изложенного, в США рассматривается замена ИД на СПД при решении ряда задач. Для такой замены необходимо повысить удельный импульс тяги СПД до значений, близких к удельному импульсу ИД, и повысить ресурс СПД до значений, характерных для ИД. В США начаты разработки СПД с удельным импульсом тяги 27—28 км/с и с ресурсом до 15000 ч [1,4]. Все сказанное подтверждает актуальность дальнейших исследований и разработки СПД с повышенными удельными импульсами тяги.

СПД является ускорителем ионов, в котором процесс ускорения осуществляется электрическим полем. Поэтому одним из наиболее простых способов повышения эффективной скорости истечения и удельного импульса тяги является увеличение разрядного напряжения. В предыдущих работах

НИИПМЭ МАИ были проведены исследования ряда лабораторных моделей СПД при разрядных напряжениях до 1000—1100В [1]. В результате было показано, что основной проблемой при повышении разрядного напряжения является необходимость уменьшения расхода рабочего тела (РТ), с тем чтобы сохранять плотность мощности на приемлемом для обеспечения большого ресурса двигателя уровне. Уменьшение расхода при одновременном увеличении разрядного напряжения приводит к тому, что снижаются плотность расхода через ускорительный канал и плотность плазмы в нем, увеличивается длина свободного пробега атомов до их ионизации и снижается коэффициент переработки потока атомов в ионы, возрастают толщина слоя ионизации и ускорения (СИУ) и протяженность зон эрозии, увеличиваются потери ионов и энергии на стенках разрядной камеры и скорость эрозии ее стенок. В результате всего изложенного снижается тяговый коэффициент полезного действия (КПД) и уменьшается ресурс двигателя [1].

Перечисленные эффекты усиливаются при значительном уширении выходной части ускорительного канала из-за износа стенок при длительной работе. Так, при разрядном напряжении 800 В и уширении ускорительного канала в зоне эрозии на угол порядка 45° на сторону снижается «анодный» (рассчитанный без учета расхода РТ в катод) тяговый КПД модели масштаба СПД-100 примерно с 50 до 40% и снижается «анодный» удельный импульс тяги с 29,5 км/с до 27,0—27,5 км/с, т.е. почти на 10%. В процессе последних работ в НИИПМЭ МАИ исследовались способы снижения отрицательного влияния названных эффектов на работу двигателя. Основные результаты исследований изложены в следующем разделе данной статьи.

### **2. Результаты новых исследований лабораторных моделей СПД с повышенными удельными импульсами тяги**

В качестве базовой для исследований была выбрана модель СПД-100П с магнитным экраном, размещенным внутри разрядной камеры (рис. 1).

Схема этого двигателя, предложенная в НИИПМЭ МАИ [5], позволяет более эффективно управлять магнитным полем в двигателе, а также обеспечивает высокую электрическую прочность конструкции, что важно для высокоимпульсного двигателя. В частности, она позволяет получать более высокие скорости нарастания магнитной индукции от анода к выходному сечению ускорительного канала (рис. 2).

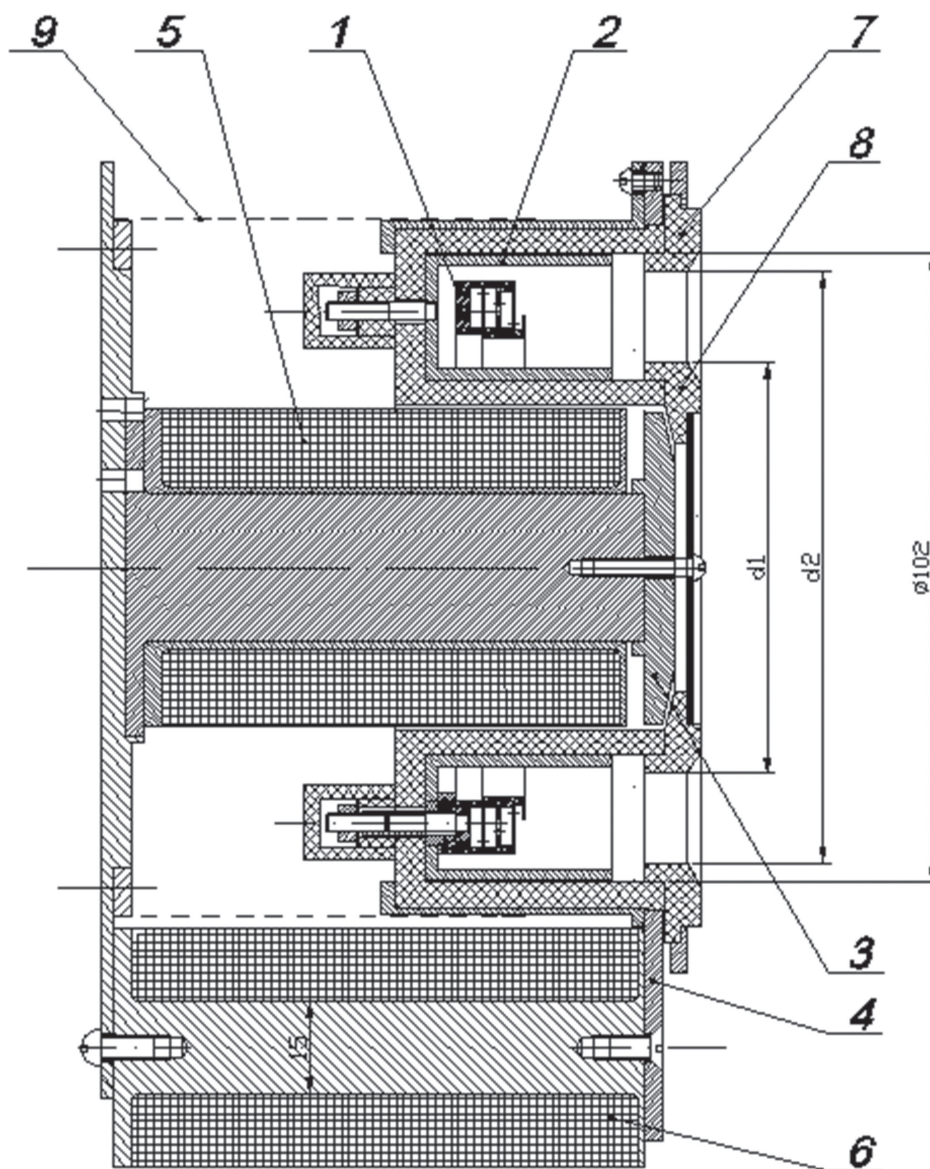


Рис. 1. Базовая конструктивная схема модели СПД-100П: 1 — анод-газораспределитель; 2 — магнитный экран; 3, 4 — магнитные полюса; 5, 6 — катушки намагничивания; 7, 8 — выходные кольца разрядной камеры; 9 — экранирующая сетка

Поскольку распределение индукции вдоль ускорительного канала контролирует положение и продольную протяженность СИУ [1], выбранная схема позволяет уменьшить продольную протяженность СИУ и управлять его положением.

Для уменьшения отрицательных последствий отмеченных выше факторов, проявляющихся при повышении разрядного напряжения, была осуществлена модернизация модели СПД-100П, а именно:

- была уменьшена ширина ускорительного канала, с тем чтобы повысить плотность потока РТ и концентрацию плазмы в нем и уменьшить протяженность СИУ;

- было подобрано такое соотношение размеров элементов магнитной системы, которое позволило

сузить распределение индукции магнитного поля и лучше согласовать его с ожидаемым сужением слоя в результате увеличения плотности расхода РТ в ускорительном канале, а также максимально выдвинуть СИУ и зоны эрозии стенок в выходном направлении за плоскость полюсов магнитной системы.

В результате была создана модель СПД-100ПМ и проведены следующие исследования:

- были определены ее интегральные характеристики при работе на ксеноне и при исходной (цилиндрической) геометрии разрядной камеры (далее «новая камера») и стабильность параметров модели в процессе первой контрольной наработки с общей длительностью 15 ч на режиме работы с разрядным напряжением 800 В и мощностью 2,0—2,1 кВт;

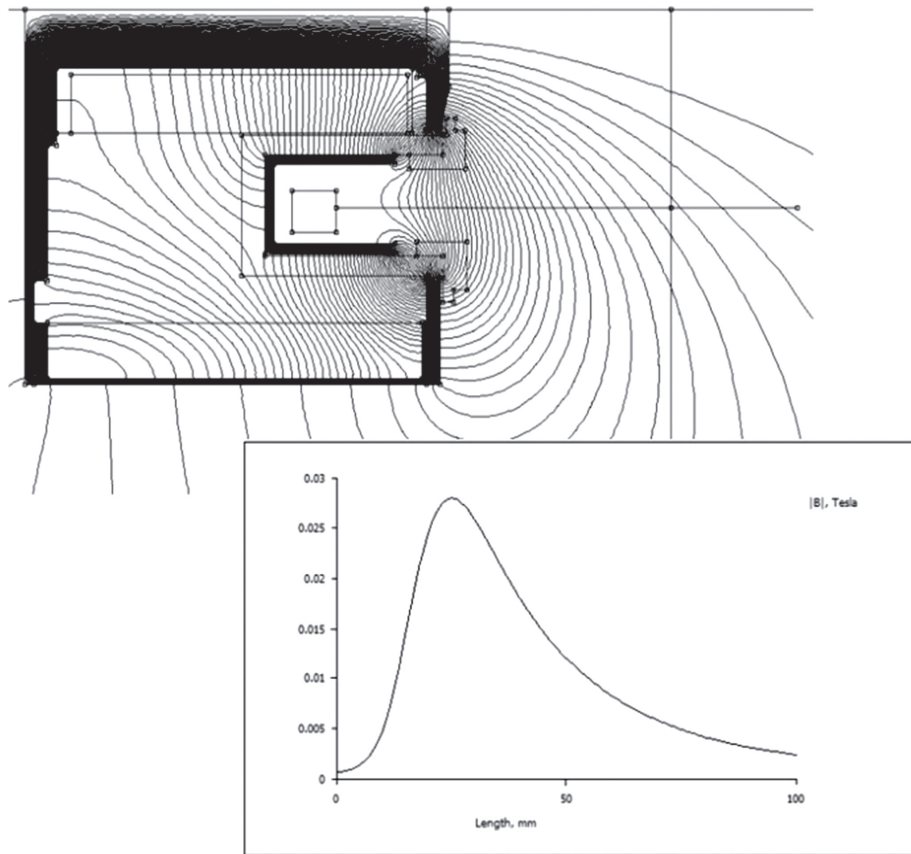


Рис. 2. Конфигурация силовых линий магнитного поля и распределение магнитной индукции вдоль срединной поверхности ускорительного канала при токе во внутренней катушке намагничивания 1,2 А и 1,5 А в наружных катушках

— были определены протяженности зон эрозии и профили стенок разрядной камеры после упомянутой первой контрольной наработки, осуществлено уширение ускорительного канала расточкой каждого из выходных колец разрядной камеры «на конус» в зонах эрозии на  $45^\circ$  (далее «расточенная камера») и определены параметры двигателя с расточенной камерой как сразу после расточки, так и после приработки с длительностью более 40 ч.

Профили стенок после их расточки в выходной части разрядной камеры представлены на рис. 3.

Следует сразу отметить, что получена меньшая протяженность зон эрозии в модели СПД-100ПМ, чем реализующаяся при длительной работе в двигателе СПД-100, работающем при разрядном напряжении 300 В, и примерно в 1,5 раза меньшая, чем в модели СПД-100П, работавшей на том же контрольном режиме с разрядным напряжением 800 В.

Характеристики модернизированной модели с «новой» разрядной камерой оказались достаточно высокими и близкими к лучшим характеристикам оптимизированных моделей других схем, и в том

числе модели СПД-100П (рис. 4–7). Характеристики модели с «расточенной» камерой сразу после расточки оказались несколько ниже характеристик с «новой» (с исходной геометрией) разрядной камерой, однако степень их снижения оказалась значительно меньше, чем в моделях других схем. Так, снижение тягового КПД при разрядных напряжениях порядка 800 В и выше получилось не больше 5–7% (см. рис. 7). Снижение удельного импульса тяги при расходах  $m_a$  через ускорительный канал менее 3 мг/с и разрядных напряжениях 800 В и выше оно составило не более 1,5 км/с, тогда как для модели типа СПД-100П и других моделей, работавших при разрядном напряжении 800 В и сопоставимой мощности разряда, оно составляло 2,0–2,5 км/с. Таким образом, в модели СПД-100ПМ в результате ее модернизации удалось значительно уменьшить рассмотренные выше отрицательные эффекты, связанные с расширением слоя ионизации и ускорения со всеми вытекающими из этого последствиями.

К сказанному следует добавить, что профили стенок после их искусственного механического

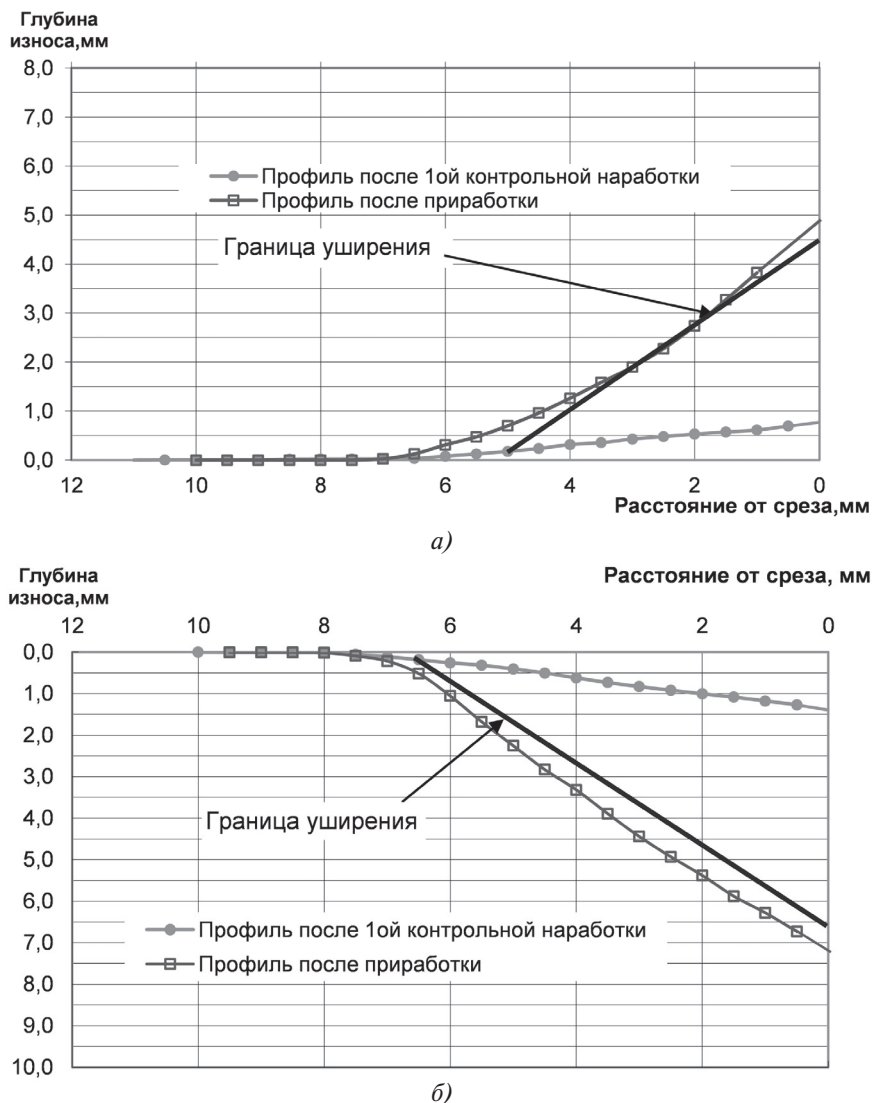


Рис. 3. Профили стенок выходной части разрядной камеры модели СПД-100ПМ после первой контрольной наработки и после приработки: а — наружная стенка; б — внутренняя стенка

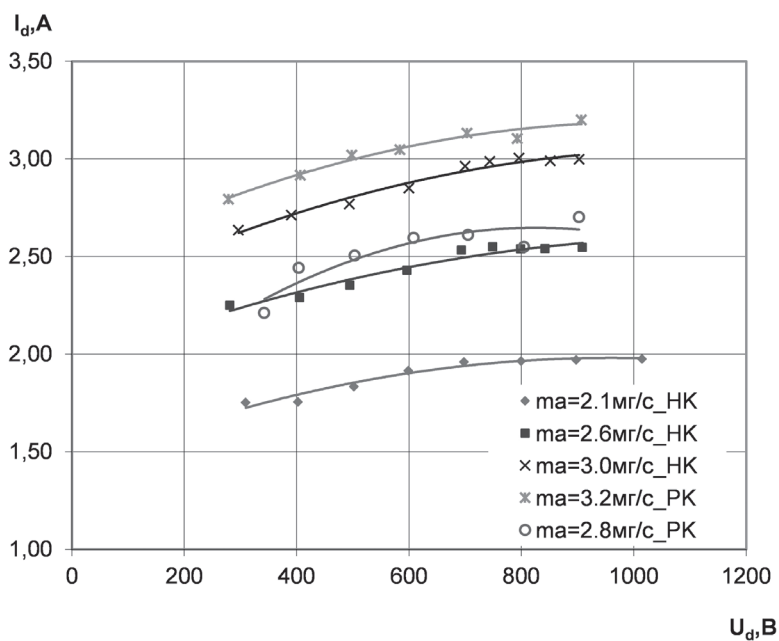


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики модели СПД-100ПМ с «новой» (НК) и расточенной (ПК) разрядной камерой

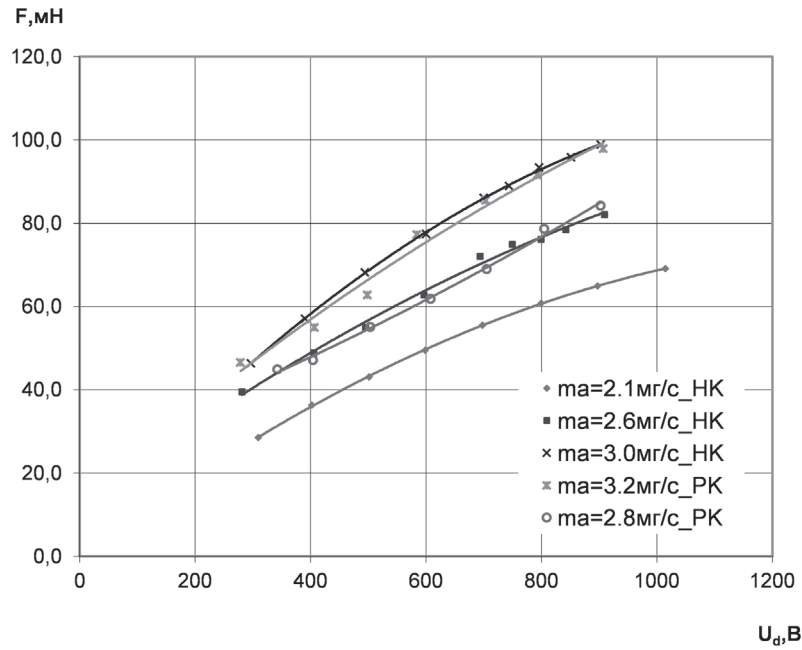


Рис. 5. Зависимость тяги модели СПД-100ПМ с «новой» (НК) и расточенной (ПК) разрядной камерой от разрядного напряжения

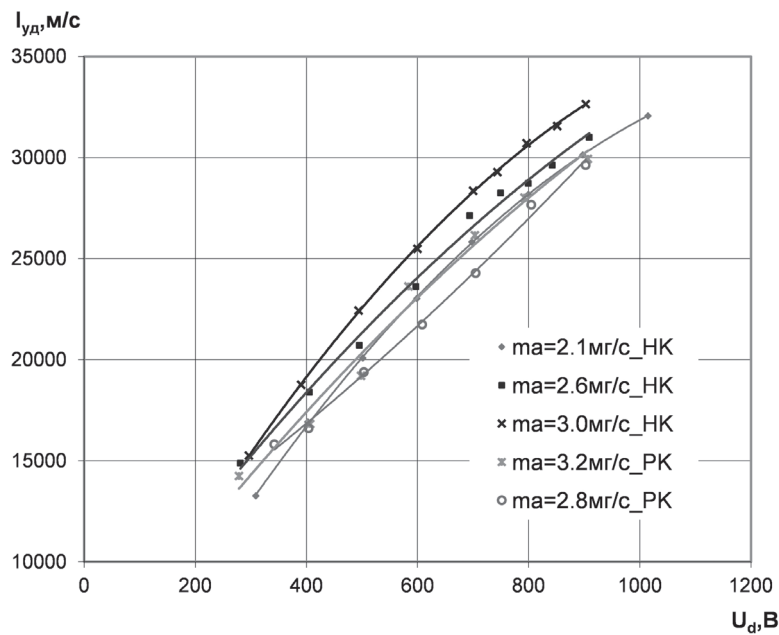


Рис. 6. Зависимость «анодного» удельного импульса тяги модели СПД-100ПМ с «новой» (НК) и расточенной (ПК) разрядной камерой от разрядного напряжения

уширения не соответствуют получающимся при длительной работе. Кроме того, параметры двигателя в процессе длительной работы колеблются в определенных пределах. Поэтому для сравнения лучше использовать усредненные значения параметров на достаточно большой временной базе. С учетом изложенного, как уже отмечалось, были проведены достаточно длительные контрольные наработки модели СПД-100ПМ на режиме с разрядным напряжением 800 В как до расточки стенок разрядной камеры, так и после нее.

Эти испытания как с «новой», так и с «расточенной» разрядной камерой были проведены при работе модели чередующимися циклами с разрядной мощностью 2,0–2,1 кВт и разрядной мощностью около 2,5 кВт при фиксированном разрядном напряжении 800 В. Изменение мощности осуществлялось изменением расхода ксенона через ускорительный канал, определяющего значение разрядного тока. При каждом значении расхода оптимизировались токи в катушках намагничивания по минимуму разрядного тока. Данные об изменении па-

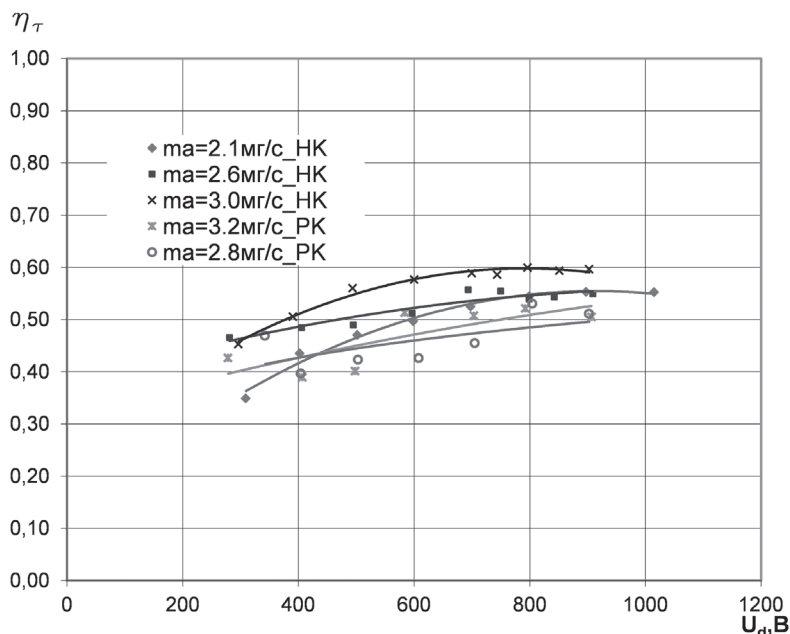


Рис. 7. Зависимость «анодного» тягового КПД модели СПД-100ПМ с «новой» (НК) и расточенной (РК) разрядной камерой от разрядного напряжения

раметров модели в процессе контрольных испытаний до и после расточки разрядной камеры приведены на рис. 8—13.

Как видно из приведенных данных, после расточки и приработки стенок разрядной камеры в течение примерно 20 ч уменьшились значения расхода через ускорительный канал, обеспечивающие сопоставимые значения разрядного тока, и средние значения тяги. При этом значения удельного импульса тяги после приработки вышли практически на тот же уровень, что был получен для «новой» разрядной камеры. Значения тягового КПД уменьшились на сопоставимых режимах работы примерно на 5%. В целом параметры модели СПД-100ПМ

после приработки расточенной разрядной камеры значительно меньше отличаются от исходных, чем параметры других моделей. Таким образом, показана возможность значительного снижения отрицательного влияния уширения РК при длительной работе на уровне тяговых параметров, по крайней мере на режиме работы с разрядным напряжением порядка 800 В и пониженным расходом ксенона через ускорительный канал, обеспечивающим получение «анодного» удельного импульса тяги порядка 28 км/с при уширенной РК и мощности разряда 2,0—2,1 кВт и порядка 30 км/с при мощности разряда 2,5 кВт.

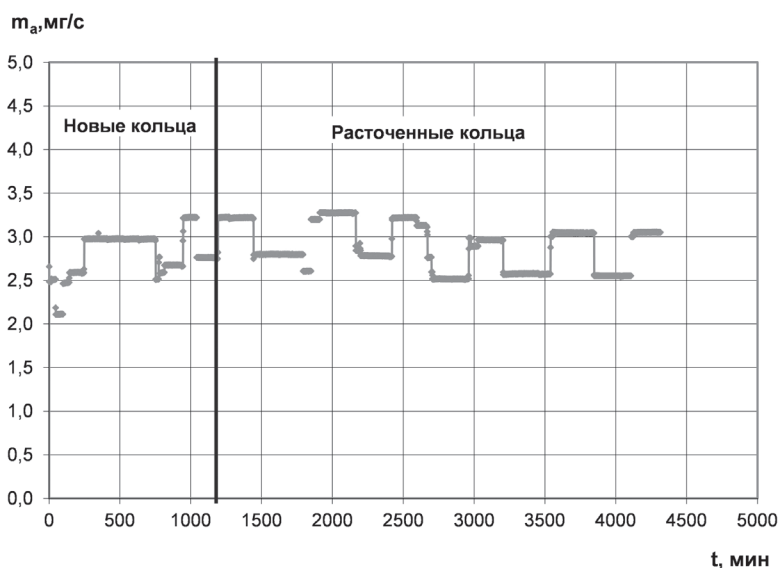


Рис. 8. Изменение расхода ксенона через анод в процессе контрольных испытаний модели СПД-100ПМ

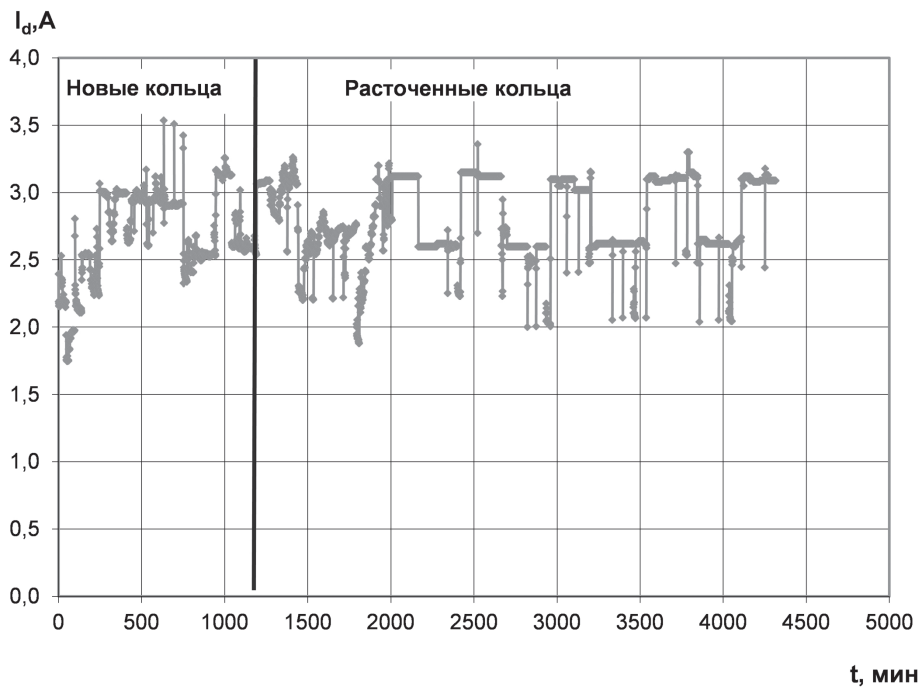


Рис. 9. Изменение разрядного тока в процессе контрольных испытаний модели СПД-100ПМ

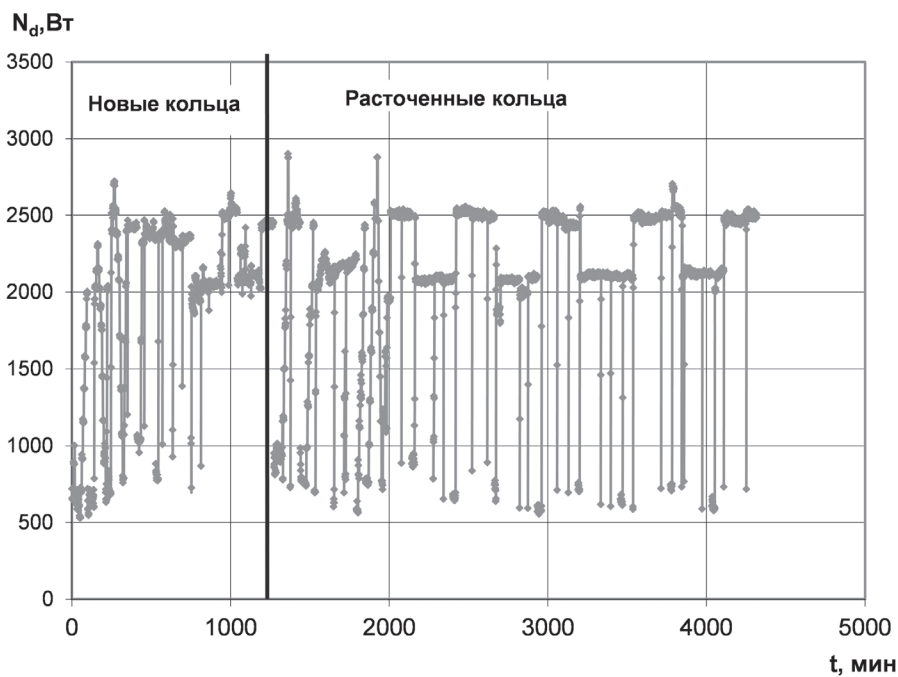


Рис. 10. Изменение мощности разряда в процессе контрольных испытаний модели СПД-100ПМ

Магнитный экран (МЭ) в модели выбранной схемы может быть выполнен изолированным от остальных элементов конструкции двигателя. Это позволяет реализовать различные схемы питания разряда в двигателе, а именно:

- при изолированном МЭ, «плавающем» в прианодной плазме;
- при МЭ, соединенном с анодом (в этом случае схема двигателя эквивалентна схеме с магнитным анодом [6]);

— при включении между анодом и МЭ дополнительного источника для реализации схемы питания, аналогичной двухступенчатой (рис. 14), при которой МЭ исполняет роль катода первой ступени;

— при МЭ, соединенном с анодом через достаточно большое сопротивление, когда экран находится под отрицательным потенциалом по отношению к аноду, но без использования источника питания разряда первой ступени.



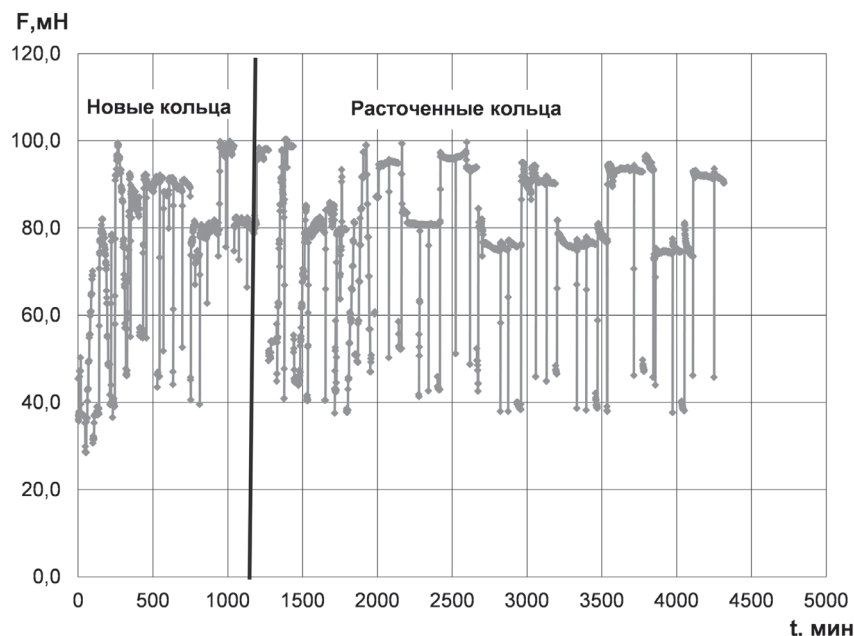


Рис. 11. Изменение тяги в процессе контрольных испытаний модели СПД-100ПМ

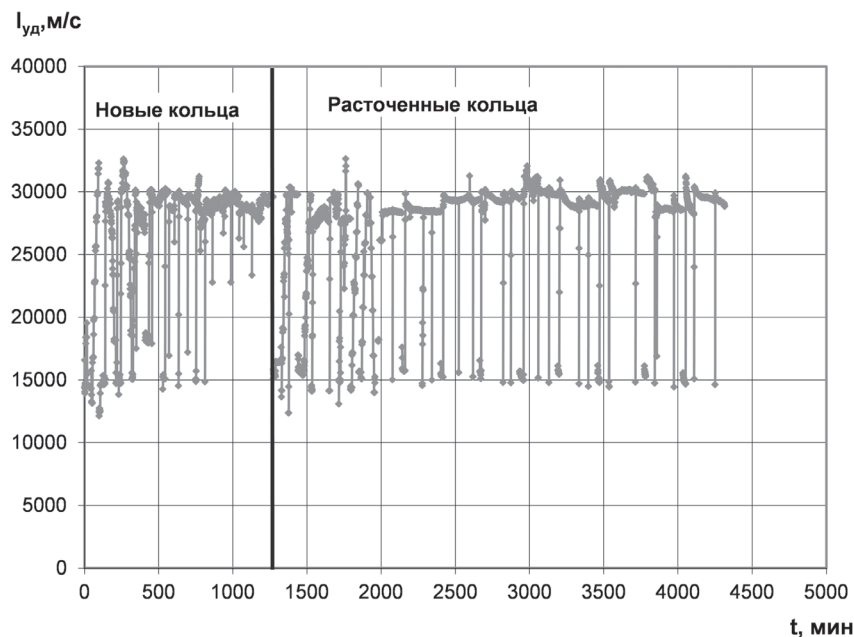


Рис. 12. Изменение «анодного» удельного импульса тяги в процессе контрольных испытаний модели СПД-100ПМ

Проведенное ранее исследование характеристик модели типа СПД-100П при представленных схемах питания разряда показало, что при высоких разрядных напряжениях наилучшие характеристики получаются при «двухступенчатой» схеме и отрицательных смещениях потенциала МЭ относительно анода на 50—100 В. При этом положительный эффект в области высоких разрядных напряжений достигается за счет уменьшения тока разряда при сохранении тяги. Это свидетельствует о том, что эффект достигается за счет уменьшения электронной составляющей разрядного тока и что отрицательно

смещенный экран позволяет контролировать перенос электронов поперек магнитного поля за счет снижения интенсивности их взаимодействия со стенками разрядной камеры. С учетом этого, а также приведенных выше результатов была осуществлена модернизация лабораторной модели типа СПД-140, аналогичная проведенной для модели СПД-100ПМ. В результате была создана модель СПД-140ПМ, которая была также испытана при различных схемах питания разряда в ней, но в расширенном диапазоне напряжений разряда. При этом смещение потенциала МЭ поддерживалось

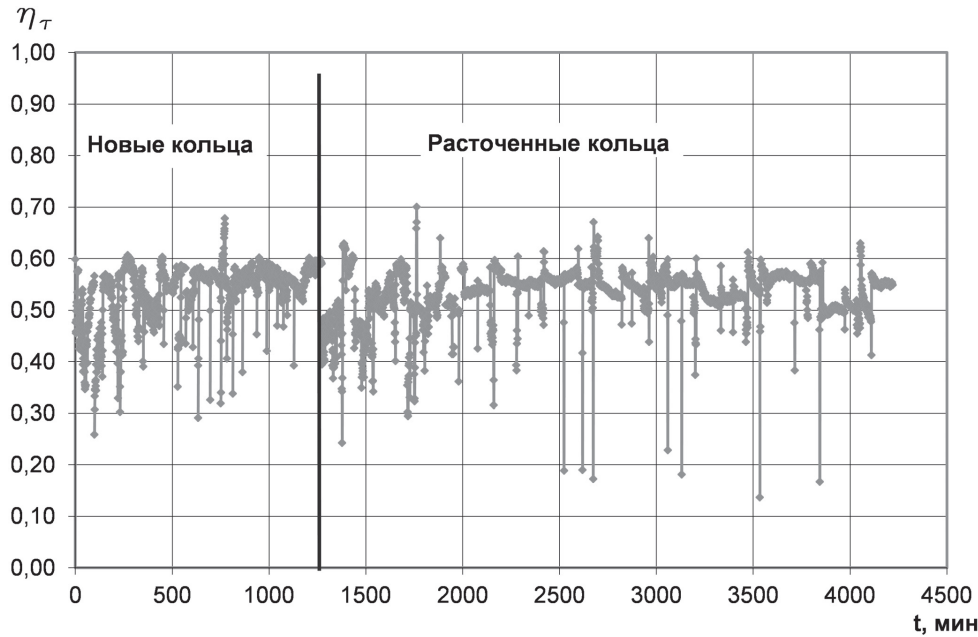


Рис. 13. Изменение «анодного» тягового КПД в процессе контрольных испытаний модели СПД-100ПМ

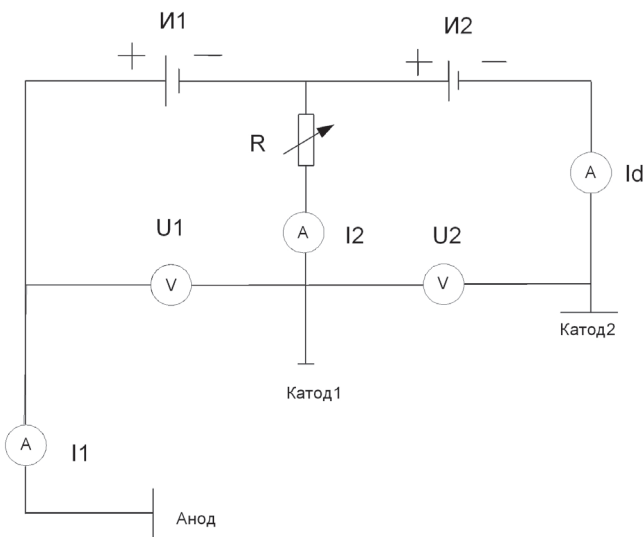


Рис. 14. Двухступенчатая схема питания разряда

равным 70 В относительно потенциала анода, а ток в цепи МЭ не превышал 0,1 А. Полученные при этом результаты приведены на рис. 15—18.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что, как и в случае модели СПД-100П, наилучшие характеристики модели СПД-140ПМ получаются при двухступенчатой схеме питания разряда за счет того, что удается получить меньшие значения разрядного тока и мощности разряда при сохранении тяги. Видно также, что при расходах ксенона через ускорительный канал 3,5 мг/с и больше удается получить и достаточно высокий уровень тягового КПД модели (рис. 19) даже при суммарных напряжениях на разряде больше 1300 В. Таким образом, принятые меры позволили существенно смягчить

отрицательные эффекты, связанные с уменьшением расхода через ускорительный канал при высоких напряжениях.

### 3. Краткий анализ полученных результатов.

Одним из интересных в физическом плане результатов является то, что наилучшие результаты при повышенных разрядных напряжениях получаются при двухступенчатой схеме питания разряда. Поскольку значения тока в цепи МЭ не превышали 3% от тока разряда во второй ступени, это свидетельствует о том, что полезный эффект от работы первой ступени сводится не к повышению эффективности ионизации потока РТ, как это предполагается при организации двухступенчатого разряда, а к уменьшению электронной проводимости поперек магнитного поля в прианодной зоне за счет реализации отрицательного смещения потенциала стенок и уменьшения интенсивности взаимодействия электронов со стенками.

Что касается названных достижимых значений удельного импульса тяги, то они характеризуют предельные возможности разработанной модели СПД-140ПМ на настоящее время. Реальные значения удельного импульса тяги должны быть определены после выбора номинального режима работы двигателя, позволяющего получить приемлемый для длительной работы тепловой режим элементов его конструкции и достаточно большой ресурс двигателя. Судя по тому, что при суммарных разрядных напряжениях около 1200 В после работы в течение 1 ч не было заметного перегрева стенок РК, в качестве искомого может быть выбран режим с

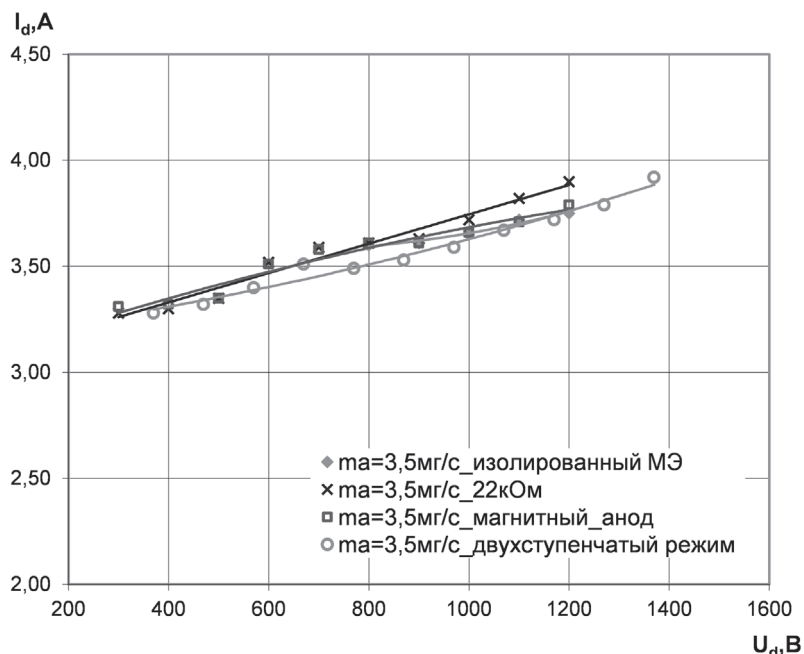


Рис. 15. Вольт-амперная характеристика модели СПД-140ПМ

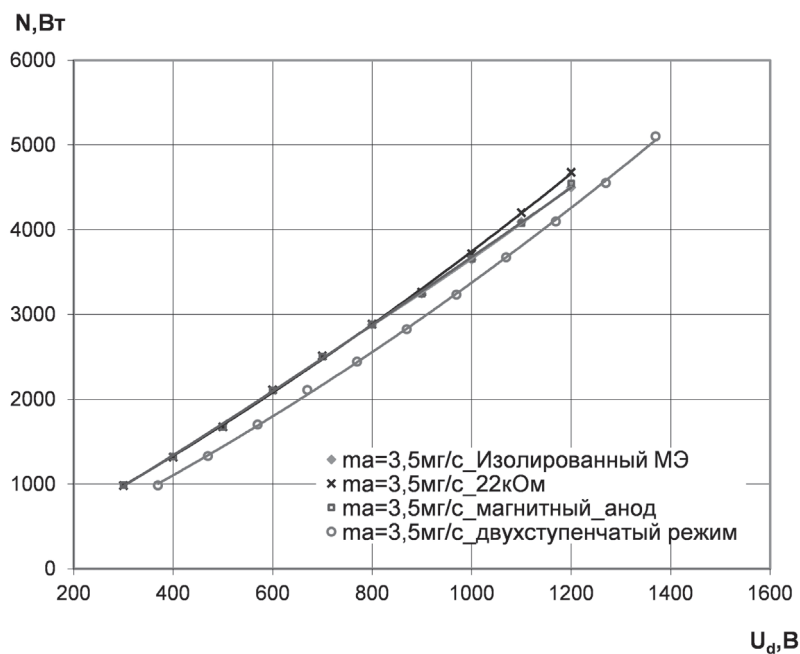


Рис. 16. Зависимость мощности разряда модели СПД-140ПМ от разрядного напряжения

названным суммарным напряжением. При этом достигим «анодный» импульс тяги 37–38 км/с, и при десятипроцентном расходе ксенона через катод полный (рассчитанный с учетом расхода через катод) удельный импульс тяги может составить 33–34 км/с. Таким образом, показана возможность создания двигателя типа СПД-140ПМ с удельным импульсом тяги более 30 км/с и номинальной мощностью порядка 5 кВт, приемлемой для обеспечения достаточно большого ресурса двигателя такого масштаба.

**Выводы**

1. Уменьшение сечения ускорительного канала и оптимизация магнитного поля в двигателе позволяют уменьшить отрицательные эффекты снижения тягового КПД СПД при увеличении разрядного напряжения и уменьшении расхода рабочего вещества через ускорительный канал для сохранения приемлемой для обеспечения большого ресурса двигателя плотности мощности разряда в двигателе.
2. Полученные данные свидетельствуют о том, что реальна разработка СПД средней мощности с удельным импульсом тяги более 30 км/с.

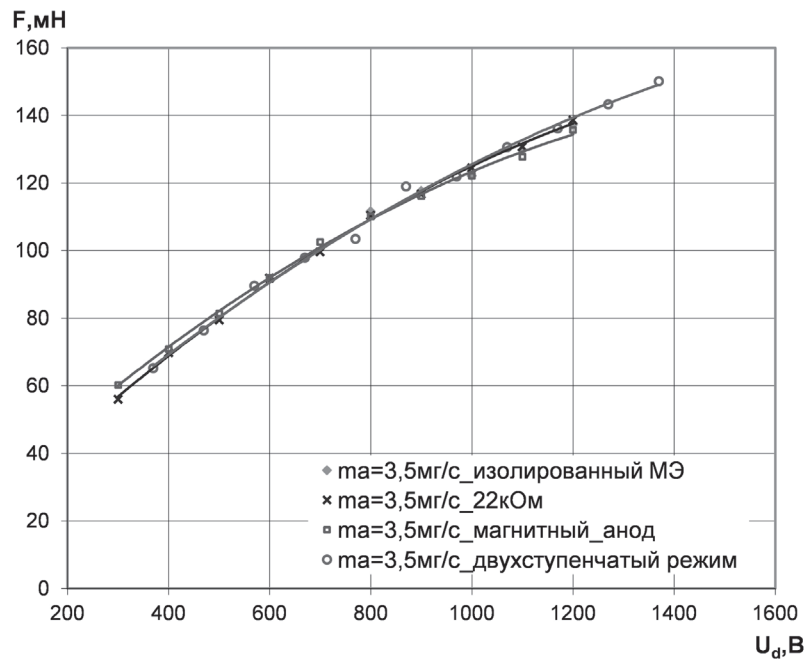


Рис. 17. Зависимость тяги модели СПД-140ПМ от разрядного напряжения

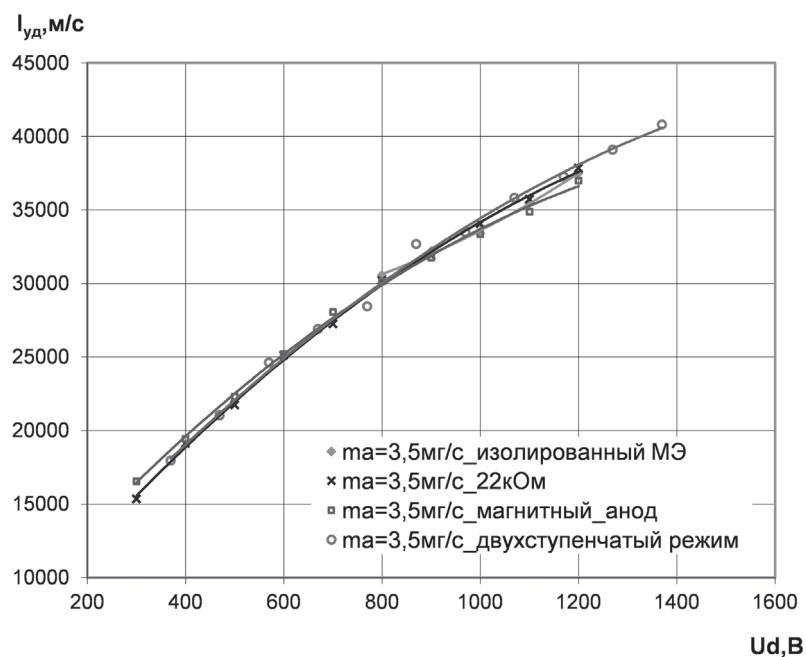


Рис. 18. Зависимость «анодного» удельного импульса тяги модели СПД-140ПМ от разрядного напряжения

Данная работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № 648 задания № 2014/92 Московскому авиационному институту на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности).

**Библиографический список**

1. Архипов А.С., Ким В.П., Сидоренко Е.К. Стационарные плазменные двигатели Морозова. — М.: Изд-во МАИ, 2012. — 291 с.
2. De Grys K., Mathers A., Welander B., Khaums V. Demonstration of 10400 hours on a 4.5 kW Qualification model Hall Thruster // Paper AIAA-2010-6698 presented at the 46th Joint Propulsion Conference, 25-28 July, 2010, Nashville, TN — <http://www.enu.kz/repository/2010/AIAA-2010-6698.pdf>

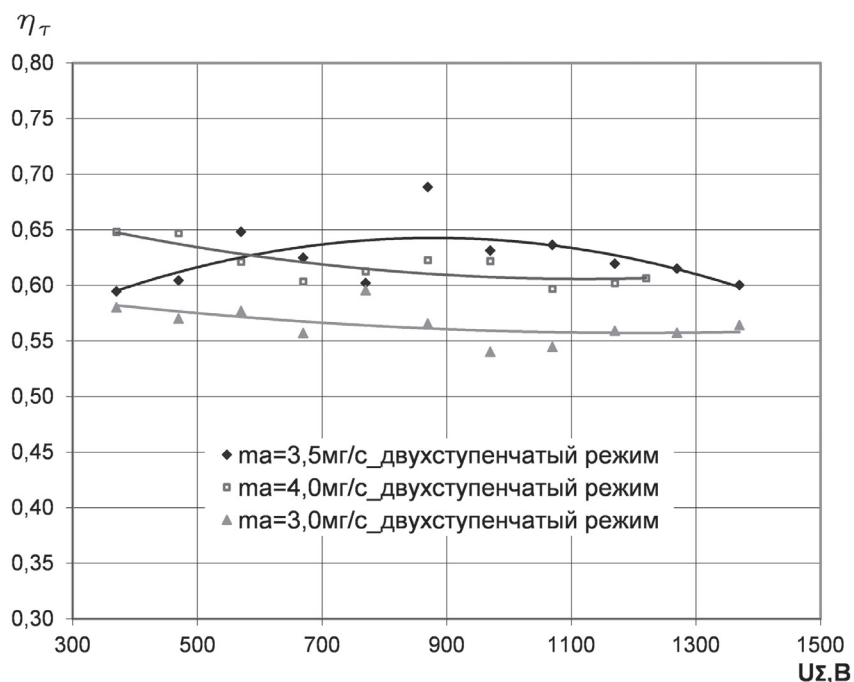


Рис. 19. Зависимость «анодного» тягового КПД модели СПД-140ПМ от суммарного напряжения на обеих ступенях

3. Горшков О.А., Муравлев В.А., Шагайда А.А. Холловские и ионные плазменные двигатели для космических аппаратов. — М.: Машиностроение, 2008. — 280 с.
4. Kamhawi H., Manzella D., Pinero L., Haag T., Mathers A. In-Space Propulsion High Voltage Hall Accelerator Development Project Overview // Paper IEPC-2009-092, 31st International Electric Propulsion Conference, 20-24 September, 2009, Ann Arbor, Michigan, USA. URL: [http://erps.spacegrant.org/uploads/images/images/iepc\\_articledownload\\_1988-2007/2009index/IEPC-2009-092.pdf](http://erps.spacegrant.org/uploads/images/images/iepc_articledownload_1988-2007/2009index/IEPC-2009-092.pdf)
5. Грдличко Д.П., Ким В.П., Козлов В.И., Козубский К.Н., Сидоренко Е.К., Умницын Л.Н. Плазменный ускоритель с замкнутым дрейфом электронов: Патент РФ на изобретение №2414107, МПК Н 05Н 1/54- Бюлл. №7, 10.03.2011.
6. Potapenko M.Yu., Gopanchuk V.V. Characteristic Relationship between Dimensions and Parameters of a hybrid Plasma Thruster // Paper IEPC-2011-042, 32nd International Electric Propulsion Conference, 11-15 September, 2011, Wiesbaden, Germany. URL: [http://erps.spacegrant.org/uploads/images/images/iepc\\_articledownload\\_1988-2007/2011index/IEPC-2011-042.pdf](http://erps.spacegrant.org/uploads/images/images/iepc_articledownload_1988-2007/2011index/IEPC-2011-042.pdf)

## STUDY OF STATIONARY PLASMA THRUSTER PERFORMANCE IN OPERATING MODES WITH HIGH DISCHARGE VOLTAGES

Kim V.P., Grdlichko D.P, Merkur'ev D.V., Smirnov P.G., Shilov E.A.

Moscow Aviation Institute (National Research University),  
 MAI, 4, Volokolamskoe shosse, Moscow, A-80, GSP-3, 125993, Russia  
 e-mail: riame4@sokol.ru

### Abstract

The paper presents the results of the study of SPT-100PM and SPT-140PM stationary plasma thrusters models characteristics. These models operated with different schemes of discharge feeding and high discharge voltages. The abovementioned models are the SPT laboratory models with external accelerating channel diameters of 100 mm and 140 mm, respectively,

modified for magnetic shunt allocation inside the discharge chamber. They had reduced width of the accelerating channel and magnetic system optimized for operation with high discharge voltages.

Tests of these models had shown that due to the abovementioned modifications we managed to reduce the negative impact on thruster performance of mass flow

reduction while discharge voltage is increased, to provide moderate level of discharge power, as well as accelerating channel broadening due to discharge chamber walls erosion during continuous operation. It is also shown that:

— the best performance level could be obtained with two stage structure of the discharge feeding scheme when magnetic shunt potential is negatively shifted relative to the anode potential;

— it is possible to obtain an “anode” thrust efficiency of the SPT 140PM (calculated not accounting for the cathode mass flow rate) model within the range of 0,55—0,60 and its «anode» specific impulse up to 4000 s, when the sum of the discharge voltages on both stages is up to 1400V and discharge power does not exceed 5 kW.

**Keywords:** stationary plasma thruster, modified laboratory model, operation modes, discharge power, high discharge voltages, thrust efficiency, thrust specific impulse.

## References

1. Arkhipov A.S., Kim V.P., Sidorenko E.K. *Statsionarnyye plazmennyye dvigateli Morozova* (Morozov's stationary plasma thrusters), Moscow, MAI, 2012, 291 p.
2. De Grys K., Mathers A., Welander B., Khaums V. Demonstration of 10400 hours on a 4.5 kW Qualification model Hall Thruster. *Paper AIAA-2010-6698 presented at the 46th Joint Propulsion Conference, 25-28 July, 2010, Nashville, TN*, available at: <http://www.enu.kz/repository/2010/AIAA-2010-6698.pdf>
3. Gorshkov O.A., Muravlev V.A., Shagaida A.A. *Khollovskie i ionnyye plazmennyye dvigateli dlya kosmicheskikh apparatov* (Hall and Ion thrusters for Spacecrafts), Moscow, Mashinostroenie, 2008, 280 p.
4. Kamhawi H., Manzella D., Pinero L., Haag T., Mathers A. In-Space Propulsion High Voltage Hall Accelerator Development Project Overview. *Paper IEPC-2009-092, 31st International Electric Propulsion Conference, 20-24 September, 2009, Ann Arbor, Michigan, USA*, available at: [http://erps.spacegrant.org/uploads/images/images/iepc\\_articledownload\\_1988-2007/2009index/IEPC-2009-092.pdf](http://erps.spacegrant.org/uploads/images/images/iepc_articledownload_1988-2007/2009index/IEPC-2009-092.pdf)
5. Grdlichko D.P., Kim V.P., Kozlov V.I., Kozubskii K.N., Sidorenko E.K., Umnitsyn L.N. *Patent RU 2414107*, 10.03.2011.
6. Potapenko M.Yu., Gopanchuk V.V. Characteristic Relationship between Dimensions and Parameters of a hybrid Plasma Thruster. *Paper IEPC-2011-042, 32nd International Electric Propulsion Conference, 11-15 September, 2011, Wiesbaden, Germany*, available at: [http://erps.spacegrant.org/uploads/images/images/iepc\\_articledownload\\_1988-2007/2011index/IEPC-2011-042.pdf](http://erps.spacegrant.org/uploads/images/images/iepc_articledownload_1988-2007/2011index/IEPC-2011-042.pdf)