

УДК 537.533.1,537.12

## ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЗМОВ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПАРАЗИТНОГО РАСХОДА РАБОЧЕГО ТЕЛА ПРИ РАБОТЕ АБЛЯЦИОННОГО ИМПУЛЬСНОГО ПЛАЗМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ

© 2019 г. А. В. Богатый<sup>1</sup> \*, Г. А. Дьяконов<sup>1</sup>, С. А. Семенихин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт прикладной механики и электродинамики МАИ, г. Москва, Россия  
\*riame@sokol.ru

Поступила в редакцию 26.03.2018 г.

После доработки 08.04.2019 г.

Принята к публикации 25.04.2019 г.

Приводятся результаты спектроскопических исследования стадий электрического разряда в канале абляционного импульсного плазменного двигателя. Показано влияние начальной стадии на дальнейшее развитие разряда. Установлен доминирующий механизм возникновения “паразитного” расхода рабочего тела при работе АИПД – ударная поверхностная ионизация рабочего тела. Приводятся результаты экспериментальных исследований зависимости тяговой эффективности и расхода от расстояния между рабочими поверхностями шашек рабочего тела АИПД.

DOI: 10.1134/S0023420619050017

### ВВЕДЕНИЕ

Активно развивающаяся тенденция к уменьшению массово-габаритных параметров космических аппаратов, и, как следствие, уменьшение бортовой мощности при сохранении длительных сроков активного существования существенно ограничивают выбор двигательных установок, пригодных для целевого использования. Кроме того стоимость аппарата должна быть относительно невысокой, а время от размещения заказа до начала эксплуатации должно быть в пределах 3–5 лет. Таким образом, выбор двигательной установки должен основываться на имеющемся заделе, проверенных технических решениях.

Таким решением может быть создание электрической ракетной двигательной установки (ЭРДУ) на базе абляционного импульсного плазменного двигателя (АИПД). АИПД является первым в истории электрическим ракетным двигателем (ЭРД), испытанным в космических условиях. Отличительными особенностями АИПД являются простота конструкции, надежность, отсутствие зависимости удельных характеристик от потребляемой мощности, которая может изменяться от единиц до сотни ватт [1, 2], что выгодно отличает данный тип двигателя от широко используемых в настоящее время двигателей с электростатическим ускорением рабочего тела, таких как стационарные плазменные и ионные двигатели.

Импульсные плазменные двигатели, уступая двигателям с электростатическим ускорением ра-

бочего тела в тяге, имеют лучшие массогабаритные показатели, что численно отражается в повышенном эффективном удельном импульсе тяги [2], равном отношению суммарного импульса тяги ЭРДУ к ее полной массе. При уменьшении размерности двигательной установки превосходство растет, так как удельные характеристики стационарных двигателей, в отличие от импульсных, существенно снижаются при уменьшении потребляемой мощности [4, 5].

В работе исследовался АИПД с боковой подачей плазмообразующего вещества (рис. 1) – политетрафторэтилена (ПТФЭ). Сочетание высокой диэлектрической прочности, химической и термической устойчивости, конструкционной прочности и технологичности делает этот материал наиболее подходящим для использования в АИПД в качестве рабочего тела (РТ).

### ОПИСАНИЕ ПРОБЛЕМАТИКИ

Один из важных показателей, характеризующих техническое совершенство ЭРДУ, как тяговая эффективность, как правило, не превышает 20% у АИПД с энергией разряда ~100 Дж и 5% у АИПД с энергией разряда ~10 Дж [2].

В обоих случаях невысокие значения тяговой эффективности объясняются тем, что существенная часть массы РТ, поступает в разрядный канал в результате абляции с рабочих поверхностей шашек РТ после завершения первого полупериода разряда, в ходе которого выделяется основная

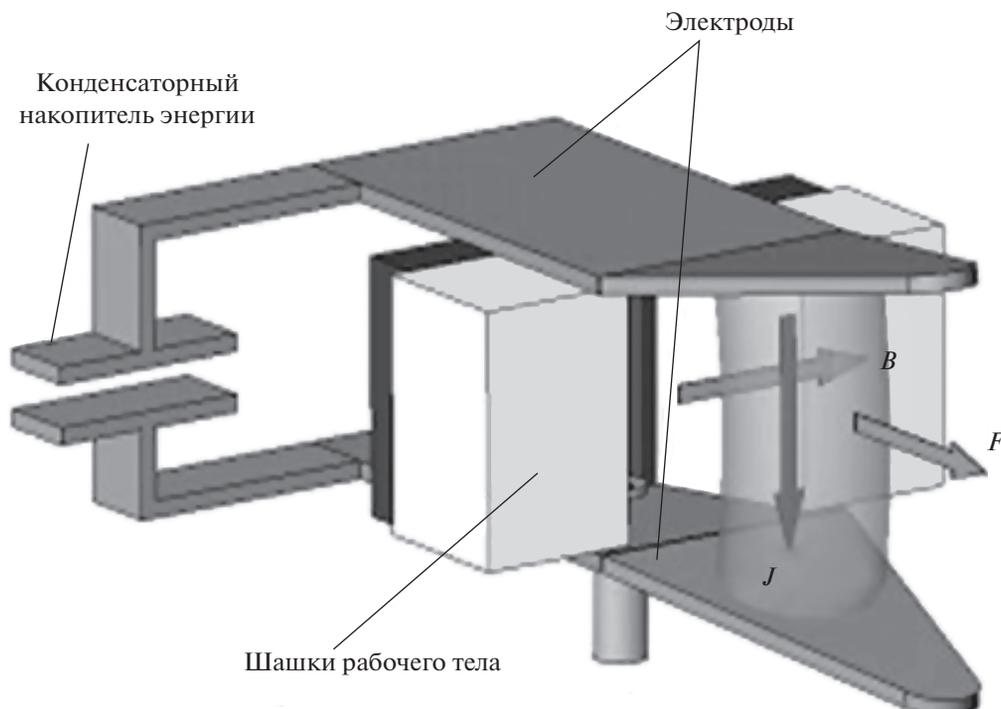


Рис. 1. АИПД с боковой подачей плазмообразующего вещества.

часть запасенной в конденсаторном накопителе энергии. Такой “паразитный” расход РТ приводит к снижению в среднем удельного импульса тяги и тяговой эффективности.

Согласно современным представлениям только 20–40% испарившегося со стенок диэлектрика вещества покидают ускорительный канал ИПУ со скоростями порядка 20–30 км/с. Это та часть вещества, которая ускоряется объемной электромагнитной силой, возникающей в результате взаимодействия разрядного тока с собственным магнитным полем. Остальные 60–80% рабочего вещества покидают ускорительный канал ИПУ с субтепловыми и тепловыми скоростями ~0.5–5.0 км/с. Это связано с тем, что испарившееся рабочее вещество не успевает взаимодействовать с разрядным током в течение длительности импульса тока, что подтверждается данными по динамике ввода мощности разряда и массы плазмообразующего вещества в разрядный канал, полученными в результате пьезозондовых измерений АИПД (рис. 2), которые свидетельствуют о рассогласованности ввода энергии (пропорциональна  $J^2$ ) и массы ( $m$ ) во времени [2].

#### ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРЯДА С ПОМОЩЬЮ СПЕКТРОСКОПИИ ПЛАЗМЫ

Ускорение плазмы в разрядном канале АИПД осуществляется следующим образом. От блока инициирования разряда подается короткий высо-

ковольтный импульс на электроды устройства инициирования разряда, в результате поверхностного пробоя образуется плазменный сгусток, “закорачивающий” межэлектродный промежуток разрядного канала АИПД, в котором формируется электрический разряд дугового типа. При этом электроды в процессе пробоя находятся под “ждущим” потенциалом. Рабочее вещество, испаряемое с поверхности диэлектрических шашек, ионизируется и ускоряется под действием электромагнитных сил и газодинамического давления.

С момента срабатывания устройства инициирования разряда до появления свечения на срезе шашек РТ проходит время масштаба 3.5 мкс, в течение которого развивается электрических про-

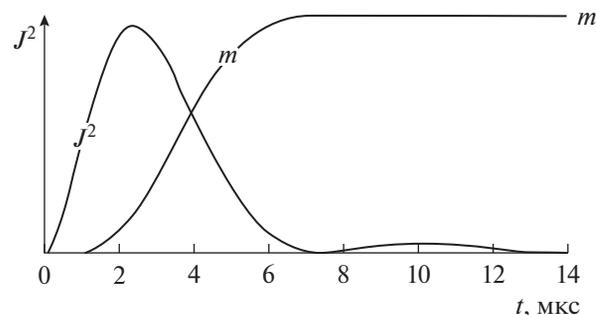


Рис. 2. Динамика ввода мощности разряда (пропорциональна  $J^2$ ) и массы  $m$  плазмообразующего вещества в разрядный канал.

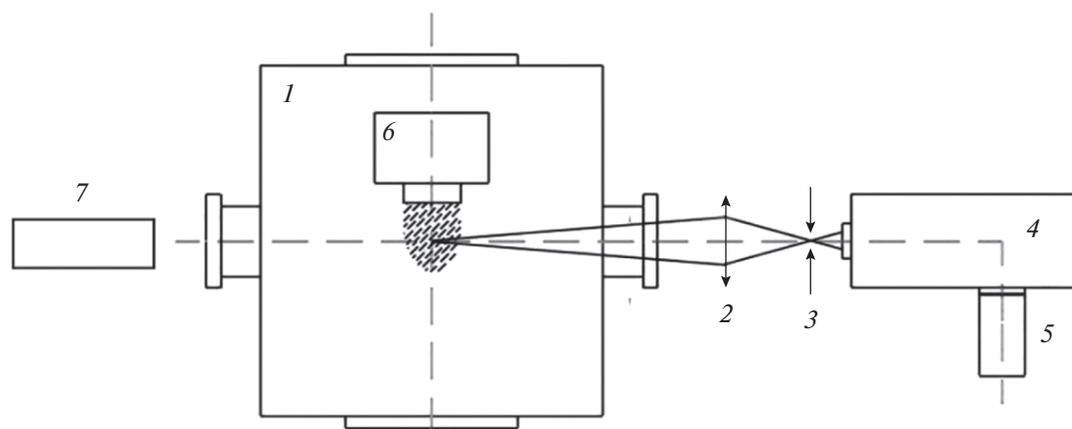


Рис. 3. Оптическая схема для спектроскопических измерений: 1 – вакуумная камера, 2 – объектив, 3 – диафрагма, 4 – монохроматор, 5 – фотоумножитель, 6 – АИПД, 7 – гелий-неоновый лазер.

бой межэлектродного промежутка и начинается процесс абляции.

Для оценки времени задержки выхода массы рабочего тела относительно начала основного тока в разрядном канале в лабораторном образце использовались спектроскопические измерения времени задержки начала регистрации излучения элементов плазмы в канале АИПД.

Абляция с рабочих поверхностей шашек РТ может происходить в результате следующих воздействий: ударной ионизации поверхности заряженными частицами, излучения дуги и нагрева в результате прямого контакта с плазмой.

Для выявления доминирующего механизма ионизации РТ использовался спектроскопический метод исследования излучения плазмы.

Исследования выполнялись на лабораторной модели АИПД с энергией накопителя 20 Дж. Спектроскопические измерения проводились перпендикулярно оси на выходе из разрядного канала.

Измерительная схема была тщательно экранирована от паразитных засветок, что проверялось экспериментально. Фотоумножитель был помещен в металлический контейнер с коаксиальными выводами, а измерительный тракт защищался ферритовыми развязками, что позволяло снизить уровень электромагнитной помехи от срабатывания АИПД до 20...50 мВ. В экспериментах каждое измерение повторялось 5 раз, а результаты затем усреднялись.

Для проведения спектроскопических исследований плазмы АИПД, состоявшей, в основном, из атомов и ионов фтора и углерода – продуктов абляции фторопласта-4, выбирались изолированные спектральные линии с высокой относительной яркостью. Выбранные спектральные линии находились в различных частях видимого диапазона спектра. Спектральный диапазон выделяемых изолированных линий составлял  $\pm 1.5 \text{ \AA}$ .

Оптическая схема измерений приведена на рис. 3. При спектроскопических исследованиях использовались монохроматор МДР-23, фотоумножитель ФЭУ-85 и цифровые осциллографы С9-8 и GDS-830 в качестве регистрирующей аппаратуры, а также синхронизирующие устройства GFG-8210, ГИ-1. Юстировка оптической схемы осуществлялась с помощью гелий-неонового лазера ЛГН-207Б.

Основные параметры спектральных линий, выбранных для спектроскопических исследований начальной стадии разряда АИПД, приведены в табл. 1. В экспериментах регистрировались также некоторые линии меди, присутствовавшей в исследуемой плазме в незначительном количестве как продукт эрозии электродов свечи поджига и электродов разрядного канала АИПД.

В табл. 2 приведены экспериментальные данные по временам задержки появления в канале АИПД возбужденных атомов углерода, фтора и меди (CI, FI, CuI) и однократно заряженных ионов углерода и фтора (CII, FII) рабочего вещества от момента срабатывания свечи поджига. Измерения выполнялись на срезе шашек рабочего тела в направлении перпендикулярном оси разрядного канала.

Характерная зависимость интенсивности излучения одной из спектральных линий (FII,  $\lambda = 4246.1 \text{ \AA}$ ) от времени, зарегистрированная в экспериментах на модели АИПД с энергией накопителя 20 Дж, и типичная осциллограмма полного тока этой модели приведены на рис. 4.

Сопоставляя экспериментальные зависимости от времени интенсивностей излучения отдельных спектральных линий атомов и ионов рабочего вещества и интенсивность интегрального излучения плазмы, можно отметить, что излучение ни одной из этих линий не появляется раньше, чем интегральное свечение. Это косвенно подтвер-

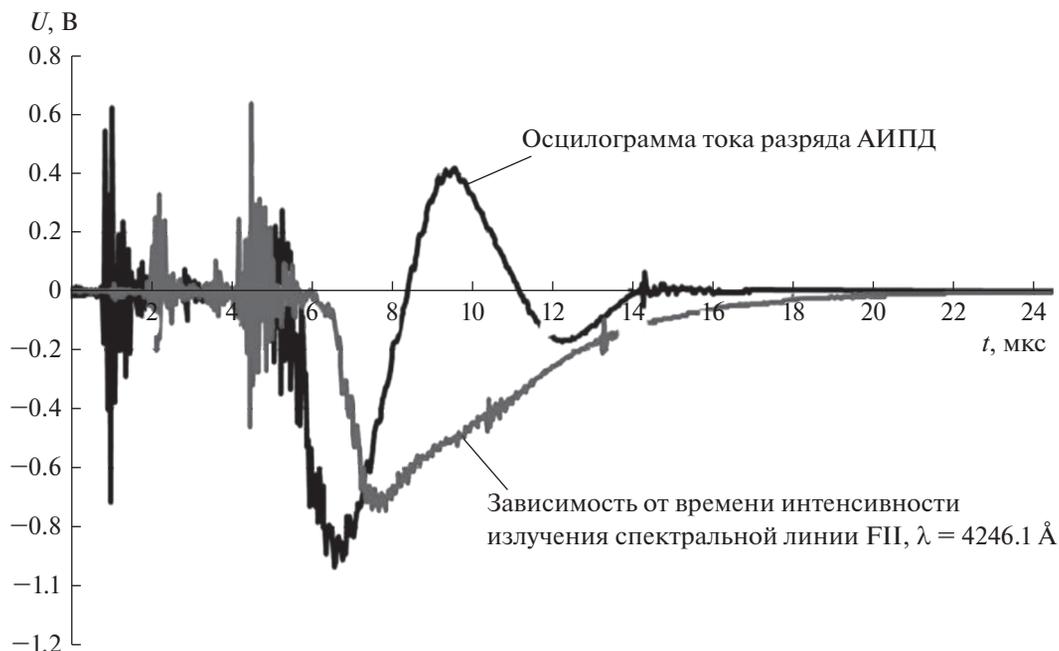


Рис. 4

ждает корректность проведенных экспериментов. Также можно отметить, что задержка выхода излучения тяжелых атомов и ионов (FI, FII) несколько больше, чем легких (CI, CII), что укладывается в общие физические представления о процессе развития разряда.

Проведенные измерения показали, что интервал времени между моментом инициирования разряда (моментом срабатывания свечи поджига) и началом регистрации свечения возбужденных атомов и ионов рабочего тела составил 4.1...5.7 мкс. По-видимому, эти значения можно считать оцен-

кой времени задержки выхода массы рабочего вещества из боковых стенок разрядного канала относительно момента инициирования разряда, поскольку времена ионизации и возбуждения малы.

Обращает на себя внимание тот факт, что передние фронты интенсивности излучения спектральных линий атомов и ионов оказались в 1.5...2 раза круче, чем фронт нарастания тока. Это свидетельствует о достаточно быстром появлении возбужденных атомов и ионов в разрядном канале, существенно опережающим явления, связанные с джоулевым нагревом плазмы. Поскольку

Таблица 1. Параметры выбранных спектральных линий плазмы рабочего тела АИПД (фторопласт-4)

Элемент плазмы АИПД	Длина волны, Å	Относительная яркость, условные единицы	Потенциал возбуждения, эВ
CI	5380.3	400	9.99
FI	6348.5	1000	14.68
CII	3980.3	200	27.48
FII	4246.1	800	31.56
CuI	3247.5	5000	3.82

Таблица 2. Времена задержки появления в АИПД элементов плазмы

Химический элемент плазмы	Длина волны, Å	Энергия накопителя, Дж	Время задержки, мкс
CI	5380.3	20	4.2
FI	6348.5		4.1
CII	3980.3		4.6
FII	4246.1		5.7
CuI	3247.5		4.9

интенсивность излучения возбужденных атомов и ионов пропорциональна их концентрации, то время нарастания сигнала регистрируемого излучения говорит о существовании достаточно быстрого процесса абляции, обуславливающего крутизну переднего фронта интенсивности излучения спектральных линий. На начальной стадии разряда, когда электрическая дуга еще не сформировалась, излучение не может вносить существенный вклад в процесс абляции. Таким образом, было сделано предположение, что доминирующим механизмом абляции материала шашек РТ на начальной стадии разряда является процесс, связанный с ударной ионизацией атомов ПТФЭ на рабочих поверхностях шашек РТ вследствие их столкновения с заряженными частицами, поступающими из сгустка плазмы, созданного свечой поджига.

Чувствительности спектроскопического метода оказалось недостаточно для регистрации процессов, происходящих в процессе срабатывания свечи поджига и приводящих к развитию основного разряда. Так как спектральные линии компонентов плазмы лежат в видимом спектре, для исследования процесса развития разряд использовалась высокоскоростная фотокамера, позволяющая делать фотоснимки с минимальной экспозицией 5 нс.

### СТАДИИ РАЗВИТИЯ РАЗРЯДА В АИПД

Условно разряд принято делить на три стадии: темновую, искровую и дуговую [3]. После инициации разряда в течение  $\sim 10^{-7}$  с развивается темновая стадия разряда, которая получила свое название из-за отсутствия излучения, которое можно было бы зарегистрировать. Заряженные частицы вытягиваются из сгустка плазмы, созданного свечой поджига, и ускоряются под воздействием электрического поля, созданного разностью потенциалов между электродами, что приводит к закорачиванию межэлектродного промежутка и лавинообразному росту тока. Траектории движения заряженных частиц на этой стадии, как показало математическое моделирование, в основном определяются электрическим полем, создаваемым конфигурацией электродов и твердого диэлектрика (шашки РТ), и существенно влияют на дальнейшее развитие искровой и дуговой стадий электрического разряда [6, 7].

Диэлектрическая проницаемость вакуума в разы меньше, чем у твердого диэлектрика, поэтому в зазорах между срезом шашек и электродами произойдет местное усиление поля. Увеличение напряженности поля в зазорах приводит к возникновению там ионизационных процессов, продукты которых (ионы и электроны), попадая в основной межэлектродный промежуток, создают местное усиление поля, приводящее к уменьшению

напряжения пробоя. В течение  $\sim (0.5-1.0) \times 10^{-6}$  с заряженные частицы, возникшие на границе электрод/поверхность шашки РТ, ускоряясь под воздействием электрического поля, вызывают ударную поверхностную ионизацию [3] ПТФЭ, в результате которой происходит возникновение и развитие токовых привязок вдоль поверхностей шашек РТ (искровая стадия, рис. 5).

По мере увеличения силы тока, протекающего в разряде, свечение токовых привязок усиливается, и через  $\sim (0.5-1.0) \times 10^{-6}$  с от начала искровой стадии начинается дуговая стадия электрического разряда, формируется плазменный сгусток (рис. 5).

Через  $\sim 2$  мкс от начала дуговой стадии ток разряда достигает максимального значения  $\sim 30-40$  кА, а плазменный сгусток, отделенный от поверхности шашек РТ, локализуется в средней плоскости разрядного канала (рис. 6). Ток в основном течет через плазменный сгусток, часть тока течет вдоль рабочих поверхностей шашек РТ, вызывая их абляцию, и, поставляя тем самым плазмообразующее вещество в зону формирования плазменного сгустка. Дополнительный вклад в абляцию вносит жесткое коротковолновое излучение дуги разряда, вызывающее радиационную абляцию фторопласта. Эта стадия характеризуется тем, что за счет сжатия плазменного сгустка собственным магнитным полем (пинч-эффект), происходит некоторая стабилизация процесса абляции фторопласта вдоль с шашек РТ, и, как следствие, ввода массы плазмообразующего вещества в разряд. Основная энергия разряда расходуется на ускорение заряженных частиц, находящихся в сгустке.

Далее, в течение  $\sim 3-4$  мкс происходит снижение тока разряда до нуля, плазменный сгусток распадается. На начало второго полупериода разряда весь объем разрядного канала оказывается заполнен плазмой, ток начинает течь вдоль поверхностей шашек РТ, но выделяющейся энергии недостаточно для формирования такого же плазменного сгустка, как в первом полупериоде, таким образом, не происходит дистанционирование зоны выделения основной части энергии от поверхностей шашек РТ. Это позволяет сделать предположение, что именно течение разрядного тока вдоль поверхностей шашек РТ вызывает "паразитный" расход, достигая своего максимума уже в начале второго полупериода разряда.

Присутствие в межэлектродном зазоре диэлектрика снижает пробойное напряжение [3] и создает условия развития разряда вдоль рабочих поверхностей шашек РТ, как на темновой стадии разряда, так и в присутствии плазмы в течение последующих стадий. Если на начальной стадии разряда ударная ионизация происходит только в зоне развития токовых привязок и является наряду с джоулевым нагревом механизмом поставки

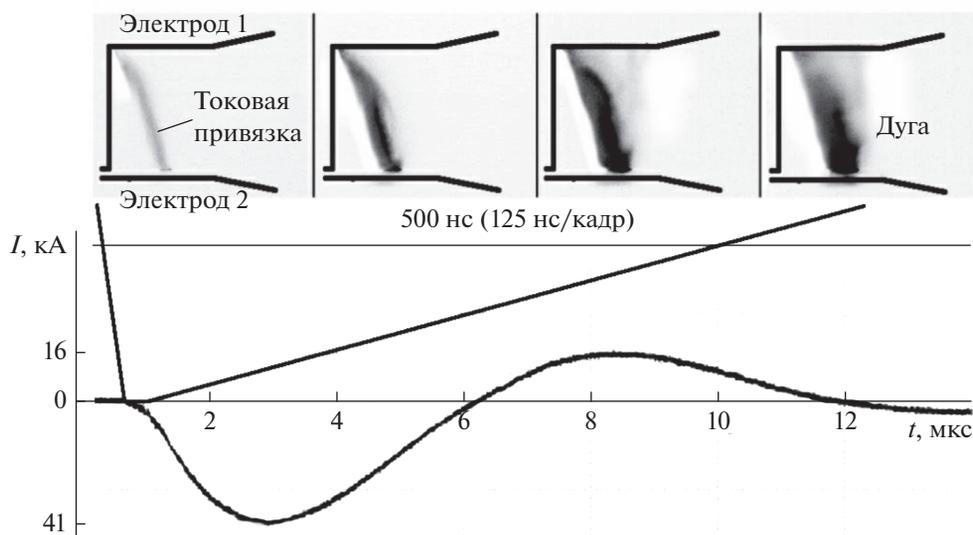


Рис. 5. Искровая стадия электрического разряда АИПД.

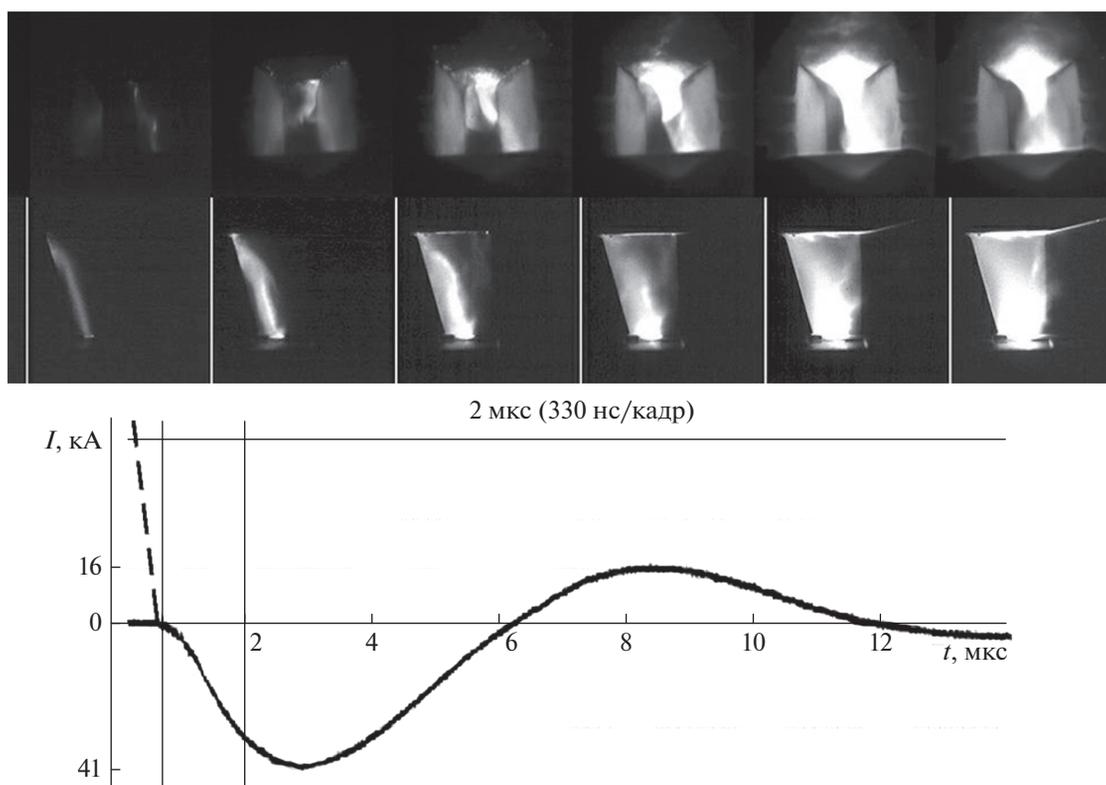


Рис. 6. Формирование токовой привязки на искровой стадии и плазменного сгустка на дуговой стадии электрического разряда в АИПД.

массы для развития разряда, то во втором полупериоде разряда, когда весь объем разрядного канала оказывается заполнен плазмой, ударная ионизация может происходить по всей площади рабочей поверхности шашек РТ.

Характерной особенностью рабочего процесса АИПД является малая длительность разрядного

импульса и сравнительно большая длительность паузы. Лишь часть длительности разряда поверхностный слой шашек РТ, соприкасающийся с плазмой, имеет температуру, равную температуре абляции. Эти обстоятельства позволяют считать, что процесс подвода тепла имеет импульсный характер.

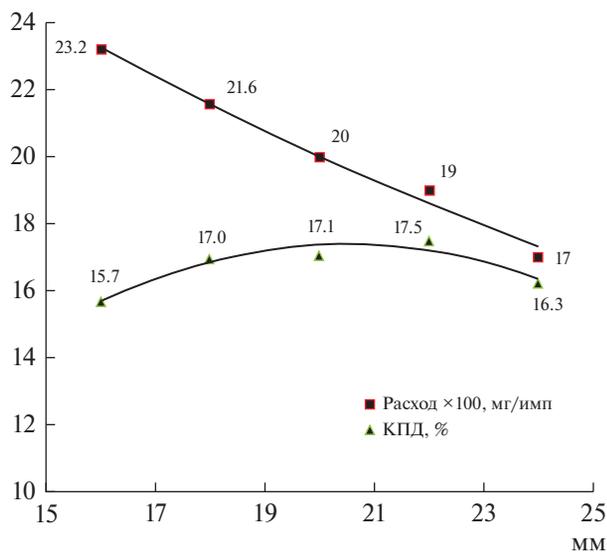


Рис. 7. Зависимости тяговой эффективности (КПД) и расхода РТ от расстояния между рабочими поверхностями шашек РТ в разрядном канале АИПД с энергией накопителя 150 Дж.

В ходе исследований контроль температуры шашек осуществлялся с помощью датчиков температуры установленных внутри шашек на расстоянии 1 мм от их рабочих поверхностей. Примерно через час непрерывной работы установилась равновесная температура шашек РТ, не превышавшая 85°C, что существенно ниже температуры разложения ПТФЭ.

По всей видимости, абляция за счет нагрева поверхностей шашек РТ вносит незначительный вклад в формирование “паразитного” расхода.

В свете полученных данных становится ясно, почему по мере увеличения расстояния между рабочими поверхностями шашек РТ (от 16 до 22 мм) сначала происходит снижение расхода и рост тяговой эффективности до некоторого максимума (22 мм), а затем начинается снижение (рис. 7).

По мере раздвижения шашек происходит дистанционирование плазменного сгустка, формирующегося на первом полупериоде разряда, от аблируемых поверхностей, снижается объемная плотность энергии, и, как следствие, поток лучистой и тепловой энергии, вызывающих абляцию. Энергия разряда в основном расходуется на ускорение заряженных частиц, а возникновение пинч-эффекта уменьшает долю испаряемого в результате ударной ионизации вещества. При увеличении расстояния более 22 мм формирование плазменного сгустка нарушается, существенно снижается эффективность ускорения заряженных частиц.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены экспериментальные исследования электрического разряда в канале АИПД с целью определения механизмов возникновения паразитного расхода рабочего тела. С помощью спектроскопического метода оценки задержки выхода массы РТ зарегистрирован быстрый процесс абляции РТ на начальной стадии развития разряда. Результаты высокоскоростной фотосъемки процесса зарождения и развития разряда подтвердили, что основным механизмом абляции на искровой стадии разряда является ударная поверхностная ионизация, а абляция за счет излучения сгустка плазмы, как и нагрева поверхностей шашек РТ вносят значительно меньший вклад в формирование “паразитного” расхода. Сделанные выводы косвенно подтверждаются результатами экспериментальных исследований зависимости тяговой эффективности и расхода от расстояния между рабочими поверхностями шашек рабочего тела АИПД.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антропов Н.Н., Богатый А.В., Дьяконов Г.А. и др. Разработка абляционных импульсных плазменных двигателей в НИИ прикладной механики и электродинамики // Космонавтика и ракетостроение. М.: ЦНИИМАШ, 2008. № 3(52). С. 28–34.
2. Антропов Н.Н., Богатый А.В., Дьяконов Г.А. и др. Новый этап развития абляционных импульсных плазменных двигателей в НИИ ПМЭ // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. М.: ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина, 2011. № 5. С. 30–40.
3. Бобров Ю.К., Дьяков А.Ф., Сорокин А.В., Юргеленас Ю.В. Физические основы электрического пробоя газов. М.: Издательство МЭИ, 1999.
4. Горшков О.А., Муравлев В.А., Шагайда А.А. Холловские и ионные плазменные двигатели для космических аппаратов. М.: Машиностроение, 2008.
5. Богатый А.В., Дьяконов Г.А., Нечаев И.Л. и др. Перспективы улучшения массогабаритных характеристик абляционных импульсных плазменных двигателей // Труды ВНИИЭМ. Вопросы электротехники. 2013. Т. 133. № 2. С. 19–26.
6. Антипов А.А., Богатый А.В. Моделирование движения заряженных частиц в абляционном импульсном плазменном двигателе в начальной стадии разряда. “Известия Российской академии наук. Энергетика”. 2017. № 3. С. 42–49.
7. Antipov A.A., Bogatyy A.V., Semenov A.A. Investigation of the Initial Stage of the Discharge in an Ablative Pulsed Plasma Thruster // J. Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2018. V. 12. № 5. P. 1037–1040.
8. Важов В.Ф., Лавринович В.А. Техника высоких напряжений. Томск: ТПУ, 2008.