

## Экспериментальные методы повышения удельных характеристик абляционных импульсных плазменных двигателей

Дьяконов Г.А., Нечаев И.Л., Семенихин С.А.

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

### Аннотация

Статья посвящена экспериментальным методам повышения удельных характеристик абляционного импульсного плазменного двигателя (АИПД) с асимметричным разрядом, в части влияния такой схемы разрядного канала на временное рассогласование ввода в него массы рабочего тела и разрядного тока. Исследуется мало изученный вопрос влияния «паразитного» расхода от парения второй шашки и способа борьбы с ним, путём применения асимметричного разряда. В работе экспериментально получены удельные характеристики новых лабораторных моделей более высокие, чем у таких же моделей с аналогичными параметрами геометрии разрядного канала и ёмкости батареи, приблизительно на 15 %. Результаты, полученные в статье, позволяют уточнить требования к конструкции современных АИПД на практике.

**Ключевые слова:** малые космические аппараты, абляционный импульсный плазменный двигатель, улучшение массогабаритных характеристик.

Малые космические аппараты (МКА) занимают в мире все возрастающую долю рынка передовых технологий в области научных и технологических исследований, а в последнее время также в сфере телекоммуникаций и наблюдения Земли. В XXI веке существенно выросли требования пользователей к космическим системам, такие как: производительность, надёжность, многофункциональность КА.

В настоящее время, в связи с развитием МКА массой до 1000 кг, возникает потребность в высокоэффективных электроракетных двигательных установках (ЭРДУ) малой тяги, сочетающих малую массу и потребляемую мощность с большим ресурсом и суммарным импульсом тяги [1,2]. Одним из перспективных направлений является создание ЭРДУ на основе абляционных импульсных плазменных двигателей (АИПД). Основными преимуществами АИПД, существенными для применения в двигательных установках МКА малой мощности, являются простота конструкции, низкая стоимость, отсутствие зависимости удельных характеристик от потребляемой мощности [3, 4].

ЭРДУ на основе АИПД включает: блок разрядного канала, ёмкостной накопитель энергии, систему хранения и подачи твёрдого рабочего тела (РТ), систему питания и управления (СПУ), блок инициирования разряда (БИР), коммутационные шины и другие элементы. Разработан один из лучших вариантов ЭРДУ, обладающий достаточно высокими тягово-энергетическими характеристиками, соответствующий большинству задач, которые ставятся перед двигательными установками такого класса.

Принцип создания тяги в АИПД рельсотронного типа иллюстрирует рисунок 1.

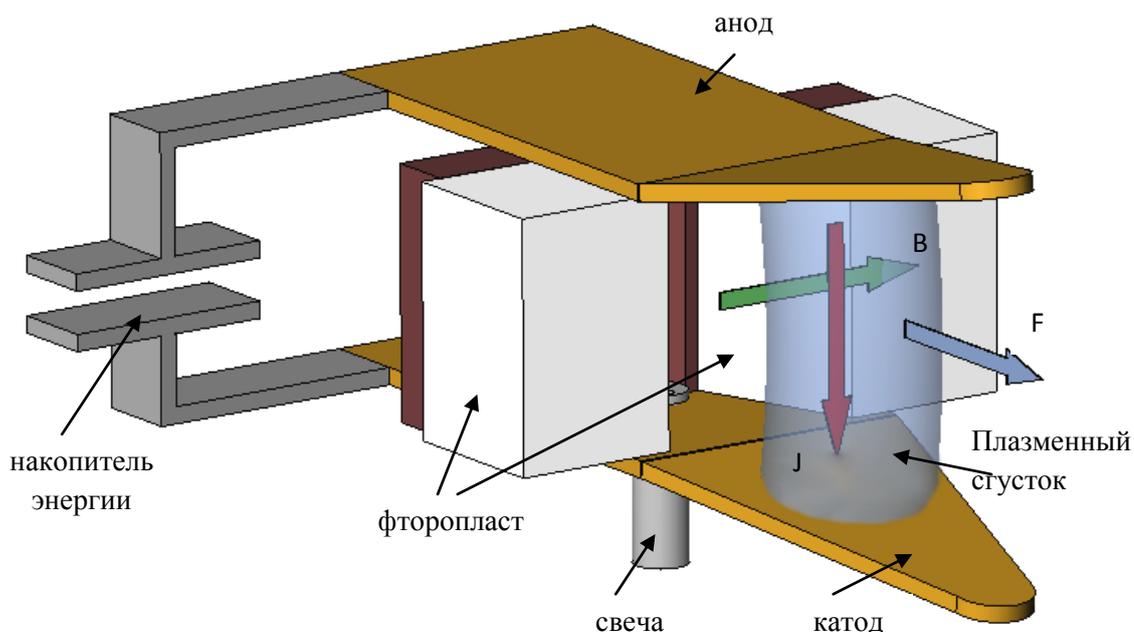


Рисунок 1 - Принципиальная схема ускорения плазменного сгустка в разрядном канале АИПД

Шашки РТ (фторопласт) подаются в канал с его боковых сторон навстречу друг другу. В катоде между шашками установлена свеча поджига (игнайтер), которая при срабатывании образует первичный плазменный сгусток, инициируя пробой между катодом и анодом. При протекании тока между электродами в канале АИПД формируется плазменный сгусток за счёт абляции (испарения) тефлоновых шашек при контакте с плазмой и под воздействием излучения с последующей частичной ионизацией рабочего вещества. Ускорение плазменного сгустка в АИПД происходит под действием электромагнитных и газодинамических сил. Электромагнитные силы ( $F$ ) создаются при взаимодействии разрядного тока ( $J$ ) АИПД с поперечным собственным магнитным полем ( $B$ ).

Одним из основных параметров ЭРДУ является суммарный импульс тяги  $P_{\Sigma}$ , который равен:

$$P_{\Sigma} = M_{\text{РТ}} \cdot J_{\text{сп}} \quad (1)$$

где:  $M_{\text{РТ}}$  – масса запасённого рабочего тела;  $J_{\text{сп}}$  – удельный импульс тяги, равный, в случае АИПД, среднемассовой скорости истечения плазмы [5].

Из формулы (1) следует, что повышение удельного импульса тяги позволяет снизить полную массу ЭРДУ за счет снижения массы запасаемого рабочего тела. Следует отметить, что улучшить массогабаритные характеристики ЭРДУ на базе АИПД можно также путем снижения массы конструкции за счёт применения новых материалов или же использования силовых конденсаторов с повышенной удельной энергоёмкостью.

В качестве примера современной ЭРДУ на базе АИПД можно привести АИПД-45-2, внешний вид и структурная схема которой представлены на рисунках 2 и 3, соответственно [6].

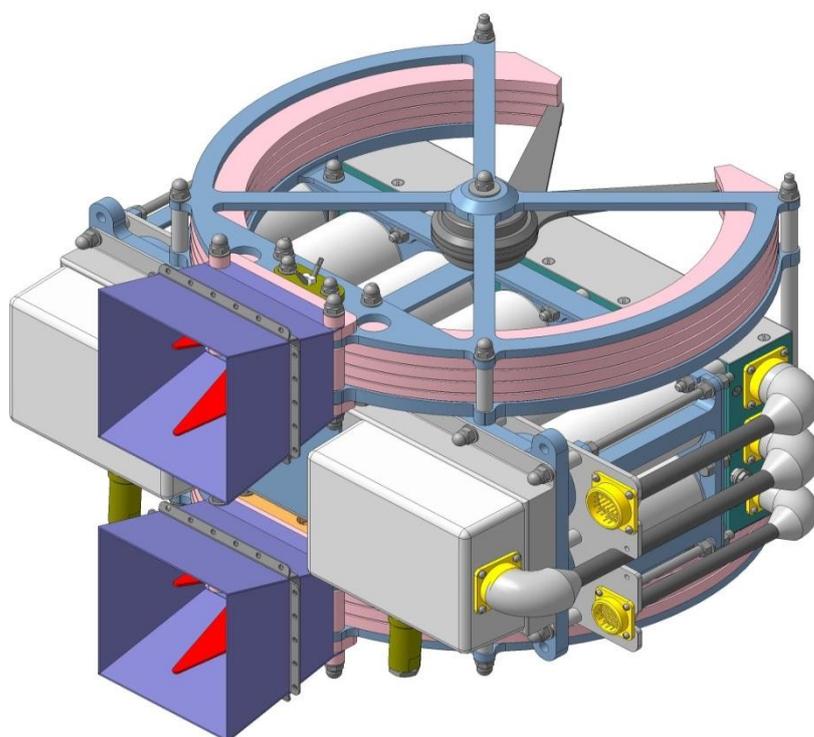


Рисунок 2 - Внешний вид ЭРДУ АИПД-45-2 [6]

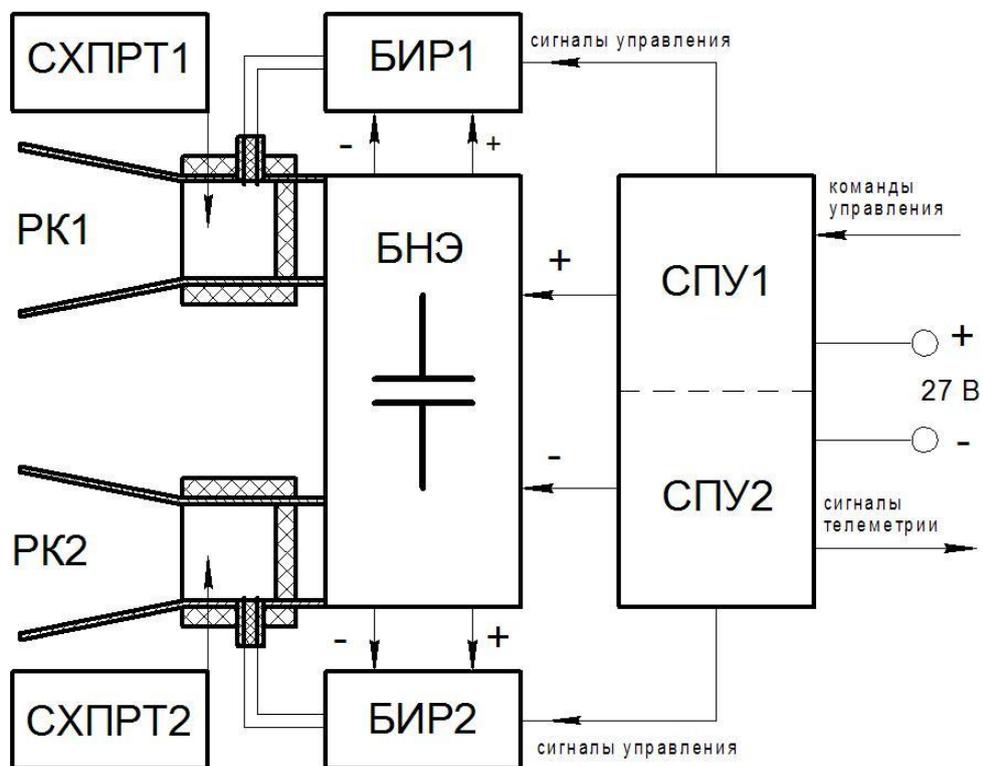


Рисунок 3 - Структурная схема ЭРДУ АИПД-45-2 [6]

ЭРДУ АИПД-45-2 имеет полную массу 10,5 кг, суммарный импульс тяги  $P_{\Sigma} = 20 \text{ кН}\cdot\text{с}$ , среднюю тягу  $P_{\text{cp}} = 2,9 \text{ мН}$  при потребляемой мощности  $N = 150 \text{ Вт}$ . Удельный импульс тяги данной ЭРДУ составляет  $J_{\text{sp}} = 11000 \text{ м/с}$  [6, 7].

В принципе, имеется два направления решения задачи повышения удельного импульса тяги АИПД, в какой то степени пересекающихся друг с другом, это оптимизация электрических параметров разрядной цепи двигателя и использование новых схем ускорительного канала, позволяющих более эффективно организовать рабочий процесс в разрядном канале. В данной работе рассматриваются возможности реализации второго подхода.

В абляционных двигателях в процессе разряда происходит одновременное и самосогласованное дозирование и ускорение рабочего тела. На рисунке 4 представлены зависимости от времени ввода в разрядный канал мощности (пропорциональна квадрату разрядного тока  $J^2$ ) и массы  $m$  плазмообразующего вещества, полученные в результате пьезозондовых измерений на одном из лабораторных образцов АИПД.

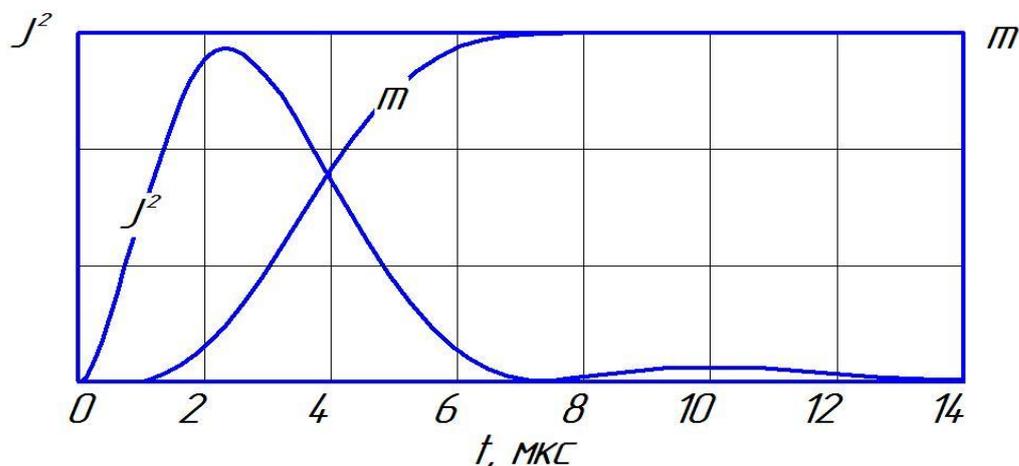
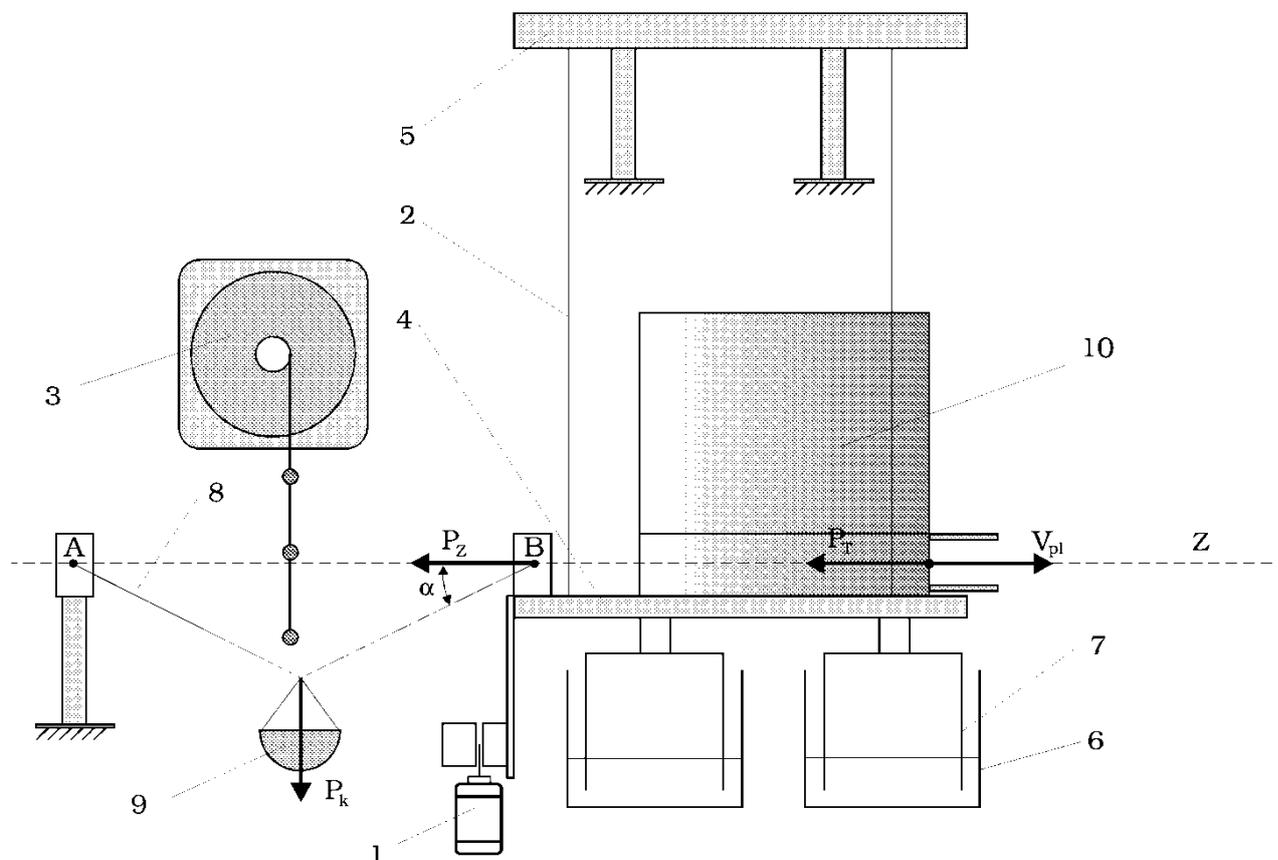


Рисунок 4 - Динамика ввода мощности разряда  $J^2$  и массы  $m$  плазмообразующего вещества в разрядный канал АИПД.

Как видно из зависимостей  $J^2(t)$  и  $m(t)$ , наблюдается существенное временное рассогласование ввода энергии и массы в ускорительный канал [4]. Значительная часть массы плазмообразующего вещества поступает в канал уже после того, как разряд практически завершился (эффект «послепарения»). Эта часть плазменного потока ускоряется только до тепловых скоростей, что приводит к снижению среднемассовой скорости. Добившись уменьшения массы рабочего вещества, поступающего в канал после завершения разряда, можно повысить удельный импульс тяги двигателя. [8,9].

В процессе исследований АИПД было установлено, что достаточно часто имеет место существенная неравномерность расхода (до 30%) левой и правой шашек рабочего тела без существенного ухудшения характеристик моделей. Наблюдалось даже значительное повышение удельного импульса тяги, особенно в случае науглероживания одной из шашек. Таким образом, имеет место ускорение рабочего вещества поступающего в разряд преимущественно с одной из шашек, а вторая просто «парит» и продукты ее абляции ускоряются лишь до тепловых скоростей и снижают величину результирующего единичного импульса тяги. Для проверки данного предположения была разработана конструкция и проведены параметрические испытания лабораторной модели АИПД рельсовой геометрии с одной шашкой рабочего тела вместо двух (асимметричная схема разрядного канала). Одновременно исследовался плазменный ускоритель стандартной симметричной схемы при тех же геометрических размерах разрядного канала и энергиях разряда  $W$ .

Для измерения средней тяги двигателя  $F$  использовалось разработанное маятниковое тягоизмерительное устройство прямого действия с индуктивным датчиком смещения платформы. Относительная погрешность измерения тяги при помощи данного устройства не превышает 5%. [10]. Схема тягоизмерительного устройства представлена на рисунке 5.



1 - индуктивный датчик смещения платформы; 2 - подвес платформы; 3 - дистанционно управляемый барабан с калибровочными грузиками; 4 - подвижная платформа; 5 - неподвижная рама; 6 - неподвижная часть масляного демпфера; 7 - подвижная часть масляного демпфера; 8 - калибровочная нить; 9 - платформа для калибровочных грузиков; 10 - исследуемый объект (АИПД)

Рисунок 5 – Схема тягоизмерительного устройства стенда ИУ-1

Полная масса рабочего тела, израсходованная за серию импульсов, и средний расход рабочего тела за один импульс  $m$  измерялись путём взвешивания шашек рабочего тела на высокочувствительных аналитических весах GR-200 до и после серии из  $n = (3 \dots 8) \cdot 10^3$  импульсов. Одной из особенностей работы пружинного механизма подачи рабочего тела является то, что расход  $m$  может колебаться относительно среднего значения, что приводит к погрешности при его измерении путём взвешивания шашек. Эта погрешность уменьшается при увеличении числа импульсов в серии  $n$ . При  $n = 5 \times 10^3$  относительная погрешность измерения среднего расхода рабочего тела составляет  $\pm 2\%$ .

Интегральные характеристики двигателя рассчитывались по формулам:

Единичный импульс тяги [Н·с]

$$P = F/f \quad (2)$$

Энергия разряда [Дж]:

$$W = \frac{1}{2} C \times U_0^2 \quad (3)$$

Среднемассовая скорость истечения (удельный импульс) [м/с]:

$$J_{sp} = P/m \quad (4)$$

Соответственно, относительные погрешности измерения составляли:

- для единичного импульса  $P$ :  $\pm 5\%$ ;
- для удельного импульса  $J_{sp}$ :  $\pm 8\%$ .

Полученные результаты для двигателя асимметричной схемы представлены в таблице 1, для модели симметричной схемы – в таблице 2.

Таблица 1 - Удельные характеристики лабораторной модели АИПД с асимметричным разрядом

| № п/п | W, Дж | P, мНс | J <sub>сп</sub> , м/с | m, мг/имп |
|-------|-------|--------|-----------------------|-----------|
| 1     | 117,7 | 2,25   | 15200                 | 0,148     |
| 2     | 99,1  | 1,93   | 13300                 | 0,145     |
| 3     | 83,2  | 1,57   | 11600                 | 0,136     |
| 4     | 69,7  | 1,24   | 11000                 | 0,113     |

Таблица 2 - Удельные характеристики лабораторной модели АИПД с аналогичными геометрическими размерами разрядного канала и симметричным разрядом

| № п/п | W, Дж | P, мНс | J <sub>сп</sub> , м/с | m, мг/имп |
|-------|-------|--------|-----------------------|-----------|
| 1     | 118,3 | 2,57   | 14000                 | 0,183     |
| 2     | 99,6  | 2,04   | 12400                 | 0,164     |
| 3     | 83,3  | 1,70   | 11500                 | 0,148     |
| 4     | 69,7  | 1,43   | 11600                 | 0,123     |

На рисунках 6 и 7 приведены графики зависимостей единичного импульса тяги и удельного импульса тяги (среднемассовой скорости) моделей от энергии разряда, соответственно. Видно, что при некотором снижении единичного импульса тяги модель с асимметричным разрядом имеет более высокий (в среднем на 15%) удельный импульс тяги.

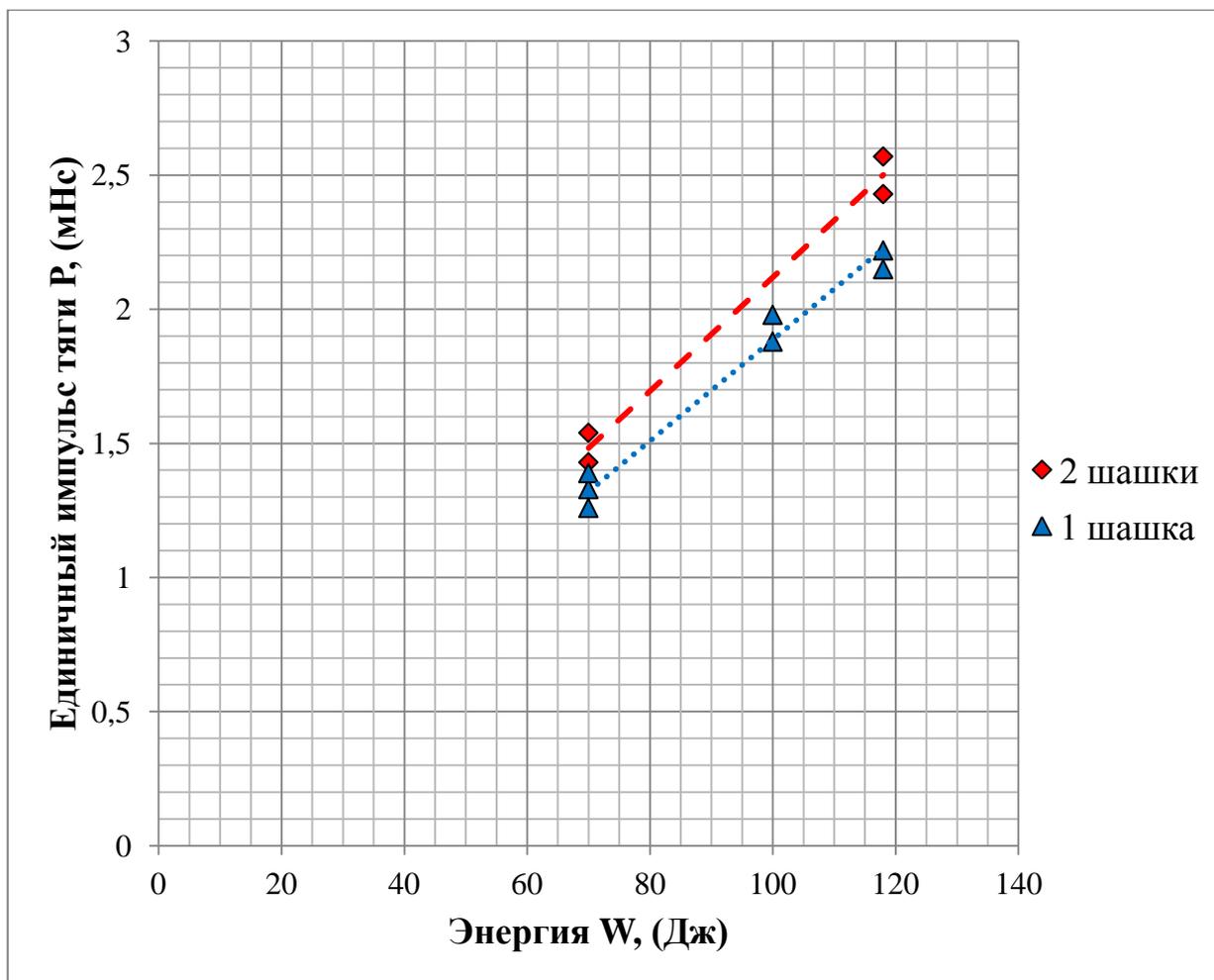


Рисунок 6 - Зависимость единичного импульса тяги от энергии разряда у моделей с асимметричным разрядом и у стандартной модели с такими же геометрическими и энергетическими параметрами.

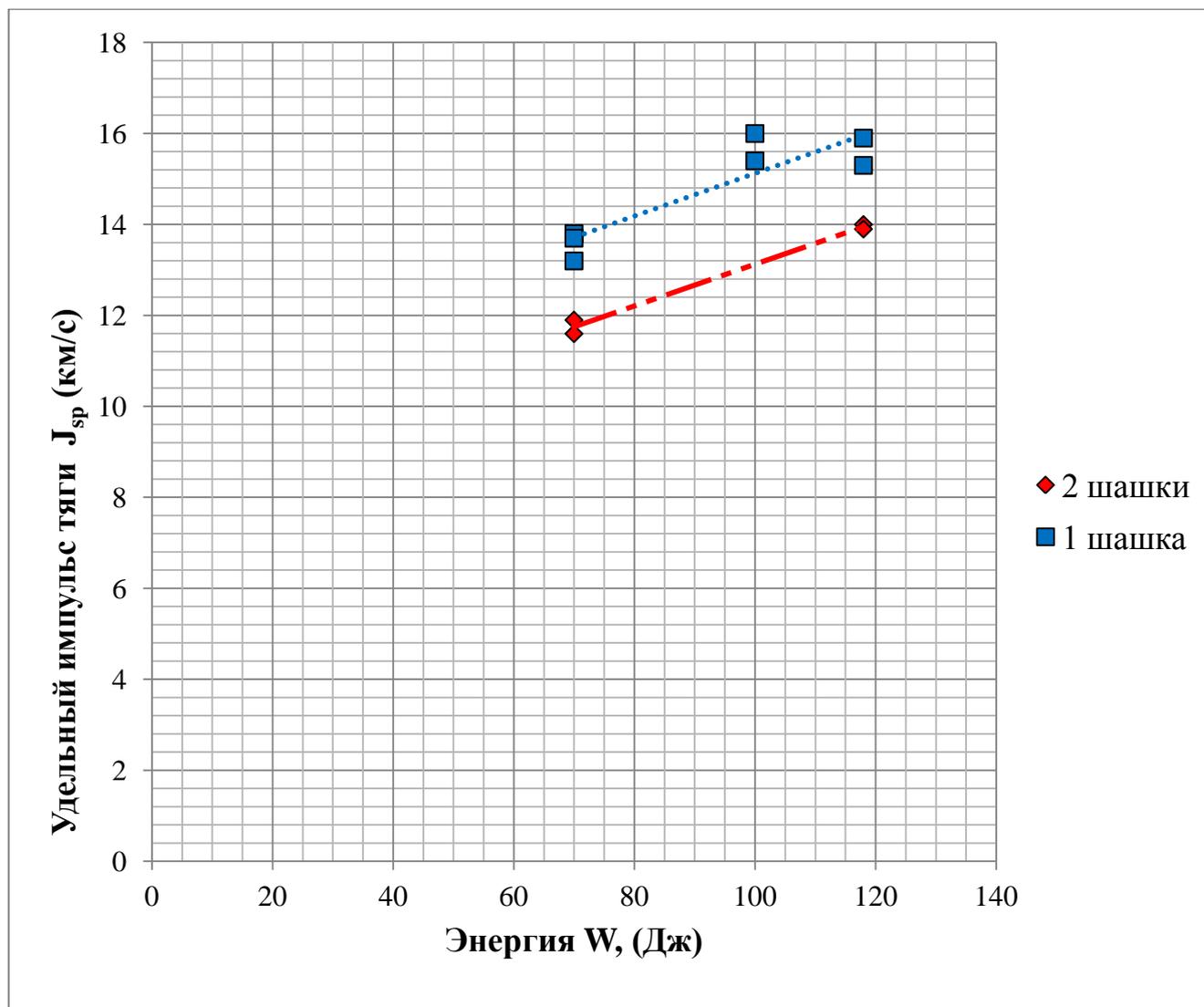


Рисунок 7 - Зависимость среднемассовой скорости плазменного сгустка от энергии разряда у моделей с асимметричным разрядом и у стандартной модели с такими же геометрическими и энергетическими параметрами.

Практическая реализация схемы асимметричного разрядного канала в летных прототипах двигателя потребует устранения двух его основных недостатков – это открытая схема канала и отклонение вектора скорости истечения основной массы рабочего вещества от продольной оси двигателя. Открытая схема канала приводит к тому, что часть рабочего вещества покидает его в направлении перпендикулярном

оси, в сторону противоположную месту размещения шашки. Интенсивное осаждение продуктов разложения фторопласта на элементах конструкции двигателя повышает риск возникновения паразитных пробоев по образовавшейся углеродной пленке. Для предотвращения этого был разработан вариант канала (рисунок 8) с одной шашкой и стенкой из диэлектрического материала с низким коэффициентом распыления (нитрид бора, алюмооксидная керамика). Эксперименты показали, что в данном случае наблюдается некоторое повышение средней скорости истечения плазмы. Вероятнее всего это обусловлено увеличением газодинамической составляющей тяги. Для проверки данного предположения и работоспособности модели со стенкой при длительном функционировании необходимо провести дополнительные исследования.

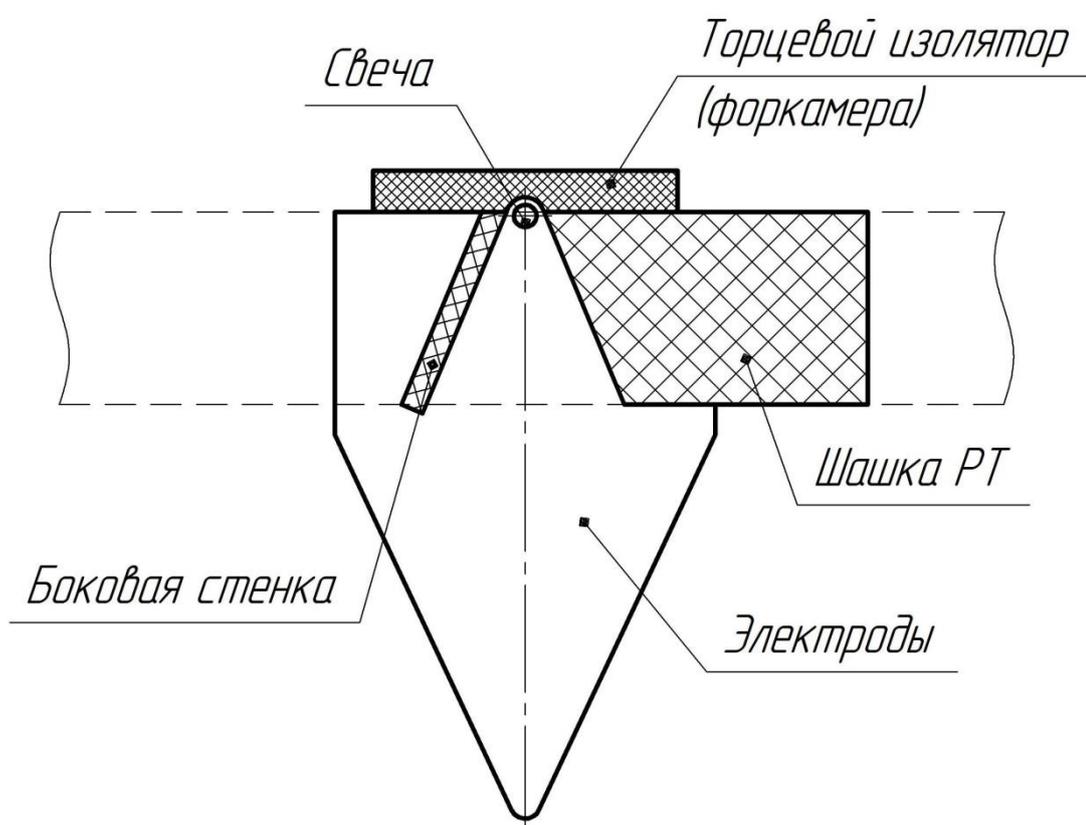


Рисунок 8 – Схема канала с асимметричным разрядом и стенкой

Факт отклонения вектора скорости истечения основной массы рабочего вещества от продольной оси двигателя асимметричной схемы был установлен при изучении характера привязки разряда к поверхности электродов. На фотографии, приведенной на рисунке 9, четко видно, что направление средней линии расположения катодных пятен не совпадает с направлением продольной оси электрода. При работе двигателя классической схемы (с двумя шашками) данная линия совпадает с продольной осью электрода. Схема истечения потока плазмы в модели с асимметричным разрядом представлена на рисунке 10.

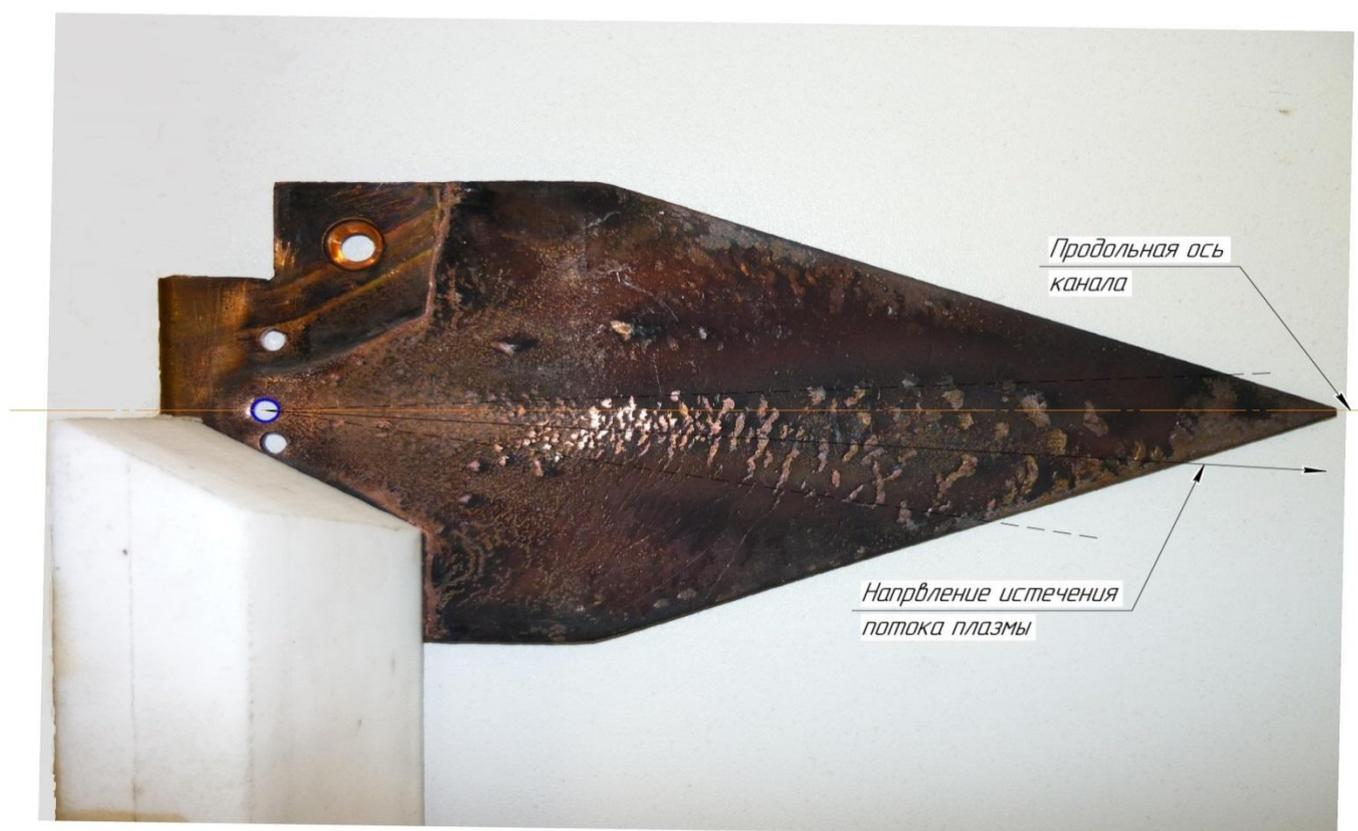


Рисунок 9 - Катод РК после работы. Условно изображены ось симметрии канала и средняя линия распространения катодных пятен

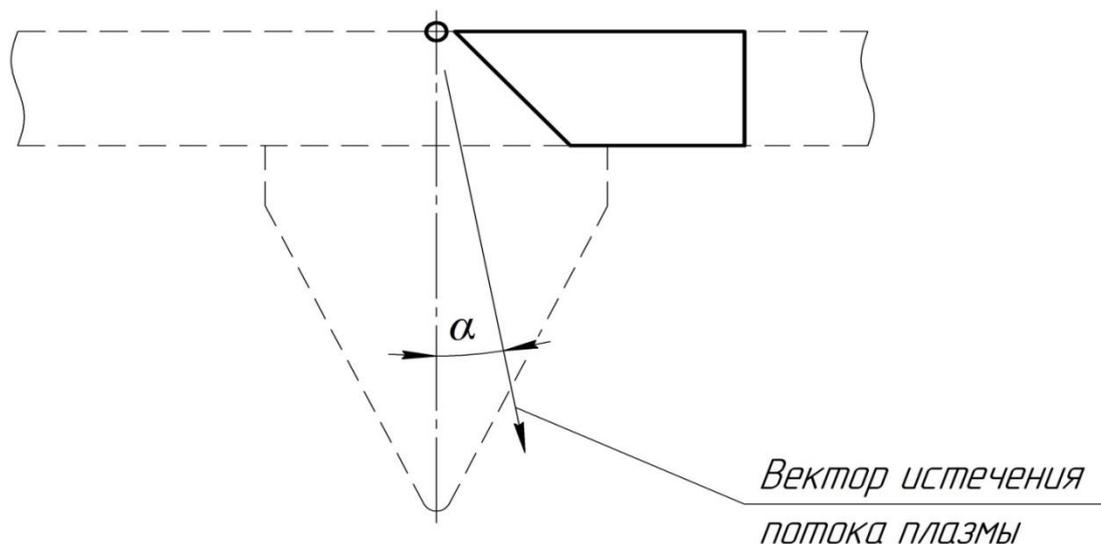


Рисунок 10 - Схема истечения потока плазмы в модели с асимметричным разрядом.

Для более подробного исследования данного явления использовалась методика визуализации потока плазмы с помощью заостренного клина. Его суть заключается в размещении в струе плазмы клина, на острие которого генерируются характерные для сверхзвукового потока ударные волны, хорошо видимые на фотоснимках. По углу наклона ударных волн к продольной оси РК можно определить направление вектора скорости потока и число Маха  $M=1/\sin(\varphi/2)$ , где  $\varphi$  - угол между ударными волнами. По углу наклона биссектрисы ударных волн к продольной оси X двигателя можно оценить угол расходимости потока в плоскости XY. При проведении эксперимента в качестве клина применялась заостренная пластина из оксида бора. Максимальная толщина клина составляла 2 мм, ширина - 40 мм, угол заточки острия  $\sim 10^\circ$ . Клин перемещался в потоке по оси Y с интервалом 15 мм. Съёмка потока плазмы производилась через фланец вакуумной камеры, изготовленный из кварцевого стекла. При этом другие фланцы были закрыты непроницаемыми для лучей света шторками. Для получения снимков

применялась фотокамера Canon D650, установленная на штативе. Параметры настройки фотокамеры подбирались таким образом, чтобы максимально закрыть диафрагму (таким образом, избегали засвечивания кадра) и выдержкой 4 с. При этом лабораторная модель АИПД запускалась с частотой импульсов 0,25 Гц. Внешний вид скачков уплотнения представлен на рисунках 11 и 12 при различном положении клина на оси Y.

В процессе данной работы было проведено исследование влияния изменения расположения канала относительно продольной оси электродов на величину отклонения потока плазмы. На рисунке 13 приведена схема расположения шашки и свечи и направление их смещения относительно продольной оси электродов.

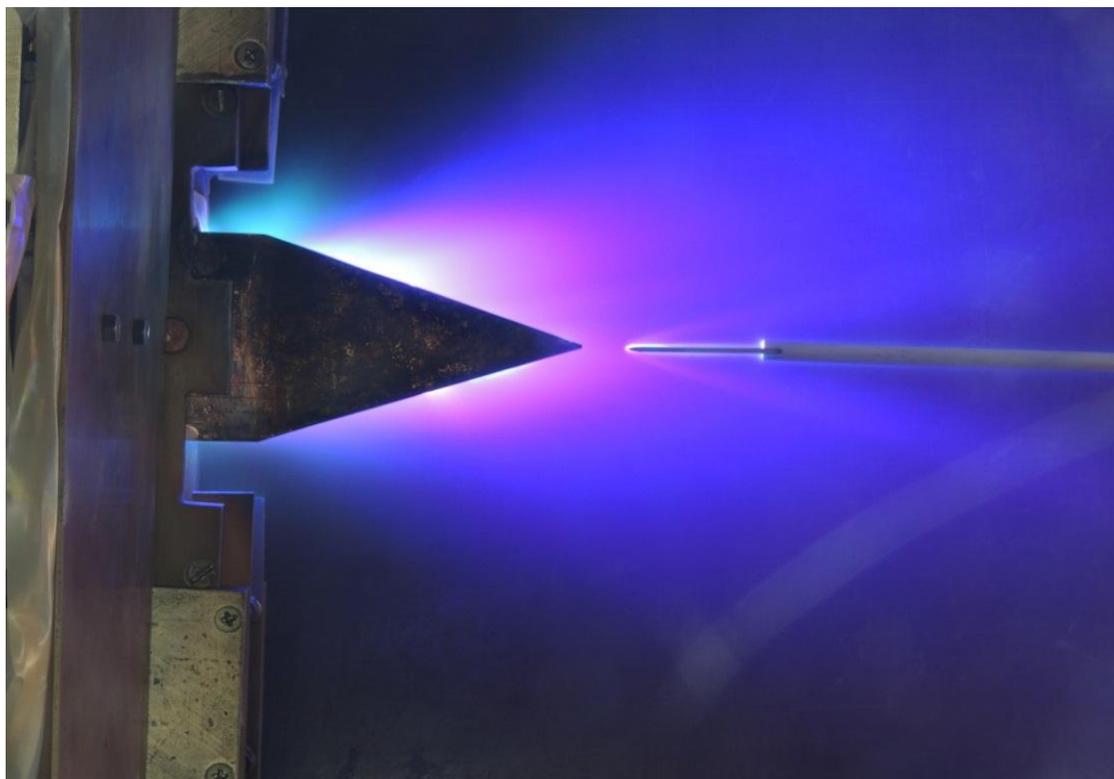


Рисунок 11 - Истечение плазмы из модели с одной шашкой, при положении клина на продольной оси канала (разряд асимметричный)

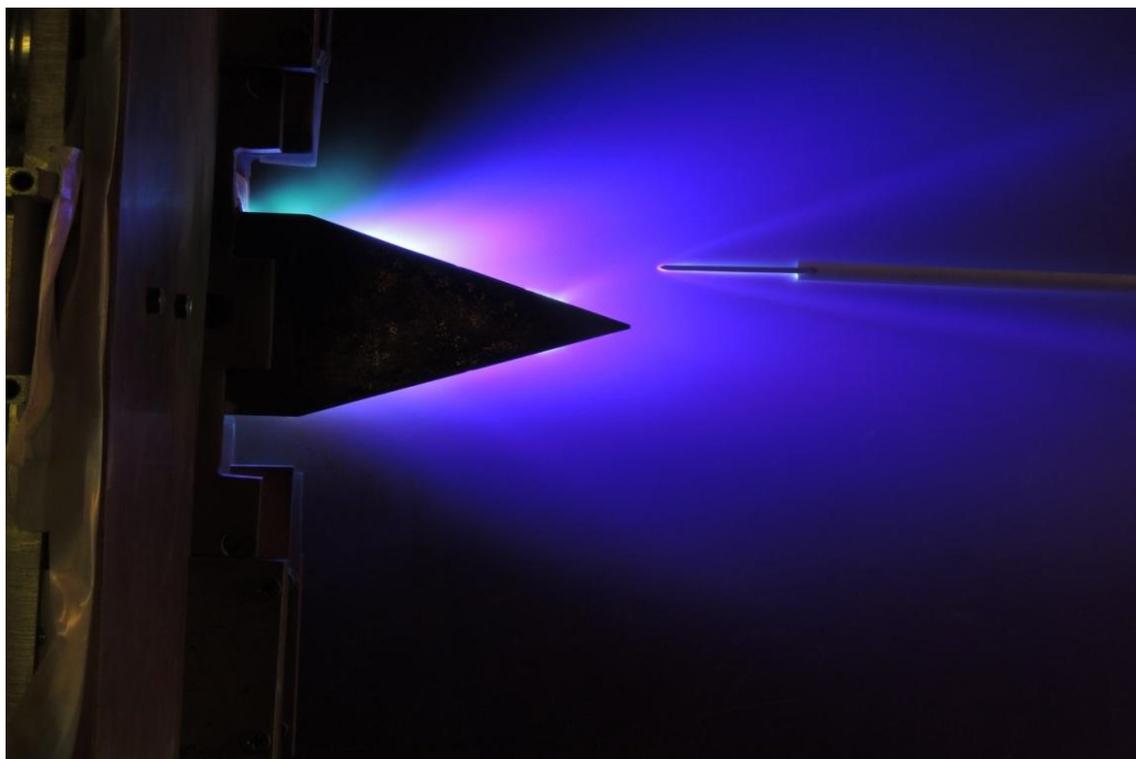


Рисунок 12 - Истечение плазмы из модели с одной шашкой, при положении клина на расстоянии 30 мм от продольной оси канала (разряд асимметричный)

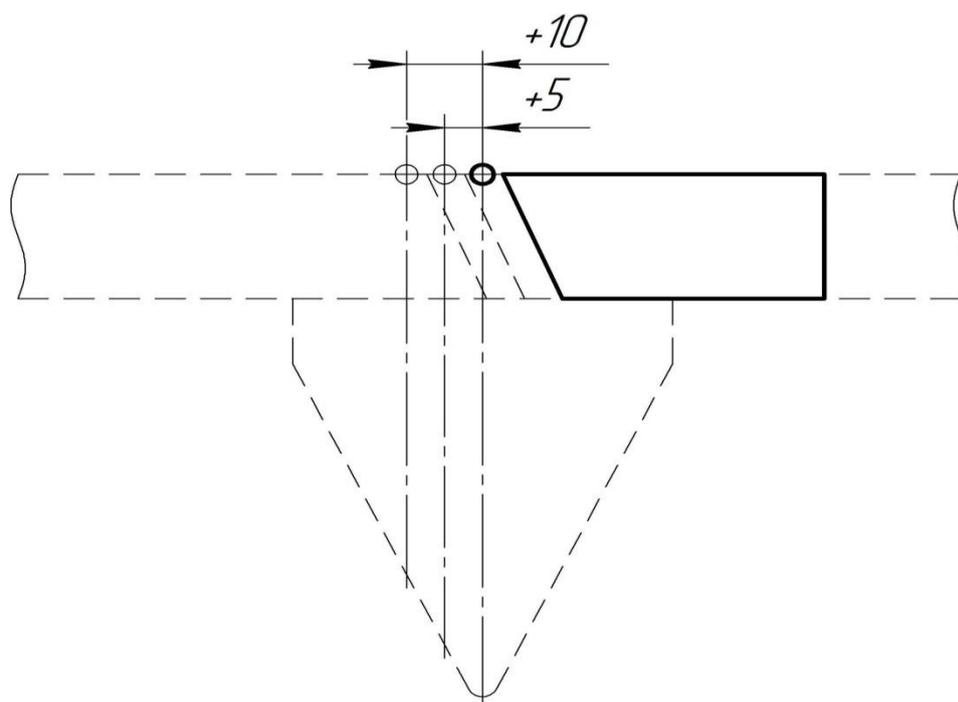


Рисунок 13 - Схема смещения шашки и свечи относительно продольной оси электродов X

Оказалось, что наименьшему углу отклонения потока плазмы соответствует вариант смещения шашки и свечи на 5 мм относительно их исходного состояния (0 мм).

На рисунке 14 приведено характерное поле направлений истечения потока плазмы для асимметричного разряда при смещении свечи поджига на 5 мм от продольной оси разрядного канала. Это соответствует случаю наименьшего отклонения потока плазмы от оси по сравнению с другими вариантами размещения свечи и шашки.

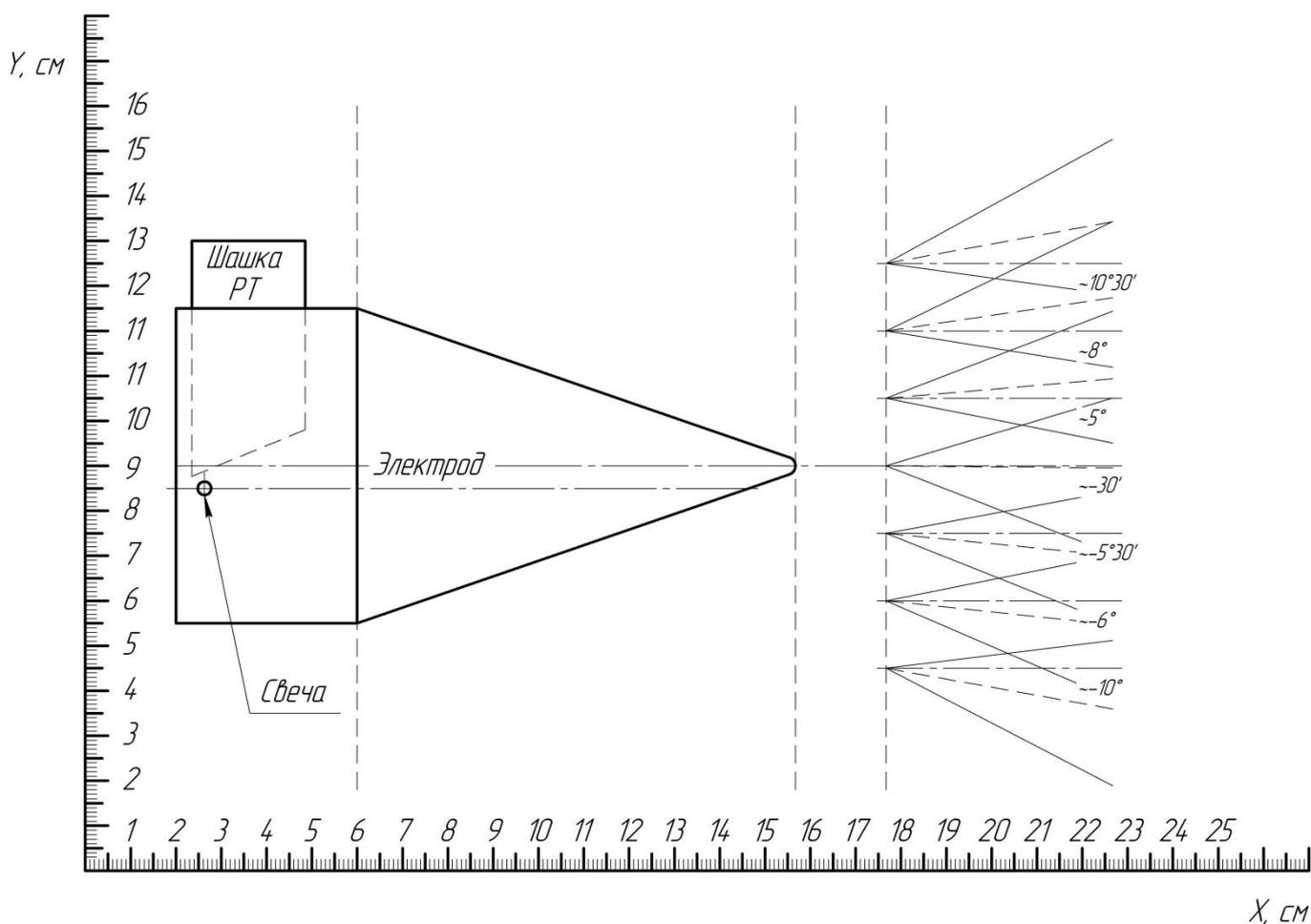


Рисунок 14 - Поле направлений истечения, соответствующее смещению свечи относительно центра РК на 5 мм

Устранить отклонение потока плазмы оси канала при использовании в двигателе асимметричного разряда можно схемным путем, используя вместо одного два поочередно работающих асимметричных разряда. В этом случае вектор средней тяги будет направлен по оси, так как каждый из поочередно вылетающих сгустков плазмы отклоняется в свою сторону на одинаковый угол. Внешний вид модели с двумя асимметричными разрядами приведен на рисунке 15. Здесь свечи поджига и, соответственно, шашки РТ были разнесены друг от друга на расстояние  $10\div 30$  мм для минимизации их влияния друг на друга.

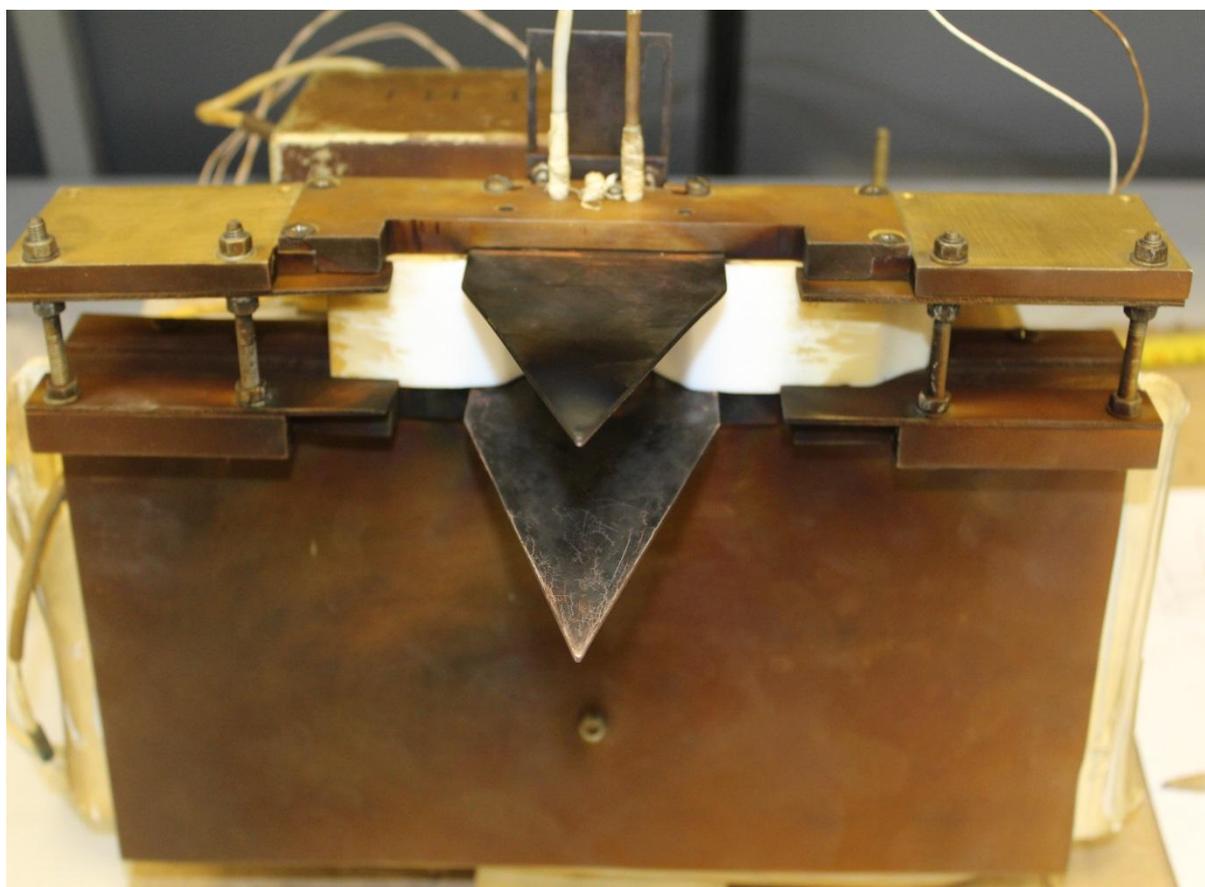


Рисунок 15 - Лабораторная модель АИПД с двумя поочередно работающими свечами

Результаты, полученные при экспериментах с двумя свечами, для наглядности помещены вместе с результатами модели со стандартным каналом в таблице 4.

Таблица 4 - Результаты работы модели с двумя свечами и стандартной модели

| № п/п | Модель-модификация | Энергия, Дж | P, мНс | J <sub>сп</sub> , м/с | m, мг/имп |
|-------|--------------------|-------------|--------|-----------------------|-----------|
| 1     | две свечи          | 117,4       | 1,71   | 11300                 | 0,151     |
| 2     | две свечи          | 117,5       | 2,16   | 12900                 | 0,167     |
| 3     | две свечи          | 117,8       | 2,27   | 13800                 | 0,165     |
| 4     | стандартная        | 118,1       | 2,57   | 14000                 | 0,183     |
| 5     | стандартная        | 118,1       | 2,43   | 13900                 | 0,180     |

Из представленных данных видно, что характеристики модели с двумя свечами несколько хуже, чем у стандартной модели. Это может быть связано с воздействием излучения из сгустка плазмы, возникающего при срабатывании одного асимметричного разряда, на шашку канала второго асимметричного разряда. В результате возникает дополнительный расход рабочего вещества практически не участвующий в процессе создания тяги двигателя. Для устранения влияния одного асимметричного разряда на другой необходимо либо использовать перегородку между каналами из диэлектрического материала с низким коэффициентом распыления, либо рассмотреть схемы с секционированными электродами и существенно большим расстоянием между шашками рабочего тела, чем у исследовавшейся модели.

Таким образом, по результатам проведенных исследований можно сделать вывод о том, что схема двигателя с асимметричным разрядом позволяет повысить

удельный импульс тяги в среднем на 15% по сравнению с классической схемой и при соответствующей доработке может быть использована в опытно-конструкторских работах в области АИПД.

### Библиографический список

1. Ходненко В.П., Колосова М.В. Корректирующие двигательные установки для перспективных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Актуальные проблемы российской космонавтики: труды XXXVII Академических чтений по космонавтике (Москва, 29 января - 1 февраля 2013 г.) - М.: Комиссия РАН, 2013. С. 98-100.

2. Дьяконов Г.А., Любинская Н.В., Семенихин С.А. Хрусталеv М.М. Абляционный импульсный плазменный двигатель для малоразмерных космических аппаратов // Труды МАИ. 2014. №73. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=48558>

3. Антропов Н.Н., Богатый А.В., Дьяконов Г.А., Орлов М.М., Попов Г.А., Тютин В.К., Яковлев В.Н. Разработка абляционных импульсных плазменных двигателей в НИИ прикладной механики и электродинамики // Космонавтика и ракетостроение. 2008. № 3(52). С. 28-34.

4. Антропов Н.Н., Богатый А.В., Дьяконов Г.А., Любинская Н.В., Попов Г.А., Семенихин С.А., Тютин В.К., Хрусталеv М.М., Яковлев В.Н. Новый этап развития абляционных импульсных плазменных двигателей в НИИ ПМЭ // Вестник ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина». 2011. № 5. С. 30-40.

5. Хрусталеv М.М., Любинская Н.В. Квазиодномерная физико-математическая модель ускорения плазмы в АИПД малой тяги // Авиационно-космическая техника и технология. 2006. № 10. С. 171-172.

6. Богатый А.В., Дьяконов Г.А., Нечаев И.Л., Попов Г.А., Марьяшин А.Ю., Халапян К.Г. Перспективы улучшения массогабаритных характеристик абляционных импульсных плазменных двигателей // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2013. Т. 133. № 2. С. 19-26.

7. Хартов В.В. Новый этап создания автоматических космических аппаратов для фундаментальных научных исследований // Вестник ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина». 2011. № 3. С. 3-10.

8. Гришин С.Д., Лесков Л.В., Козлов Н.П. Плазменные ускорители. - М.: Машиностроение, 1983. - 231 с.

9. Богатый А.В., Дьяконов Г.А., Нечаев И.Л.. Абляционный импульсный плазменный двигатель с разделенным механизмом ионизации и ускорения рабочего тела // Труды МАИ. 2012. № 52. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=29468>

10. Балашов В.В., Могулкин А.И., Хартов С.А., Шлыгин А.В. Тепловая модель связки двигателей электроракетной двигательной установки // Труды МАИ. 2014. № 73. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=48536>