

## **Опыт создания электроракетных двигателей большой мощности в ОАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королева»**

В.Г. Островский, А.А. Смоленцев, Б.А. Соколов

### **Аннотация**

Исследования и разработка электроракетных двигателей большой мощности в РКК «Энергия» им. С.П. Королева имеют более чем полувековую историю. Приведены основные этапы разработки магнитоплазодинамических двигателей на литии, завершившиеся созданием двигателя большой мощности (500 кВт) с высокими удельными характеристиками и большим ресурсом. Проведены 500-часовые испытания этого двигателя и космический эксперимент с его моделью. Впервые разработан радиационно охлаждаемый двигатель с анодным слоем, при испытании которого в ЦНИИМАШ на висмуте при мощности 34 кВт были достигнуты удельный импульс 5200 с и КПД 70 %. Предложено альтернативное рабочее тело (йод) для двигателей с замкнутым дрейфом электронов большой мощности и начаты испытания СПД на йоде.

### **Ключевые слова**

электроракетный двигатель; магнитоплазодинамический двигатель; двигателей с замкнутым дрейфом электронов; анод; катод; удельный импульс; КПД.

### **Введение**

Исследования и разработка электроракетных двигателей (ЭРД) и электроракетных двигательных установок (ЭРДУ) в ОКБ-1 – ЦКБЭМ – НПО «Энергия» – РКК «Энергия» имени С.П. Королева (с 1956 г. – ОКБ-1; с 1966 г. – ЦКБЭМ; с 1980 г. – НПО «Энергия»; с 1994 г. – ОАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева) имеют более чем полувековую историю.

В 1958 году после успешного полета первого искусственного спутника Земли по инициативе и указанию С.П. Королева проектные отделы ОАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева приступили к исследованиям с целью создания и использования ЭРД, питаемых от ядерной энергетической установки (ЯЭУ), для межпланетных сообщений.

Принцип работы наиболее эффективных ЭРД заключается в ионизации рабочего тела с последующим ускорением образовавшейся плазмы до больших скоростей (десятки километров в секунду) в электромагнитном или электрическом поле.

Основным преимуществом ЭРД является высокий удельный импульс  $F_{уд}$ . Это дает большую экономию рабочего тела (РТ) или возможность значительно увеличить полезный груз.

Выполненные к началу 1960-х годов проектно-баллистические исследования показали перспективность разработки ядерного ЭРД (ЯЭРД) для межпланетных перелетов в связи с их высокой экономичностью.

Первый поисковый этап работ завершился в 1962 году выпуском эскизного проекта комплекса ракеты-носителя Н-1, в состав которого были включены материалы по ЯЭРД для тяжелых межпланетных кораблей (ТМК).

ЭРД и ЭРДУ для ТМК разрабатывались в отделе ЦКБЭМ под руководством М.В. Мельникова.

#### **Этапы разработки МПД двигателя большой мощности**

Большая мощность и другие параметры позволили сделать выбор в пользу единичного модуля магнитоплазодинамического двигателя (МПД) электрической мощностью 0.5...1.0 МВт. К достоинствам МПД помимо высокой плотности тяги можно отнести большую электрическую мощность единичного модуля в сочетании с высокими достижимыми значениями удельного импульса и коэффициента полезного действия (КПД) при возможности непосредственной стыковки (без преобразователя напряжения) с космической энергоустановкой, например ЯЭУ на базе термоэмиссионного реактора-преобразователя.

При этом предпочтение было отдано МПД с собственным магнитным полем. Это существенно упростило задачу его создания, так как не требовалась разработка источника магнитного поля достаточно большой величины.

Следует отметить, что основные результаты в области ЭРДУ, полученные в ОАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева, длительное время не публиковались. Лишь в 90-е годы стали появляться первые открытые статьи. Поэтому значительная часть результатов появлялась в

открытых изданиях других организаций без ссылки на источник. Например, это касается впервые обнаруженного ОАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева предельного режима МПДД, а также способа его преодоления.

В качестве РТ МПДД был выбран литий. При работе двигателя РТ (литий) от специальной системы подачи и дозировки подается в жидком состоянии заданным расходом в нагретый до температуры примерно 1500 °С испаритель, после чего пар лития ионизируется и поступает в разрядный промежуток. Образовавшаяся плазма ускоряется в собственном магнитном поле сильноточного дугового разряда. Система хранения и подачи (СХП) лития оптимально сочетается с высокотемпературной ЯЭУ и имеет массу, минимальную по сравнению с СХП других РТ, несмотря на малую плотность лития.

Физические свойства лития:

Плотность при 0° С, г/см <sup>3</sup>	0.539
Температура плавления, °С	180.5
Теплота плавления, ккал/кмоль	717
Температура кипения, К	1611
Теплота парообразования, ккал/кг	4606
Потенциал ионизации, В	5.39

Параметры МПДД таковы, что в зоне ускорения (между катодом и анодом) выполняется условие:

$$H_{\phi}^2 / (8\pi P) > 1, \quad (1)$$

где:

$H_{\phi}$  – собственное магнитное поле тока разряда;

$P$  – давление плазмы.

При выполнении этого условия тяга  $F$  для осесимметричного ЭРД выражается известной формулой [1]:

$$F = aI^2 (\ln R_a / R_k + \xi), \quad (2)$$

где:

$I$  – ток разряда;

$\xi$  – коэффициент, равный ~0.5;

$R_a, R_k$  – радиусы анода и катода, соответственно;

$a$  – размерный множитель.

Средняя массовая скорость истечения плазмы определяется как

$$\langle V \rangle = F / G, \quad (3)$$

где:

$G$  – секундный расход рабочего тела.

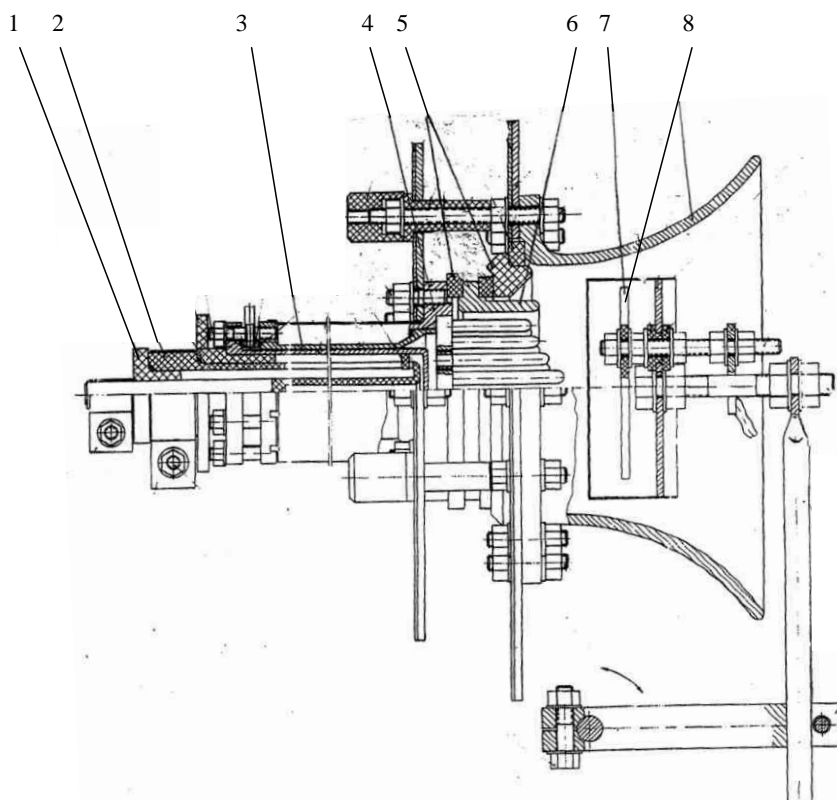
Тяговый КПД двигателя вычисляется по формуле

$$\eta = F^2 / 2 G N, \quad (4)$$

где:  $N$  – электрическая мощность, потребляемая двигателем.

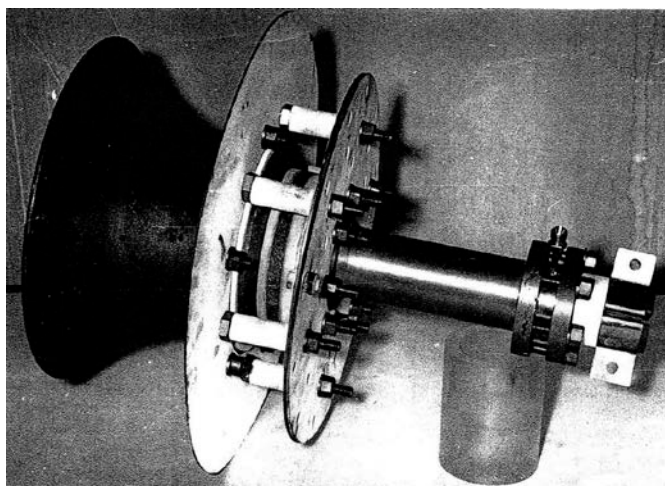
Накопленный ОАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева опыт позволил уже в 1966–1968 годах разработать, изготовить и испытать конструкцию мощного торцевого двигателя или МПДД (МПДД - по международной классификации) (Э4170-521), в которой были решены многие задачи: определены размеры, конструкция и форма электродов, обеспечены защита изоляторов от теплового воздействия разряда, подача и испарение РТ – лития, запуск двигателя при относительно низком напряжении. Также были предложены конструкционные материалы и оптимальная технология узлов двигателя.

Один из вариантов конструкции Э4170-521 приведен на рисунке 1; фотография двигателя представлена на рисунке 2.



1 – изоляторы; 2 – нагреватель; 3 – испаритель; 4 – блок катода; 5 – изоляторы; 6 – нейтральная вставка; 7 – анод; 8 – стартовый нагреватель с агрегатом его перемещения

**Рис.1. Конструкция мощного торцевого двигателя**



**Рис.2. Конструктивное исполнение двигателя Э4170-521**

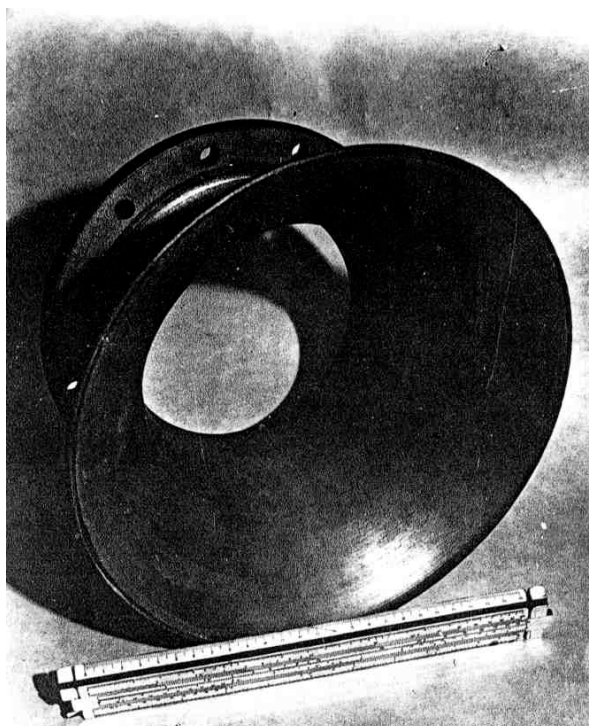
В двигателе были впервые реализованы следующие новые предложения:

- блок катода со шнековым испарителем и расположенным внутри него графитовым нагревателем (рисунок 3), обеспечившим подачу пара лития в катод и запуск двигателя при напряжении приблизительно 40...50 В, при помощи стартового нагревателя, снабженного приводом;
- защита изоляторов от непосредственного воздействия разряда с помощью нейтральных вставок;
- радиационно-охлаждаемый вольфрамовый анод, изготовленный методом плазменного напыления с последующим отжигом в водороде (рисунок 4).



1 – проволочный катод; 2 – испаритель; 3 – штуцер входа лития

**Рис.3. Блок катода**



**Рис.4. Радиационно-охлаждаемый вольфрамовый анод**

Катод двигателя стержневого типа, предложенный специалистами НИИТП, был изготовлен из монокристаллических вольфрамовых стержней диаметром 10 мм, запрессованных в плату из вольфрамового сплава МВ-52. Недостатки двигателя были связаны с изготовлением и эксплуатацией стержневого катода, так как в процессе функционирования из-за рекристаллизации вольфрама стержни охрупчивались и ломались в месте заделки в плату. Двигатель со стержневым катодом нельзя было испытывать в вертикальном положении.

Длительная стационарная работа двигателя (часы, десятки часов) реализовывалась только при использовании предложенного в ОАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева проволочного катода, в котором вольфрамовые проволоки диаметром 1...2 мм были плотно упакованы в вольфрамовую обойму (см. рисунок 3). По сравнению с предложенным в НИИТП стержневым катодом, технологически трудно выполнимым, было получено новое качество – катод стал работать в режиме многополостного, что позволило получить миделевую плотность тока более  $100 \text{ A/cm}^2$  при длительной работоспособности.

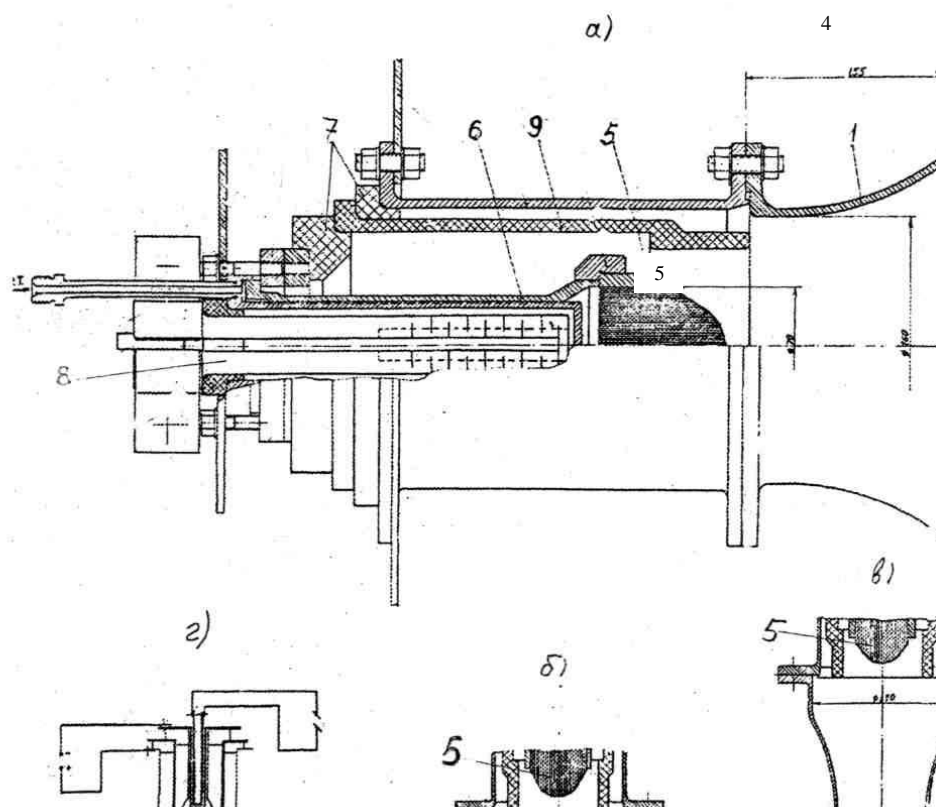
#### **Выбор профиля анода**

В следующей модификации двигателя Э4170-521, разработанной в ОАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева (рисунок 5), впервые катод был изготовлен в виде

вольфрамовых проволочек диаметром 2 мм, запрессованных в вольфрамовую обойму (рисунок 3). Нагреватель катода был выполнен из графита марки В-1.

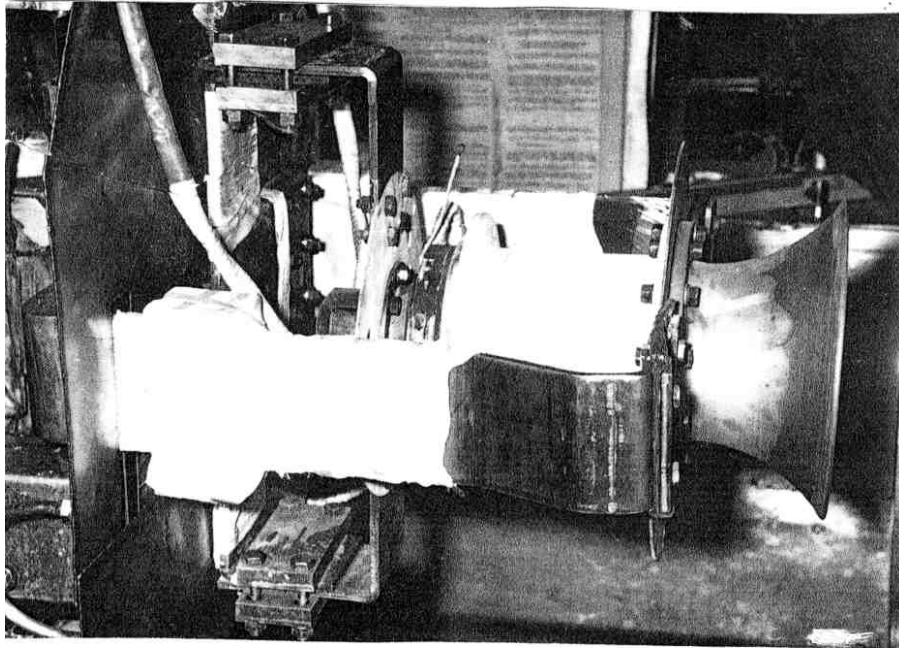
Далее необходимо было исследовать усовершенствованный МПДД и установить степень влияния различных профилей анода на характеристики. Исследовались МПДД Э4170-521 (см. рисунок 5) с монотонно расширяющимся анодом (рисунок б), с сужающимся анодом, анодом с горловиной (типа сопла Лавалья) и с цилиндрическим анодом. Эксперименты показали, что малые изменения профиля анода практически не влияют на характеристики.

Эксперименты проводились с одним блоком катода. Испытания на установившемся тепловом режиме подтвердили, что правильный выбор профиля анода может оказать существенное влияние на характеристики и работоспособность двигателя.



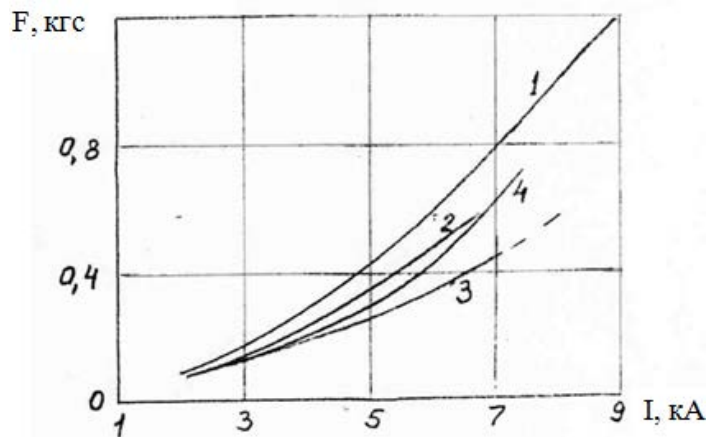
а – монотонно расширяющийся анод; б – сужающийся анод; в – анод в виде сопла Лавалья;  
 г – электрическая схема подключения ЭРД; 1 – проволочный катод; 2 – нейтральная вставка;  
 3 – испаритель лития; 4 – изоляторы; 5 – нагреватель

**Рис.5. Конструкция мощного торцевого электроракетного двигателя Э4170-521 с различными вариантами анодов**



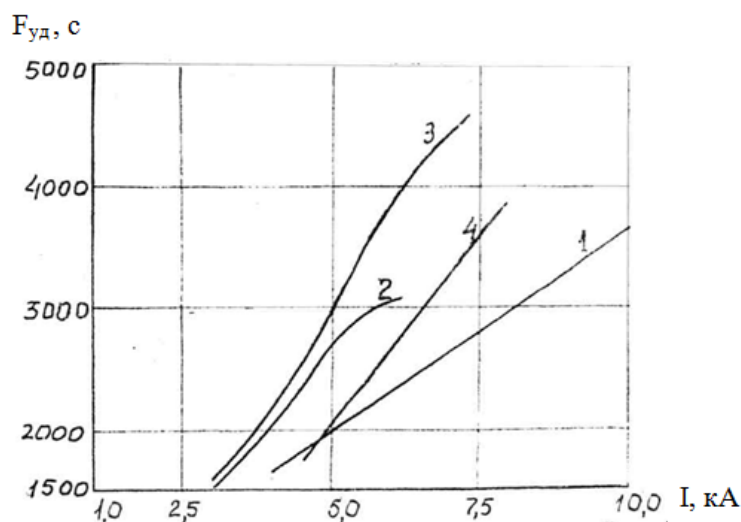
**Рис.6. Двигатель Э4170- 521 в вакуумной камере стенда ОКБ «Факел»**

Вывод о профиле анода МПДД сделать трудно, так как каждый имеет определенные преимущества и недостатки и области рационального использования. Наибольшая тяга  $F$  при одинаковых токах разряда (рисунок 7) соответствует двигателю с монотонно расширяющимся профилем, наименьшая – у МПДД с анодом в виде сопла Лавалья. При этом наибольший удельный импульс  $F_{уд}$  у двигателя с анодом в виде сопла Лавалья (рисунок 8), наименьший – у двигателя с монотонно расширяющимся анодом. Сужающийся и цилиндрический профили анода обеспечивают характеристики, занимающие промежуточные значения. Наибольшие токи разряда при заданном расходе РТ характерны для МПДД с профилем анода в виде сопла Лавалья. Наибольшие расходы РТ для достижения того же тока разряда необходимы для двигателя с монотонно расширяющимся анодом.



**Рис.7. Зависимость тяги двигателя от тока разряда**



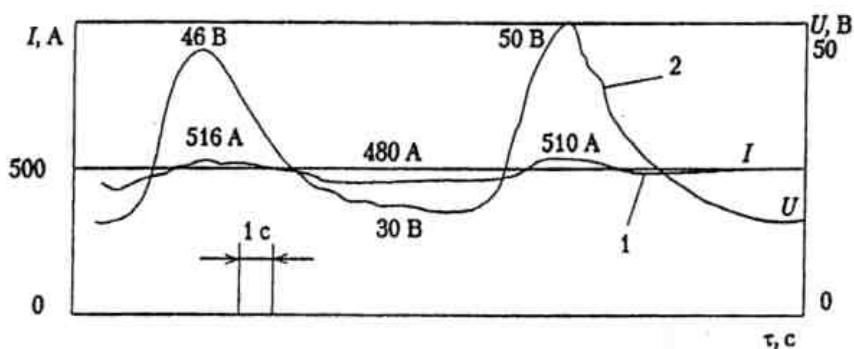


Профили анода: 1 – монотонно расширяющегося; 2 – сужающегося; 3 – с горловиной типа сопла Лавеля; 4 – цилиндрического

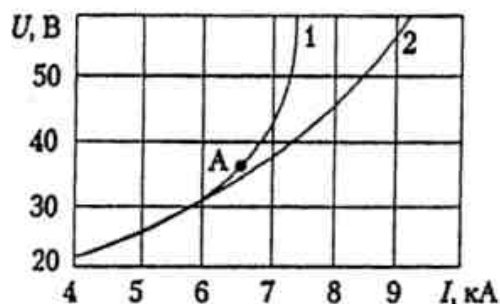
**Рис.8. Зависимость удельного импульса двигателя от тока разряда**

### Предельные кризисные явления в МПДД и способы увеличения предельного тока

Тяга МПДД прямо пропорциональна квадрату тока, поэтому для увеличения удельной тяги необходимо при постоянном расходе РТ повышать разрядный ток. Однако в ОАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева в 1969 году уже было обнаружено явление предельного режима МПДД, заключающееся в резком увеличении разрядного напряжения при достижении разрядным током некоторого предельного (при данном расходе лития) значения (рисунок 9 и рисунок 10). Попытки увеличить предельные токи  $I_{пр}$  путем профилирования анода или подачи части РТ в анод не достигли значительного эффекта.



**Рис. 9. Осциллограммы разрядного тока и напряжения МПДД**

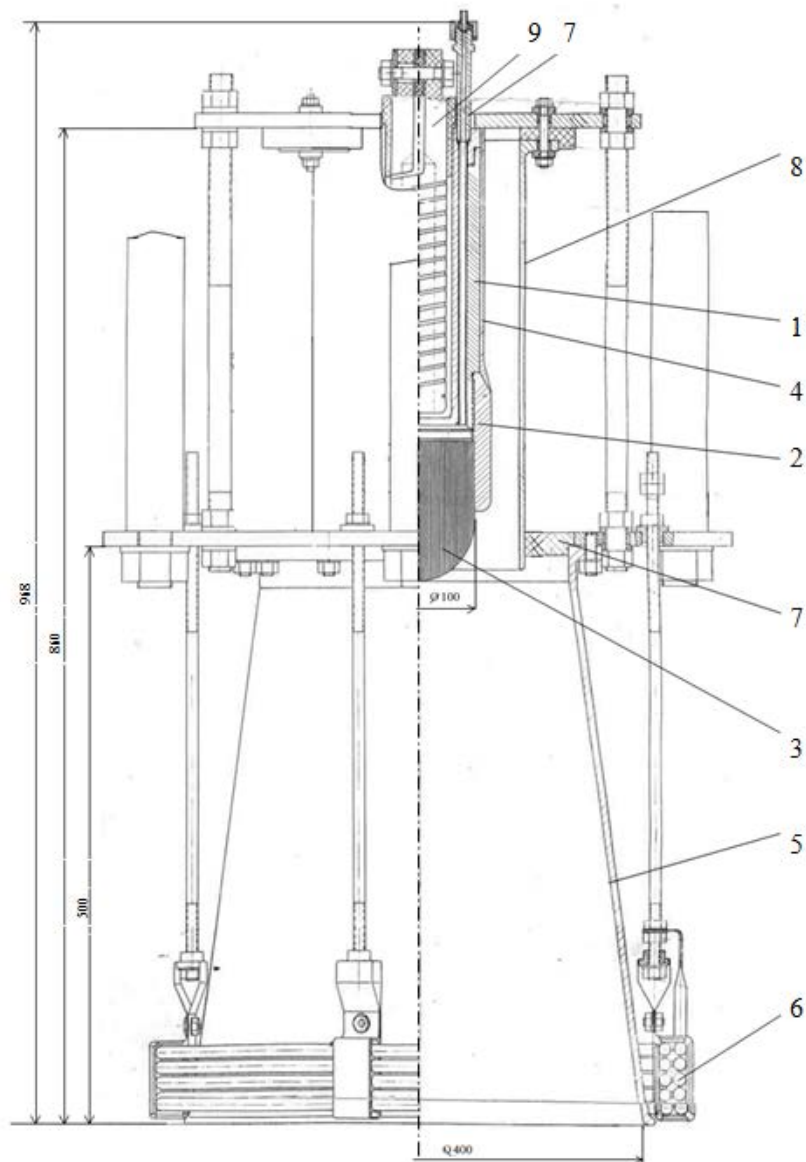


**Рис. 10. Вольтамперная характеристика МПДД с выключенным (1) и с включенным магнитным полем (2); точка А – точка начала кризиса тока**

В работе [2] кризисные явления в сильноточном МПДД объясняют отжатием потока плазмы от анода и ее разогревом в прианодной области, и дана рекомендация: «увеличение предельного тока  $I_{пр}$  возможно путем повышения концентрации плазмы в прианодной области за счет дополнительной подачи рабочего тела». Авторы провели экспериментальное исследование подачи части РТ через анод сильноточного МПДД.

Испытания разработанных в ОАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева МПДД электрической мощностью до 100 кВт с подачей части РТ через анод показали, что происходит увеличение предельного тока на 10...20 % при соответствующем увеличении абсолютной тяги и удельного импульса. Однако относительно незначительное улучшение параметров за счет частичной подачи РТ через анод и трудности, связанные с подачей лития в вольфрамовый анод МПДД большой мощности, вряд ли оправдывают применение расходных анодов.

Экспериментальные исследования, проведенные в ОАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева, с целью определения путей увеличения предельных токов показали, что наиболее эффективным способом является создание на выходной кромке анода небольшого соленоидального магнитного поля (приблизительно  $10^4$  А/м) [3]. Для подтверждения эффективности этого способа и, соответственно, удельных характеристик МПДД в 1970 году было проведено испытание разработанного и изготовленного в ОАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева двигателя большой мощности (Э5610-521 ОК) на стенде Калининградского филиала ОКБ «Заря». Схема его аналога дана на рисунке 11. Блок катода этого двигателя состоял из литой вольфрамовой обоймы внутренним диаметром 100 мм, в которую запрессован пакет из вольфрамовых проволок.



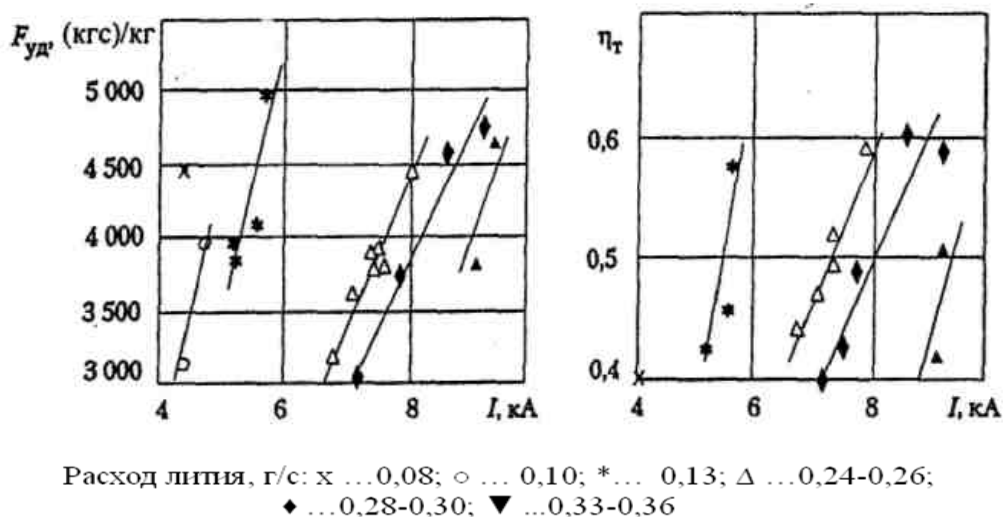
1 – блок катода; 2 – обойма катода; 3 – пакет проволок катода; 4 – слой вольфрама; 5 – анод;  
6 – соленоид; 7 – изоляторы; 8 – нейтральная вставка; 9 – нагреватель

**Рис.11. Двигатель Э5610-521**

С обоймой был герметично соединен испаритель лития, выполненный в виде коаксиальных цилиндров из молибденового сплава ВМ-1 с набивкой молибденовой проволокой диаметром 1.5 мм. Стык испарителя герметизировался пайкой, резьбовое соединение вольфрамовой обоймы катода с испарителем герметизировалось слоем вольфрама пористостью, не превышающей 1...2 %, что позволило исключить травление пара лития через это резьбовое соединение.

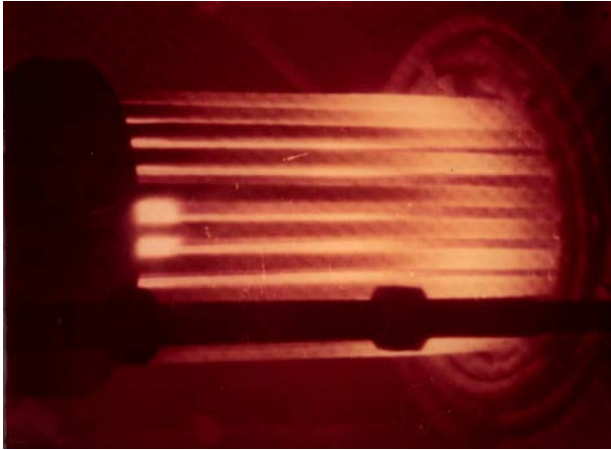
Замена шнекового испарителя на испаритель с набивкой проволокой упростила технологию его изготовления и обеспечила устойчивое испарение лития при расходах до 0.35 г/с (без пульсаций).

Анод двигателя был выполнен в виде конуса из вольфрама длиной 400 мм. Диаметр анода на входе составлял 190 мм при угле раскрытия  $10^\circ$ . Испытания на стационарных режимах (в течение нескольких часов) подтвердили хорошую работоспособность всех узлов двигателя в широком диапазоне токов и расходов лития. Удельный импульс тяги достигал 5000 с, а тяговый КПД – 60 % [1.6] (Рисунок 12). В 1970 году двигатель прошел 10-часовые испытания.



**Рис. 12. Зависимости удельного импульса тяги и КПД двигателя от разрядного тока**

Не уступал проволочному (мультиканальному) катоду при длительной работоспособности и предложенный специалистами ОАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева пористый, изготовленный горячим прессованием вольфрамовых сферических гранул малого диаметра. Пористость составила приблизительно 30 %, при этом пар лития в катод подавался через шлицы шнекового испарителя, изготовленного из молибдена и герметично соединенного с пористым элементом катода методом плазменного напыления вольфрама. Пористый катод испытывался в составе двигателя Э5287-521 большой мощности [4]. Диаметр анода равнялся 190 мм при диаметре катода равном 70 мм. В ходе испытания двигателя были получены высокие значения удельных параметров: при токе разряда порядка 7 кА КПД достигал значения около 0.5 при удельном импульсе выше 6000 с и тяге до 500 г. Необходимо также отметить, что впервые в процессе испытаний МПДД изменялся цвет истекающей из двигателя плазменной струи. При менее напряженных режимах работы двигателя струя плазмы имела малиновый цвет (рисунок 13), что соответствовало резонансному уровню возбужденных атомов лития с длиной волны  $6708 \text{ \AA}$ ; на напряженных режимах работы цвет струи изменялся и становился ярко-зеленым, что соответствовало резонансному уровню возбужденных ионов лития с длиной волны  $5485 \text{ \AA}$  (рисунок 14).



**Рис.13. МПДД со стержневым анодом средней мощности**



**Рис. 14. МПДД с сужающимся анодом большой мощности**

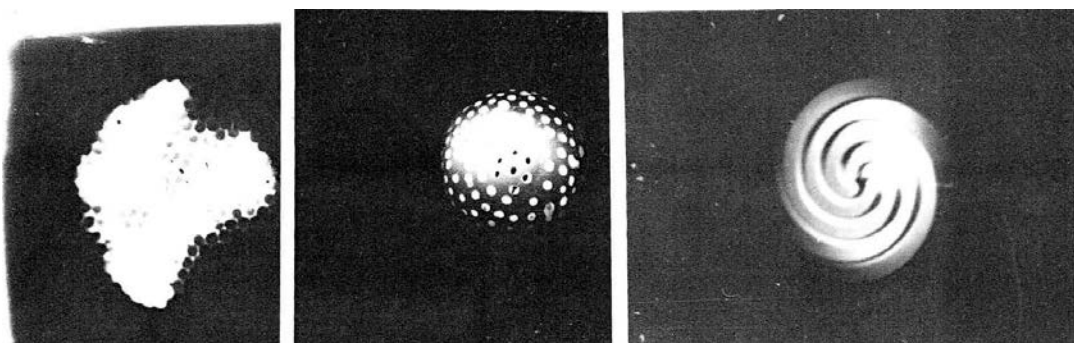
### **Поиск путей увеличения ресурса МПДД до нескольких тысяч часов**

К концу шестидесятых годов XX века одной из главных для двигателистов стала задача обеспечения ресурса мощного МПДД, и, прежде всего, его наиболее нагруженного узла – катода, так как из всех элементов он имеет максимальную плотность тока, максимальную температуру и подвержен бомбардировке тяжелыми частицами – ионами. Поэтому именно катод ограничивал ресурс работы МПДД.

В качестве основной схемы катода была исследована многополостная система, в частности вышеупомянутый простой ее вариант – проволочный катод, представляющий собой пакет из вольфрамовых проволок, запрессованных в вольфрамовую обойму. Через него подается рабочее тело в виде газа или пара. Такой катод представляет собой совокупность большого числа (до нескольких тысяч) полых катодов, образованных промежутками между проволоками.

На кафедре физики МАИ и в Калининградском филиале ОКБ «Заря» состоялись испытания проволочного катода в составе моделей двигателей на малых токах (до ~1 кА) и в составе сильноточных двигателей, разработанных и изготовленных в ОАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева, продолжительностью до 100 часов. Было установлено, что работоспособность катода определяется, прежде всего, плотностью тока на катоде и расходонапряженностью (т. е. расходом, приходящимся на единицу миделевой поверхности катода). В ОАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева была разработана и изготовлена конструкция модели двигателя с разборным катодом для планомерного исследования ресурсных характеристик катодов, которое проводилось на стенде кафедры Э-8 МВТУ им. Н.Э. Баумана по договору с ОАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева. Состоялось несколько десятков длительных испытаний (приблизительно 20 часов каждое), в основном

предложенных специалистами ОАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева, различных конструкций многополостных вольфрамовых катодов (проволочных, стержневых, пористых, спиральных, дырчатых), выполненных, в том числе, и из монокристаллического вольфрама. На рисунке 15 приведены фотографии работающих катодов. Во время работы многополостного катода в режиме полых катодов условия в полостях сохраняются в том диапазоне, когда ионизационная длина свободного пробега электрона меньше характерного размера полости, т. е. внутри полостей происходит ионизация РТ. Эти условия в основном определяются видом РТ, его расходом и характерным размером полостей катода. В начале внутреннего столба плазмы есть активная зона, перед которой атомы РТ еще не ионизованы. Привязка разряда к стенкам катода и его максимальная температура устанавливаются, как правило, в активной зоне. Количество работающих полостей зависит от тока из единичной полости, связанного с расходом РТ. При увеличении значения тока или уменьшении расхода РТ количество работающих полостей возрастает. Температура и падение потенциала у катода при этом практически не изменяются. Снижение расхода лития ниже некоторого предельного значения приводит к прекращению его ионизации в полостях и переходу разряда на торцевую поверхность катода. Этот режим сопровождается значительным повышением температуры и увеличением катодного падения потенциала. Плотность термоэмиссионного тока, рассчитанная по формуле Ричардсона – Дешмана [5], при измеренных параметрах совпадает с плотностью тока, определенной по отношению тока к поверхности, измеренной по следам эрозии катода. Эрозия многополостного катода происходит в основном из-за испарения материала катода (вольфрама) в полостях и «выдувания» последнего РТ.

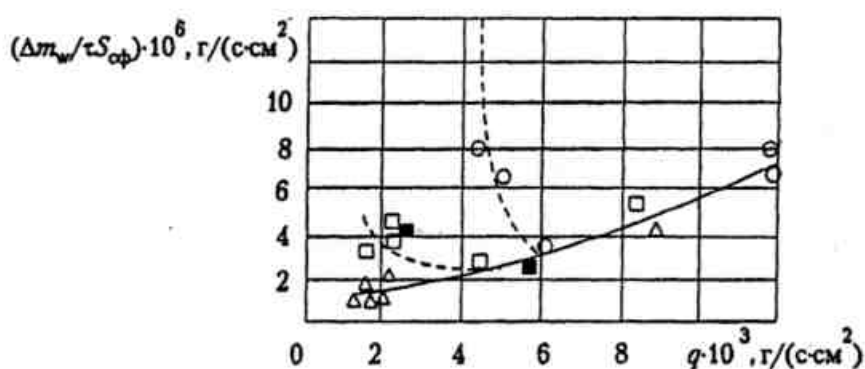


а – проволочный; б – дырчатый; в – спиральный

**Рис.15. Вид катодов, функционирующих в составе двигателя Э4916-521**

На рисунке 16 показана зависимость удельной скорости уноса материала катода от расхода лития, отнесенного к его торцевой поверхности (расходонапряженности), и плотности тока на катоде. При работе на литии в режиме многополостного катода катодное

распыление незначительно из-за низкого катодного падения потенциала. В этом случае температура катода составляет 3000...3100К, скорость уноса вольфрама ( $\Delta m/\tau$ ) с единицы поверхности катода ( $S_{сф}$ ) составляет примерно  $10^{-6}$  г/(с×см<sup>2</sup>), и она возрастает с увеличением расхода РТ. При работе проволочного катода в диффузном режиме (когда разряд выносятся из полостей на торцы проволок) скорость уноса вольфрама растет с уменьшением расхода, отнесенного к торцевой поверхности. Это объясняется ростом температуры катода и катодного падения потенциала. Указанное значение скорости уноса вольфрама с единицы поверхности катода ограничивает ресурс его работы: он не превышает нескольких сотен часов.



----- - работа в режиме многополостного катода;  
 ----- - диффузный режим работы катода.

Δ, ■, □ и ○ – плотность тока 100, 160 (при I = 5 000 А); 160 (при I = 500 А); 240 А /см<sup>2</sup>

**Рис.16. Зависимость удельной скорости уноса материала катода от расходонапряженности лития и плотности тока на многополостном катоде**

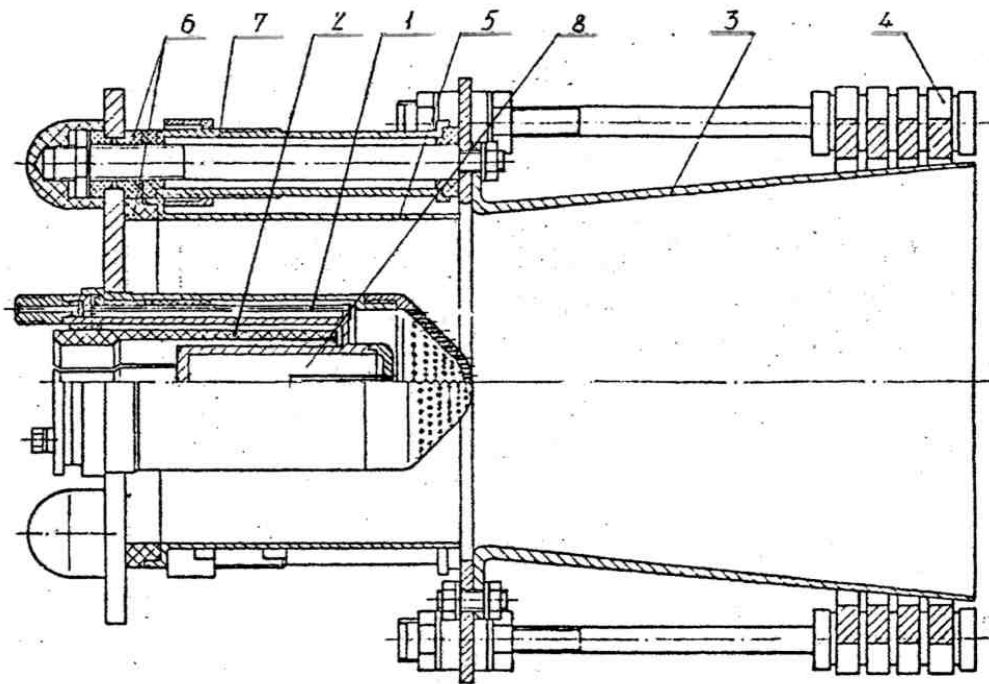
Катоды, изготовленные из вольфрамовой проволоки, легированной активирующими присадками, в частности окисью иттрия, снижающими работу выхода материала катода, обеспечили лишь кратковременный (порядка нескольких часов) эффект снижения температуры до 2400 К. Она повысилась до 2900 К через 3 ч 40 мин работы двигателя. С учетом особенностей работы катодов МПДД (большие плотности тока, подача пара лития через полости катода, ионная бомбардировка и т. д.) необходимо было решить задачу возобновления активирующего покрытия в активной зоне полых катодов, так как готовых решений ее не существовало.

Увеличить ресурс работы катода МПДД непрерывного действия впервые в мировой практике удалось в ОАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева. Во внутреннюю полость блока многополостного катода устанавливали ампулу, содержащую активирующую присадку на основе бария (барий и окись бария) и снабженную дозатором [6] (рисунок 17). Бариевая

активирующая присадка поступает в полости многополостного катода или через поры вольфрамовой губки (в случае применения пористого катода) в активную зону и на наружную поверхность катода, как миграцией адсорбированных атомов, так и кнудсеновским течением пара. Достигнув эмитирующей поверхности, барий мигрирует от каждой полости (поры) на расстояние, определяемое коэффициентом миграции и временем жизни атомов на поверхности. Время жизни определяется энергией адсорбции бария на поверхности вольфрама и температурой поверхности. На рабочей поверхности вольфрама барий (и его окисел) заметно снижает работу выхода электронов вольфрама. В течение срока службы катода барий медленно расходуется испарением с эмитирующей поверхности и течением из полостей, пополняясь за счет запасенной в ампуле активирующей присадки. Испытания показали, что скорость уноса бария и окиси бария мала и составила лишь 0.1...0.5 % от расхода РТ (лития).

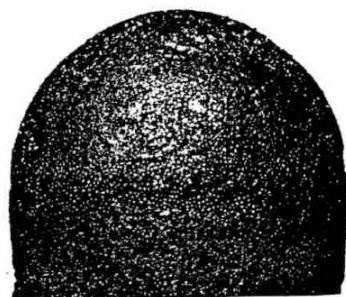
Использование активирующей присадки на основе бария в многополостных (пористых) катодах МПДД позволило примерно на 1300 К понизить температуру катода, т. е. на несколько порядков уменьшить скорость эрозии вольфрама [7]. На рисунке 18 представлены снимки пористых катодов диаметром 18 мм: катода, испытанного в течение 40 часов на литии при плотности тока на катоде  $\sim 100 \text{ А/см}^2$  без активирующей присадки (а); катода, проработавшего 133 часа на литии и активирующей присадке на основе бария при такой же плотности тока (б), а также фрагменты десятикратно увеличенных соответствующих поверхностей пористых катодов (в, г). Поверхность пористого катода, работавшего на литии без активирующей присадки (в), имеет следы оплавлений, характерные для катодов, работающих при высоких температурах (более 3000 К). Внешний вид катода, работавшего на литии с активирующей присадкой (г), свидетельствует об отсутствии оплавлений.





1 – изоляторы; 2 – крепежные детали; 3 – нагреватель; 4 – блок катода-испарителя; 5 – нейтральная вставка; 6 – ампула, содержащая активирующую присадку; 7 – анод; 8 – управляющий соленоид

**Рис.17. Стационарный МПД большой мощности**



а



б



в



г

**Рис.18. Пористые катоды, отработавшие в составе двигателя Э4916-521 на литии при плотности тока порядка  $100 \text{ A/cm}^2$**

Обычно в двигателестроении увеличение ресурса двигателя достигается за счет снижения его характеристик. Основную цель работы – более чем десятикратное увеличение ресурса МПДД – удалось дополнить значительным улучшением удельных характеристик за счет уменьшения катодного падения потенциала благодаря резкому снижению работы выхода катода.

После 133-часовых испытаний бариевого катода в составе модели двигателя было рассчитано количество бария в ампуле, необходимого для длительной работы двигателя (до 500 часов) мощностью до 500 кВт.

Был разработан и изготовлен стационарный МПДД мощностью 500...600 кВт для ресурсных испытаний. В его конструкции были реализованы почти все технические решения, способствующие улучшению характеристик и повышению работоспособности. В частности, блок проволочного катода содержал капсулу с дозатором, наполненную активирующей присадкой на основе бария; молибденовый испаритель лития имел возможность испарять до 0.4 г/с лития. При этом расход пара лития в периферийной области катода был меньше, чем в центральной его части. Нейтральная вставка выполнена открытой, что обеспечивало снижение ее температуры при работе двигателя и устранение паразитных пробоев. Конический анод из вольфрама изготавливался методом плазменного напыления в контролируемой среде. Соленоид из молибденового листа располагался у выходной кромки анода.

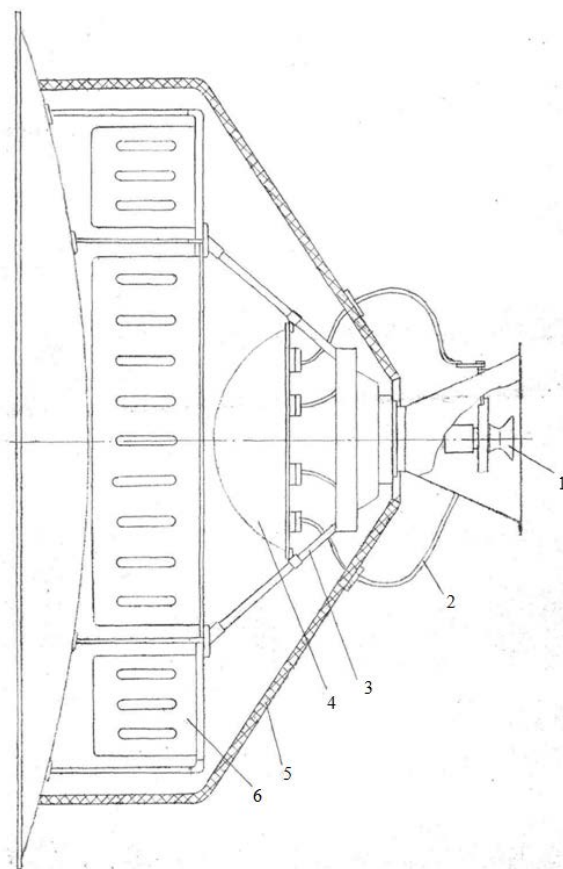
Ресурсные испытания двигателя проводились на малом литиевом стенде (МЛС) ОАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева. Потребляя мощность 450...500 кВт, двигатель в стационарном режиме работал приблизительно 500 ч, при этом он сохранил работоспособность и параметры. Прекращение испытаний было связано с нарушением работоспособности стенда.

### **Космический эксперимент с моделью МПДД**

В 1976 году был проведен космический эксперимент с моделью МПДД, названной генератором плазмы (ГП). Одной из задач эксперимента кроме испытания мощного прототипа МПДД была проверка влияния двигателя на РТ (литии) на работу систем космических аппаратов. Установка ГП была смонтирована снаружи бытового отсека изделия 11Ф732 № 3Л (рисунок 19). Модель стационарного МПДД мощностью 17 кВт (ток разряда до 700 А), разработанная и изготовленная в ОАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева, представлена на рисунке 20. Электропитание двигателя обеспечивалось аккумуляторными

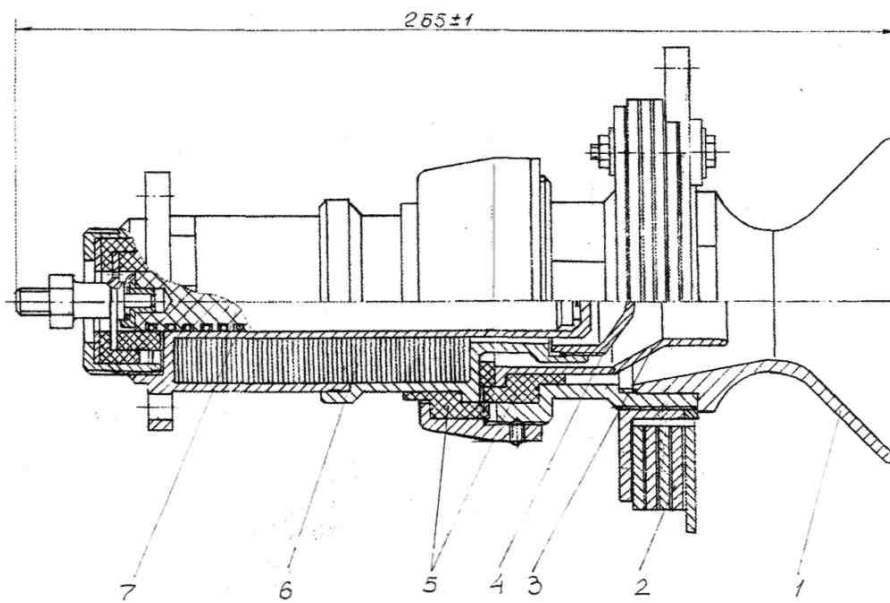
батареями. Время работы в связи с этим ограничивалось емкостью батареи и составляло порядка нескольких минут. Это наложило отпечаток на конструкцию модели МПДД. Впервые была предложена и разработана модель двигателя (рисунок 20) без автономной системы подачи РТ [8]. Необходимый расход лития обеспечивался расположенным внутри емкости нагревателем. Многополостной дырчатый вольфрамовый катод [9] был герметично связан с емкостью, содержащей пористый вкладыш из тугоплавкого металла (аккумулятор лития), пропитанный литием (массой около 9 г). Внутри емкости установлен нагреватель из проволоки из вольфрам-рениевого сплава ВР-27. Вольфрамовый анод в виде сопла был последовательно связан с магнитной катушкой, выполненной из ниобиевого листа и необходимой для согласования разрядного напряжения двигателя с напряжением аккумуляторной батареи. Катод изолирован от анода вольфрамовой нейтральной вставкой и изоляторами из алумонитрида бора.

13 декабря 1976 года состоялось первое включение ГП, расположенного снаружи бытового отсека изделия 11Ф732. ГП прекрасно проработал несколько минут на номинальном режиме (рисунок 21), соответствующем потребляемой мощности около 17 кВт.



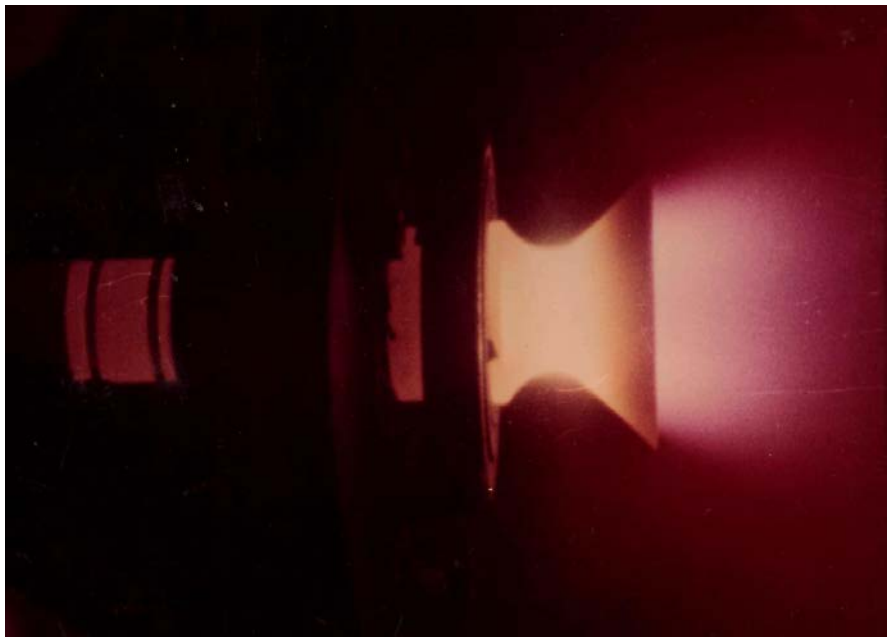
1 – генератор плазмы; 2 – кабель; 3 – ферма; 4 – блок коммутации; 5 – экранно-вакуумная теплоизоляция; 6 – аккумуляторы

**Рис.19. Установка ГП**



1 – анод; 2 – соленоид; 3 – нейтральная вставка; 4 – катод; 5-изоляторы; 6 – аккумулятор лития; 7 – нагреватель

**Рис.20. ГП лития**



**Рис.21. Работа ГП**

Космический эксперимент подтвердил надежность запуска и устойчивой работы модели МПДД и его хорошую совместимость с бортовыми системами космического аппарата (КА). Было получено много уникальной информации, в частности о влиянии истекающей из ГП струи литиевой плазмы на командно-измерительный комплекс. Например, при определенной ориентации струи плазмы не проходили команды на выключение ГП, кроме того, «зашкалили» ионные датчики ориентации, которые забыли отключить при работе ГП, как этого требовала инструкция.

Под влиянием большого резонанса, произведенного экспериментом, было проведено повторное включение. Однако из-за значительного снижения напряжения аккумуляторных батарей и выработки лития повторная работа ГП оказалась менее эффективной.

В 1978 году была начата проектная разработка межорбитального буксира с ЯЭУ и ЭРДУ, получившая индекс 17Ф11 («Геркулес»).

В 1982 году было разработано Техническое предложение по межорбитальному ядерному буксиру, включающему ЭРДУ.

Задачей многоразового межорбитального буксира (ММБ) являлась доставка больших грузов различного назначения на высокие околоземные орбиты.

Полезная электрическая мощность ЯЭУ составляла 550 кВт. Огневой ресурс ЭРДУ – 16000 часов.

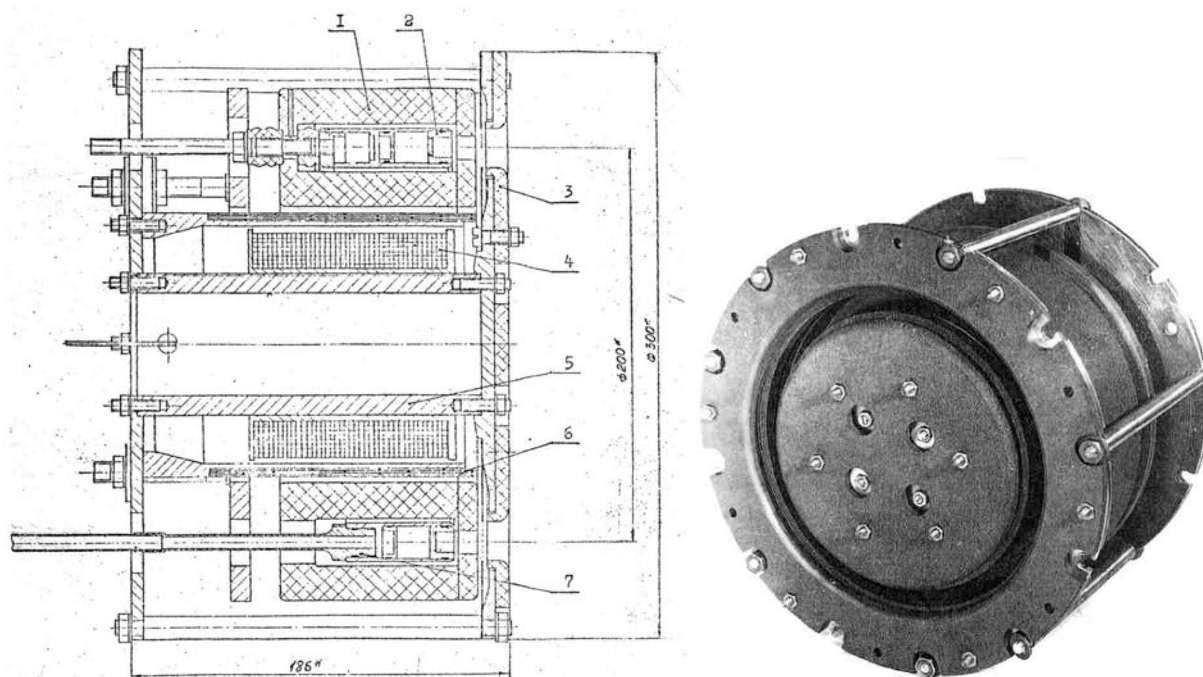
В основу разработки положено модульное построение ЭРДУ. ЭРДУ состоит из 48 двигателей, из которых в состав маршевой электроракетной двигательной установки (ЭРДМ) входят две связки по 20 ТМ в каждой, и в состав ЭРДУ ориентации (ЭРО) – два блока по 4 ТМ.

Для варианта, в котором в качестве РТ для ЭРДМ предполагалось использовать металл (ртуть), в качестве маршевых ЭРД предлагалось применить ДАС.

Вариант ЭРДУ на металлическом РТ представлялся более компактным и легким.

Относительно слабым местом мощных СПД был сравнительно небольшой экспериментально подтвержденный ресурс. Альтернативу СПД на металлическом рабочем теле мог составить ДАС, предложенный в начале 60-х годов А.В. Жариновым. В ЦНИИМаш выполнили исследования на охлаждаемой водой лабораторной модели двигателя. В этих исследованиях были получены удовлетворительные удельные параметры модели ДАС. Основываясь на имеющихся материалах, в ОАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева предложили радиационно-охлаждаемую конструкцию двухступенчатого ДАС [10] (рисунок 22), в котором в качестве материала электродов был выбран графит В-1 (за исключением анода разрядной ступени). Центральная магнитная катушка отделена от электродов медным тепловым экраном, теплонапряженные поверхности магнитопровода защищены графитовыми накладками, усовершенствована конструкция анода-парораспределителя и т.д. В ОАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева был проведен расчет теплового состояния двигателя и анода-парораспределителя рабочего тела (висмута – не токсичного аналога ртути). Двигатель под индексом Э10270-521 (позднее известный как

ДАС-200) был изготовлен в мастерских (ОАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева) и испытан в ЦНИИМаш. Фотография двигателя приведена на рисунке 22.



1 – блок катода разрядной ступени; 2 – анод-газораспределитель; 3 – катод ускорительной системы; 4 – электромагнит; 5 – магнитопровод; 6 – система экранов; 7 – штуцер подвода рабочего тела

**Рис.22. Двухступенчатый двигатель с анодным слоем Э10270-521 (ДАС-200)**

Испытания показали уникально высокие характеристики ДАС-200. При потребляемой электрической мощности до 35 кВт (напряжение ускорительной ступени – до 8000 В) величина удельного импульса при работе двигателя на висмуте составляла 5200 с при КПД ~70 %.

### **Альтернативное рабочее тело двигателей с замкнутым дрейфом электронов (ДАС, СПД) большой мощности**

ЭРД с замкнутым дрейфом электронов такие, как СПД, ДАС, а также ионные двигатели (ИД) традиционно используют плазмообразующие вещества с большим атомным весом и низким потенциалом ионизации. В настоящее время во всем мире предпочтение отдают инертным газам в качестве РТ указанных выше ЭРД, в частности ксенону, имеющему наибольший атомный вес (131.3) и сравнительно низкий потенциал ионизации (12.1 эВ). По своим физическим свойствам и складированию он превосходит все остальные газы (при давлении 760 мм рт. ст. и температуре 20 °С плотность составляет 0.00589 г/см<sup>3</sup>), при этом значительно уступая металлам. Он химически инертен и не конденсируется на элементах конструкции КА.

Ксенон в качестве РТ, особенно при использовании его для ЭРД большой мощности, имеет ряд существенных недостатков:

- 1 кг ксенона стоит порядка 2450 долларов США. С увеличением активного срока существования КА, а также при решении транспортных задач существенно возрастают необходимые запасы РТ, а, следовательно, и стоимость заправляемого ксенона. Если к этому добавить, что при наземных испытаниях двигатель должен работать при космическом вакууме порядка  $5 \times 10^{-6}$  мм рт. ст., обычно получаемому благодаря работе криогенных вакуумных насосов, то при испытании указанного двигателя производительность откачной системы должна превышать 4 млн. литров в секунду. Для отработки ЭРДУ мегаваттного уровня затраты на откачную систему значительно превысят миллиард рублей. К этому следует добавить стоимость большой вакуумной камеры, обеспечивающей инфраструктуры и расходных материалов, таких как азот.
- Мировое производство ксенона составляет около 20 тонн в год (из них только 10 % идет на космическую отрасль). При развертывании широкомасштабных космических программ, таких как экспедиция к Марсу, может возникнуть острый дефицит ксенона.

Требования к рабочему телу ЭРД противоречивы:

- с одной стороны необходимо, чтобы РТ не конденсировалось на поверхности КА (по этой причине отвергаются практически все металлические рабочие тела);
- с другой стороны для удешевления наземной отработки ЭРД предпочтительны конденсирующиеся РТ, так как в этом случае производительность вакуумной системы должна быть достаточной, чтобы поддерживать высокий вакуум при малой газовой нагрузке.

В этой связи большой практический интерес в качестве РТ, предложенного в РКК «Энергия» еще в конце прошлого века, представляет йод [11]. В условиях космического вакуума он практически не конденсируется на элементах КА, т.к. при окружающем давлении порядка  $10^{-6}$  мм рт. ст. температура конденсации составляет минус  $74^{\circ}\text{C}$ .

С другой стороны в отличие от ЭРДУ на ксеноне, для наземной отработки которых требуется охлаждать криопанели вакуумных камер жидким гелием, при работе ЭРДУ на йоде криопанели достаточно охлаждать жидким азотом, что на много снижает стоимость наземной отработки ЭРД и не требует создания гигантских стендовых баз.

Учитывая близкие значения атомных весов ксенона и йода (131.3 и 126.9, соответственно) и потенциалов ионизации (12.1 и 10.44) можно ожидать достаточно схожие характеристики ЭРД, работающих на таких рабочих телах.

Первые экспериментальные исследования СПД на йоде уже проведены как в России (РКК «Энергия»), так и в США. Они подтвердили, что характеристики СПД, работающих на ксеноне и на йоде, близки.

В этой связи представляется интересным проведение испытаний ЭРД большой мощности, например ДАС-200, предназначенном для работы на металлических рабочих телах, на рабочем теле йод.

### **Выводы**

1. В 1965 – 1970 годах проведен комплекс экспериментально-конструкторских работ и создан стационарный МПДД на литии большой мощности:

- отработаны технологические процессы получения крупногабаритных деталей и узлов из тугоплавких металлов (вольфрама, молибдена, ниобия), определены и внедрены способы их герметичного соединения между собой и с разнородными металлами, например с нержавеющей сталью; определена оптимальная конструкция и геометрия двигателя;
- обнаружены «предельные режимы» МПДД, ограничивающие достижение высоких удельных характеристик двигателя, и определен способ увеличения последних;
- создана конструкция мощного МПДД с низкотемпературным эффективным термокатодом, прогнозируемым ресурсом работы в несколько тысяч часов;
- получены и подтверждены на стенде ОКБ «Факел» высокие характеристики МПДД в стационарном режиме – удельный импульс тяги 5000 с и КПД 60 %;
- впервые в мировой практике проведены 500-часовые ресурсные испытания МПДД на литии мощностью 500 кВт.

2. Создана стендовая база, снабженная системами вакуумирования, охлаждения, электропитания, измерения, подачи жидкометаллического РТ, прямого измерения тяги и др.

3. Проведен космический эксперимент с демонстрацией работы МПДД на литии мощностью 17 кВт на борту КА 11Ф732.

4. Для ЭРДУ на металлическом РТ в 1983 году впервые в мировой практике разработан мощный радиационно-охлаждаемый ДАС-200 на висмуте, который при подведенной электрической мощности 34 кВт имел удельный импульс 5200 с при КПД 70 %.

5. Предложено альтернативное РТ для двигателей с замкнутым дрейфом электронов (ДАС, СПД) большой мощности и осуществлена начальная стадия исследований указанных ЭРД на рабочем теле йод.



## Библиографический список

1. Маектр Н. Plasma jets in arcs in a process self-induced magnetic compression. Zs. Phys. 141(1). 1955. pp. 198-216.
2. Энциклопедия низкотемпературной плазмы под ред. В.Е. Фортова. М.: Наука, 2000. Том IV.с. 319.
3. Агеев В.П., Мартинсон А.А., Островский В.Г., и др. Способ получения высоких удельных параметров электроплазменного двигателя. Авт. св. 60648. 1972.
4. Агеев В.П., Бесчастных Ю.В., Островский В.Г., Мартинсон А.А. Электроплазменный двигатель. Авт. св. 56059. 1971.
5. Janson T.J., Loosjes R., Phil. Res. Rep., 8, 81, 1953.
6. Мельников М.В., Островский В.Г. Электроплазменный двигатель. Авт. св. 74851. 1973.
7. Островский В.Г. Создание и исследование термоэмиссионного катода для электроракетных двигателей с ресурсом в несколько тысяч часов. Диссертация на соискание ученой степени канд. тех. наук. 1973.
8. Агеев В.П., Бесчастных Ю.В., Островский В.Г. Стационарный электроплазменный двигатель. Авт. св. 62697. 1972.
9. Островский В.Г. Термоэмиссионный катод. Авт. св. 69327. 1973.
10. Агеев В.П., Быстров П.И., Знак Е.А., Островский В.Г. Двухступенчатый двигатель с анодным слоем. Авт. св. 203611. 1984.
11. Островский В.Г. Электроракетная двигательная установка и способ ее эксплуатации. Патент RU 2308610. Бюллетень № 29. 2007

## Информация об авторах

ОСТРОВСКИЙ Валерий Георгиевич, старший научный сотрудник ОАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королева, к.т.н.  
Россия, 141070, г. Королёв, Московская обл., ул. Ленина, д. 4А;  
тел.: 84955136582; факс: 84955138620; e-mail: [post@rsce.ru](mailto:post@rsce.ru)

СМОЛЕНЦЕВ Александр Алексеевич, главный конструктор, руководитель НТЦ ОАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королева.  
Россия, 141070, г. Королёв, Московская обл., ул. Ленина, д. 4А;  
тел.: 84955136507; факс: 84955136138; e-mail: [post2@rsce.ru](mailto:post2@rsce.ru)

СОКОЛОВ Борис Алексеевич, профессор, советник Президента ОАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королева, д.т.н.

Россия, 141070, г. Королёв, Московская обл., ул. Ленина, д. 4А;

тел.: 84955136692; факс: 84955136138; e-mail: [post2@rsce.ru](mailto:post2@rsce.ru)