

*Посвящается памяти А.В. Жаринова  
и А.И. Морозова — пионеров разработки  
в СССР плазменных ускорителей ионов  
и двигателей с замкнутым дрейфом  
электронов*

УДК 533.9.07

## ФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ РАЗВИТИЕ ДВИГАТЕЛЕЙ С ЗАМКНУТЫМ ДРЕЙФОМ ЭЛЕКТРОНОВ

© 2024 г. В. П. Ким<sup>а, \*</sup>, А. В. Семенкин<sup>б</sup>, Е. А. Шилов<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Научно-исследовательский институт прикладной механики и электродинамики  
Московского авиационного института (национального исследовательского университета) (НИИ ПМЭ МАИ),  
Москва, Россия

<sup>б</sup>Государственный научный центр Российской Федерации «Исследовательский центр М.В. Келдыша»,  
Москва, Россия

e-mail: riame4@mai.ru

Поступила в редакцию 26.04.2024 г.

После доработки 27.05.2024 г.

Принята к публикации 01.06.2024 г.

Рассмотрены результаты многолетних исследований, выполненных в разных организациях СССР и России в процессе разработок двигателей с анодным слоем (ДАС) и стационарных плазменных двигателей (СПД). Используется их общее название «двигатели с замкнутым дрейфом электронов» (ДЗДЭ), поскольку они разработаны на основе плазменных ускорителей ионов с замкнутым дрейфом электронов (УЗДЭ). ДЗДЭ прошли достаточно долгий путь развития. В результате СПД стал одним из наиболее широко используемых в космосе электроракетных двигателей (ЭРД) и продолжает развиваться. Разработки ДАС также достигли достаточно высокого уровня и близки к переходу к практическому использованию. Поэтому рассмотрены основные физические положения и результаты исследований, которые определяли прогресс в развитии СПД и ДАС с целью их анализа и обобщения, а также оценки их применимости для дальнейшего развития названных двигателей. Приведена краткая характеристика основных этапов разработки СПД и ДАС и достигнутых на этих этапах результатов. Показано, что основной проблемой их дальнейшего развития является обеспечение как высокой тяговой эффективности, так и большого ресурса. Показано также, что основной фактор, ограничивающий ресурс ДАС и СПД, — попадание ускоренных ионов на элементы их конструкции, поэтому для управления их движением необходимо прежде всего понимать закономерности формирования электрического поля в разрядах ДЗДЭ. Выявлены новые и уточнены известные свойства разряда в ДЗДЭ и закономерности формирования электрического поля в нем, определяющие толщину и положение зоны ускорения с основным падением потенциала в разряде и потоки ускоренных ионов на элементы конструкции двигателя. Рассмотрены и проанализированы успешно апробированные на втором этапе развития СПД и ДАС способы управления толщиной и положением зоны ускорения в ДЗДЭ путем изменения характеристик магнитного поля. Показано, что эти способы позволяют эффективно управлять работой ДЗДЭ и его характеристиками, определены физические условия, обеспечивающих эффективность их применения. Определены физические условия реализации и обоснование целесообразности полного вынесения зоны ускорения из конструкции двигателя как основного направления современного развития ДЗДЭ с учетом результатов анализа свойств разряда и закономерностей формирования электрического поля в ДЗДЭ. Приведены основные выводы по рассмотренным вопросам.

*Ключевые слова:* двигатели с замкнутым дрейфом электронов, двигатель с анодным слоем, стационарный плазменный двигатель, свойства электрического разряда, управление рабочими процессами

**DOI:** 10.31857/S0367292124090032, **EDN:** DVJLYB

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В СССР и Российской Федерации с конца 1950-х—начала 1960-х гг. проводятся исследования и разработки плазменных ускорителей ионов с замкнутым дрейфом электронов (УЗДЭ). Было разработано два типа УЗДЭ, имеющих близкие принципиальные схемы. Один из них был назван ускорителем с “узкой” зоной ускорения (УЗДУ) [1], а второй – ускорителем с “протяженной” зоной ускорения” (УЗДП) [2]. На основе первого был разработан электроракетный двигатель (ЭРД), названный впоследствии двигателем с анодным слоем (ДАС) [3], который сохраняет определенные перспективы применения в космосе, и источники ускоренных ионов, которые используются для эффективной реализации некоторых процессов вакуумно-плазменных технологий [4] (очистка и модификация свойств поверхностей, нанесение на них покрытий, доведение формы больших поверхностей до заданных и др.). На основе УЗДП был разработан ЭРД, названный “стационарным плазменным двигателем” (СПД), который уже многие годы успешно работает в системах управления движением космических аппаратов (КА) [5–7], и его применение в космосе расширяется.

Требования к названным двигателям существенно сложнее, чем к источникам ускоренных ионов наземного применения. Поэтому в данной статье будут рассмотрены результаты исследований и разработок, только названных выше двигателей, которые при их общей характеристике будут называться двигателями с замкнутым дрейфом электронов (ДЗДЭ). Но многие из полученных при исследованиях и разработке ДЗДЭ результатов могут оказаться полезными и при разработке отмеченных выше технологических источников ионов. К сказанному следует добавить, что ДАС и СПД могут разрабатываться как по одноступенчатой, так и по двухступенчатой схеме. Краткая характеристика истории и общего состояния разработки ДЗДЭ приведена в разделе 2, где показано, что наибольший прогресс достигнут в разработках ДЗДЭ одноступенчатой схемы. Поэтому с учетом ограниченности объема журнальной статьи авторами принято решение сосредото-

читься на рассмотрении результатов, полученных для двигателей одноступенчатой схемы.

Следует также отметить, что в настоящее время возникают задачи, требующие создания двигателей с новыми выходными параметрами. При этом приходится решать ряд новых научно-технических проблем. Одной из них является кардинальное повышение ресурса СПД и ДАС, ограниченное в современных двигателях попаданием ускоренных ионов на элементы конструкции рассматриваемых двигателей. Решение этой проблемы затруднено сложностью и до настоящего времени недостаточной изученностью ряда важных физических процессов в электрическом разряде в УЗДЭ и отсутствием верифицированных методик расчета и проектирования новых ускорителей с существенно измененными требованиями к ним. Поэтому решать названную проблему приходилось и приходится в основном экспериментальным путем. С учетом близости принципиальных схем СПД и ДАС решение названной проблемы может осуществляться одинаковыми способами. Как показывает опыт, в качестве основы для разработки тех или мер по управлению процессами в ДЗДЭ и для качественной оценки эффективности названных мер в ДЗДЭ, можно использовать общие свойства электрического разряда и закономерности формирования электрического поля в нем. В качестве параметров, характеризующих названные свойства разрядов в ДЗДЭ, можно помимо исследования традиционных его выходных параметров использовать положение зоны ускорения (ЗУ) с основным падением потенциала в разряде и ее продольный размер (толщину) в направлении ускорения, контролируя которые можно судить о характере и эффекте воздействия осуществляемых мер по управлению процессами в двигателе. В частности, имеющиеся данные свидетельствуют о том, что кардинальное повышение ресурса ДЗДЭ может быть достигнуто путем частичного или полного вынесения ЗУ из конструкций рассматриваемых двигателей. Этот способ позволяет существенно снизить потоки ускоренных ионов на элементы конструкции двигателей и скорости их износа и тем самым существенно увеличить ресурс рассматриваемых уско-

рителей и двигателей. При этом в силу отмеченной сложности процессов даже в одноступенчатых двигателях физическое обоснование применяемых для управления подходов остается далеко от завершения. Поэтому определение, уточнение и обобщение физических условий реализуемости используемых подходов и их эффективности представляет собой генеральное направление современных исследований и прикладных разработок ДЗДЭ. С учетом отмеченного, задачами данного исследования являлось выявление или уточнение упомянутых свойств разряда в ДЗДЭ и физических условий, выполнение которых позволяет управлять процессами в ДЗДЭ, в том числе и для реализации упомянутого вынесения ЗУ из УК, что позволит использовать полученные результаты при разработке будущих двигателей.

Для решения названных задач была необходима систематизация полученных к настоящему времени результатов исследований, отражающих основные свойства разряда в ДЗДЭ, и физических положений, на основе которых разрабатывались способы управления процессами в них. Важная часть этих результатов и положений была получена или сформулирована уже на первом этапе разработки ДЗДЭ, продолжавшемся около 10 лет. Поэтому в разделе 3, в первую очередь, рассмотрены и систематизированы названные положения и результаты, а в последующих разделах приведены результаты анализа и обобщения результатов дальнейших работ с целью выявления и уточнения физических условий, определяющих реализуемость рассматриваемого способа управления процессами в ДЗДЭ. За исключением начального этапа разработки ДАС и СПД проходили почти синхронно, и рассмотренные ускорители и двигатели на их основе развивались, конкурируя между собой. Но успехи в развитии одного из них способствовали развитию второго. Поэтому далее они рассматриваются параллельно.

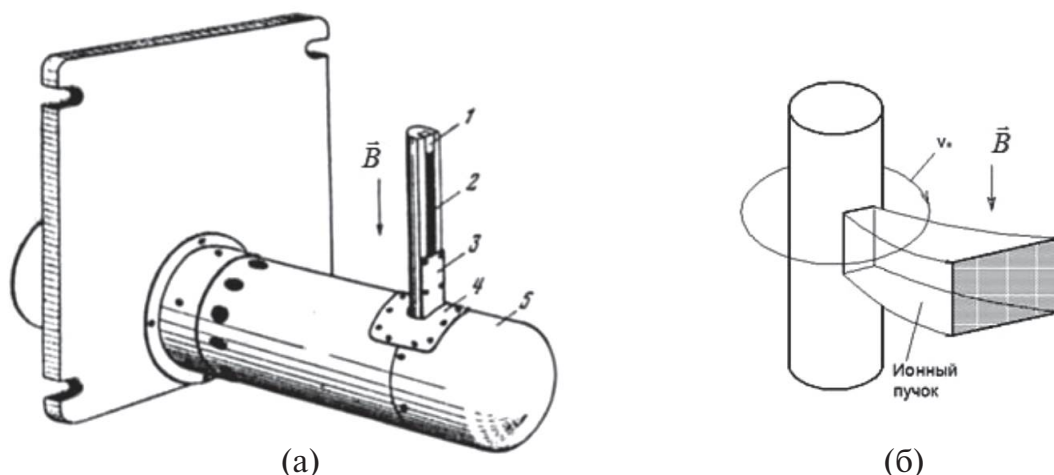
## 2. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИСТОРИИ И ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ РАЗРАБОТКИ ДАС И СПД

В разработке первых плазменных ускорителей ионов с замкнутым дрейфом электронов ионов и ДЗДЭ на их основе лидировали работы по ДАС. Поэтому далее рассмотрение важных для разработки ДЗДЭ положений и результатов начинается с положений и результатов, полученных и сформулированных для ДАС.

### 2.1. Основные результаты разработки ДАС

Идея разработки ДАС родилась у научного сотрудника Отдела плазменных исследований Института атомной энергии имени И.В. Курчатова (ИАЭ) Аскольда Владимировича Жаринова на основе анализа результатов его исследований высоковольтных разрядов в электрическом (с напряженностью  $E$ ) и ортогональном к нему магнитном (с индукцией  $B$ ),  $E \times B$ , полях [6, 7]. Определенный импульс для начала работ по ДАС дали исследования, проведенные также сотрудником ИАЭ Е.Е. Юшмановым в рамках работ по управляемому термоядерному синтезу (УТС) для оценки возможности нагрева ионов в цилиндрической плазменной ловушке магнетронным методом, предложенным еще одним сотрудником ИАЭ П.М. Морозовым. Для проверки реализуемости этой идеи, Юшманов в середине 1950-х гг. провел эксперимент в цилиндрической ловушке плазмы с сильными продольным (вдоль оси ловушки) магнитным и радиальным электрическим полями [8]. Вдоль оси этой ловушки, он вводил плазму из специального источника вдоль оси ловушки. Электрическое поле в ловушке создавалось приложением высокого напряжения  $U_0$  между источником плазмы и стенками камеры, а распределение потенциала внутри ловушки измерялось электростатическими зондами. Среди прочих результатов в этом эксперименте была впервые продемонстрирована возможность создания в значительной части объема плазмы достаточно сильного электрического поля с напряженностью, направленной по радиусу, т. е. поперек магнитного поля. Это был первый, важный для разработки УЗДЭ, результат.

При анализе результатов описанного эксперимента Жаринова заинтересовало то, что при некоторых напряжениях и индукциях магнитного поля в эксперименте Юшманова электрическое поле концентрировалось в достаточно узком слое плазмы в приосевой части камеры. Поэтому он решил использовать такой слой для ускорения ионов. Для проверки названной возможности, он провел эксперименты, подобные эксперименту Юшманова, а именно: у оси такой же цилиндрической камеры, в которой можно было создавать сильное продольное (параллельное оси камеры) магнитное поле, он расположил источник плазмы с выходной щелью, параллельной оси камеры, с длиной около 4 см и шириной около 1 см (рис. 1а) [1, 6, 7]. При созданном в камере магнит-

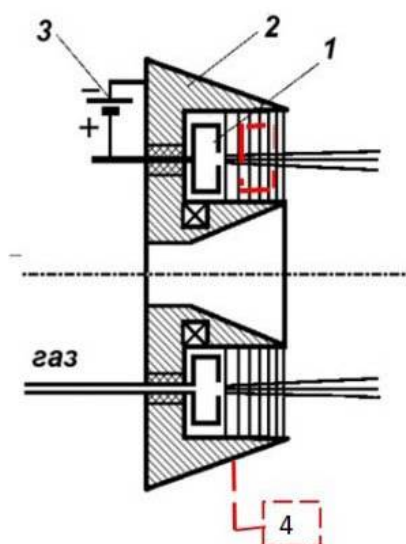


**Рис. 1.** Схема эксперимента А.В. Жаринова (а) и общий вид ионного пучка, выходящего из источника плазмы (б): 1 – источник плазмы, 2 – выходная щель источника, 3–5 – элементы конструкции [6, 7].

ном поле и приложении высокого напряжения между источником плазмы и стенками камеры, он получал ленточные пучки ионов водорода и других веществ (рис. 1б). Таким образом, А.В. Жариновым была впервые продемонстрирована возможность “безэлектродного” и “безстеночного” ускорения ионов электрическим полем в плазме с поперечным к электрическому полю магнитным полем.

На основе полученных результатов в 1961 г. Жариновым была подана заявка и впоследствии получено авторское свидетельство СССР на изобретение двигателя, который позже стал называться ДАС [7]. В этом двигателе (рис. 2) предполагалось ускорение ионов в кольцевом канале с продольным электрическим и радиальным магнитным полями, при этом объемный заряд ионов в названном канале предполагалось компенсировать электронами, дрейфующими вокруг оси двигателя под действием скрещенных  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ -полей.

Жаринов предложил руководству отдела плазменных исследований (ОПИ) ИАЭ начать разработку такого двигателя. Однако это предложение не было поддержано, и он перешел на работу в Центральный научно-исследовательский институт машиностроения (ЦНИИМаш), где с 1962 г. начал работать в отделении, которым руководил Сергей Дмитриевич Гришин. Под непосредственным руководством Жаринова командой специалистов ЦНИИМаш, включавших кроме него М.А. Абдюханова, В.С. Ерофеева, Е.А. Ляпина, В.П. Наумкина, Ю.С. Попова, И.Н. Сафронова, Ю.М. Золотайкина, Л.В. Лескова, Ю.С. Попова, Ю.В. Саночкина и др., был выполнен



**Рис. 2.** Схема ДАС в соответствии с изобретением Жаринова: 1 – анод, 2 – магнитная система, 3 – источник электропитания, 4 – катод-нейтрализатор [7].

комплекс исследований и разработок плазменных источников ускоренных ионов со скрещенными  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ -полями и ДАС [6, 9, 10]. В результате к концу 1960-х гг. были разработаны основные физические принципы организации работы и созданы лабораторные модели 2-ступенчатых ДАС (рис. 3) с достаточно высокой тяговой эффективностью.

Созданные модели были способны работать на висмуте, таллии и других конденсирующихся рабочих веществах (РВ) при мощностях до 100 кВт, обеспечивая получение скоростей частиц РВ со скоростями до 80 км/с (рис. 4) [6, 9, 10]. Эти ско-



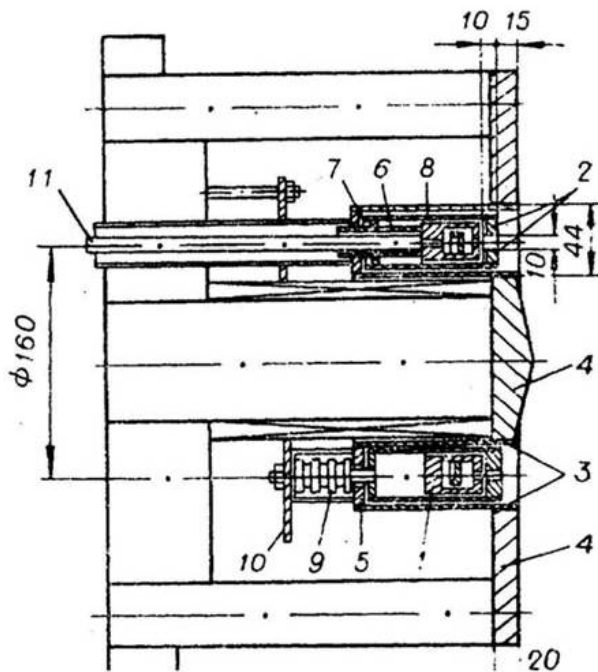


Рис. 3. Конструкция типичной двухступенчатой лабораторной модели ДАС: 1 – анод 1-й ступени, 2 – катод 1-й ступени–анод 2-й ступени, 3 – разрядная камера, которая могла быть использована как катод 2-й ступени, 4 – полюсы магнитной системы, 5–10 – конструктивные элементы, 11 – трубка подачи РВ [6, 7].

рости более, чем в 15 раз превосходили скорости истечения частиц РВ в лучших “тепловых” ракетных двигателях (ТРД), в которых ускорение потока РВ осуществляется за счет его нагрева с использованием внутренней энергии топлива или за счет электрической энергии и последующего преобразования тепловой энергии в кинетическую энергию направленного движения истекающего из двигателя потока РВ. Средняя скорость истечения частиц РВ, истекающих из ДАС, определялась путем измерения массового расхода РВ и развиваемой ускорителем реактивной тяги в предположении 100% ионизации потока частиц РВ, истекающих из двигателя (при неполной переработке потока атомов в ионы скорости последних получают еще больше).

Первые модели ДАС работали в основном на конденсирующихся рабочих веществах (РВ) и при достаточно больших мощностях. Это определялось направлением работ по ДАС в рассматриваемый период – создание мощных ЭРД, способных в будущем обеспечивать эффективную транспортировку тяжелых космических аппаратов (КА) и грузов в космосе, в том числе, к Луне и Марсу. Эта

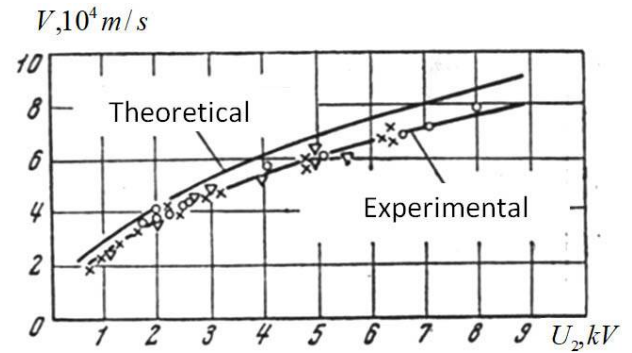


Рис. 4. Зависимость скоростей истечения двухступенчатого ДАС от ускоряющего напряжения на второй ступени (○, ▽ – висмут, × – перерасчет на ксенон по данным для висмута) [6, 7].

идея была очень популярной в 1960-х гг. после запуска Первого искусственного спутника Земли (ИСЗ) в 1957 г. и первого полета в космос Юрия Алексеевича Гагарина в 1961 г. Конденсирующиеся РВ упрощают решение проблем хранения больших запасов РВ, необходимых для решения задач ЭРД в названных миссиях, на борту КА и обеспечения высокого вакуума в установках для исследований и испытаний мощных ЭРД. Но возможности бортовых систем энергоснабжения в рассматриваемый период были весьма ограниченными, что тормозило развитие этого направления.

Были проведены также первые 500-часовые ресурсные испытания одной из моделей ДАС описанного типа и показано, что происходит значительная эрозия электродов этой модели вследствие их бомбардировки ускоренными ионами из плазмы как в первой, так и во второй ступенях [9, 10]. Таким образом, основной проблемой для дальнейшего развития ДАС стало повышение его ресурса.

Как будет показано позже, в рассмотренный период значительные успехи были достигнуты и в разработке СПД, приведшие к тому, что двигатели этого типа достаточно эффективно работали на ксеноне при мощностях порядка 1 кВт, и оказалось возможным применять их при достигнутой к концу 1960-х гг. энерговооруженности отечественных КА. Это существенно ускорило развитие работ по СПД, и в прикладном плане они стали опережать разработки ДАС. Поэтому примерно с середины 1970-х гг. были начаты разработки одноступенчатых ДАС разной мощности, работающих на ксеноне, что можно считать началом 2-го этапа развития ДАС. В результате в течение 1970–1990-х гг. командой специалистов ЦНИИМаш, включавшей В.И. Гаркушу, Е.А. Ля-

пина, А.В. Семенкина, А.Е. Солодухина, С.О. Твердохлебова, Л.Е. Захаренкова, В.Д. Подгорнову и др. при лидирующей роли сначала Е.А. Ляпина, а затем А.В. Семенкина были разработаны конкурентоспособные экспериментальные и опытные образцы одноступенчатых ДАС, достаточно эффективно работающие на ксеноне, в диапазоне мощностей от 0.5 до 50 кВт [6, 9–18]. Одна из названных моделей типа ТМ-50 на ксеноне с номинальной мощностью 50 кВт была разработана специалистами ЦНИИМаш совместно с ракетно-космической корпорацией “Энергия” в качестве возможного варианта базового ЭРД в ядерно-электрическом модуле для транспортировки тяжелых КА и грузов в космосе [12]. Были разработаны также экспериментальные образцы ДАС на ксеноне меньшей мощности, способные работать с достаточно высокой тяговой эффективностью и скоростями истечения до 40 км/с как в одноступенчатом, так и в двухступенчатом режиме [13]. Была исследована работа связки 3-х двигателей, включавшая в себя исследования струй как одиночного двигателя, так и названной связки ДАС [14], проведена серия ресурсных испытаний отдельных образцов ДАС с длительностью до 1000 ч, в том числе, в рамках программы оценки российских ДАС в США. Особо можно отметить разработку модели ДАС типа Д-55 (рис. 5) и исследование возможности обеспечения большого ресурса ДАС путем вынесения ЗУ из ускорительного канала [15, 16] (полученные при этом результаты будут рассмотрены позже). Названная модель послужила прототипом летного образца двигателя TAL WSF, разработанного и испытанного в космосе специалистами США [17].

По заказу Jet Propulsion Laboratory (США) был разработан также экспериментальный образец двухступенчатого ДАС, способный работать на висмуте при мощностях до 35 кВт и скоростях истечения до 70 км/с [18]. В рамках отечественных программ были разработаны опытные образцы двигателя малой мощности типа Д-38 и средней мощности типа Д-90 с проектной мощностью до 5 кВт [12].

В целом, к настоящему времени в России создан достаточно значительный задел для перехода к практическому применению ДАС в космосе.

## 2.2. Результаты разработки СПД

Работы по УЗДП и СПД, как уже отмечалось, стартовали в ИАЭ в 1962 г. также в отделе

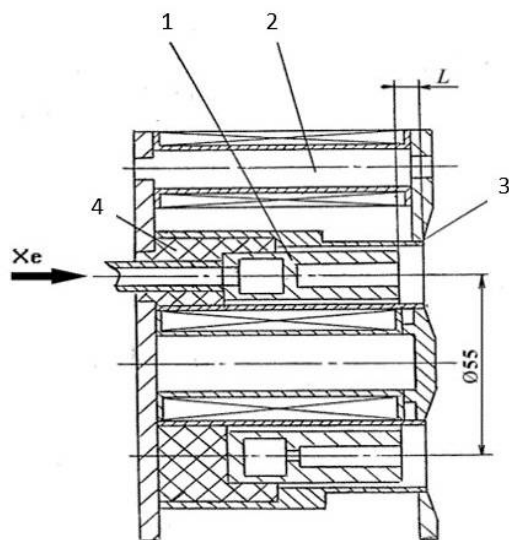


Рис. 5. Конструктивная схема ДАС типа Д-55: 1 – анод, 2 – магнитная система, 3 – разрядная камера, 4 – изолятор) [6, 7].

плазменных исследований, возглавляемом академиком Львом Андреевичем Арцимовичем. Эти работы поддерживались Арцимовичем и развивались в определенной мере под влиянием рассмотренных в предыдущем разделе идей и работ А.В. Жаринова под руководством научного сотрудника ИАЭ Алексея Ивановича Морозова. Основной идеей Морозова являлось ускорение ионов в протяженном слое плазмы со скрещенными  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ -полями, в котором эквипотенциали электрического поля формируются силовыми линиями магнитного поля (рис. 6) [19], позволяя фокусировать ионы в процессе их ускорения, как в классических ионных двигателях. Соответствующее устройство было названо ускорителем с протяженной зоной ускорения (УЗДП) [2].

Названное предложение исходило из того, что электроны относительно свободно перемещаются вдоль силовых линий магнитного поля и должны выравнивать на них электрический потенциал. В условиях реального разряда с учетом электрического дрейфа электронов надо говорить о кольцевых поверхностях, содержащих однотипные вдоль направления дрейфа силовые линии, но для простоты изложения, как и во многих других работах, далее будет употребляться более короткое условное выражение “вдоль силовых линий”, имея в виду поверхности, в которых размещаются эти линии. Кроме того, анализируя динамику электронов в плазме вдоль силовой линии магнитного поля, Морозов вывел формулу “терма-

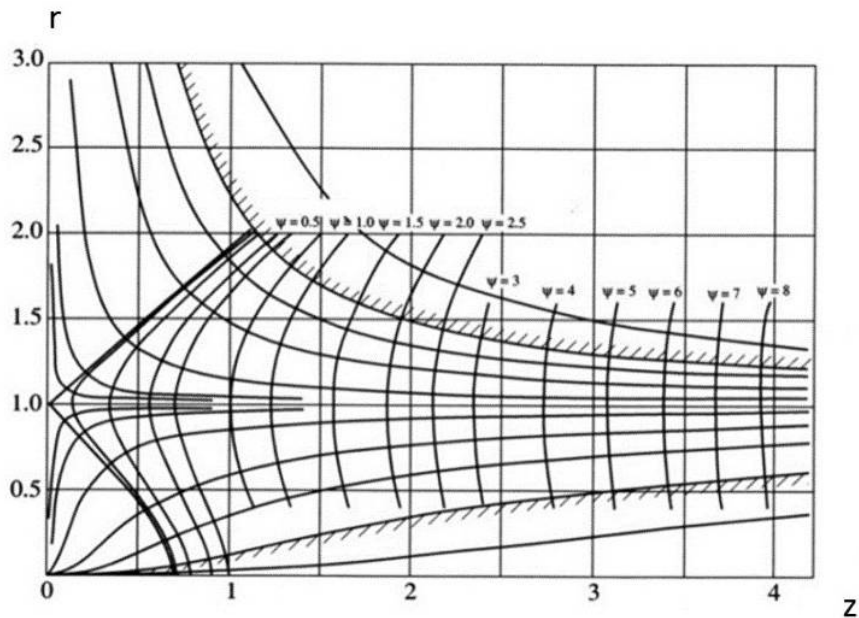


Рис. 6. Эквипотенциалы силовых линий магнитного поля ( $\psi = \text{const}$ ) для СПД, предложенные Морозовым [6, 7].

лизованного” потенциала [19, 20], характеризующую возможное изменение потенциала вдоль силовой линии, которую можно записать в следующем виде:

$$\Delta\phi(\gamma) = \frac{kT_e(\gamma)}{e} \ln \frac{n_o(\gamma)}{n(\gamma)}, \quad (1)$$

где  $\Delta\phi(\gamma)$  есть разница потенциала вдоль линии магнитного поля  $\gamma$  между точками с максимальной концентрацией  $n_o(\gamma)$  и с концентрацией  $n(\gamma)$  и  $kT_e(\gamma)$  — температура электронов, предполагаемая постоянной вдоль силовой линии магнитного поля.

Поскольку рассматриваемая разность потенциалов существенно зависит от температуры электронов, для ее снижения Морозов предложил использовать в СПД разрядную камеру (РК) с диэлектрическими стенками, ограничивающими ускорительный канал (УК), способными снижать температуру электронов за счет эмиссии с такой стенки вторичных электронов с меньшей энергией, чем у выпадающих на стенки “первичных” электронов из плазмы. Как будет показано позже, рассмотренное отклонение эквипотенциалей от силовых линий играет важную роль в формировании электрического поля в начальной части ЗУ со стороны анода и направленных потоков ионов в этой зоне.

Следует отметить, что работы по СПД в ИАЭ были начаты практически одновременно с работами в США плазменных ускорителей

ионов, на основе которых в настоящее время в США разрабатываются так называемые холловские двигатели (ХД). Так, в 1962 г. была опубликована статья с описанием схемы “ускорителя ионов холловским током” [21] и предварительными результатами исследования “ускорения ионов в нейтральной плазме “с доминирующим гироманнитным эффектом” [22], а авторами [23] была подана заявка на ускоритель ионов с такими же основными элементами, как у СПД (рис. 7, [22, 24]), на которую в 1964 г. был выдан патент США № 3155858.

В упомянутом патенте, как и в изобретении Жаринова, предполагалось ускорять ионы в кольцевом УК с продольным электрическим полем, созданным приложением постоянного напряжения между источником ионов и катодом, и радиальным магнитным полем. Объемный заряд ионов в названном канале, как и в ДАС, предполагалось компенсировать дрейфующими вокруг оси двигателя электронами под действием силы Лоренца.

На рассматриваемом этапе в США было разработано и испытано несколько лабораторных моделей ХД и было обнаружено, что тяговая эффективность этих моделей не превышала 30%. При этом одним из важных физических результатов являлось обнаружение с помощью электростатических зондов вращающихся в азимутальном направлении возмущений параметров плазмы



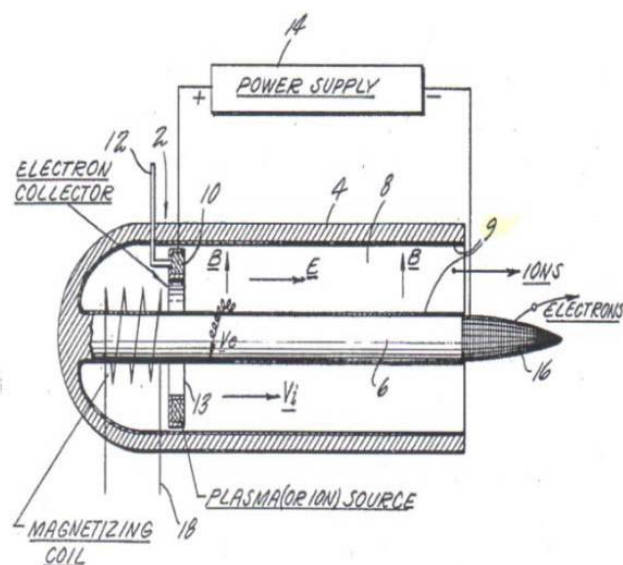


Рис. 7. Схема ускорителя ионов в соответствии с патентом США № 3155858: 2 — магнитная система, 4 и 6 — элементы магнитного сердечника, 8 — плазма, 9 — диэлектрические покрытия, 10 — плазменный или ионный источник, 12 — трубка подачи РВ в рабочий канал, 13 — корпус источника плазмы, 16 — источник электронов [23].

внутри УК [25, 26]. В частности, было показано, что названные возмущения параметров плазмы внутри ускорительного канала способны создавать азимутальную составляющую  $\tilde{E}_\vartheta$  электрического поля и компоненту скорости движения электронов  $\tilde{V}_{ez} \sim \tilde{E}_\vartheta / B$  поперек магнитного поля. Было показано также, что при определенной взаимосвязи меняющихся во времени  $\tau$  концентрации электрона  $\tilde{n}_e$  и  $\tilde{E}_\vartheta$ , может быть выполнено следующее условие результирующего переноса электронов за характерный период возмущений  $T$

$$\int_{S_{ch}} \int_0^T \tilde{n}_e \tilde{E}_\vartheta d\tau ds \neq 0, \quad (2)$$

где  $S_{ch}$  — это площадь поперечного сечения канала ускорения.

Это положение использовалось во многих последующих работах для объяснения наблюдаемого повышенного переноса электронов поперек магнитного поля.

Рассмотренные работы в США были свернуты в период 1965—1966 гг., вероятно, из-за того, что тяговая эффективность моделей ХД была значительно ниже тяговой эффективности созданных к тому времени ионных двигателей, а также из-за отсутствия идей по ее повышению. В то же время

в СССР в результате работ команды А.И. Морозова в ИАЭ, включавшей Ю.В. Есипчука, Г.Н. Тилинина, Ю.А. Шарова, В.А. Михайличенко, В.А. Смирнова, А.В. Трофимова, А.М. Капулкина, А.Н. Веселовзорова, И.Б. Покровского и др., как и в США, было создано и исследовано несколько лабораторных моделей СПД, работающих на разных РВ, в том числе, на инертных газах, определены их интегральные характеристики и проведены измерения внутри УК распределений потенциала “плавления” и ионного тока на плоский электростатический зонд с нормалью к приемной поверхности, ориентированной в сторону анода. На основе полученных результатов измерений было отмечено, что слой плазмы с электрическим полем в разряде является протяженным, а напряженность электрического поля можно считать пропорциональной значению локальной магнитной индукции [2]. Кроме того, было получено, что потенциал “плавающего” зонда в прианодной области заметно ниже потенциала анода, что могло означать наличие достаточно большого положительного прианодного скачка потенциала, а эквипотенциальные линии, близкие по геометрии к силовым линиям магнитного поля, можно получить только в двухступенчатых моделях СПД, работающих с напряжением разряда в несколько кВ [2]. Но в одноступенчатых СПД они значительно отклоняются от силовых линий магнитного поля, вследствие относительно высокой температуры электронов в начальной части зоны ускорения со стороны анода и заметной разницы значений потенциала между различными точками вдоль одной силовой линии в соответствии с формулой (1), дающей отмеченное отклонение эквипотенциалов от силовых линий [2].

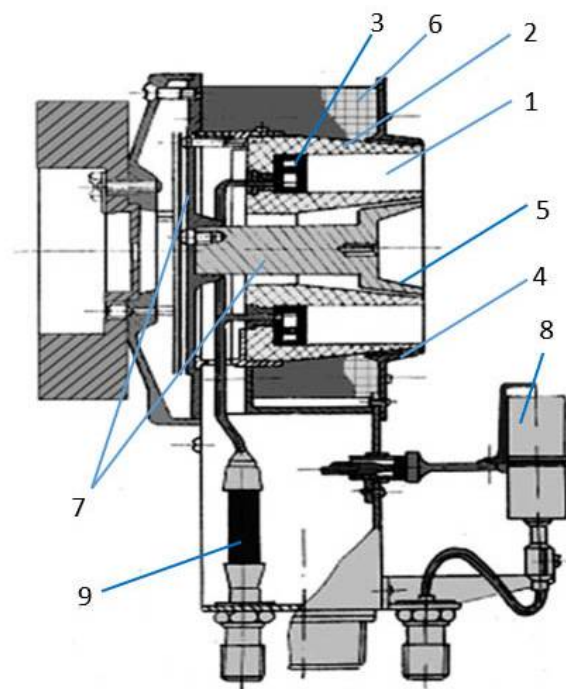
Следует отметить, что упомянутые измерения распределения потенциалов были проведены в достаточно больших моделях ускорителя, работавших с относительно низкими массовыми расходами РВ и с помощью только “плавающих” плоских зондов. Более поздние измерения, проведенные в Московском авиационном институте имени С. Орджоникидзе (МАИ) с использованием более совершенной методологии, которые будут рассмотрены позже, показали, что ряд приведенных выше выводов требует корректировки. В прикладном же плане важно то, что к 1967—1968 гг. в ИАЭ командой Морозова были разработаны лабораторные модели СПД, имеющие при работе на ксеноне с мощностями разряда около 1—3 кВт



тяговый КПД до 30–35% и скорости истечения частиц РВ (удельные импульсы тяги) до 18 км/с [6, 7]. Эти параметры превышали соответствующие параметры ионных и других плазменных двигателей такого уровня мощности в названном диапазоне скоростей истечения. Также важной оказалась идея использования инертных газов в качестве РВ, предложенная специалистами ИАЭ, что упростило проведение исследований и испытаний СПД, а также хранение ксенона на борту КА и обеспечение совместимости работы СПД с элементами конструкции двигателя и КА.

Значимым преимуществом СПД в рассматриваемый период было также то, что при работе на ксеноне с уровнем мощности, не превышающим 1 кВт, и при скоростях истечения частиц РВ около 10 км/с СПД имел достаточно высокий тяговый КПД, позволяющий получать низкие (менее 20 кВт/Н) энергетические затраты на создание тяги. Сочетание указанных особенностей позволяло использовать СПД для управления движением советских космических аппаратов (КА) уже в начале 1970-х гг., а названная скорость истечения частиц РВ из СПД в 3 и более раз, превышала соответствующие скорости истечения в ТРД малой тяги. С учетом изложенного Морозов предложил провести летные испытания СПД, и это предложение было поддержано руководством ИАЭ, Всесоюзного научно-исследовательского института электромеханики (ВНИИЭМ) и отдела опытно-конструкторских работ государственного комитета СССР по атомной технике. В результате, группой специалистов ИАЭ, ВНИИЭМ, опытно-конструкторского бюро (ОКБ) “Заря” и его филиала в г. Калининграде (ныне известного как ОКБ “Факел”) было подготовлено и в 1972 г. успешно проведено первое летное испытание экспериментального образца (ЭО) СПД-60 (рис. 8), на борту искусственного спутника Земли (ИСЗ) “Метеор”, разработанного ВНИИЭМ [27, 28]. В этом образце, разработанном в ОКБ “Факел” на основе прототипа, разработанного в ИАЭ Ю.А. Шаровым, наружный диаметр ускорительного канала составлял 60 мм, и он мог длительно работать при мощностях до 500–600 Вт.

Для дальнейшего рассмотрения следует отметить, что ЭО СПД-60 имел достаточно протяженные в направлении ускорения (“широкие”) полюса для задания определенной магнитной индукции в ускорительном канале (УК), образующие



**Рис. 8.** Общий вид экспериментального образца СПД-60, впервые испытанного в космосе: 1 – ускорительный канал, 2 – разрядная камера, 3 – анод-газораспределитель, 4, 5 – наружный и внутренний (центральный) полюса магнитной системы соответственно, 6 – катушка намагничивания, 7 – элементы магнитопровода, 8 – газоразрядный катод-нейтрализатор, 9 – газозлектрическая развязка [6, 7].

сужающийся к выходу межполюсный зазор для создания силовых линий магнитного поля с “фокусирующей” геометрией в прианодной части УК в соответствии с упомянутой идеей Морозова. К сказанному следует добавить, что лабораторные модели типа ЭО СПД-60, созданные в ИАЭ, без особых дополнительных мер со стороны исследователей достаточно устойчиво работали в диапазоне разрядных напряжений 150–600 В и, судя по измерениям пространственного распределения ускоренных ионов вблизи плоскости выходного сечения зондами, проведенных в МАИ, обеспечивали близкую к 100%-ной переработку потока атомов ксенона в ионы уже при напряжениях около 200 В [5, 28]. Ресурс ЭО СПД-60 на режиме работы с мощностью разряда 400 Вт составлял около 1000 часов.

Кроме того, в ИАЭ была показана возможность получения тягового КПД СПД на ксеноне 1 киловаттного класса до 60% и выше [6, 7, 28]. Но созданные модели с высокой тяговой эффективностью обладали небольшим ресурсом. Поэтому основной для дальнейшего развития СПД, как

и для ДАС, оказалась проблема обеспечения как высокой тяговой эффективности, так и большого ресурса.

Упомянутую устойчивую работу моделей ИАЭ можно было объяснить тем, что они имели в прианодной части УК участки с нарастающей в выходном направлении магнитной индукцией, что соответствовало теоретическому выводу Морозова об устойчивости ускоряемого ионного потока в таких частях канала [29]. Больше того, экспериментальное исследование характеристик моделей СПД со спадающей во всем канале в выходном направлении магнитной индукцией показало, что разряд в них становился неустойчивым и переходил в моду с высоким уровнем низкочастотных колебаний и большой долей электронной компоненты в разрядном токе [30], приводящей к значительному снижению тяговой эффективности. Поэтому одним из положений, которое соблюдалось далее при разработке большинства СПД в СССР, было создание в прианодной части УК магнитного поля со значительным участком нарастания магнитной индукции в выходном направлении. К сказанному следует добавить, что создание “фокусирующей” геометрии силовых линий магнитного поля обеспечивает в части УК возрастающее распределение магнитной индукции, что служит дополнительным обоснованием ее целесообразности.

Для последующего развития СПД важным оказалось решение в процессе первых испытаний СПД в космосе практической задачи, а именно: в результате работы одного из ЭО СПД-60 в течение примерно 170 ч ИСЗ “Метеор” был переведен на предпочтительную орбиту [27], и это было значимым успехом первого этапа работ по СПД, который привел к расширению и ускорению работ по СПД. К сказанному следует добавить, что уже в процессе подготовки рассмотренных испытаний СПД к его исследованиям и разработкам кроме ИАЭ, ОКБ “Факел” и ВНИИЭМ были привлечены МАИ, Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова (ЦИАМ), а несколько позже — Московский институт радиоэлектроники и автоматики (МИРЭА) и другие организации. В итоге, начался 2-ой этап развития СПД, и данное направление работ стало одним из ведущих по исследованиям и разработкам ЭРД в СССР в период 1970–1990-х гг., что дало значительные результаты [5–7, 28, 31–33]. При этом названное расширение числа привлеченных к ра-

ботам по СПД организаций оказалось полезным не только из-за увеличения возможностей исследований, но и обеспечило поддержание их уровня после расформирования в середине 1970-х гг. исследовательской группы ИАЭ из-за возникших в ней внутренних противоречий.

В прикладном плане основной проблемой, которая решалась на втором этапе развития СПД, стало повышение его ресурса при обеспечении высокой тяговой эффективности. Для решения этой проблемы сначала специалистами кафедры 208 МАИ, а затем НИИ прикладной механики и электродинамики МАИ (НИИПМЭ МАИ) Андреем М. Бишаевым, В.М. Гаврюшиным, В.И. Козловым, В.В. Егоровым, С.А. Хартовым, Р.К. Чуяном, Александром М. Бишаевым, В.М. Серовайским, А.И. Скрыльниковым, А.В. Лазуренко, Д.В. Меркурьевым, А.С. Архиповым, Е.К. Сидоренко, Е.А. Шиловым и др. при лидирующей роли В.П. Кима был выполнен комплекс исследований, позволивших выявить ряд важных особенностей протекания рабочих процессов в СПД и разработать технические решения, обеспечивающие, как достаточно высокую тяговую эффективность, так и повышенный ресурс этого двигателя [6, 7, 28, 31]. Эти работы несколько подробнее будут рассмотрены позже.

В ОКБ “Факел” с учетом рекомендаций и при научно-технической поддержке МАИ осуществлялось последовательное совершенствование организации рабочих процессов и конструкции СПД. В результате, в ОКБ “Факел” были разработаны и прошли наземную отработку конструкции летных образцов двигателей типа СПД-50, СПД-70, СПД-100 и СПД-140 второго поколения и двигательных установок на их основе, работающих на ксеноне с достаточно высокой тяговой эффективностью при номинальных мощностях от 0.4 до 4.5 кВт соответственно, и достаточными для решения ряда задач сроками службы (ресурсами) [5–7, 28, 31–33]. Была проведена их летная отработка сначала в составе ИСЗ типа “Метеор”, разработанных ВНИИЭМ, а затем в составе геостационарных ИСЗ, разработанных научно-производственным объединением прикладной механики (НПОПМ), и началось регулярное их применение в системах управления движением отечественных космических аппаратов (КА). Перечисленные двигатели уже многие годы используются в системах управления движением отечественных КА, а двигатели СПД-100 и СПД-

140 — используются и в составе зарубежных КА [5–7, 28, 31–33].

Как уже отмечалось ранее, с учетом успехов в разработке и применении СПД в СССР с начала 1990-х гг. была проведена комплексная оценка российских СПД и ДАС в США и Франции и начались работы по применению российских двигателей на зарубежных КА, а также разработки собственных версий СПД, называемых ими Холловскими двигателями (ХД). В настоящее время двигатели этого типа разрабатываются также в Италии, Китае, республике Корея, Израиле и Японии. Особо следует отметить, что в США ХД, работающие на криптоне, с 2019 г. начали применяться в системах управления движением многоспутниковой орбитальной группировки Starlink с максимальным проектным числом малых КА свыше 10000. Это резко расширило масштабы применения СПД (ХД) в космосе. Расчеты показывают также перспективность использования мощных транспортных модулей на основе СПД (ХД) и ДАС для реализации транспортировки тяжелых грузов к Луне и другим объектам Солнечной системы. Поэтому одна из основных задач современного развития СПД — создание двигателей, способных длительно и эффективно работать на режимах работы с повышенными до 3000 с и более удельными импульсами тяги, в том числе, на альтернативных ксенону рабочих веществах. Так, в США в течение более 10 лет разрабатываются ХД HERMES с номинальной мощностью 12.5 кВт, удельным импульсом тяги до 3000 с и проектным ресурсом не менее 50 тысяч часов по программе NASA разработки новых технологий и транспортные модули на его основе [34], разработан двигатель MaSMi с мощностью до 1 кВт и повышенным ресурсом для реализации полетов малых КА в дальний космос [35]. При этом главной проблемой создания таких двигателей является кардинальное повышение ресурса СПД (ХД) и ДАС, а уже используемые способы повышения ресурса ДЗДЭ не имели достаточно полного физического обоснования. С учетом изложенного актуальной была научно-техническая задача анализа и физического обоснования уже использованных или используемых способов повышения ресурса ДЗДЭ и оценки их перспективности при разработке ДЗДЭ нового поколения.

### 3. БАЗОВЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, НА ОСНОВЕ КОТОРЫХ РАЗРАБАТЫВАЛИСЬ ДАС И СПД НА ПЕРВОМ ЭТАПЕ ИХ РАЗВИТИЯ

Как уже отмечалось ранее, важная часть названных положений и результатов была разработана или получена уже на первом этапе развития ДЗДЭ. Поэтому они рассматриваются далее в первую очередь с комментариями авторов, учитывающими новые данные или отражающих их значимость на современном этапе развития ДЗДЭ. Отмечалось также, что на первом этапе развития ДЗДЭ наиболее последовательно основные физические положения для их разработки были сформулированы и подтверждены экспериментально на основе примерно 10 лет исследований ДАС [1, 10, 11]. Поэтому названные положения рассматриваются далее применительно к обоим типам УЗДЭ, и их можно свести к следующим выводам.

1. Возможны эффективная ионизация и “безэлектродное” ускорение ионов РВ в достаточно узком квазинейтральном слое плазмы со скрещенными  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ -полями. Обоснованность этого положения была достаточно полно подтверждена исследованиями распределений параметров в экспериментальных ионных магнетронах, моделирующих процессы в ДАС [1, 10], один, из которых представлен на рис. 9. В этом устройстве создавалось достаточно сильное и направленное вдоль оси камеры магнитное поле и через анодные трубки 3, расположенные у оси магнетрона, подавалась плазма, полученная в газовом разряде в парах таллия со скрещенными  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ -полями.

Были проведены измерения ионного тока на коллектор, распределений потенциала плавающего зонда в истекающей из источника плазме вдоль и поперек направления ускорения ионов и энергетических характеристик потока ионов, попадающих на коллектор. В результате было получено, что основное падение потенциала реализуется в прианодном слое разряда с размером около 1.0 см (рис. 10), а энергия ионов сопоставима с энергией, примерно соответствующей приложенному между анодом и катодом напряжению. Ток ионов на коллектор был близок к значению, соответствующему потоку частиц таллия, поступавших в разряд в предположении их однократной ионизации. При этом плотность ионного тока в этом разряде существенно превышала возможную при ограничении ее объемным зарядом



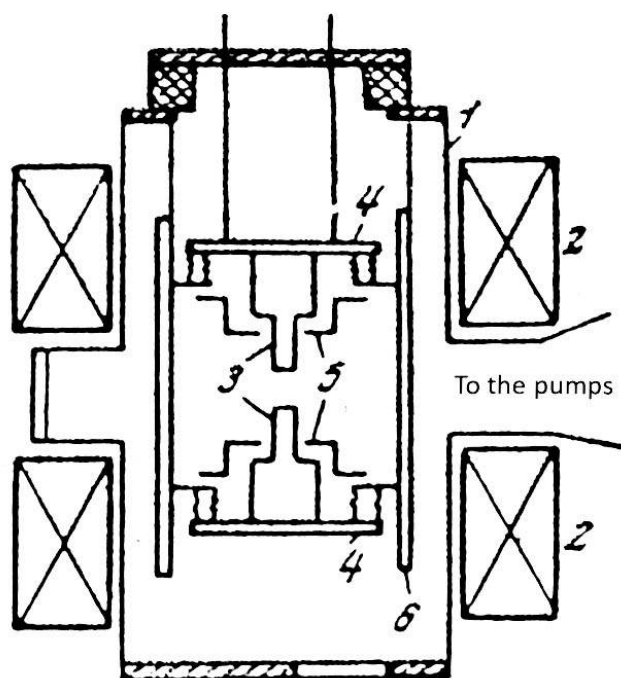


Рис. 9. Экспериментальный ионный магнетрон, использованный командой А.В. Жаринова для исследования ионизации и ускорения потоков ионов таллия в  $E \times B$ -разряде: 1 – вакуумная камера, 2 – катушки намагничивания, создающие однородное продольное магнитное поле в рабочем объеме магнетрона, 3 – газоразрядные источники плазмы с выходными трубками с диаметром 10 мм, использованные в качестве анодов разряда, 4 – монтажные фланцы, 5 – электростатические экраны, 6 – коллектор ионов с внутренним диаметром 280 мм, охлаждавшийся водой и служивший катодом разряда) [6, 7].

ионов. Это свидетельствовало о квазинейтральном режиме их ускорения.

Важно, что была получена малая толщина зоны ускорения (ЗУ) с основным падением потенциала и локализация зоны с основным падением потенциала в прианодной части разряда. Первое свойство разряда, как будет показано позже, было объяснено Жариновым. Второе может быть объяснено тем, что поток ионов, истекающих из источника плазмы, расширяется и концентрация плазмы снижается по мере удаления от названного источника. Поэтому слой локализуется в прианодной области разряда с повышенной концентрацией плазмы, где реализуются более высокие скорости ионизации.

Отмеченная особенность локализации активной части разряда дала основание назвать УЗДУ и ДАС ускорителем и двигателем с анодным слоем соответственно.

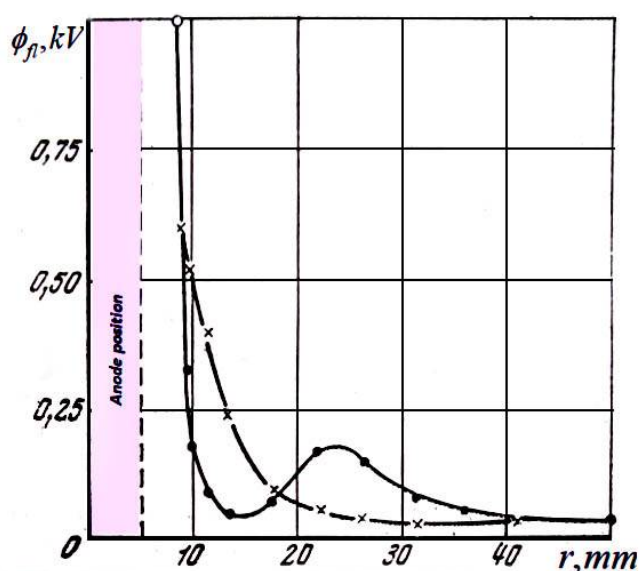


Рис. 10. Радиальные распределения потенциала «плавающего» зонда  $\Phi_l$  в магнетронном разряде с напряжением 4 кВ и магнитной индукцией 0.15 Тл [1, 10] (• – без ионного пучка, × – с ионным пучком).

2. Продольный размер (толщина)  $L_{sh}$  ЗУ в направлении ускорения должна быть значительно меньше, чем ионный радиус Лармора  $R_{Li} = V_i / \omega_i$ , и больше, чем электронный радиус Лармора  $R_{Le} = V_e / \omega_e$ , где  $V_i$ ,  $V_e$ ,  $\omega_i = eB / Mc$ ,  $\omega_e = eB / mc$  скорости ионов и электронов, циклотронные частоты ионов и электронов ( $M$  и  $m$  – массы ионов и электронов) соответственно, т. е.

$$R_{Le} < L_{sh} \ll R_{Li}. \quad (3)$$

Первое из названных условий обеспечивает небольшое влияние магнитного поля на движение ионов внутри отмеченного слоя, а второе является одним из условий перемещения электронов в ЗУ преимущественно в азимутальном ( $E \times B$ ) направлении. Далее электрическое поле будет считаться направленным преимущественно в направлении ускорения.

3. Плазма внутри рассматриваемого слоя должна быть разреженной, чтобы длины свободного пробега атомов, ионов и электронов превышали толщину слоя, а электроны должны быть «замагничены», чтобы их параметр Холла  $\omega_e \tau_e$  был очень большим, где  $\tau_e = \lambda / V_e$ ,  $\lambda$  – время и длина свободного пробега электронов в объеме разряда.

Названные условия обеспечивают малое влияние столкновений электронов в объеме ЗУ между собой и с другими частицами, а также столкновений ионов и атомов между собой на их

движение, небольшой электронный ток поперек магнитного поля и доминирование электрического дрейфа в усредненном движении электронов. Поэтому можно расценивать приведенные условия, как также обеспечивающее почти полное “замыкание” траекторий усредненного движения электронов в кольцевом ускорительном канале. Поскольку с использованием этих предположений строится большинство анализов и теоретических моделей процессов в УЗДЭ, целесообразно было проверить их применимость. Среди них наиболее сложным является подтверждение существенной замагниченности электронов. Как будет показано далее, в зонах ускорения СПД были проведены экспериментальные проверки выполнения наиболее сложного для подтверждения условия существенной замагниченности электронов  $\omega_e \tau_e \gg 1$ , одной из ключевых особенностей УЗДЭ, объясняющей, почему в СССР и России ДАС и СПД назывались плазменными ускорителями или двигателями с замкнутым дрейфом электронов (ДЗДЭ).

4. Электрическое поле внутри ЗУ определяется уравнением Пуассона, т. е. распределением концентраций ионов ( $n_i$ ) и электронов ( $n_e$ )

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} = \frac{1}{\epsilon_0} (\sum n_i q_i - n_e e), \quad (4)$$

где  $q_i$ ,  $\rho$ ,  $\epsilon_0$  — заряд ионов, локальная плотность не скомпенсированных зарядов и диэлектрическая проницаемость вакуума соответственно.

Из этого уравнения следует, что пространственные распределения электрического поля в разряде УЗДЭ определяются распределениями концентрации ионов и электронов, в свою очередь, зависящими от электрического поля и закономерностей рождения и движения ионов и электронов, т. е. все названные распределения связаны между собой и должны быть самосогласованными. Это определяет сложность теоретического описания совокупности физических процессов в рассматриваемом разряде, особенно, из-за сложности и недостаточной изученности динамики электронов в разрядах УЗДЭ и отсутствия до настоящего времени верифицированного количественного описания влияния на нее неустойчивостей в плазме и ее зависимости от общих условий разряда, пригодного в инженерной практике.

5. В оговоренных выше условиях, ионы с массой  $M$  должны двигаться внутри ЗУ в основном под действием электрического поля, сформиро-

ванного в ЗУ в соответствии с уравнением (4), т. е. уравнение их движения может быть записано в следующем виде:

$$M \frac{d\mathbf{V}_i}{dt} = q_i [\mathbf{E} + (\mathbf{V}_i \times \mathbf{B})]_i \approx q_i \mathbf{E}. \quad (5)$$

Совместно с уравнением (3) это означает, что механизм ускорения ионов в ДАС и, как будет показано позже, в СПД является электростатическим, а с учетом разреженности плазмы их динамика, как и динамика нейтральных атомов наиболее адекватно должна описываться кинетическими уравнениями.

6. Электроны внутри ЗУ должны перемещаться под действием *под действием силы Лоренца*

$$m \frac{d\mathbf{V}_e}{dt} = -e [\mathbf{E} + (\mathbf{V}_e \times \mathbf{B})], \quad (6)$$

в основном в азимутальном ( $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ) направлении со средней скоростью электрического дрейфа  $\mathbf{u} = \mathbf{E} \times \mathbf{B} / B^2$ .

Дрейфовое движение электронов вызывает появление дрейфового (холловского) тока с плотностью

$$\mathbf{j}_{e\theta} = -n_e e \mathbf{u} = -n_e e \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B^2}. \quad (7)$$

Из-за столкновений с другими частицами, стенками и влияния неустойчивостей электроны в ЗУ перемещаются в противоположном направлении электрического поля. Продольный электронный ток поперек магнитного поля ограничивается магнитным полем. Поэтому перемещение электронов поперек магнитного поля можно описывать гидродинамическим уравнением для плотности этого тока

$$j_{ez} = \frac{1}{\omega_e \tau_e} n_e u e = \frac{n_e e}{B \omega_e \tau_e} E = \frac{n_e m}{B^2 \tau_e} E. \quad (8)$$

Для замагниченности электронов в ЗУ эффективное значение параметра Холла должно быть очень большим, т. е.

$$(\omega_e \tau_e)_{eff} = j_{e\theta} / j_{ez} \gg 1. \quad (9)$$

Из последнего выражения следует, что проверить существенную замагниченность электронов в ЗУ можно, получив данные о соотношении плотностей азимутальной и продольной составляющих электронного тока в зоне ускорения УЗДЭ. Кроме отмеченного ранее, важность оценки реальных значений  $(\omega_e \tau_e)_{eff}$  определяется тем, что эти значения позволяют получить представление о значимости различных меха-

низмов переноса электронов поперек магнитного поля. Удостовериться в том, что это условие выполняется, не так просто. Косвенная проверка выполнения этого требования была осуществлена впервые в ИАЭ в работе В.Н. Демьяненко, С.В. Лебедева и др. [34] путем измерения при работающей модели СПД сигналов, наведенных дрейфовым током на нескольких диагностических катушках (ДК), соосных ускорительному каналу и охватывающих разрядную камеру. Сопоставляя полученные сигналы с сигналами на ДК, получаемыми при размещении в разных сечениях УК неработающей модели кольцевого проводника с током, можно было находить положение проводника и величину тока в нем, обеспечивающих получение на ДК таких же сигналов, как и при работе модели. Соответствующие значение тока и положение проводника трактовались как величина дрейфового тока (ДТ) электронов и положение центра его тяжести соответственно. По результатам измерения продольных составляющих ионных токов плоским электростатическим зондом можно было также оценить величины полного ионного тока в сечении УК, проходящем через найденный центр тяжести распределений ионных токов, и величину продольного электронного тока (ПЭТ) как разность разрядного тока и полного ионного тока в названном сечении. При определенных допущениях о сечениях, через которые протекают ДТ и ПЭТ, можно было также оценить плотности этих токов и значения эффективного параметра Холла по формуле (9). Такие измерения и оценки дали значения  $(\omega_e \tau_e)_{eff} = 200 - 300$ . Дополнительные исследования описанным выше методом были проведены специалистами МИРЭА А.И. Бугровой, В.К. Харчевниковым и др. для уточнения положения центра тяжести ДТ на разных режимах работы СПД [35].

Оценки эффективного значения параметра Холла были проведены также в МАИ В.П. Кимом по результатам измерений распределений локальных параметров плазмы в методической лабораторной модели (далее ЛМ-1) СПД с наружным диаметром УК около 100 мм, работающей при разрядном напряжении 200 В [36, 37], которые будут рассмотрены позже. В этой модели были определены двумерные распределения параметров плазмы, включая распределения потенциала плазмы и направленных ионных потоков, позволивших определить значения продольного ионного тока и электронной составляющей разряд-

ного тока в разных сечениях УК, и получить оценки плотности продольного электронного тока в области поперечного сечения УК с максимальными значениями концентрации электронов и дрейфового электронного тока. В данном случае важно то, что полученные значения концентрации электронов, напряженности электрического поля, направленных ионных токов позволили оценить электронную составляющую разрядного тока и величину холловского тока, а также оценку эффективного значения в ЗУ, которая дала значения  $(\omega_e \tau_e)_{eff} \geq 100$ . Полученная оценка параметра Холла заметно отличается от приведенной ранее, что может быть объяснено различием моделей, в которых проводились измерения, и режимов их работы. Кроме того, погрешность оценки эффективного параметра Холла рассмотренными методами достаточно велика из-за сложности точной оценки поперечных сечений, в которых протекают ДТ и ПЭТ. Но в целом полученные большие значения параметра Холла подтверждают существенную замагниченность электронов в ЗУ разряда СПД на типовых режимах его работы. При этом полученные оценки этого параметра свидетельствуют о том, что столкновения дрейфующих электронов с атомами и ионами вносят малый вклад в поперечный перенос электронов в ЗУ, так как оценки этого параметра с учетом только названных столкновений дают минимальные его значения в ЗУ более 1000.

7. Электрический дрейфовый (холловский) ток в ЗУ ДЗДЭ достаточно большой, потому что скорость дрейфа электронов для типичных режимов работы ДЗДЭ намного выше, чем средняя продольная (вдоль направления электрического поля) скорость электрона  $V_{ez}$ . Можно оценить электромагнитную силу  $\mathbf{f}_{em} = \mathbf{j}_{e\vartheta} \times \mathbf{B}$ , действующую на дрейфующие электроны в единице объема, в котором они движутся.

С учетом приводившегося ранее выражения скорости дрейфа, можно получить, что

$$\mathbf{f}_{em} = \mathbf{j}_{e\vartheta} \times \mathbf{B} = -n_e e \mathbf{u} \times \mathbf{B} = n_e e \mathbf{E} = -\mathbf{f}_{Ee}. \quad (10)$$

При условии квазинейтральности плазмы

$$n_e e \approx \sum n_i q_i, \quad (11)$$

где  $n_i$  — концентрация ионов с зарядом  $q_i$ , получается, что

$$\mathbf{f}_{em} = \mathbf{j}_{e\vartheta} \times \mathbf{B} = \sum n_i q_i \mathbf{E} = \mathbf{f}_{Ei}. \quad (12)$$

Таким образом, в силу квазинейтральности плазмы электромагнитная сила, действующая на



дрейфующие электроны, равна электрической силе  $\mathbf{f}_{Ei}$ , действующей на ионы со стороны электрического поля. При этом в работе [10] отмечалось, что в принципе электромагнитная сила и холловский ток в разряде УЗДЭ могут использоваться для решения определенных задач в магнитогидродинамическом (МГД) приближении. Но в ситуации, когда в ЗУ УЗДЭ ионы и электроны движутся в зоне ускорения в существенно отличающихся направлениях и “в значительной мере” независимо друг от друга, т. е. в отсутствие в ЗУ движения плазмы как целого, такой подход не представляется адекватным (слова “в значительной мере” в данном случае отражают то, что движутся ионы и электроны в одном и том же созданном внешним источником электрическом поле, формирующимся в объеме ЗУ с их участием в соответствии с уравнением (4). Поэтому следует аккуратно подходить к разработке моделей для МГД-описания динамики ионного потока в ЗУ и моделей для качественного ее анализа. Так, с использованием уравнения “интегрального баланса сил” в зоне ускорения [1], полученного с использованием таких базовых соотношений, как (12) и др. без учета затрат на ионизацию, расходимости ионного потока и его взаимодействия со стенками, существенных в реальных ускорителях, можно получить ошибочные результаты. Кроме того, в экспериментальном плане гораздо проще и нагляднее контролировать движение ионов, измерять напряженность электрического поля, направленные ионные потоки в УК и их энергетические характеристики, чем контролировать распределения локальных значений плотности холловского тока, что значительно сложнее.

К сказанному следует добавить, что выражение (12) вызывало путаницу и в объяснении механизма ускорения ионов в УЗДЭ, а именно: кто-то может сказать, что оно отражает электромагнитный механизм ускорения ионов. Например, в некоторых ранних работах команды Жаринова и американских статьях по ХД использовался термин “ускорение плазмы холловским током”. Этот вопрос обсуждался и в некоторых, более поздних работах. С учетом отмеченного, он был специально рассмотрен В.П. Кимом в работе [38] на примере лабораторной СПД, в которой с использованием результатов измерений продольного распределения потенциала плазмы в разряде было определено распределение избыточных объемных зарядов и показано, что фактически в ЗУ СПД ионы

ускоряются в двойном электрическом слое избыточным отрицательным объемным зарядом электронов, перенос которых поперек магнитного поля ограничивается силой Лоренца.

Принципиальное отличие механизма ускорения ионов в ДЗДЭ состоит в следующем: в чисто электростатических двигателях униполярный поток ионов ускоряется зарядами электронов, сконцентрированными на поверхностях ускоряющих электродов, а в СПД и ДАС ионы ускоряются в квазинейтральной плазме избыточными зарядами электронов, удерживаемых силой Лоренца в окрестностях прозрачных для ионов магнитных поверхностей, содержащих однотипные силовые линии магнитного поля и компенсирующие основную часть объемного заряда ионов. Названные избыточные заряды электронов совместно с избыточным зарядом ионов в прианодной части ЗУ создают в объеме ЗУ электрическое поле, действующее на ионы с силой  $\mathbf{f}_{Ei}$  и на электроны с силой  $\mathbf{f}_{Ee}$ , перенос которых поперек магнитного поля ограничивается силой Лоренца.

Таким образом, было подтверждено, что в СПД (и, очевидно, в ДАС) ускорение ионов является электростатическим и “безэлектродным”. При этом, объемная сила  $\mathbf{f}_{Ei}$ , действующая на ионы со стороны электрического поля, должна быть равна силе  $\mathbf{f}_{ei}$ , действующей на ионы со стороны избыточного заряда электронов. В соответствии с 3-м законом Ньютона на электроны со стороны ионов действует сила  $\mathbf{f}_{ie} = \mathbf{f}_{Ee} = -en_e\mathbf{E} = -\mathbf{f}_{em}$ . Поэтому

$$\mathbf{f}_{Ee} + \mathbf{f}_{em} = 0. \quad (13)$$

Последнее уравнение показывает, что усредненные силы, действующие на дрейфующие электроны, находятся в равновесии. При этом сила реакции  $\mathbf{f}_{ie} = \mathbf{f}_{Ee}$ , действующая на электроны со стороны ускоряемых ими ионов, компенсируется действующей на них электромагнитной силой, передающей, в свою очередь, действие силы  $\mathbf{f}_{ie} = \mathbf{f}_{Ee}$  через магнитное поле на магнитную систему двигателя [38].

Следует также отметить, что, по мнению авторов данной статьи, названия “холловский двигатель” (ХД), “двигатель с эффектом Холла” являются неудачными, поскольку классический эффект Холла состоял в отклонении зарядов, движущихся в проводнике в направлении действия основного электрического поля, поперек этого направления их движения под действием поперечного к нему магнитного поля. В УЗДЭ и в маг-

нетронах значительный ток электрического дрейфа в соответствии с уравнением (6) возникает под действием силы Лоренца при малых или нулевых продольных (вдоль направления электрического поля) токах, т. е. независимо от созданного электрическим полем продольного тока. Таким образом, электронный дрейфовый ток в УЗДЭ является первичным, а продольный ток электронов возникает вследствие взаимодействия дрейфующих электронов с другими частицами, стенками и возмущениями параметров плазмы из-за ее неустойчивостей, т. е. является вторичным. Поэтому рассматриваемые устройства по физической их основе логичнее называть “лоренцевыми” двигателями или ускорителями ионов с замкнутым дрейфом электронов, как было принято в СССР, а не “холловскими” двигателями, как их называют в США, или “двигателями с эффектом Холла”, как их называют в Европе.

8. Жариновым было показано [1], что в  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ -слое с ионизацией, продольный размер  $L_{sh}$  в направлении ускорения (толщина ЗУ) с основным падением потенциала для его устойчивого существования должен быть таким, чтобы все образовавшиеся в нем электроны удалялись из слоя. Поэтому толщина ЗУ должна быть сопоставима с Ларморовским радиусом электронов, а именно

$$L_{sh} \approx R_{Le}(\Delta U) \sqrt{\frac{v_e}{v_i}}, \quad (14)$$

где  $R_{Le}(\Delta U)$  — ларморовский радиус электронов со скоростью, соответствующей энергии электронов, прошедших разность потенциалов, равную падению потенциалов в слое  $\Delta U$ ,  $v_e$  — эффективная частота столкновений дрейфующих электронов с другими частицами и стенками или с условными “возмущениями параметров плазмы” вследствие ее неустойчивостей, вызывающих сдвиг электронов поперек магнитного поля,  $v_i$  — частота ионизационных столкновений электронов  $v_i = \langle \sigma_i V_e \rangle n_a$  с атомами с концентрацией  $n_a$ , где  $\langle \sigma_i V_e \rangle$  — коэффициент скорости ионизации, усредненный по функции распределения электронов по скоростям.

При этом важно, что выражение (14) является “директивным”, а именно: если слой стабильно существует, то толщина ЗУ должна соответствовать этому выражению. Это означает, что толщину и положение ЗУ в разряде можно рассматривать как интегральные параметры  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ -разряда, а ее

малую толщину, как одно из важных общих свойств этого разряда, которое, как будет показано позже, можно использовать для управления процессами в УЗДЭ. В частности, можно изучать влияние различных внешних факторов на положение и толщину ЗУ и управлять названными параметрами, а следовательно, и процессами в разряде, изменяя названные факторы.

К сказанному следует добавить, что, как будет показано, позже, выражение (14) применимо и к СПД. В частности, оно объясняет один из факторов, определяющих разницу между процессами в ДАС и СПД. Так эффективную частоту столкновений электронов, определяющих поперечный к магнитному полю перенос электронов можно условно представить в виде  $v_e = v_{ea} + v_{ei} + v_{ew} + \tilde{v}_e$ , где  $v_{ea}$  — частота столкновений электронов с атомами,  $v_{ei}$  — ионами,  $v_{ew}$  — стенками и  $\tilde{v}_e$  — условная частота взаимодействия электронов с “возмущениями параметров плазмы”, вызванными ее неустойчивостями, определяющими “шумовую” электронную проводимость. При этом частота ионизационных столкновений является малой частью суммарной частоты столкновений электронов с атомами и ионами, которая, в свою очередь, значительно меньше частоты столкновений электронов со стенками. Последнюю можно представить в виде  $v_{ew} = k_w V_e / b_{ch}$ , где  $V_e$  — скорость электронов,  $b_{ch}$  — ширина УК,  $k_w$  — коэффициент, учитывающий то, что не все электроны, движущиеся из плазмы к стенке, взаимодействуют с нею с потерей импульса. В СПД меньше разность потенциалов между плазмой и диэлектрическими стенками РК, которая определяется условием “плавания” названных стенок в плазме и составляет несколько  $kT_e / e$ , где  $kT_e$  — температура электронов в эВ. В ДАС же стенки разрядной камеры, ограничивающие разряд в радиальном направлении, выполняются из электропроводных материалов и обычно имеют значительное отрицательное смещение по отношению к плазме в местах ее контакта со стенками. Поэтому должны быть меньше эффективная частота столкновений электронов со стенками и суммарная частота столкновений электронов в выражении (14), которые могут приводить к их смещению поперек магнитного поля и к возникновению “пристеночной проводимости”, механизм которой был впервые объяснен А.И. Морозовым [39]. Соответственно, должна быть меньше и толщина ЗУ. Эти выводы подтверждаются и эксперимен-

тальными данными, свидетельствующими, о несколько больших размерах зон ускорения в СПД, чем в ДАС, и о возможности управления процессами в разряде изменением свойств и потенциала стенок разрядной камеры [40].

Следует также отметить, что уже в первых работах ИАЭ было определено, что в прианодной области разряда и в выходной его части существенными являются возмущения параметров плазмы, в том числе, вращающиеся в азимутальном направлении, способные вызывать увеличение подвижности и коэффициентов диффузии электронов поперек магнитного поля, а в зоне ускорения доминируют продольные “пролетные” колебания, которые также могут влиять на поперечный перенос электронов [41–44]. Существенную роль может играть и пристеночная электронная проводимость, поскольку частота столкновений электронов со стенками значительно превышает частоту их столкновений с остальными частицами. Но вопрос о доминирующем механизме переноса электронов в разных зонах разряда до конца не решен в силу отмечавшейся сложности процессов, определяющих поперечный перенос электронов поперек магнитного поля в  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ -разрядах.

9. Следующий важный качественный результат, полученный командой ЦНИИМаш, устанавливал, что для обеспечения эффективной ионизации потока РВ в рассматриваемом слое, плотность этого потока должна превышать определенное значение [1]. Действительно, высокая вероятность ионизации атомов РВ

$$P_i = 1 - \exp(-L_{sh} / \lambda_{ai}) \quad (15)$$

внутри ЗУ может быть получена, если длина  $\lambda_{ai} = V_a / \langle \sigma_i V_e \rangle n_e$  свободного пробега атомов со скоростью  $V_a$  до их ионизации в плазме с концентрацией электронов  $n_e$  ( $\langle \sigma_i V_e \rangle$  — коэффициент скорости ионизации атомов электронами, усредненный по функции распределения электронов по скоростям) будет значительно меньше, чем  $L_{sh}$ . В частности, полагая, что скорость атомов определяется температурой анода  $T_a$ , специалистами ЦНИИМаш было определено, что для получения вероятности ионизации атомов в слое  $P_i \geq 0.5$ , плотность тока  $j_m = \dot{m}_a e / MS_{ch}$ , рассчитанная по массовой плотности потока частиц РВ  $\dot{m}_a / MS_{ch}$  с массой  $M$  в УК с поперечным сечением  $S_{ch}$ , должна отвечать следующему условию [10]:

$$j_m \geq C \frac{1}{\langle \sigma_i V_e \rangle} \left( \frac{\langle \sigma_i V_e \rangle}{\langle \sigma_{ea} V_e \rangle} \right)^{1/2} \frac{B T_a^{1/2}}{M}, \quad (16)$$

где  $\bar{V}_i$  — средняя скорость ионов,  $\dot{m}_a$  — массовый расход частиц РВ через канал ускорения,  $B$  — магнитная индукция,  $\langle \sigma_{ea} V_e \rangle$  — коэффициент скорости столкновений электронов с нейтральными атомами, приводящих к смещению электронов поперек магнитного поля, усредненный по функции распределения электронов по скоростям,  $C$  — константа.

Недостаток последнего выражения — оно получено лишь для одного возможного значения  $P_i$  подбором его значения, поскольку в выражении (15) правая часть зависит от  $P_i$ . Но, как показано В.П. Кимом [24], при тех же допущениях, что и в [1, 10], этот недостаток можно устранить, поскольку в  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ -слое практически всегда  $P_i < 1$ . Действительно в выражении (15) можно представить, что

$$n_e \approx \frac{\dot{m}_i}{MS_{ch}\bar{V}_i} \approx \frac{\dot{m}_a}{MS_{ch}\bar{V}_i} P_i, \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \frac{L_{sh}}{\lambda_i} &= L_{sh} \frac{\langle \sigma_i V_e \rangle}{V_a} \frac{\dot{m}_a}{MS_{ch}\bar{V}_i} P_i = \\ &= -\ln(1 - P_i) = P_i f(P_i), \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} L_{sh} \frac{\langle \sigma_i V_e \rangle}{V_a} \frac{\dot{m}_a}{MS_{ch}\bar{V}_i} &= \frac{L_{sh}}{\lambda_{i0}} = f(P_i) = \\ &= 1 + \frac{P_i}{2} + \frac{P_i^2}{3} + \dots + \frac{P_i^n}{n+1} + \dots, \end{aligned} \quad (19)$$

$$\frac{\dot{m}_a}{S_{ch}} \approx f(P_i) \frac{M V_a V_i}{\langle \sigma_i V_e \rangle L_{sh}}. \quad (20)$$

Таким образом, чтобы обеспечить значение вероятности ионизации атомов РВ, превышающее заданное значение  $P_i$ , нужно обеспечить следующее условие:

$$\frac{\dot{m}_a}{S_{ch}} \geq f(P_i) \frac{M V_a V_i}{\langle \sigma_i V_e \rangle L_{sh}}, \quad (21)$$

где

$$\lambda_{i0} = \frac{V_a}{\langle \sigma_i V_e \rangle n_{e0}} = \frac{V_a}{\langle \sigma_i V_e \rangle} \frac{MS_{ch}\bar{V}_i}{\dot{m}_a} \quad (22)$$

есть характерная длина свободного пробега атомов до их ионизации. Таким образом, используя предварительно рассчитанные значения функции  $f(P_i)$  (рис. 11), можно оценить влияние различных факторов на значения  $\lambda_{i0}$  и  $P_i$



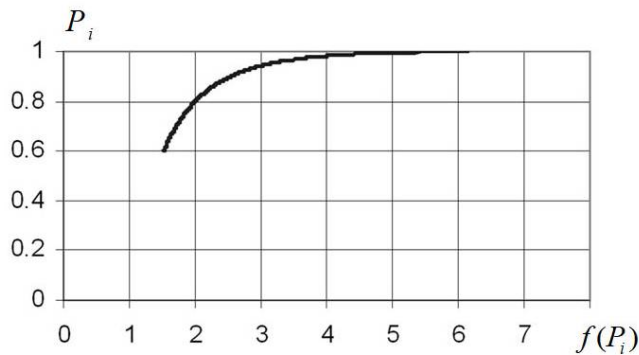


Рис. 11. Функция  $f(P_i)$  [24].

в разрядах ДАС и СПД. Например, чтобы получить  $P_i \geq 0.95$ , необходимо обеспечить условие  $L_{sh} / \lambda_{io} \geq f(P_i \geq 0.95) \approx 3$  (см. рис. 11), а именно:

$$\frac{\dot{m}_a}{S_{ch}} (P_i \geq 0.95) \geq 3 \frac{MV_a V_i}{\langle \sigma_i V_e \rangle L_{sh}}. \quad (23)$$

Приведенные выражения и рис. 11 иллюстрируют влияние всех действующих факторов на требуемую плотность массового расхода РВ для получения заданной вероятности ионизации атомов РВ и высокой эффективности использования РВ в ДЗДЭ. Для дальнейшего рассмотрения важно также, что эффективность ионизации в разряде зависит не только от плотности расхода и режимных параметров, но и от толщины слоя, которая, как будет показано позже, зависит от многих факторов, что усложняет анализ приведенных соотношений для прикладных целей.

10. Как уже отмечалось ранее, применимость приведенных положений и результатов к СПД была проверена в МАИ с использованием распределений локальных параметров плазмы в УК методической лабораторной модели (далее ЛМ-1) этого двигателя с наружным диаметром УК 98 мм (рис. 12), полученных в начале второго этапа развития СПД Андреем М. Бишаевым и В.П. Кимом

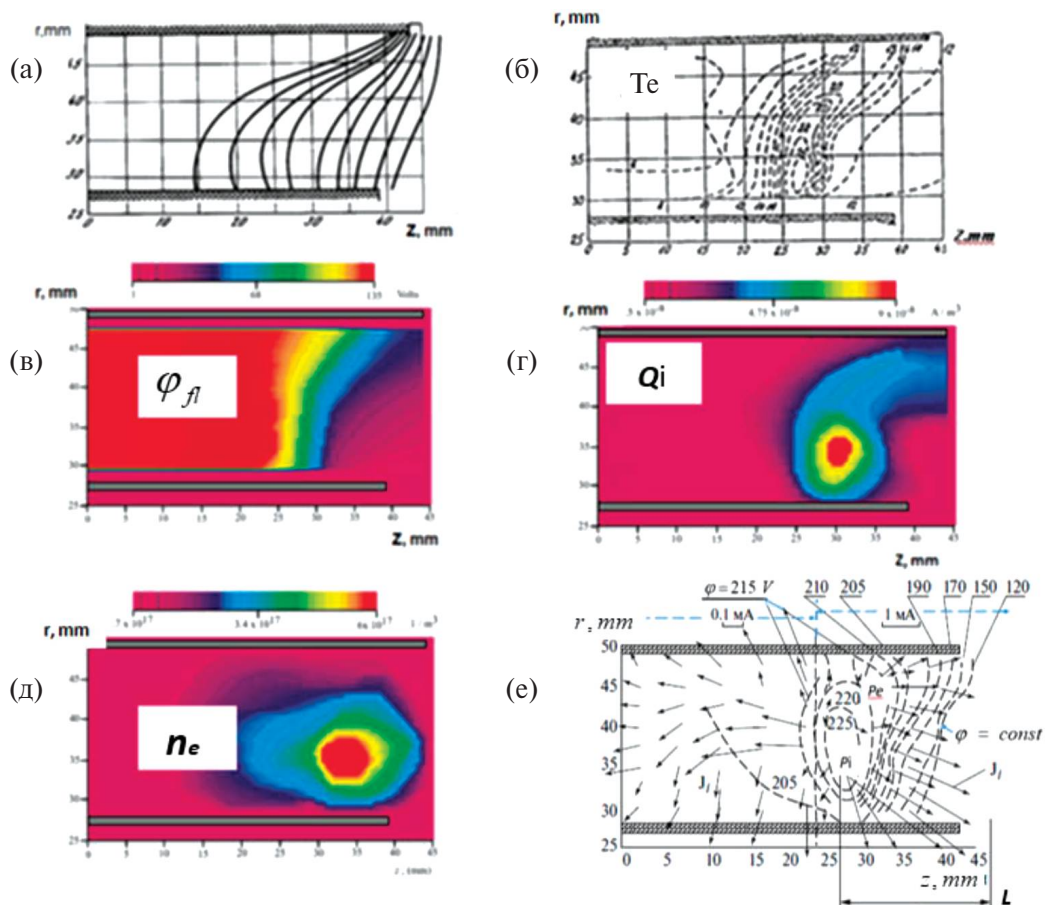


Рис. 12. Картина силовых линий магнитного поля (а) и распределения температуры электронов  $T_e$  (б), потенциала «плавления» зонда  $\Phi_f$  (в), скорости ионизации  $Q_i$  (г), концентрации электронов  $n_e$  (д), потенциала плазмы  $\Phi$  и направленных ионных токов  $J_i$  (е) в ускорительном канале методической модели ЛМ-1, работавшей при разрядном напряжении 200 В и расходе ксенона через ускорительный канал 3 мг/с [45].

[36, 37]. Двумерные распределения локальных параметров плазмы в значительной части ускорительного канала (УК) этой модели были получены перемещающимися и вращающимися направленными плоскими электростатическими зондами. В этой модели магнитное поле было подобрано таким образом (рис. 12а), чтобы снизить взаимодействие ускоренных ионов с наружной стенкой УК и возмущения разряда зондами, которые вводились внутрь УК через эту стенку. Для контроля значений потенциала, получаемых обработкой ВАХ-зондов, у наружной стенки были проведены измерения потенциала плазмы накаливаемым зондом, которые дали практически постоянное его значение 204–206 В почти вдоль всей наружной стенки за исключением выходной ее части. Они показали также приемлемую их сходимость с результатами обработки зондовых характеристик. Кроме того, распределения потенциала плазмы внутри канала вдоль силовых линий были рассчитаны вдоль силовых линий магнитного поля по формуле (1) с использованием результатов измерений этого потенциала у наружной стенки и значений концентрации и температуры электронов, полученных обработкой зондовых характеристик в объеме УК. В результате было получено, что распределения параметров, полученных разными способами, удовлетворительно согласуются между собой. Поэтому было признано возможным использовать их для качественного анализа процессов в УК СПД. В результате такого анализа был сделан ряд важных выводов о названных процессах, которые уже обсуждались в работах авторов выполненных измерений [36, 37, 45–47], а также в ряде публикаций других авторов.

Для темы данной статьи важными являются следующие выводы из представленных данных.

- Потенциал плазмы (рис. 12, 13) в значительной части прианодной зоны разряда и у значительной части наружной стенки выше потенциала анода и несколько уменьшается к аноду, т. е. электрическое поле в названных частях разряда отрицательно или близко к нулю, а прианодное падение потенциала отрицательно или мало по величине. При этом ЗУ с основным падением потенциала отделена от анода и от выходной части разряда зонами с малыми изменениями потенциала и локализуется в области разряда с максимальными значениями индукции (рис. 13 [45]). С учетом отмеченного СПД можно называть “плазменным двигателем

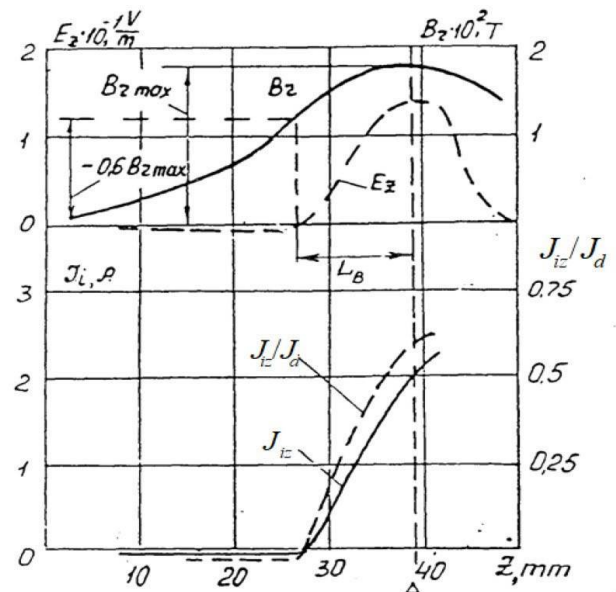


Рис. 13. Распределения радиальной компоненты  $B_r$  магнитной индукции, продольной составляющей  $E_z$  напряженности электрического поля и направленной составляющей  $J_z$  суммарного ионного тока и его отношения к разрядному току  $J_d$  вдоль срединной поверхности ускорительного канала [46].

с ускорением ионов электрическим полем в магнитном слое” [45]. Для дальнейшего рассмотрения важно, что продольный размер (толщина) этого слоя или ЗУ существенно меньше длины ускорительного канала и близка к получающейся в ДАС, а при повышении разрядных напряжений выше 150 В реализуется достаточно эффективная ионизация потока РВ [28, 45]). Таким образом, было получено, что ЗУ в СПД обладает такими же свойствами, что и в ДАС, т. е. названные свойства являются общими для разрядов в ДЗДЭ. В частности, это означает применимость соотношения (14) и для оценки толщины ЗУ в СПД [45, 46].

- Поле направленных ионных токов  $J_z$  (рис. 12f) согласуется с выявленными областями рождения ионов и полученными эквипотенциалами электрического поля, при этом плотность тока ионов на стенки сопоставима с максимальной плотностью тока ионов в ускорительном канале, а энергии достигающих стенок ионов составляют значительную долю от энергии, соответствующей приложенному разрядному напряжению, и достаточны для распыления большинства конструктивных материалов, что ограничивает ресурс двигателя. При этом в прианодной зоне ионы движутся

к аноду, а в начальной части ЗУ они движутся преимущественно в радиальных направлениях. Это свидетельствует, что скорость ионизации в этой части ЗУ превышает возможности отвода их электрическим полем, и что в этой части разряда важную роль в переносе ионов должны играть диффузионные процессы [45]. В прикладном плане важно также, что ускоренные ионы попадают на стенки в областях их контакта с ЗУ, что определяет зоны эрозии стенок. Поэтому, изменяя как минимум, положение ЗУ в разряде можно управлять интенсивностью взаимодействия потоков ускоренных ионов со стенками разрядной камеры.

- Эквипотенциали электрического поля (рис. 12д) существенно отклоняются от силовых линий магнитного поля (что получалось и ранее [2]) вследствие высокой температуры электронов и больших градиентов концентрации плазмы в начальной части ЗУ со стороны анода, т. е. идея Морозова фокусировки ионов в одноступенчатом СПД в ее исходном понимании не работает. Вместе с тем в средней части канала в области ЗУ (рис. 12д) наклон эквипотенциалей соответствует наклону силовых линий магнитного поля. Это определяет соответствующее общее отклонение потоков ионов к оси УК и на стенки разрядной камеры [45].

Для дальнейшего рассмотрения важно также, что смещение силовых линий в выходном направлении у наружной стенки привело и к смещению эквипотенциалей электрического поля в значительной пристеночной части ЗУ в том же направлении (рис. 12д). В свою очередь, это смещение приводит к уменьшению потоков ускоренных ионов на наружную стенку и уменьшению их энергий, приводящему к значительному снижению скорости распыления этой стенки. Отмеченный эффект ранее не обсуждался и объясняется он совместным влиянием “выравнивания” потенциала электронами вдоль силовых линий магнитного поля, идущих из прианодной части канала к выходной части наружной стенки и увеличением отклонений эквипотенциалей электрического поля от силовых линий в выходном направлении вследствие увеличения концентрации плазмы по мере удаления этих линий от наружной стенки к середине УК в соответствии с формулой (1) Морозова. В частности, на рис. 12д видно, что в точке с координатами  $z = 20$  мм и  $r = 40$  мм, через которую проходит ближайшая к аноду (из

показанных на рис. 12а) силовая линия, исходящая из прианодной области разряда, потенциал составляет около 205 В, а при ее подходе к наружной стенке в точке с координатами  $z = 40$  мм и  $r = 48$  мм его значения составляют около 190 В, т. е. близки к потенциалу в прианодной области, из которой эта линия исходит. Это подтверждает упомянутое “выравнивание” потенциала вдоль силовых линий. А повышение потенциала при перемещении вдоль этой линии от прианодной области к области с максимальными концентрациями плазмы (например, в точке с координатами  $z = 30$  мм и  $r = 45$  мм потенциал составляет примерно 215 В) и последующее понижение его после прохождения этой области иллюстрирует влияние изменения концентрации электронов и заметную разницу потенциалов на рассматриваемой линии между разными точками на этой линии, максимальную в области максимальных значений концентрации в соответствии с формулой (1). Это изменение потенциала вдоль силовой линии в прианодной части ЗУ оказывается сопоставимым с продольным падением потенциала в этой части ЗУ, что и приводит к значительному отклонению эквипотенциалей, связанных с рассматриваемой силовой линией от этой силовой линии в выходном направлении в области максимальных значений концентрации плазмы. В большей или меньшей мере, этот эффект срабатывает и вдоль других силовых линий, приводя к смещению эквипотенциалей в значительной части объема пристеночной плазмы в выходном направлении.

В прикладном плане рассмотренный эффект определяет целесообразность реализации “фокусирующей” геометрии силовых линий магнитного поля у обеих стенок, т. е. во всей выходной части УК, с формой, близкой к симметричной относительно срединной поверхности канала для сдвига анодной границы и всей ЗУ в выходном направлении у обеих стенок, ограничивающих УК, для уменьшения потерь ионов на них. (Далее это решение сокращенно будет называться “созданием фокусирующего магнитного поля в выходной части УК”.) Это возможно получить, переходя к магнитным полям с более “фокусирующими” свойствами, обеспечивающими сдвиг пристеночных частей ЗУ в выходном направлении у обеих стенок. Таким образом, назначение “фокусировки” в этом случае направлено на использование разного отклонения эквипотенциалей элект-



рического поля от силовой линии в разных ее частях для сдвига частей анодной границы и всей ЗУ в выходном направлении, т. е. она приобретает новый смысл по сравнению с тем, что предполагал использовать Морозов, но решает ту же задачу уменьшения потоков ионов на стенки разрядной камеры.

#### 4. АПРОБИРОВАННЫЕ НА ВТОРОМ ЭТАПЕ РАЗВИТИЯ СПД И ДАС СПОСОБЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ В ДЗДЭ ПУТЕМ ИЗМЕНЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Как было показано в предыдущем разделе, результаты исследования процессов в СПД и ДАС на первом этапе их развития показали, что основным внешним фактором, который может использоваться для управления процессами в ДЗДЭ является магнитное поле, определяющее распределение концентрации заряженных частиц, а, следовательно, и электрическое поле в разрядах ДЗДЭ. Поэтому на втором этапе развития ДЗДЭ значительная часть прикладных исследований была посвящена более детальному исследованию влияния магнитного поля на характеристики СПД и ДАС. Полученные при этом результаты рассмотрены в следующем разделе данной статьи.

##### 4.1. Результаты, полученные при разработке первых СПД 2-го поколения

Рассмотренный в предыдущем разделе эффект сдвига части ЗУ в выходном направлении у наружной стенки означал целесообразность реализации такого же эффекта и у внутренней стенки, что можно было достичь “созданием фокусирующего магнитного поля в выходной части УК”, обеспечивающим заметное смещение силовых линий в выходном направлении у выходных частей обеих стенок, ограничивающих УК (рис. 13), и сжатие получающейся при этом магнитной линзы как в радиальном, так и в выходном направлении со стороны анода. Для получения требуемых характеристик магнитного поля в МАИ при лидирующей роли В.П. Кима и при участии ведущего конструктора ОКБ “Факел” К.Н. Козубского — сотрудниками кафедры 208 МАИ Р.К. Чуяном и В.М. Серовайским было выполнено исследование возможностей магнитных систем разных схем и предложена система с магнитными экранами, охватывающими разряд-

ную камеру (МСМЭ), которая была признана изобретением и позволила решить эту задачу в СПД 2-го поколения (рис. 14). Реализация рассмотренной возможности позволяла рассчитывать на увеличение ресурса двигателя за счет смещения ЗУ и зон эрозии стенок из УК в выходном направлении и некоторого увеличения толщины стенок в межполюсном зазоре за счет сдвига анодной границы в выходной части УК у обеих стенок, а, следовательно, и всей ЗУ в выходном направлении в соответствии с рассмотренным в предыдущем разделе эффектом смещения анодной границы ЗУ у наружной стенки модели ЛМ-1 (рис. 12е). Эта возможность была реализована в 1970-х годах в двигателях СПД-50 и СПД-70 второго поколения совместной работой МАИ и ОКБ “Факел” [6, 7, 28]. В результате в названных двигателях удалось сместить ЗУ в выходном направлении и сократить зоны эрозии стенок разрядной камеры с 12–15 до 3–5 мм и тем самым уменьшить потоки ускоренных ионов и соответствующие потери энергии на стенках РК. В свою

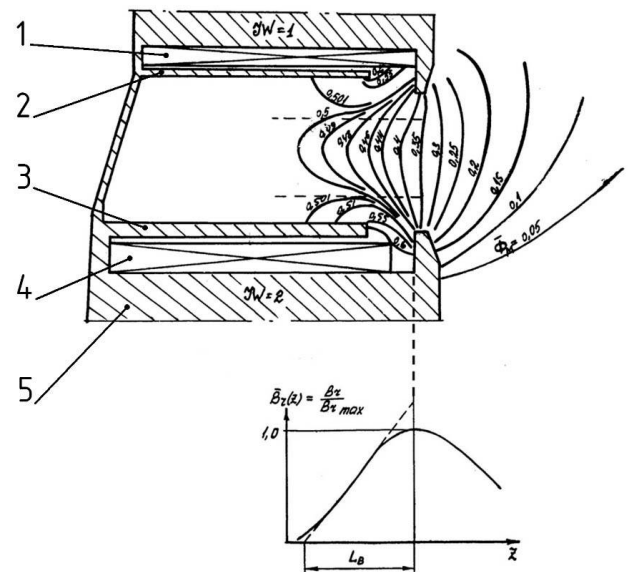


Рис. 14. Схема МСМЭ, конфигурация силовых линий магнитного поля и распределение магнитной индукции вдоль срединной поверхности УК, которые могут быть получены с ее помощью: 1 — наружная катушка намагничивания, 2 — наружный магнитный экран, 3 — внутренний магнитный экран, 4 — центральная катушка намагничивания, 5 — центральный сердечник магнитной системы,  $J_w$  — относительные ампер-витки катушек намагничивания,  $\Phi_m$  — доля магнитного потока, проходящего, начиная от оси до данной силовой линии,  $\bar{B}_r(z) = B_r / B_{r,max}$  — относительное распределение магнитной индукции вдоль срединной поверхности возможного УК [7].

очередь, это позволило обеспечить приемлемую тяговую эффективность и увеличить ресурсы уже первых летных образцов двигателя СПД-50 с наружным диаметром УК 50 мм с мощностью около 400 Вт до 1500 ч и двигателя СПД-70 с наружным диаметром УК 70 мм на режиме работы с мощностью около 700 Вт — до 3000 ч, достаточных для решения задач коррекции орбит околоземных КА. И эти двигатели начали регулярно использоваться в составе систем коррекции орбит таких КА [6, 7, 31].

Однако в названных двигателях значительная часть ЗУ еще размещалась в части УК в межполюсном зазоре. Поэтому их ресурс ограничивался временем износа стенок в названном зазоре. С учетом этого, а также выявленной связи положения ЗУ с областью максимальных значений индукции в МАИ были проведены исследования возможности вынесения ЗУ из межполюсного зазора магнитной системы в выходном направлении путем вынесения области максимальных значений индукции за плоскость, перпендикулярную оси двигателя и касающейся или пересекающей выходные поверхности одного или обоих полюсов в ближайшей к УК точке (далее “реперная плоскость полюсов”).

Для проверки реализуемости этой идеи В.П. Кимом и В.И. Козловым были дополнительно изучены возможности упомянутой МСМЭ при разных ее схемах и соотношениях размеров ее элементов [6, 7, 31]. В результате были найдены варианты, обеспечивающие не только “фокусирующее магнитное поле в выходной части УК”, но и значительное вынесение в выходном направлении из УК и за реперную плоскость полюсов значительной части распределения магнитной индукции с максимальными ее значениями (рис. 15). При этом ожидалось и соответствующее смещение ЗУ. В свою очередь, это позволяло выдвинуть выходные торцы стенок, ограничивающих УК, и увеличить их толщину в освободившемся пространстве за пределами плоскости полюсов, т. е. увеличить запасы на их износ для защиты полюсов названными частями стенок РК. С учетом снижения скорости износа по мере расширения канала из-за износа стенок это позволяло рассчитывать на значительное увеличение ресурса двигателя.

Рассмотренная идея была впервые апробирована в МАИ при разработке экспериментальных образцов двигателя СПД-100 (далее ЭО СПД-100)

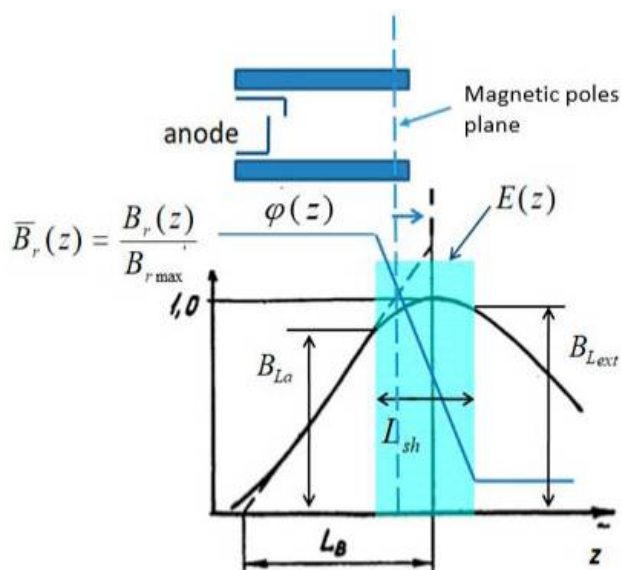


Рис. 15. Схема распределений магнитной индукции и электрического поля в разряде СПД с вынесенным из УК максимумом распределения магнитной индукции.

с наружным диаметром УК 100 мм [6, 7, 31]. В названных ЭО с использованием возможностей МСМЭ было создано “фокусирующее магнитное поле в выходной части УК” и реализовано вынесение в выходном направлении максимума распределения магнитной индукции вдоль срединной поверхности УК за плоскость полюсов примерно на 5 мм. При этом торцы стенок разрядной камеры (РК) были также вынесены на 5–6 мм в разных модификациях двигателя и были выполнены с увеличенной толщиной. Как будет показано позже, это позволило, по крайней мере, на начальном этапе длительной работы двигателей СПД-100, вынести зону ускорения в выходном направлении за пределы реперной плоскости полюсов и снизить потери ускоренных ионов на стенках разрядной камеры. На базовую схему МСМЭ и соотношение размеров ее элементов, позволяющих получить рассмотренные эффекты, на имя МАИ были получены сначала авторские свидетельства СССР на изобретения, а затем патенты Российской Федерации и ряд международных патентов на имя ОКБ “Факел” для их коммерциализации [6, 7, 31].

В результате параметрических испытаний названных ЭО СПД-100 было показано, что максимальные значения его тягового коэффициента полезного действия (КПД), определенные по измеренной тяге и потребляемой мощности

на режимах работы, допускавших длительную работу ЭО, превышали 50%, т. е. двигатель мог работать достаточно эффективно. Результаты 100-часовых эрозионных испытаний одного из ЭО СПД-100 на режиме работы с разрядным напряжением 300 В и разрядным током 4.5 А показали, что зоны эрозии выходных частей стенок РК, как и планировалось, расположены за пределами реперной плоскости полюсов и что ожидаемый ресурс двигателя должен составить не менее 5000 ч. Эти результаты, а также два экземпляра ЭО СПД-100 с одной наружной катушкой намагничивания в одном из них и с 4-мя наружными катушками намагничивания во втором и с рекомендациями по выбору конструктивной схемы и размеров основных элементов конструкции магнитной системы, УК и возможных режимов его работы были переданы в ОКБ “Факел”. После успешных контрольных испытаний упомянутых ЭО в ОКБ “Факел” вариант с четырьмя наружными катушками намагничивания был выбран в качестве прототипа, и на его основе в ОКБ был разработан и доведен до серийного производства летный вариант конструкции двигателя СПД-100 [6, 7, 31].

Следует отметить, что в процессе разработки и экспериментальной отработки конструкции двигателя СПД-100 в ОКБ “Факел” была также проведена серия параметрических его испытаний, подтвердивших достаточно высокий уровень его тяговой эффективности. В качестве номинального для длительной работы был выбран упоминавшийся режим с разрядным напряжением 300 В и разрядным током 4.5 А, получавшийся при расходе ксенона через УК около 4.5 мг/с, обеспечивавший получение тяги не менее 80 мН, тягового КПД около 50%, продольной компоненты среднemasсовой скорости истечения частиц РВ — более 15 км/с. На этом режиме были проведены ресурсные испытания нескольких образцов этого двигателя СПД-100 с длительностью одного из них более 9000 ч, подтвердивших достаточно большой его ресурс [6, 7, 31]. Таким образом, была подтверждена работоспособность идеи смещения ЗУ в выходном направлении за плоскость полюсов за счет “создания фокусирующего магнитного поля в выходной части УК” и вынесения максимума распределения магнитной индукции вдоль срединной поверхности ускорительного канала и торцов выходных частей стенок РК за пределы плоскости полюсов, позволившая обеспечить

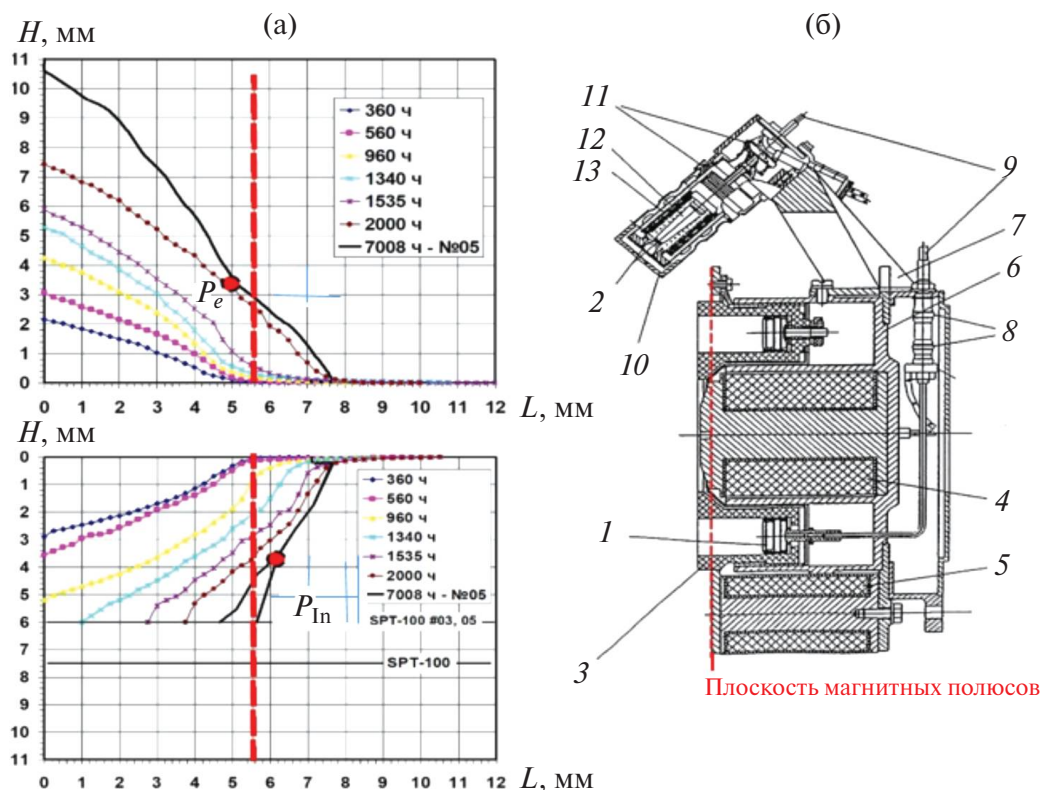
достаточно высокую тяговую эффективность и существенно повысить ресурс двигателя. С учетом полученных результатов СПД-100 начал применяться в системах коррекции орбит сначала отечественных, а затем и зарубежных КА, став одним из наиболее широко используемым в космосе ЭРД [7, 28, 31–33].

Решения, использованные для повышения ресурса двигателя СПД-100, были использованы и при разработке двигателя СПД-140, ресурс которого совместной работой МАИ и ОКБ “Факел” доведен до 13 000 ч на номинальном режиме работы на ксеноне с мощностью 4.5 кВт [28, 31]. И в настоящее время этот двигатель также используется в составе отечественных и зарубежных КА для довыведения и последующей стабилизации рабочих орбит геостационарных КА [31, 33]. Таким образом, разработанный способ был реализован в практических разработках двигателей второго поколения, работающих в космосе до настоящего времени.

В процессе ресурсных испытаний двигателя СПД-100 были обнаружены важные для дальнейшего развития СПД особенности износа стенок РК при больших наработках (рис. 16 [4850]). Среди них в рамках данной статьи представляет интерес следующие:

- до наработки двигателя СПД-100 около 500 ч зоны эрозии выходных частей стенок разрядной камеры (РК), как и предполагалось и получалось при эрозионных испытаниях ЭО СПД-100, располагались за пределами реперной плоскости полюсов магнитной системы;
- после названной наработки происходило смещение анодных границ зон эрозии в направлении к аноду, которое сложно было предвидеть, исходя из результатов предыдущих ресурсных испытаний, и которое прекратилось при углах поворота профилей наружной стенки из-за удаления материала наружной стенки около 60° и внутренней стенки — около 50° относительно оси двигателя (рис. 16 [50]);
- после наработки двигателя около 2000 ч на изнашивавшихся до этого участках стенок от начала зон эрозии со стороны анода до точек  $P_E$  и  $P_{IN}$  на их профилях резко снижалась скорость износа, при этом на профилях стенок в окрестности названных точек  $P_E$  и  $P_{IN}$  появились изломы, свидетельствующие о смещении в выходном направлении анодной границы и всей ЗУ;





**Рис. 16.** Картина износа выходных частей стенки разрядной камеры СПД-100 для разных образцов двигателя (а) и конструктивная схема СПД-100 (б): 1 – анод; 2 – катод; 3 – разрядная камера; 4–6 – элементы магнитной системы; 7–13 – элементы конструкции двигателя,  $H$  – отклонение профилей выходных частей стенок разрядной камеры из-за износа стенок разрядной камеры после наработки двигателя на ресурс, показанных в легенде,  $L$  – расстояние от выходных торцов стенок разрядной камеры в направлении к аноду,  $P_{IN}$  – точка на границе профиля внутренней стенки с резким замедлением ее износа после наработки 2000 ч,  $P_E$  – точка на границе профиля наружной стенки с резким замедлением ее износа после наработки 2000 ч. Штриховые линии на рисунке показывают плоскость полюсов [50].

- смещение анодной границы ЗУ в выходном направлении подтверждается не только резким снижением скорости износа частей стенок до точек  $P_E$  и  $P_{IN}$ , а также тем, что дальнейший износ выходных частей стенок после точек  $P_E$  и  $P_{IN}$  происходил аналогично, наблюдаемому в начале испытаний на начальных участках зон эрозии со стороны анода, но со значительно меньшими скоростями.

Новизна отмеченных эффектов состояла в том, что изнашивавшиеся до этого части стенок стали изнашиваться существенно меньше. Получить такие части стенок разрядной камеры в СПД можно было и раньше обрезанием выходных торцов стенок разрядной камеры, но при этом оголялись полюса магнитной системы, которые начинали изнашиваться из-за бомбардировки ускоренными ионами. В рассматриваемом случае наиболее удаленные от анода точки слабо изнашивающихся частей стенок оказались распо-

ложенными в близкой окрестности выходной плоскости полюсов или за этой плоскостью. Поэтому остающиеся части стенок защищали полюса в течение, как минимум 5000 ч работы двигателя.

Кроме того, наиболее удаленные от анода части слабо изнашивающихся участков внутренней стенки разрядной камеры оставались и после 7000-часовой наработки за пределами плоскости полюсов, защищая внутренний полюс, а интенсивная эрозия наружного полюса радиальными потоками ионов начиналась примерно после 5000–6000 часовой наработки в зависимости от толщины выходной части наружной стенки в разных образцах СПД-100, когда торец наружной стенки в результате износа его выходной части приближался к плоскости полюсов [50].

В целом, отмеченные результаты свидетельствуют о значительном влиянии геометрии выходной части УК на положение ЗУ в разряде СПД. В прикладном плане из них следовал очень

простой вывод: для дальнейшего повышения ресурса СПД следует выдвинуть слабо изнашивающиеся участки обеих стенок на большее, чем в СПД-100, расстояние от плоскости полюсов, достаточное для длительной защиты полюсов после того, как выходные части стенок за пределами слабо изнашивающихся участков будут удалены из-за износа.

Важно также, что этот эффект уже был заложен в конструкции двигателя СПД-100, благодаря смещению ЗУ из его конструкции за счет создания “фокусирующего магнитного поля в выходной части УК” и вынесения максимума распределения магнитной индукции вдоль срединной поверхности УК в выходном направлении. Поэтому, естественно, возникла идея усилить давшие обсуждаемый эффект меры, чтобы еще больше выдвинуть ЗУ из конструкции СПД и обеспечить размещение торцов слабо изнашивающихся частей стенок РК, где размещается анодная граница ЗУ, на расстоянии от плоскости полюсов магнитной системы, достаточном для обеспечения более длительной, чем в СПД-100, защиты полюсов. Фактически это означает полное вынесение ЗУ из конструкции двигателя. Реализация этой идеи составила одно из направлений дальнейших работ НИИПМЭ МАИ и Государственного научного центра Российской Федерации “Исследовательский центр имени М.В. Келдыша” по повышению ресурса СПД, которые проводились по мере возникающих потребностей и возможностей. Далее оно будет называться направлением 1 дальнейшего развития СПД на современном этапе.

#### *4.2. Результаты исследования возможности повышения ресурса ДАС*

В разделе 2 было показано, что на втором этапе развития значительный прогресс был достигнут и в разработках ДАС. Из научно-технических решений, которые позволили достичь названный прогресс в рамках данной статьи можно отметить переход на конструктивную схему с полым анодом, которые позволил распределить замыкание разрядного тока на большую площадь анода [51, 52]. Так, секционирование такого анода в одноступенчатом ДАС показало, что разрядный ток замыкается не только на торцовых частях анода, но и на его частях, расположенных внутри УК, т. е. увеличивается общая площадь поверхности анода, на которую замыкается электронный ток. Это, естественно, снижает величину прианодного

скачка потенциала и смягчает тепловой режим анода. Было показано также, что, как и в случае СПД, профилирование распределения магнитной индукции с созданием участков с нарастающей в выходном направлении индукцией внутри УК до выходных торцов анода способствует повышению тяговой эффективности ДАС и стабильности разряда в нем, а смещение разряда из УК в выходном направлении путем соответствующего смещения анода и максимума распределения магнитной индукции вдоль срединной поверхности УК позволяет, как и в случае СПД, повысить ресурс ДАС [53]. Так, с учетом результатов, полученных при разработке двигателя СПД-100, аналогичное решение по значительному сдвигу ЗУ в выходном направлении смещением области максимальных значений индукции и анода в этом направлении с использованием МСМЭ было апробировано и специалистами ЦНИИМаш при лидирующей роли А.В. Семенкина в одноступенчатом ДАС типа Д-55 (рис. 17 [53]). Для этого анод и магнитный экран были соединены как механически, так и электрически. Это позволило получать магнитные поля с возрастающей в выходном направлении магнитной индукцией в прианодной области при перемещении анода—магнитного экрана, предназначенного для смещения распределения магнитной индукции в выходном направлении при фиксированном положении РК и полюсов (рис. 17). Важно отметить, что в рассматриваемой модели впервые магнитный экран был использован как элемент разрядной камеры и анода.

В рассматриваемой модели можно было смещать область максимальных значений индукции в выходном направлении вплоть до полного вынесения ЗУ из УК при размещении выходного торца анода в плоскости полюсов и существенно снизить взаимодействие ускоренного потока ионов со стенками РК и защитными кольцами 9 (рис. 17) и скорости их износа. При этом для определения скорости износа колец, защищающих полюса, использовались кольца из молибдена. В двигательном варианте они изготавливаются из более стойких к ионному распылению материалов на основе графита.

Проведенные испытания описанной модели показали, что при названном перемещении анода—магнитного экрана тяговая эффективность снижается не более, чем на 5%, а расходимость струи практически не изменяется. При этом

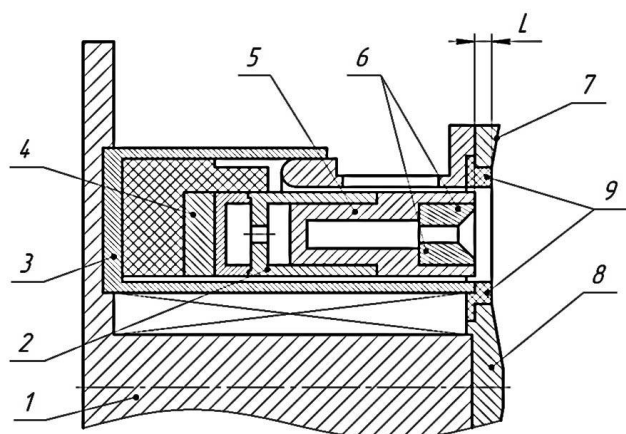


Рис. 17. Экспериментальная модель Д-55 с изменяемым положением анода и магнитного экрана: 1 – сердечник центральной катушки магнитной системы, 2 – анод-газораспределитель, 3 – корпус разрядной камеры, 4 – сменное кольцо для регулирования положения анода относительно разрядной камеры и магнитной системы, 5 – магнитный экран, 6 – теплоустойчивые вставки из немагнитного материала, 7, 8 – полюса магнитной системы, 9 – кольца для защиты полюсов из стойкого к распылению ионами немагнитного материала.

интегральная скорость износа защитных колец уменьшалась практически линейно с перемещением анода (рис. 18 [53]), что можно объяснить пропорциональным смещению ЗУ уменьшением площади контакта ЗУ со стенками разрядной камеры. При положении торцов анода в выходной плоскости полюсов, т. е. при полном вынесении ЗУ из УК, снижение скорости износа защитных колец составило более 10 раз. Таким образом, была подтверждена возможность обеспечения больших ресурсов ДАС и возможность эффективной ионизации потока частиц РВ и ускорения ионов в ДАС с полностью вынесенной ЗУ из УК.

С физической точки зрения важно то, что в варианте этой модели ДАС с полностью вынесенной из конструкции двигателя ЗУ “держится” в основном на магнитном поле, что подтвердило возможность создания полностью “безстеночного” в ЗУ двигателя Жаринова. Кроме того, полученный результат подтвердил перспективность названного выше направления дальнейшего развития СПД путем полного вынесения ЗУ из конструкции двигателя и возможность эффективной ионизации потока частиц РВ и ускорения ионов в такой ЗУ.

Все сказанное выше подтверждает также сделанное ранее заключение, что свойства разряда со скрещенными  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ -полями, использованные

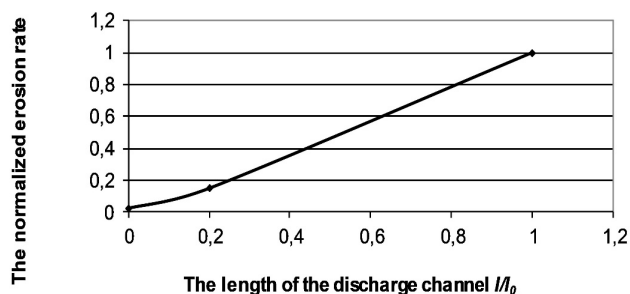


Рис. 18. Скорость эрозии стенок разрядной камеры модели Д-55 при ее работе на ксеноне с разрядным напряжением 300 В при разных расстояниях  $l/l_0$  торцов анода от плоскости полюсов [53].

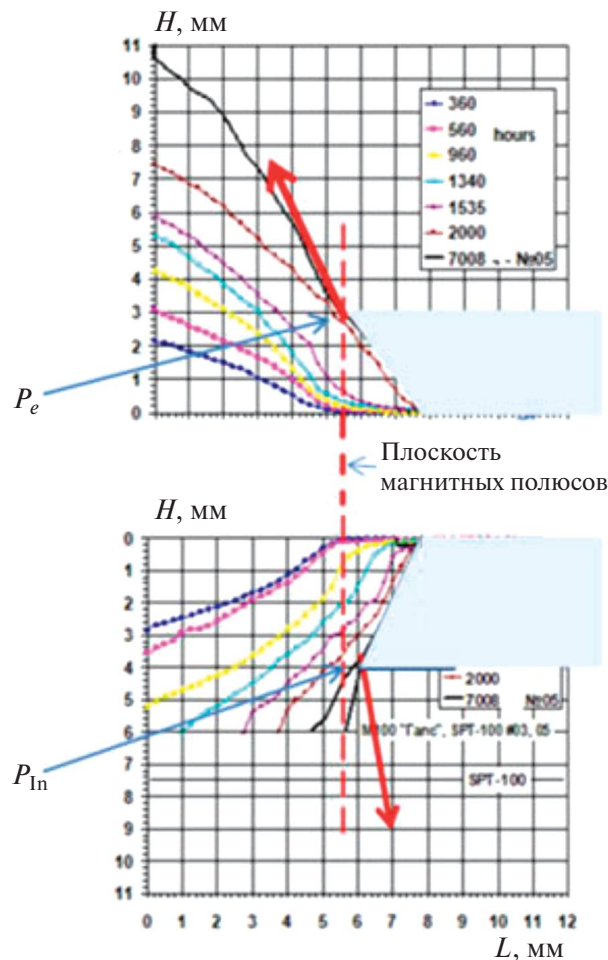
для разработки и обоснования применимости обсуждаемого способа управления процессами в названных двигателях, являются общими для одноступенчатых СПД и ДАС. Это, естественно, определяется близостью их принципиальных схем.

#### 4.3. Результаты разработки холловских двигателей с “магнитным экранированием” стенок разрядной камеры

Возникновение “слабо изнашивающихся” участков выходных частей РК в ХД было обнаружено и в США специалистами Jet Propulsion Laboratory (JPL) при анализе результатов ресурсных испытаний ХД типа ВРТ 4000 [54]. И они решили, что можно попытаться создать “безизносный” двигатель, оставив в конструкции выходной части разрядной камеры лишь слабо изнашивающиеся ее части (рис. 19, где эти части условно показаны закрашенными) и защитив их “магнитным экранированием”.

Идея “магнитного экранирования” (magnetic shielding) была основана на рассмотренной ранее гипотезе Морозова управления движением ускоряемого ионного потока созданием в плазме “фокусирующей” конфигурации эквипотенциалов электрического поля за счет формирования соответствующей конфигурации силовых линий магнитного поля, выравнивающих потенциал вдоль силовых линий магнитного поля. С ее использованием специалисты США предполагали получить у стенок РК эквипотенциалы, отталкивающие от них ускоренные ионы путем выполнения УК с расширенной выходной частью и создания силовых линий магнитного поля, в первом приближении эквидистантных внутренним поверхностям выходной части стенок (рис. 20 [54,



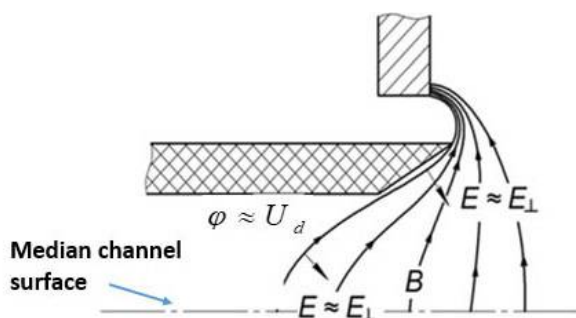


**Рис. 19.** Картина износа стенок двигателя СПД-100 в процессе его ресурсных испытаний со схемой слабо изнашивающихся выходных частей стенок и точками излома профилей стенок после наработки 2000 ч.

55]). Далее двигатели с “магнитным экранированием” сокращенно будут называться ХДМЭ.

Однако, как уже отмечалось ранее, еще первые исследования, выполненные в ИАЭ [2] и в МАИ [45] (раздел 2, рис. 12д), показали, что эта идея в ее исходном понимании в разряде СПД не работает. Поэтому далее физические особенности ХДМЭ будут рассмотрены подробнее и будет показано, что в конечном счете, как было отмечено в [38], в ХДМЭ фактически реализуется полное вынесение ЗУ из конструкции двигателя, как это описано в данной статье. Тем не менее, выполненный специалистами JPL комплекс поисковых исследований подтвердил возможность защиты выходных частей стенок РК с торцами, расположенными в близкой окрестности плоскости полюсов с использованием рассмотренного подхода. Но в такой ситуации на выходе из УК у краев истекающего из него потока ионов возникают “радиальные” потоки ионов с достаточной для

распыления полюсов энергией [57]. Поэтому в ХДМЭ приходится защищать полюса накладками из стойкого к распылению материала в качестве которого используется графит [58], аналогично тому, как это делалось и делается в ДАС. В результате в США в рамках программы NASA развития новых технологий разработан ХДМЭ типа HERMES с номинальной мощностью 12.5 кВт и проектным ресурсом до 50 000 ч [55] и многорежимный ХДМЭ малой мощности типа MaSMi (magnetically Shielded Miniature Hall Thruster), способный работать в диапазоне мощностей 0.2–1.0 кВт [58]. На базе MaSMi в США создан ХДМЭ на кryptonе, работающий в составе малых КА многоспутниковой орбитальной группировки Starlink. Таким образом, разработки ХДМЭ с “магнитным экранированием” стенок РК уже нашли практическую реализацию в США и разрабатываются в ряде других стран.



**Рис. 20.** Схема «магнитного экранирования» стенок разрядной камеры, где  $\varphi$  — потенциал плазмы,  $U_d$  — разрядное напряжение,  $E$  — напряженность электрического поля,  $E_{\perp}$  — нормальная к силовой линии составляющая напряженности электрического поля,  $B$  — магнитная индукция) [55].

Разработку таких двигателей можно считать вторым, успешно развивающимся направлением современного развития УЗДЭ, хотя, как будет показано позже, они основаны на использовании тех же закономерностей и свойств разряда в этих ускорителях, а также технических решений, которые описаны в данной статье.

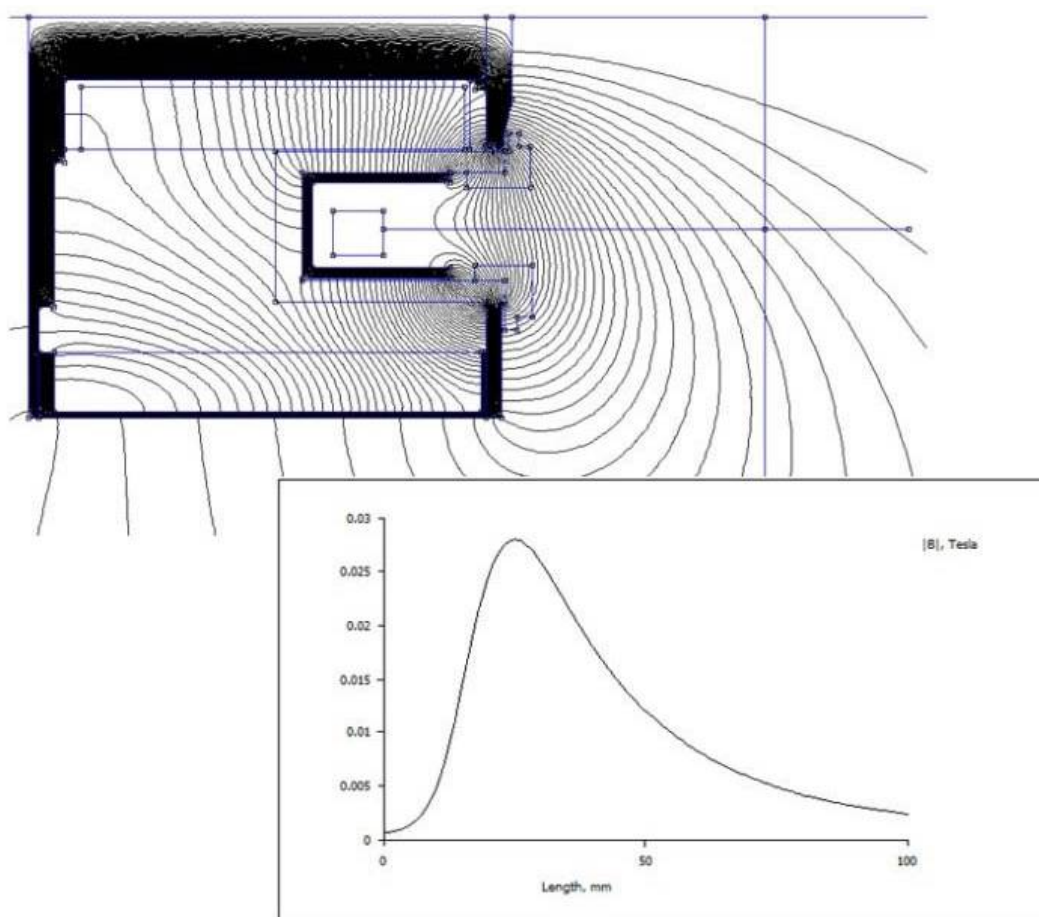
#### 4.4. Некоторые дополнительные результаты исследований влияния различных факторов на толщину и положение ЗУ на втором этапе развития ДЗДЭ

Для дальнейшего применения рассмотренных способов управления процессами в ДЗДЭ важно лучше понимать влияние различных факторов на положение и толщину ЗУ в разрядах СПД и ДАС. Ниже будут представлены результаты исследований, позволяющие дополнить физическую картину влияния разных факторов на положение ЗУ в разрядах рассматриваемых двигателей.

В НИИПМЭ МАИ было проведено исследование влияния характеристик магнитного поля и режима работы СПД на толщину и положение ЗУ в разряде двигателя путем измерения распределений локальных параметров плазмы еще в одной лабораторной модели СПД: двигателя СПД-100 (с наружным диаметром УК около 100 мм), которая далее будет называться ЛМ-2 [7]. В этой модели с использованием МСМЭ можно было создавать «фокусирующее» магнитное поле в выходной части УК (рис. 21) с геометрией силовых линий магнитного поля, значительно отличающейся от соответствующей геометрии в ЛМ-1 (рис. 12а).

Кроме того, простым сдвигом магнитного экрана можно было смещать вдоль срединной поверхности возможного УК в выходном направлении распределение магнитной индукции, а также изменять ширину распределения и положение области этого распределения с максимальными значениями индукции (рис. 22). Анализ изменений распределений индукции магнитного поля вдоль возможной срединной поверхности УК в приведенных на рис. 22 и полученных при варианте 1 с меньшим и в варианте 3 с большим смещением положения магнитного экрана в выходном направлении свидетельствует о том, что при сохранении одних и тех токов в катушках намагничивания происходит снижение максимальных значений индукции при смещении магнитного экрана в выходном направлении. Если же сравнивать полученные распределения при одинаковом максимальном значении индукции для выявления относительного изменения рассматриваемых распределений, то главным эффектом изменений можно считать смещение максимума распределения магнитной индукции. Для оценки влияния отмеченных изменений характеристик магнитного поля и режима работы на положение ЗУ были проведены измерения распределений локальных параметров плазмы пристеночными зондами вдоль наружной стенки УК для вариантов 1 и 3 распределений магнитной индукции в ЛМ-2 при ее работе на ксеноне и оптимальных режимах с расходом ксенона через УК  $\dot{m} = 2.5$  мг/с и с разрядным напряжением  $U_d = 700$  В [7]. Таким образом, как характеристики магнитного поля, так и режим работы модели ЛМ-2 существенно отличались от реализованных в модели ЛМ-1 при проведении измерений локальных параметров в них. Это дало возможность оценки влияния изменения названных условий на положение и толщину ЗУ.

Полученные результаты измерений локальных параметров плазмы при вариантах 1 и 3 (рис. 22) распределений магнитной индукции представлены на рис. 23 и свидетельствуют о том, что смещение максимума распределения магнитной индукции в выходном направлении при переходе от варианта 1 к варианту 3 приводит к отчетливо выраженному сужению и смещению ЗУ в том же направлении. Таким образом, была подтверждена возможность управления положением и толщиной ЗУ в разряде СПД даже при значительно отличающихся характеристиках магнитного поля

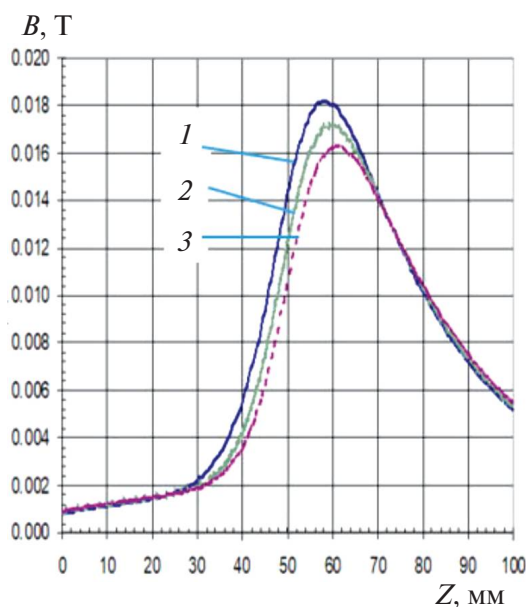


**Рис. 21.** Картина силовых линий магнитного поля и распределение магнитной индукции вдоль срединной поверхности ускорительного канала в ЛМ-2) [7].

посредством изменения распределения магнитной индукции и в других режимах его работы.

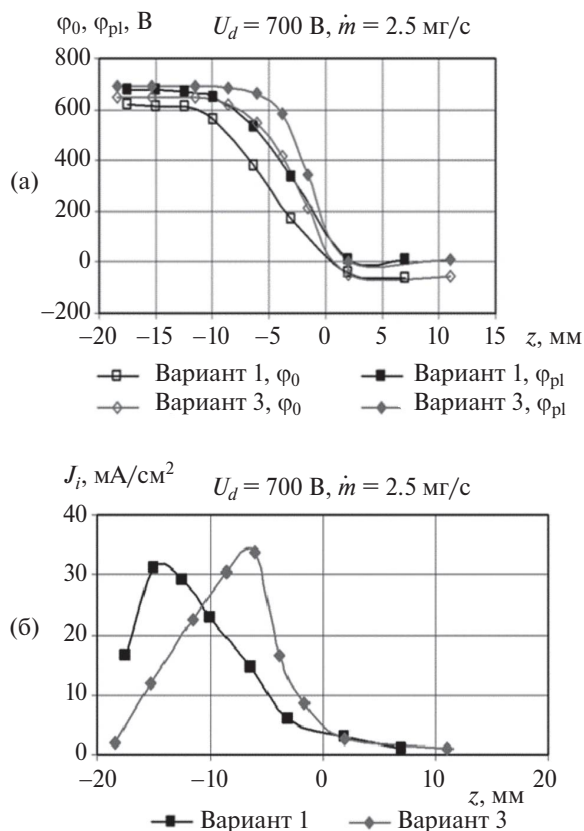
К сказанному следует добавить, что в работе [38] были представлены результаты определения распределений избыточных объемных зарядов вдоль ускорительного канала с использованием измеренного распределения потенциала в УК модели ЛМ-2 с вариантом 3 (рис. 22) распределения магнитной индукции и уравнения (4). В результате, как уже отмечалось, было показано (рис. 24), что в зоне ускорения СПД ионы фактически ускоряются в двойном электрическом слое избыточным объемным зарядом электронов, удерживаемых силой Лоренца в окрестностях магнитных поверхностей с одинаковыми в азимутальном направлении конфигурациями содержащихся в них силовых линий.

Приведенные данные свидетельствуют также, что электрическое поле в модели ЛМ-2, как и в модели ЛМ-1 (рис. 13), оказалось сконцентрировано в области разряда с максимальными



**Рис. 22.** Распределения магнитной индукции вдоль срединной поверхности УК при разных вариантах 1, 2 и 3 зазоров между торцами магнитных экранов и полюсами.





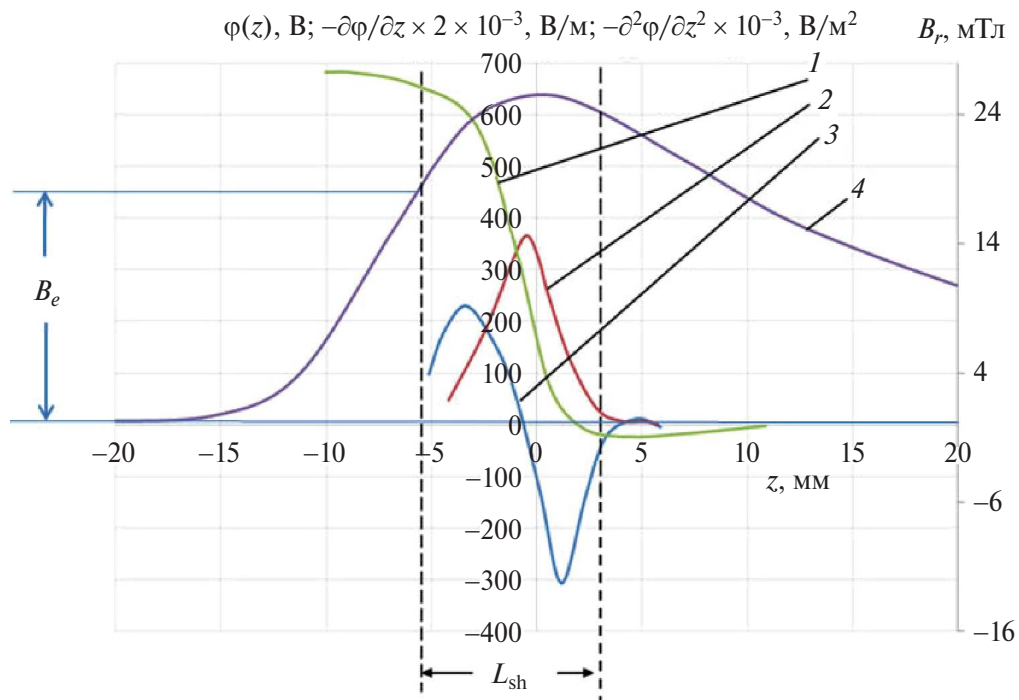
**Рис. 23.** Распределения параметров плазмы в ЛМ-2 СПД при разных распределениях магнитной индукции вдоль срединной поверхности УК этой модели [7]: потенциалы «плавления»  $\Phi_0$  зонда и плазмы  $\Phi_{pl}$  (а); плотность  $J_i$  ионного тока на зонд (б).

значениями радиальной составляющей магнитной индукции вдоль срединной поверхности УК, несмотря на отмеченные значительные отличия физических условий в ЛМ-1 и ЛМ-2. Поэтому концентрацию электрического поля в области разряда с максимальными значениями магнитной индукции можно считать важным общим свойством разряда в СПД (ХД), которое можно использовать для управления положением ЗУ в названном разряде изменением распределения магнитной индукции в нем, что и было уже реализовано двигателе СПД-100.

Кроме того, представляет интерес то, что толщина ЗУ (расстояние между штриховыми линиями на рис. 24) в ЛМ-2 оказалась примерно в 3 раза меньше полученной в ЛМ-1 (рис. 13), хотя увеличение разрядного напряжения более, чем в 3 раза, могло привести к увеличению толщины слоя примерно в 1.7 раза из-за увеличения скорости электронов, соответствующей падению по-

тенциала в слое, и увеличения значения ларморовского радиуса в формуле (14). Кроме того, в ЛМ-2 при разрядном напряжении 700 В примерно в 1.2 раза возросло оптимальное значение магнитной индукции, что уменьшает примерно во столько же раз обсуждаемый ларморовский радиус электронов. Поэтому результирующее увеличение толщины ЗУ из-за рассмотренного увеличения Ларморовского радиуса при одинаковых магнитных индукциях могло бы составить до ~1.4 раза. Фактически же произошло уменьшение толщины слоя примерно в 3 раза вместо его возможного увеличения лишь с учетом влияния увеличения разрядного напряжения и магнитной индукции. Такая большая разница в оценках ожидаемой толщины ЗУ свидетельствует, во-первых, что при переходе от ЛМ-1 к ЛМ-2 произошло кардинальное изменение процессов в УК, определяющих толщину ЗУ. Во-вторых, можно заключить, что это изменение слабо связано с изменением разрядного напряжения. Как будет показано позже, такое изменение толщины слоя, не могло быть связано и с уменьшением расхода РВ в ЛМ-2, поскольку соответствующее изменение могло бы быть пропорционально изменению корня из плотности расхода и составить меньше 10%. Поэтому главной причиной полученных отличий было признано сужение области максимальных значений магнитной индукции в УК при переходе от ЛМ-1 к ЛМ-2, т. е. уменьшение толщины магнитного слоя в ЛМ-2, в пределах которого сосредоточено электрическое поле и плазма (в том числе, электроны) взаимодействует со стенками. При этом рассмотренные изменения, вероятнее всего, привели к существенному уменьшению эффективной частоты столкновений электронов со стенками, к их смещению поперек магнитного поля, и к существенному сужению ЗУ в соответствии с формулой (14).

Можно также увязать это сужение с созданием фокусирующего магнитного поля в выходной части УК в ЛМ-2 и соответствующим смещением анодной границы и частей ЗУ у обеих стенок вследствие обсуждавшегося ранее эффекта смещения части анодной границы ЗУ у наружной стенки в разряде ЛМ-1, а именно: можно считать, что в результате него произошло сужение ЗУ и смещение положения у обеих стенок анодной границы и всей ЗУ в выходном направлении, приведшее к существенному уменьшению потоков



**Рис. 24.** Распределения локальных параметров плазмы вдоль срединной поверхности УК в ЛМ-2 с наружным диаметром ускорительного канала около 100 мм, работавшей на ксеноне при разрядном напряжении 700 В и массовом расходе 2.5 мг/с [38]: (1 – потенциал плазмы  $\phi(z)$ , 2 – напряженность электрического поля  $E(z) = -\partial\phi / \partial z$ , 3 – плотность избыточного объемного заряда  $\rho(z) / \epsilon_0 \approx -\partial^2\phi / \partial z^2$ , 4 – радиальная компонента  $B_r(z)$  магнитной индукции вдоль срединной поверхности УК,  $B_e$  – значение магнитной индукции на условной границе слоя со стороны анода).

ионов на стенки и интенсивности взаимодействия плазмы и электронов с ними, как это было у наружной стенки в ЛМ-1.

Таким образом, проведенным исследованием была подтверждена возможность управления толщиной и положением ЗУ в разряде СПД созданием фокусирующего магнитного поля в выходной части УК и изменением положения максимума распределения магнитной индукции вдоль срединной поверхности УК независимо от типа магнитной системы и режима работы СПД. При этом, как уже отмечалось ранее, механизм действия “фокусирующей” геометрии силовых линий в рассмотренных условиях отличается от исходных представлений Морозова, а именно: в рассматриваемом случае достигается новый эффект смещения анодной границы и всей ЗУ не за счет малого отклонения эквипотенциалов электрического поля от силовых линий, а, наоборот, за счет их заметного и различного по величине их отклонения в разных частях силовой линии, максимального в центральной части УК, где концентрация плазмы максимальна.

Для реализации дальнейшего управления процессами в СПД изменением внешних факторов желательно также понимать физические условия или иметь физические критерии, определяющие положение границ ЗУ в разряде СПД или, как минимум, их зависимости от внешних факторов. Вопрос о процессах, определяющих положение названных границ, связан с вопросом о том, как электроны движутся в разряде, и, в частности, как электроны с катода попадают к аноду. Первые данные для получения предварительного ответа на этот вопрос, как уже отмечалось ранее, были получены специалистами ИАЭ уже в первый период развития СПД [41–44]. В частности, они свидетельствовали о том, что в прианодной области и в области спадающего магнитного поля на выходе канала соответственно, коэффициенты диффузии и подвижность электронов поперек магнитного поля могут существенно повышаться из-за возмущений параметров плазмы, вызванных, в том числе, вращающимися в азимутальном направлении неустойчивостями, а в области разряда с большой индукцией названные неустойчивости подавлены и колебания пара-

метров плазмы имеют преимущественно продольный характер. Поэтому можно было заключить, что поперечная подвижность электронов в названной области снижается, и создаются условия для формирования слоя с достаточно большими напряженностями электрического поля [38, 45]. Как уже отмечалось ранее, было показано также, в том числе, Морозовым на основе теоретического анализа устойчивости укоряемого в скрещенных полях потока ионов [59] и экспериментально сотрудниками ИАЭ [42], что при спадающей в разрядном промежутке в выходном направлении магнитной индукции резко снижается устойчивость разряда и повышаются уровень колебаний в разрядной цепи и перенос электронов поперек магнитного поля.

Поэтому в разрабатывавшихся в СССР моделях СПД в основном использовались распределения магнитной индукции вдоль срединной поверхности УК, содержащие, как минимум, в прианодной части УК участки с возрастающей в выходном направлении магнитной индукцией.

К сказанному следует добавить, что приведенные качественные объяснения до сих пор остаются приемлемыми, так как новые модели возникновения неустойчивостей в плазме разрядов в УЗДЭ и результаты их теоретических и экспериментальных исследований, а также моделирования их влияния на поперечный к магнитному полю перенос электронов раскрывают все больше возможных механизмов повышения коэффициентов диффузии и подвижности электронов поперек магнитного поля в рассматриваемом разряде. При этом, как уже отмечалось, число теоретических исследований и работ по моделированию уже значительно обогнало число соответствующих экспериментальных исследований, что подтверждается обзорами [60–63]. Больше того, возник разрыв между ними: многие положения и выводы, следующие из результатов теоретического анализа и моделирования процессов в разряде, не подкрепляются соответствующими измерениями, подтверждающими именно эти положения и выводы. Это определяется опять-таки сложностью процессов в рассматриваемых разрядах, ограниченностью возможностей вычислительных средств и средств диагностики, особенно, нестационарных возмущений параметров в плазме разрядов в УЗДЭ с достаточно высоким пространственным и временным разрешениями. Поэтому, несмотря на сотни выполненных к настоящему времени исследований,

они не доведены до верифицированных моделей и методик, которые позволяли бы рассчитывать распределения электрического поля в разрядах новых двигателей и, в частности, определять физические условия формирования границ ЗУ в разрядах новых ДЗДЭ. В то же время существуют экспериментальные данные, которые были представлены на рис. 12 и 24, а также результаты измерений потенциала на выходе из одноступенчатого ДАС (рис. 25 [53]), по которым можно судить о положении выходной границы ЗУ.

Следует отметить, что измерения потенциала плазмы пристеночными зондами типа представленных на рис. 24 для СПД, а также полученные в периферийных частях ускоренного потока ионов для ДАС (рис. 25) обычно несколько смещены к аноду от получающихся в центральной части этого потока. Следовательно, можно считать, что в рассмотренных двигателях выходная граница ЗУ локализуется в центральных частях названного потока в области разряда с максимальными значениями индукции, где начинается ее падение в выходном направлении. Поэтому при решении прикладных задач можно считать, что выходная граница ЗУ в разрядах УЗДЭ локализована

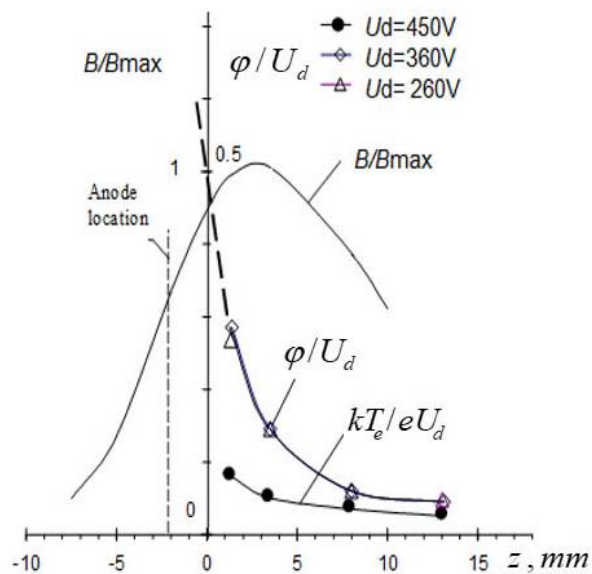


Рис. 25. Относительные распределения магнитной индукции  $B/B_{\max}$  вдоль срединной поверхности УК и относительные распределения потенциала плазмы  $\phi/U_d$  и температуры электронов  $kT_e/eU_d$  вдоль наружной части ускоренного потока ионов на постоянном расстоянии от оси двигателя Д-55 при различных разрядных напряжениях  $U_d$  (координата «0» по оси  $z$  соответствует выходной плоскости УК) [53].



в начале названной области спада максимальных значений индукции, что представляет собой еще одно общее свойство рассматриваемых разрядов. С учетом отмеченного, в работе [38] и в данной статье на основе упомянутых экспериментальных данных в качестве условной выходной границы принималась перпендикулярная оси двигателя плоскость, пересекающая срединную поверхность УК в сечении, в котором значение магнитной индукции в спадающей части ее распределения вдоль срединной поверхности УК составляет  $\sim 0.95$  от ее максимального значения на этой поверхности, где явно начинает проявляться падение магнитной индукции. Как будет показано далее, при определенных предположениях это допущение позволяет объяснить экспериментальную зависимость положения анодной границы ЗУ от различных факторов [38].

В действительности выходная граница ЗУ может представлять собой некий переходный слой, в котором затухают, например, те же дрейфовые неустойчивости, которые отчетливо регистрируются в выходной части разряда. В то же время некоторые результаты моделирования процессов в разряде СПД показывают, что эта граница может быть и достаточно четко выраженной, и достаточно узкой [63]). Однако этот результат получен без учета изменения магнитного поля в ЗУ по радиусу, а также без учета расходимости ионного потока и различия в функциях распределений ионов и электронов по скоростям в разных частях этого потока. Как было показано выше, изменения магнитного поля по радиусу играют существенную роль, как минимум, в формировании анодной границы ЗУ. Поэтому целесообразны дальнейшие, по возможности, согласованные теоретические и экспериментальные исследования закономерностей формирования распределений электрического поля и параметров плазмы в УК и, в частности, физических условий формирования границ ЗУ в разряде УЗДЭ.

Интересные экспериментальные данные по исследованию зависимости “анодной” границы ЗУ при работе семейства СПД второго поколения были получены в работе [49]: оказалось, что магнитные силовые линии, проходящие через границы зон эрозии со стороны анода на наружной и внутренней стенках в разных СПД второго поколения с небольшими расширениями выходной части УК практически сливаются, т. е. можно считать, что

в каждом из двигателей в каждом режиме работы есть одна “граничная” силовая линия, проходящая через названные границы зон эрозии на обеих стенках. Это определяется малой температурой электронов в прианодной области разряда и тем, что силовые линии, проходящие через прианодную область “выравнивают” значения потенциала вдоль них с точностью до значений, соответствующих формуле (1). Поэтому значения потенциала в пристеночных слоях плазмы у точек пересечения “граничной” силовой линией, проходящей через прианодную область и через границу зоны износа на одной стенке, будут близки к потенциалу плазмы в месте пересечения этой же линией второй стенки. С учетом того, что износ стенок на обеих стенках должен начинаться при близких значениях разности потенциалов между стенкой и пристеночной плазмой, близкие значения потенциалов в пристеночной плазме должны определять и близость границ зон износа к местам пересечения стенок одной общей “граничной” силовой линией. Это подтверждается уже рассмотренными ранее особенностями формирования распределения потенциала плазмы по результатам его измерений и расчетов в ЛМ-1, обсуждавшимися ранее (рис. 12д). С учетом отмеченного результата можно сделать вывод, что существует “граничная” силовая линия, проходящая через прианодную зону, которая определяет форму и положение анодной границы ЗУ. Это можно считать еще одним важным свойством разряда в СПД (и с большой вероятностью в ДАС), поскольку, изменяя конфигурацию “граничной” силовой линии, можно изменять анодную границу ЗУ и ее положение в разрядах ДЗДЭ.

По данным работы [49] зависимости от расхода РВ (ксенона) значений магнитной индукции  $B_e$  в точке пересечения “граничной” силовой линии со срединной поверхностью УК в разных СПД второго поколения с малым износом цилиндрических стенок, в том числе, работающих на разных оптимальных режимах работы на ксеноне, с небольшими отклонениями укладываются в одну общую зависимость для всех двигателей и разных режимов их работы (рис. 26, [49]). Таким образом, было получено, что расход РВ (ксенона) является одним из основных факторов, определяющих положение анодной границы ЗУ в рассмотренных двигателях. С учетом отмеченного в работе [64] было принято, что анодная граница ЗУ проходит через точки пересечения “граничной” силовой

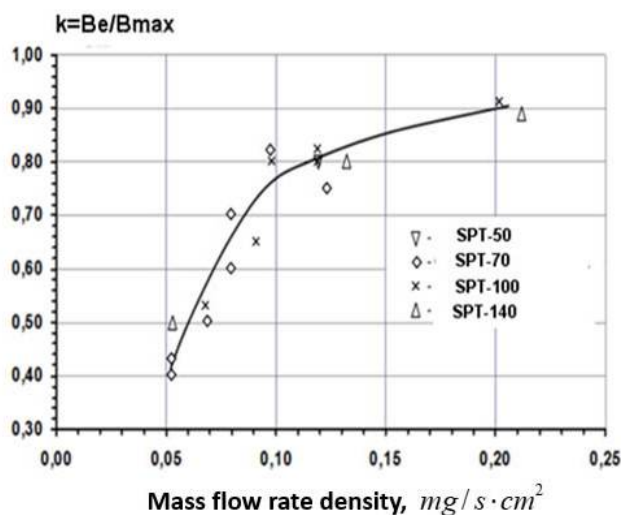


Рис. 26. Зависимость отношения значения  $B_e$  магнитной индукции в месте пресечения «граничной» магнитной силовой линией срединной поверхности УК к максимальному значению магнитной индукции  $B_{\max}$  на этой поверхности от плотности расхода ксенона через УК разных СПД второго поколения, работающих на разных режимах [63].

линии со срединной поверхностью УК, координаты которой можно было определить, зная соответствующее значение  $B_e$  и распределение магнитной индукции в УК. Далее, считая, что выходная граница ЗУ во всех случаях совпадает с введенной ранее условной выходной границей слоя, была построена зависимость нормированной толщины  $\bar{L} = L / b_{ch}$  ЗУ от плотности массового расхода  $\dot{m}_a$  РВ в УК с площадью  $S_{ch}$  его поперечного сечения. При этом нормирование было осуществлено делением полученной толщины на ширину  $b_{ch}$  УК, поскольку для семейства СПД второго поколения геометрии магнитных линз в УК, контролирующих размеры положение ЗУ в разряде, были в первом приближении подобными, а их характерные размеры — пропорциональны ширине канала.

Полученные зависимости представлены на рис. 27 и свидетельствуют о том, что зависимость нормированной толщины слоя вдоль срединной поверхности от плотности расхода РВ удовлетворительно соответствует следующему закону:

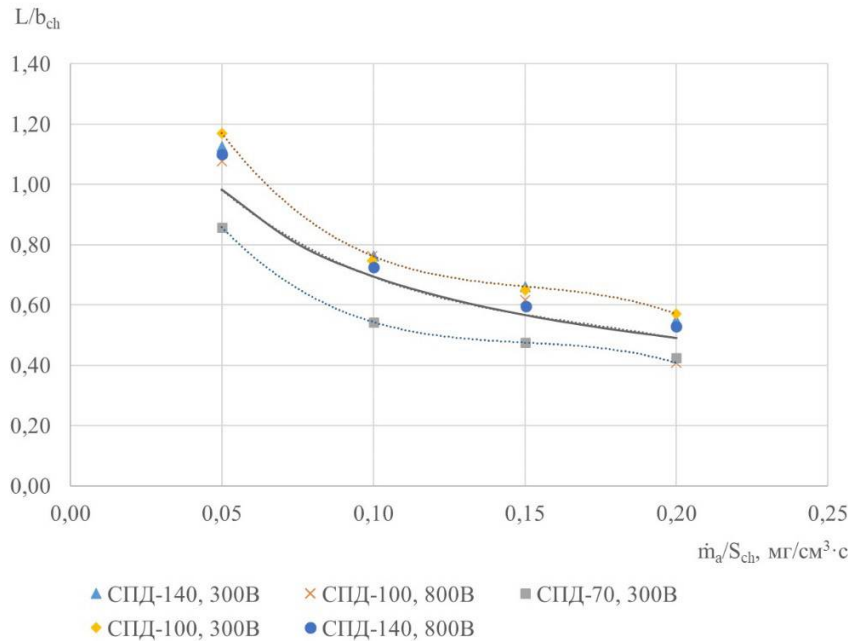
$$\frac{L}{b_{ch}} \approx C \sqrt{\frac{\dot{m}_a}{S_{ch}}}. \quad (25)$$

Кроме того, эти зависимости незначительно отличаются для двигателя СПД-70 с частичным вынесением ЗУ из межполюсного зазора и для двигателей СПД-100 (и СПД-140) с полным

вынесением ЗУ за пределы плоскости полюсов в начале их длительной работы с цилиндрическими стенками канала (рис. 27).

Полученные результаты могут быть объяснены тем, что в соответствии с формулой (14) частота ионизационных столкновений  $\nu_i = \langle \sigma_i V_e \rangle n_a$  явно влияет на толщину слоя, а концентрация атомов в слое пропорциональна плотности расхода РВ в УК. Из данных, представленных на рис. 27, видно также, что значительное изменение разрядного напряжения с 300 до 800 В не приводит к значительному отклонению соответствующих точек от генеральной зависимости. Таким образом, изменение расхода РВ, определяющего уровень концентрации нейтральных атомов в слое, задает один из ведущих трендов изменения толщины слоя и, соответственно, положения анодной границы слоя при фиксированной его выходной границе. Приемлемость приведенных объяснений подтверждается небольшим разбросом данных, представленных на рис. 26 и 27. Поэтому для оценок возможного изменения толщины слоя при изменении расхода РВ можно использовать зависимость (25).

Приведенные данные позволяют также объяснить и отмеченное в разд. 4.1 смещение анодной границы ЗУ при расширении выходной части УК в процессе ресурсных испытаний двигателя СПД-100 в сторону анода снижением концентрации нейтральных атомов в слое и соответствующим увеличением толщины слоя при фиксированном положении его выходной границы [64]. Отмеченное в разд. 4.1 обратное смещение анодной границы в выходном направлении при дальнейшем расширении УК из-за износа стенок также можно объяснить с использованием формулы (14). Действительно, в условиях свободномолекулярного течения при больших расширениях выходной части УК снижается влияние дальнейшего расширения на распределение концентрации нейтральных атомов в ЗУ из-за того, что оно будет формироваться в основном нерасширяющейся частью УК. Кроме того, при больших расширениях УК снижается интенсивность взаимодействия плазмы со стенками и уменьшается эффективная частота столкновений электронов, приводящих к их смещению поперек магнитного поля, что, в свою очередь, приводит к уменьшению толщины ЗУ, которое становится доминирующим при больших расширениях УК. Естественно, приведенные интерпретации выявленных особенно-



**Рис. 27.** Нормированная толщина ЗУ в зависимости от плотности расхода ксенона в УК различных СПД второго поколения на разных режимах их работы (пунктирные линии на данном рисунке показывают диапазон изменений экспериментальных данных, а сплошная линия соответствует зависимости (25) [64].

стей развития процессов износа стенок РК и их влияния на работу двигателя требуют дальнейшей верификации, но для темы данной статьи важны сами выявленные тенденции изменения положения границ ЗУ, которые подтверждаются имеющимися данными. Они отчетливо свидетельствуют о расположении выходной границы ЗУ в начале спадающей части распределения магнитной индукции вдоль срединной поверхности УК и смещении анодной границы ЗУ по мере расширения канала и уменьшения расхода РВ сначала к аноду, а затем — в выходном направлении при больших расширениях УК или увеличении расхода.

“Условность” приведенных зависимостей определяется также тем, что они построены при допущении локализации выходной границы ЗУ в введенной ранее “условной” выходной границе слоя. Но при незначительных изменениях положения выходной границы ЗУ характер названных зависимостей изменяется мало. Поэтому представляется возможным использовать эту зависимость при качественном анализе влияния расхода РВ на толщину и положение анодной границы ЗУ в разрядах ДЗДЭ. В частности, учет выражения (25) в соотношении (23) позволяет учесть влияние изменения толщины слоя при изменении расхода РВ на вероятность ионизации частиц РВ в слое и приводит его к виду

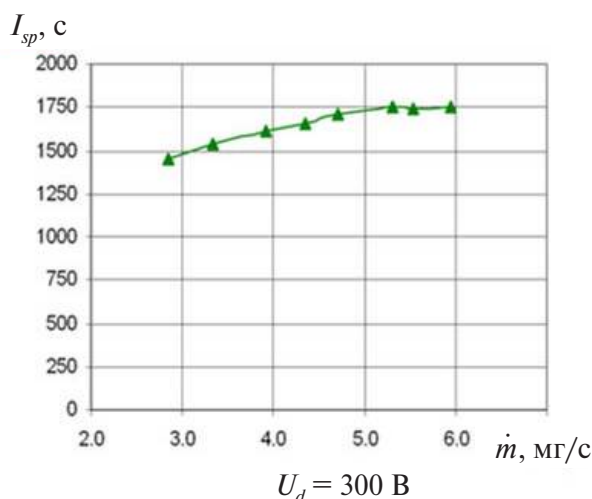
$$\frac{\dot{m}_a}{S_{ch}}(P_i \geq 0.95) \geq 9 \left( \frac{MV_a V_i}{\langle \sigma_i V_e \rangle C} \right)^2. \quad (26)$$

Данное выражение объясняет более быстрый рост расходов через УК лабораторной модели СПД-140 (рис. 28), по сравнению с зависимостью (23) или рис. 11, необходимых для получения более высоких значений удельного импульса тяги этой модели, пропорциональных коэффициенту использования РВ.

Понятно также, что при “полном” расширении УК, когда стенки не будут препятствовать свободному перемещению электронов и ионов параллельно стенке, рассмотренное расширение УК из-за износа стенок должно прекратиться, как минимум, из-за больших углов падения ускоренных ионов на поверхность и соответствующего уменьшения коэффициента распыления стенок ускоренными ионами.

В качестве “полного” расширения можно принять разворот относительно оси двигателя профилей стенок из-за их износа на 90° или выход их на направление, параллельное магнитному полю (рис. 19). Действительно, при выходе касательных к поверхности выходных частей профилей стенок на направление, параллельное магнитному полю, должно происходить “выравнивание” потенциала плазмы электронами вдоль





**Рис. 28.** Зависимость, удельного импульса лабораторной модели СПД-140 от расхода ксенона через УК при разрядном напряжении 300 В. Здесь удельный импульс тяги есть традиционный параметр двигателя, характеризующий эффективность ускорения частиц РВ в ракетных двигателях, рассчитываемый по направленной составляющей среднемассовой скорости  $V$  истечения названных частиц из двигателя, определяемый по измерениям реактивной тяги как  $I_{sp} = V / g$ , где  $g$  – ускорение свободного падения тел на Земле) [7].

силовых линий, т. е. его повышение в области таких выходных частей стенок до уровня, близкого к потенциалу плазмы в месте первого со стороны анода выхода профилей на направление, параллельное магнитному полю. Далее должно происходить его снижение в соответствии с формулой (1). Это также должно приводить к уменьшению потока ионов, выпадающих на выходные части стенок с такими профилями и стабилизации этих профилей, которые также должны становиться “слабо изнашиваемыми”. Сказанное подтверждается существенным снижением скорости износа выходных частей внутренней стенки при приближении ее профиля к магнитной силовой линии после 2000-часовой наработки двигателя СПД-100 (рис. 19).

Суммируя рассмотренные в данном разделе результаты можно заключить, что на втором этапе развития были накоплены новые данные, на основе которых можно было уточнять конкретные направления дальнейшего развития ДЗДЭ. Поэтому, естественно, что в России продолжались поисковые работы по совершенствованию организации работы СПД и ДАС с целью повышения

их ресурса. Полученные при этом результаты рассмотрены в следующем разделе данной статьи.

## 5. НОВЫЕ ПРИКЛАДНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПО ОСНОВНЫМ НАПРАВЛЕНИЯМ СОВРЕМЕННОГО РАЗВИТИЯ ДЗДЭ

Ранее уже были сформулированы наиболее важные направления современного развития ДЗДЭ, которые можно свести к двум обобщенным вариантам.

Вариант 1 сводился к выдвиганию ЗУ из УК больше, чем в СПД-100, за счет выдвигания из конструкции двигателя в выходном направлении слоя с максимальными значениями индукции и создания фокусирующего магнитного поля в выходной части УК, обеспечивающих полное вынесение ЗУ и торцов слабо изнашивающихся выходных частей обеих стенок РК из УК за плоскость полюсов в выходном направлении на большее, чем в СПД-100, расстояние. Целью работ по этому направлению, разрабатываемому в России, было определение возможности повышения ресурса СПД за счет полного вынесения ЗУ и слабо изнашивающихся торцов выходных частей стенок РК за пределы реперной плоскости полюсов на расстояние, достаточное для исключения попадания ускоренных ионов на полюса, в том числе, из “радиальных” потоков ионов, и более длительной защиты полюсов, чем в двигателе СПД-100.

Вариант 2 “магнитного экранирования” выходных частей стенок РК, который разрабатывается в США, а вслед за ними и в ряде других стран. Суть его сводится к экспериментальной оптимизации конфигурации выходных частей УК, магнитного поля и режима работы, чтобы торцы выходных частей стенок РК изнашивались с малыми скоростями с самого начала работы двигателя и более длительное время, чем в двигателях второго поколения.

Таким образом, цели развития по названным направлениям близки, но они отличаются физическими подходами к выбору направления развития СПД (ХД), а также тем, что во втором варианте меньше внимания уделялось максимальному выдвиганию слабо изнашивающихся выходных торцов стенок РК для длительной защиты ими полюсов магнитной системы от ускоренных ионов из “радиальных” потоков в течение всего ресурса двигателя.

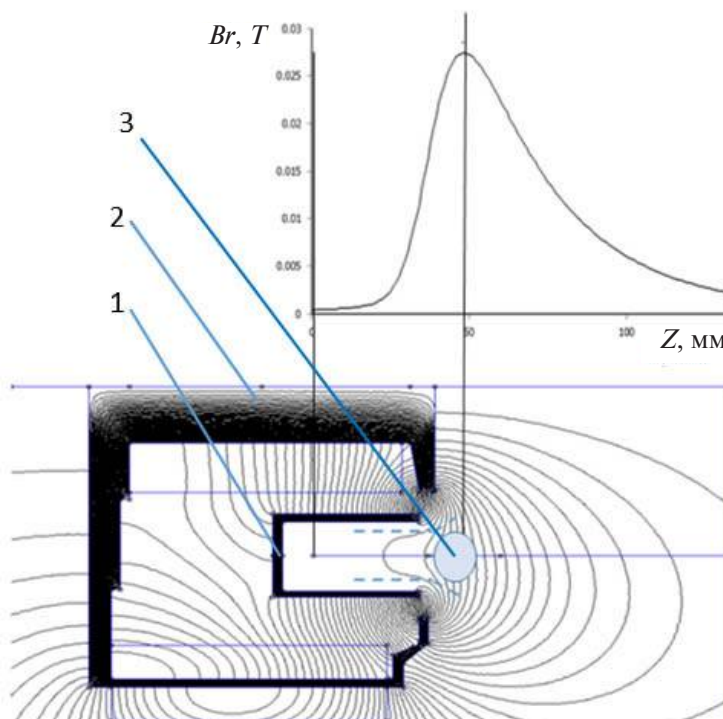
Для развития направления по варианту 1 необходимо было решить следующие задачи:

- найти решения, обеспечивающие большее вынесение области максимальных значений индукции от плоскости полюсов, чтобы разместить ЗУ во внешнем пространстве на большем расстоянии от плоскости полюсов, чем в СПД второго поколения, и разместить анодную границу ЗУ, а, следовательно, и торцы слабо изнашивающихся выходных частей стенок РК на расстоянии от плоскости полюсов, достаточном для более длительной, чем в СПД второго поколения, защиты полюсов;
- обеспечить толщину ЗУ и режимы работы двигателя, достаточные для эффективной переработки потока атомов РВ в ионы и их ускорения.

Как видно, решение названных задач должно быть комплексным, поскольку требует совместного рассмотрения влияния, как минимум, магнитного поля, конфигурации выходной части УК и режима работы СПД. Естественно было начать его с дальнейшего исследования возможностей МСМЭ в части управления конфигурацией силовых линий магнитного поля и продольного распределения магнитной индукции вдоль возможной срединной поверхности УК, давшего положительный эффект при разработке СПД второго поколения и ДАС с вынесенной зоной уско-

рения. Последующие исследования показали физическую обоснованность развития работ по этому направлению. В частности, было показано, что с использованием МСМЭ возможно создание магнитного поля с достаточно четко выраженной “фокусирующей” геометрией силовых линий магнитного поля в выходной части УК, близкой к симметричной относительно срединной поверхности УК, и максимумом распределения магнитной индукции, удаленным от плоскости полюсов на расстояние, до 1.5 раз превышающее расстояние от реперной плоскости полюсов в сопоставимых по масштабам СПД второго поколения (рис. 29). Таким образом, МСМЭ оказалась способной обеспечить решение первой из сформулированных задач, обеспечивая создание фокусирующего магнитного поля в выходной части УК с силовыми линиями, близкими к симметричным относительно срединной поверхности у выхода из УК, и вынесение максимума распределения магнитной индукции и, соответственно, выходной границы ЗУ на большее расстояние от полюсов, чем в двигателях второго поколения.

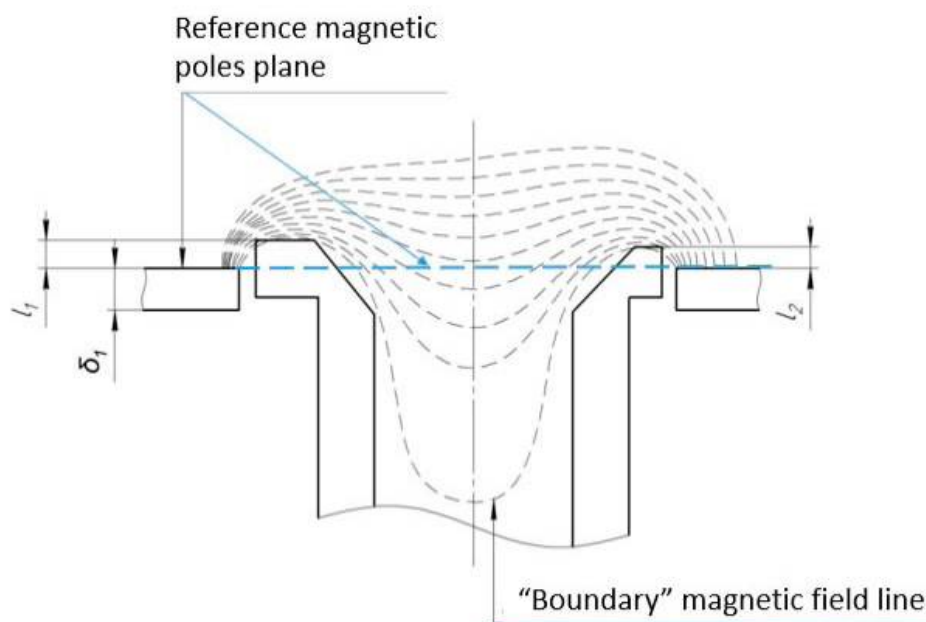
Следующей задачей являлось обеспечение расположения анодной границы ЗУ и торцов слабо изнашивающихся выходных частей стенок на расстояниях от плоскости полюсов, достаточных



**Рис. 29.** Возможный вариант схемы МСМЭ и картина силовых линий магнитного поля и распределения радиальной компоненты магнитной индукции вдоль срединной поверхности УК, возможные границы которого показаны штриховой линией: 1 – магнитный экран, 2 – магнитная система, 3 – возможное положение ЗУ.

для длительной их защиты от распыления “радиальными” потоками ионов. Для решения этой задачи в НИИПМЭ МАИ и в Государственном научном центре Российской Федерации “Исследовательский центр имени М.В. Келдыша” была проведена серия моделирований магнитного поля и разных возможных геометрий выходных частей стенок, ограничивающих выходные части УК, с проверкой эффективности введенных изменений эрозионными испытаниями. В частности, исследования, проведенные в НИПМЭ МАИ, показали, что можно создать магнитное поле с силовой линией, проходящей через прианодную область и УК, и возможные профили выходной части стенок РК, при которых указанная силовая линия будет пересекать возможную границу стенок только во внешнем пространстве на большем расстоянии  $l_1(l_2)$  (рис. 30) от плоскости полюсов, чем в двигателе СПД-100. Это означает, что такая силовая линия должна стать “граничной”, как было определено ранее, и анодная граница ЗУ должна начинаться в месте пересечения рассмотренной граничной линией на указанных расстояниях  $l_1(l_2)$ , превышающих соответствующие расстояния в двигателе СПД-100. Это означает также, что обрезание выходных торцов на указанных или незначительно меньших расстояниях от “реперной” плоскости полюсов должно обеспечить малые скорости износа оставшихся

частей торцов стенок РК и что такие “слабо изнашивающиеся” торцы могут более длительное время, чем в двигателе СПД-100, защищать полюса от их распыления “радиальными” потоками ионов при сопоставимых остальных условиях. Проведенные в НИИПМЭ МАИ эксперименты показали, что при выполнении названных условий возможная анодная граница зон эрозии и ЗУ пересекает проектные стенки близко к точкам их пересечения “граничной” силовой линией. При этом для полного вынесения ЗУ можно обрезать стенки РК между реперной плоскостью и продольными сечениями УК, в которых расположены точки пересечения профилей проектных стенок УК “граничной” силовой линией, хотя можно работать и без названного обрезания. Таким образом, в результате анализа и проведенных дополнительных исследований подтверждены сформулированные ранее физические условия полного вынесения ЗУ из конструкции СПД. Получено также подтверждение и предложенного механизма формирования анодной границы ЗУ подбором соответствующей “граничной” силовой линии, вдоль которой высокий потенциал “передается” из прианодной в выходную часть УК, обеспечивая разность его значения в месте пересечения стенки РК названной линией и потенциала стенки в этом месте, не превышающую порог распыления материала стенки.



**Рис. 30.** Возможная схема смещения выходных торцов и их форма, а также картина магнитных силовых линий в выходной части рабочего канала.



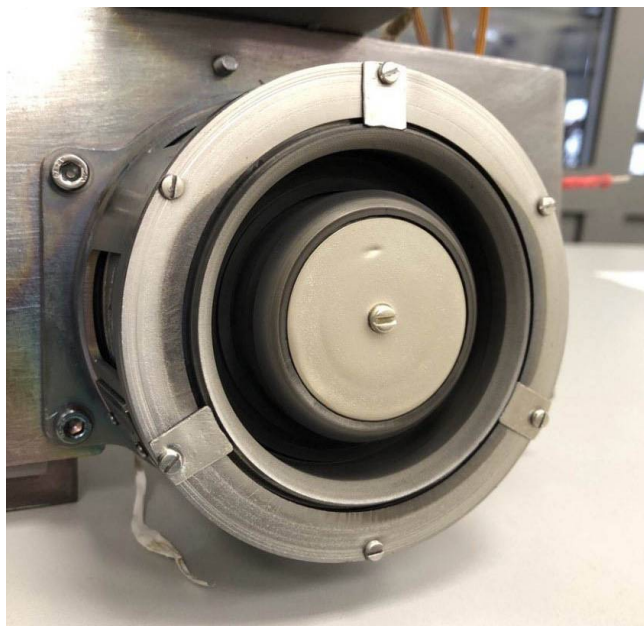
С использованием результатов рассмотренных исследований в НИИПМЭ МАИ было разработано, изготовлено и испытано несколько лабораторных моделей разного масштаба с наружными диаметрами УК в межполюсном зазоре от 40 до 140 мм с разной степенью вынесения ЗУ из УК. Они подтвердили возможность получения слабоизнашивающихся выходных торцов стенок РК на большем относительном удалении от “реперной” плоскости полюсов, чем в двигателе СПД-100, при создании фокусирующего магнитного поля в выходной части УК (как это было определено ранее) с “граничной” силовой линией, проходящей через прианодную область УК, и близкой к симметричной относительно срединной поверхности УК геометрией, пересекающей стенки УК только во внешнем относительно “реперной” плоскости полюсов пространстве или не пересекающей стенки в варианте полного вынесения всей ЗУ из УК. При этом выходные торцы стенок “слабо изнашивающихся” частей стенок РК с самого начала должны быть размещены на большем относительном удалении от “реперной” плоскости полюсов, чем в двигателе СПД-100.

Для иллюстрации полученных эффектов далее будут представлены основные результаты разработки и испытаний лабораторной модели ЛМ СПД-70В с наружным диаметром УК в цилиндрической его части 70 мм и съемными выходными кольцами РК для их взвешивания после испытаний и подтверждения сделанных в начале данного раздела выводов. При разработке этой модели были выполнены условия полного вынесения ЗУ из расширяющегося в выходном направлении УК с выходными торцами стенок, также вынесенными за реперную плоскость полюсов, которое можно было изменять в диапазоне 1–2 мм при ширине УК в межполюсном зазоре 7 мм. Один из вариантов исполнения этой модели был выполнен со съемными выходными частями стенок РК, которые прижимались к основной части РК плоской круглой пластиной из нержавеющей стали, закрывавшей торцевую поверхность внутреннего полюса, и кольцевой пластиной из того же материала для прижатия съемной выходной части наружной стенки. Испытания этой модели при ее работе на ксеноне и криптоне показали, что она обладает конкурентоспособными характеристиками. Поэтому были проведены ее 200-часовые эрозионные испытания на криптоне в режиме работы с разрядным напряжением 300 В и раз-

рядной мощностью в диапазоне 1350–1400 Вт, превышающей мощность серийного двигателя ОКБ “Факел” примерно в 2 раза и близкой к номинальной мощности двигателя СПД-100. Увеличение расхода и плотности расхода криптона в УК этой модели было предпринято для того, чтобы в соответствии с соотношением (25) несколько скомпенсировать возможное снижение коэффициента переработки потока атомов РВ (криптона) в ионы из-за уменьшения толщины ЗУ при ее вынесении из УК вследствие снижения взаимодействия плазмы (электронов) со стенками РК, а также из-за уменьшения размеров модели, приводящего к уменьшению размеров магнитной линзы и возможной толщины ЗУ.

Проведением эрозионных испытаний и взвешиванием съемных частей РК и упомянутой прижимной пластины можно было оценить скорости износа стенок РК и полюсов в отсутствие их защиты прижимными пластинами. Результаты этих испытаний показали, что разрядная камера ЛМ СПД-70В и элементы ее магнитной системы могут выдержать работу в указанном режиме более 7500 ч, достаточных для решения ряда задач управления движением КА двигателями такой мощности, как, например, в группировке КА типа Starlink. В частности, эти испытания показали, что, как и в ХДМЭ, внутренние поверхности выходной части стенок РК, ограничивающих УК, скорее напыляются распыленными материалами из камеры, чем распыляются (рис. 31).

К сказанному следует добавить, что вакуумная камера НИИПМЭ МАИ с внутренним диаметром 2 м имеет только один элемент из графита для защиты стенок камеры от распыления их ускоренными ионами в виде соосного вакуумной камере кольца с внутренним диаметром 1 м, расположенным в поперечном сечении камеры на расстоянии около 1 м от торца двигателя, работающего в положении с осью, параллельной оси камеры. Поэтому поток распыленного графита с этого защитного элемента на работающий двигатель и защита торцевых поверхностей двигателя была меньше, чем при испытаниях сопоставимого по параметрам ХДМЭ MaSMi в вакуумной камере JPL со стенками, полностью закрытыми накладками из графита [58]. Вероятно, вследствие этого после испытаний ЛМ СПД-70В в НИИПЭ МАИ видна незначительная по скорости очистка внутренних поверхностей выходных частей стенок РК, что объяснимо меньшим напылением графита на



**Рис. 31.** Фото варианта ЛМ СПД-70В с нержавеющей пластиной, прижимающей съемную часть внутренней стенки РК после 200-часовых ее эрозионных испытаний.

названные поверхности и, соответственно, меньшим их защитным действием, явно проявившимся при испытаниях ХДМЭ в США. Кроме того, в рассматриваемой ЛМ СПД-70В, как и в ХДМЭ, происходит распыление открытых торцевых поверхностей РК и магнитной системы бомбардировкой ионами из плазмы с более высокой температурой электронов, характерной для частей плазмы, примыкающих к анодной границе ЗУ в двигателях с вынесенной из УК ЗУ.

В целом, малая величина результирующей скорости износа элементов ЛМ СПД-70В подтвердила практически полное вынесение ЗУ из ее УК и возможность длительного существования слабо изнашивающихся выходных торцов стенок разрядной камеры и длительной защиты ими полюсов магнитной системы. Таким образом, были подтверждены условия и возможность полного вынесения ЗУ из конструкции двигателя.

Было обнаружено также, что заметному износу подвергается накладная из нержавеющей стали, прижимающая съемное внутреннее выходное кольцо разрядной камеры (рис. 31). Это объяснимо отмечавшимся ранее повышением потенциала вторичной плазмы, контактирующей с торцевыми поверхностями ускорителя, и увеличением энергии выпадающих из нее ионов по сравнению с энергией таких ионов в двигателях второго по-

коления. Указанное повышение потенциала вторичной плазмы при вынесении анодной границы ЗУ к выходной плоскости УК и соответствующее повышение потенциала плазмы в выходной части УК должно повышать потенциал вторичной плазмы за счет его “выравнивания” вдоль силовых линий, имеющих преимущественно радиальное направление в окрестности названной выходной плоскости УК (рис. 30). Но даже с измеренной скоростью эрозии накладка толщиной 1.0 мм могла защищать внутренний полюс в ЛМ СПД-70В в течение более 2000 ч. Поэтому при ее замене на пластину из более стойкого материала возможность ее работы в течение более 7500 ч не вызывает сомнений несмотря на повышение мощности разряда примерно в 2 раза по сравнению с серийным двигателем СПД-70 ОКБ “Факел”.

При эрозионных испытаниях ЛМ СПД-70В существенно более слабой очистке подвергались также открытые части наружного полюса (рис. 31) и элементы для прижима наружного съемного выходного кольца РК к основной ее части. Судя по характеру этой очистки, она производилась также обратными потоками ионов из вторичной плазмы, образующейся обычно у торцевой поверхности двигателя во внешнем по отношению к двигателю пространстве. По полученным данным пока сложно было оценить скорость этой очистки, но, судя по фото, она была значительно ниже, чем у центральной прижимной пластины. Поэтому возможность защиты открытых частей наружного полюса и названных крепежных элементов нанесением на них покрытий из стойких к распылению материалов или накладками из такого материала не вызывает сомнений.

С учетом рассмотренных результатов в НИИПМЭ МАИ разработана инженерная модель нового СПД типа НТ-1000 (ЕМ НТ-1000) с полностью вынесенной из конструкции двигателя ЗУ, рассчитанная на работу на ксеноне или криптоне при мощностях от 200 Вт до 1 кВт. С учетом снижения рабочего диапазона по мощности наружный диаметр УК в цилиндрической его части выбран равным 55 мм. В конструкцию ЕМ НТ-1000 заложены те же решения, что были использованы при разработке ЛМ СПД-70В, которые позволяют реализовать полное вынесение ЗУ из УК двигателя с обеспечением защиты полюсов от распыления радиальными потоками ионов “слабо изнашивающимися” выходными частями стенок РК. С учетом возможного заметного уве-



личения скорости износа торцевой поверхности внутреннего полюса как и в других двигателях с полностью вынесенной зоной ускорения вследствие перемещения анодной границы ЗУ в область выходного сечения УК, центральный полюс и открытые выходные поверхности полюсов в конструкции ЕМ НТ-1000, защищены накладками, изготовленными из углерод-углеродного композита (рис. 32).

Конструкция двигателя ЕМ НТ-1000 разработана с учетом типовых современных требований к ее стойкости к механическим нагрузкам, а также к электрическому и тепловому интерфейсам. К настоящему времени изготовлено 2 экземпляра ЕМ НТ-1000, которые проходят наземную отработку. В частности, проведены параметрические испытания образцов ЕМ НТ-1000 при их работе на ксеноне и криптоне и 200-часовые эрозионные испытания одного из них при работе на криптоне с разрядным напряжением 300 В и разрядной мощностью 900 Вт при работе на криптоне. Эти испытания подтвердили высокую стабильность выходных параметров двигателя и малый износ стенок разрядной камеры и элементов магнитной системы ЕМ НТ-1000 (рис. 33).

Средние значения основных параметров ЕМ НТ-100, полученные в процессе 200-часовых ее

эрозионных испытаний приведены в табл. 1. Масса ЕМ НТ-100 составляет около 2 кг.

Эрозионные испытания ЕМ НТ-1000 показали, что максимальная скорость износа выходных торцов разрядной камеры и других элементов за 200 ч работы не превысила погрешности измерения износа лазерным 3D-сканером типа Range Vision Pro, имеющимся в МАИ, которая составляла не более 0.1 мм за 1000 ч работы, и будет уточняться в процессе дальнейших испытаний. Но даже названная величина скоростей износа позволяет прогнозировать достаточно большой ресурс двигателя НТ-1000, который разрабатывается в НИИПМЭ МАИ на основе ЕМ НТ-1000.

Возможность полного вынесения ЗУ из УК за счет оптимизации магнитного поля с использованием МСМЭ и подбора геометрии внутренней поверхности стенок в выходной части УК, а также уменьшения скорости износа элементов разряд-



Рис. 32. Общий вид изготовленной ЕМ НТ-1000.



Рис. 33. Вид торцевой поверхности ЕМ НТ-1000 после 200-часовых эрозионных испытаний.

Таблица 1. Основные параметры ЕМ НТ-100, полученные во время 200-часовых эрозионных испытаний

| Расход криптона через УК, мг/с | Расход криптона через катод, мг/с | Разрядное напряжение, В | Разрядный ток, А | Реактивная тяга, мН | Удельный импульс тяги не менее, с | Тяговый КПД, не менее |
|--------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|------------------|---------------------|-----------------------------------|-----------------------|
| 2.75                           | 0.27                              | 300                     | 3.0              | 42.0                | 1420                              | 0.32                  |



ной камеры и полюсов магнитной системы элементами РК подтверждена также разработкой 10 кВтного СПД типа КМ-10 в исследовательском центре Келдыша [65]. В частности, 500-часовые испытания этого двигателя дали очень малые скорости износа элементов разрядной камеры и полюсов магнитной системы. Таким образом, в совокупности с рассмотренными ранее исследованиями возможности повышения ресурса ДАС, проведенные исследования СПД с полностью вынесенной ЗУ из конструкции двигателя подтверждают возможность значительного повышения ресурса ДЗДЭ по сравнению с двигателями второго поколения за счет создания фокусирующего магнитного поля в выходной части УК и большего вынесения ЗУ из их конструкции.

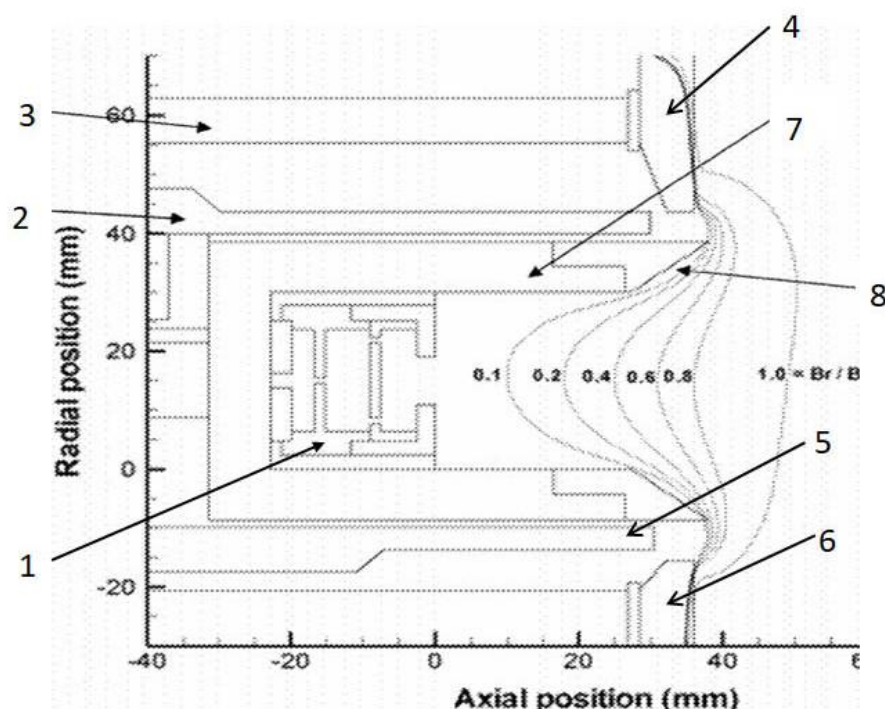
Что касается результатов работ по варианту 2 развития ДЗДЭ, проводившихся в последние годы в США по “магнитному экранированию” стенок РК, то, как уже отмечалось ранее, идея его сводилась к расширению выходной части УК и созданию магнитного поля с силовыми линиями, эквидистантными в выходной части канала поверхностям стенок. При этом предполагалось предотвращение попадания ускоренных ионов на стенки разрядной камеры созданием эквипотенциалей электрического поля, отталкивающих ионы от стенок в соответствии с идеей Морозова [54–55]. Но, как уже было показано ранее, эта идея в исходной ее интерпретации в СПД не работает. Тем не менее специалистами JPL (США) в результате серии поисковых исследований удалось создать решения, обеспечивающие получение слабо изнашивающихся выходных торцов разрядной камеры, расположенных в близкой окрестности плоскости полюсов. Поэтому представляет интерес рассмотреть названные решения и их физическую сущность.

Типовая конструктивная схема ХДМЭ (рис. 34) описана, например, в патенте США № 10,082,133 В2, опубликованном 25.09.2018 [66]. Как видно, она содержит магнитную систему с магнитными экранами, охватывающими разрядную камеру, т. е. МСМЭ, описанную во многих российских работах ранее и в данной статье. Она спроектирована таким образом, что в выходной части УК создается магнитное поле с фокусирующим магнитным полем в выходной части УК, в том числе, с магнитными силовыми линиями, проходящими через прианодную часть УК и выходящими из него, не пересекая стенки УК, а торцы стенок РК

располагаются в окрестности выходной плоскости УК с небольшим смещением в выходном направлении. При этом, как и в российских моделях, максимум распределения магнитной индукции оказывается вынесенным на значительное расстояние от плоскости полюсов магнитной системы (рис. 34). Таким образом, решения, к которым пришли специалисты из США, могут быть объяснены с использованием результатов, рассмотренных в данной статье, а именно

- вынесением максимума распределения магнитной индукции из УК в ХДМЭ, приведшим к значительному вынесению ЗУ из УК, благодаря связи положения ЗУ с областью максимальных значений индукции в разряде УЗДЭ;
- созданием фокусирующего магнитного поля в выходной части УК с силовыми линиями, часть которых проходит через прианодную часть УК и выходит из УК вблизи выходных частей стенок разрядной камеры, не пересекая их, что приводит в соответствии с формулой (1) к повышению потенциала в соответствующих пристеночных областях в окрестности выходного сечения УК до уровня, сопоставимого с потенциалом в прианодной области, а обсуждавшийся ранее эффект смещения эквипотенциалей от названных силовых линий в выходном направлении из-за повышения концентрации плазмы (электронов) при переходе вдоль силовой линии от пристеночных областей УК к средней его части приводит к смещению анодной границы и всего ЗУ в выходном направлении.

К сказанному следует добавить, что как уже отмечалось ранее, авторами “магнитного экранирования” стенок РК не ставилась задача максимального удаления торцов “слабо изнашивающихся” частей стенок РК от плоскости полюсов. Поэтому ими были найдены лишь варианты с небольшим удалением выходных торцов стенок разрядной камеры от плоскости полюсов. В результате в ХДМЭ отчетливо проявилось распыление, как минимум, внутреннего полюса радиальными потоками ионов [66]. Как уже отмечалось ранее, эти потоки ионов с достаточно большой энергией, практически всегда образуются в окрестности выходной плоскости УК даже в двигателях второго поколения. Поэтому в ХДМЭ пришлось защищать полюса накладками из стойкого к распылению ионами материала (графита), как это делалось и делается в ДАС (рис. 17). По мнению специа-



**Рис. 34.** Схема типового ХДМЭ и силовых линий магнитного поля в таком двигателе: 1 — анод, 2 — наружный магнитный экран, 3 — элемент магнитной цепи, 4 — наружный магнитный полюс, 5 — внутренний магнитный экран, 6 — внутренний магнитный полюс, 7 — основа разрядной камеры, 8 — расширенная выходная часть разрядной камеры) [66].

листов из США, это позволяет получать малый износ полюсов даже при больших наработках двигателей, разрабатываемых с проектным ресурсом до 50 000 ч. Кроме того, как уже отмечалось в данной статье, такие накладки защищают полюса от распыления ионами из вторичной плазмы, образующейся на выходе из ДЗДЭ при их работе и имеющей повышенный потенциал в двигателях и ускорителях с вынесенной из УК ЗУ. Поэтому их применение можно признать оправданным и по этой причине.

В настоящее время в США обсуждается также идея выполнения разрядной камеры—магнитного экрана ХДМЭ проводящей или соединенной с анодом [66]. Эти решения повторяют использованные ранее в работе [53] и описанные в данной статье при рассмотрении ДАС с полным вынесением ЗУ из конструкции двигателя. Понятно также, что в этих моделях, как и в названном ранее ДАС и СПД с полностью вынесенной из УК ЗУ, также необходимо будет защищать торцевые поверхности полюсов магнитной системы накладками из стойких к распылению материалов не только от распыления их “радиальными” потоками ионов, но и ионами из вторичной

плазмы, которые будут неизбежно возникать у краев ускоряемого потока в окрестности плоскости выходного сечения УК вследствие смещения анодной границы ЗУ в названное сечение УК и соответствующего повышения потенциала вторичной плазмы, контактирующей с торцевой поверхностью двигателя.

Таким образом, как уже отмечалось в работе [38] и в данной статье, основной физический эффект “магнитного экранирования” выходных частей стенок разрядной камеры сводится к полному смещению ЗУ из УК, т. е. к удалению от защищаемых стенок области плазмы, из которой ускоренные ионы могут попадать на стенки, в выходном направлении, а не к экранированию стенок магнитным полем для уменьшения потоков ускоренных ионов на стенки из контактирующей с ними плазмы. Тем не менее эффект защиты выходных частей стенок РК от ускоренных ионов в ХДМЭ достигается, и при желании по выходному результату его можно называть “магнитным экранированием”. В России же этот эффект называется полным вынесением ЗУ из конструкции двигателя.

Важно также то, что рассмотренные материалы, включая результаты специалистов США по “магнитному экранированию” стенок РК, подтверждают сделанные в данной статье выводы о том, что физическими условиями для реализации полного вынесения ЗУ из УК являются создание фокусирующего магнитного поля в выходной части УК с максимумом распределения магнитной индукции вдоль срединной поверхности проектируемого УК, вынесенным из него в выходном направлении на расстояние от “реперной” плоскости полюсов (как она была определена в данной статье), достаточное для защиты полюсов от радиальных потоков, и с “граничными” силовыми линиями, проходящими через прианодную зону разряда и выходящих из УК во внешнее пространство за плоскостью полюсов без пересечения стенок УК.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены результаты многолетних исследований процессов в двигателях с замкнутым дрейфом электронов (ДЗДЭ), на основе которых были разработаны электроракетные двигатели (ЭРД) двух типов, названные в СССР двигателями с анодным слоем (ДАС) и стационарными плазменными двигателями (СПД). Их разработка уже в СССР достигла достаточно высокого уровня и продолжается в России до настоящего времени. При этом СПД, в значительной мере благодаря работам советских и российских специалистов, стал одним из наиболее эффективных и широко используемых в космосе ЭРД и продолжает, как и ДАС, успешно развиваться. Были рассмотрены базовые положения и наиболее важные результаты, которые определяли развитие ДЗДЭ и могут быть полезными для дальнейшего совершенствования ДАС и СПД, а также ускорителей и технологических источников на их основе. Они сводятся к следующим.

ДАС был первым ДЗДЭ, продемонстрировавшим свою перспективность.

Исходные физические положения для его разработки были впервые сформулированы или выведены научным сотрудником Института атомной энергии имени И.В. Курчатова (ИАЭ) Аскольдом Владимировичем Жариновым, который в конце 1950-х гг. предложил ускорять ионы в “узком” слое плазмы с продольным (вдоль направления ускорения) электрическим и поперечным к нему магнитным (скрещенными) полями и с замк-

нутым током дрейфующих в скрещенных полях электронов, разработал первую модель такого ускорителя и экспериментально продемонстрировал возможность “безэлектродного” и “безстепеночного” ускорения ионов в названном слое плазмы. Им же была разработана принципиальная схема и в 1961 г. подана заявка на изобретение ДАС и получено авторское свидетельство СССР на это изобретение. С 1962 г. Жаринов начал работать в Центральном научно-исследовательском институте машиностроения (ЦНИИМаш), и командой специалистов этого института под его руководством были разработаны и исследованы модели источников ускоренных ионов таллия и других РВ в разряде со скрещенными электрическим и магнитным полями. К началу 1970-х гг. были созданы эффективные лабораторные модели двухступенчатого двигателя этого типа, способные ускорять ионы висмута до 80 км/с, более, чем в 10 раз превышавшие скорости “тепловых” ракетных двигателей, в которых ускорение истекающих из них частиц рабочего вещества (РВ) достигается нагревом и преобразованием их тепловой энергии в кинетическую энергию направленного движения укоренного потока РВ, истекающего из двигателя.

В процессе названных исследований упомянутой командой специалистов ЦНИИМаш также были сформулированы условия для реализации эффективной ионизации частиц рабочего вещества (РВ) и ускорения образовавшихся ионов в электрическом разряде со скрещенными полями, такие как необходимое соотношение продольных размеров (толщины) зоны ускорения (ЗУ) с основным падением потенциала в названном разряде и Ларморовских радиусов ионов и электронов, определяющих выбор магнитной индукции в ЗУ, необходимость существенной замagnetичности электронов, определяющей доминирование электрического дрейфа в их усредненном движении в разряде, необходимость пропускания через ЗУ потока частиц РВ большой плотности для достижения высокой степени переработки этого потока частиц в ионы. При этом Жариновым было выведено выражение (14) для толщины ЗУ, обеспечивающее стабильное существование зоны при наличии в ней ионизации. Как было показано в данной статье, перечисленные результаты могут использоваться для качественного анализа процессов не только в ДАС, но и в СПД. Было показано также, что основной проблемой для дальнейшего развития ДАС явля-



ется повышение его ресурса, обусловленное попаданием ускоренных ионов на элементы его конструкции.

Данная проблема постепенно решалась специалистами ЦНИИМаш на следующих этапах развития ДАС. В результате в ЦНИИМаш при лидирующей роли сначала Е.А. Ляпина, а затем А.В. Семенкина была разработана серия конкурентоспособных моделей и опытных образцов одноступенчатых и двухступенчатых ДАС, работающих на разных РВ, включая ксенон и висмут, в диапазоне мощностей от 0.5 до 50 кВт. На основе одной из них, Д-55, в США был разработан и успешно испытан в космосе летный образец ДАС. Показана также возможность создания ДАС с полностью вынесенной из УК ЗУ и обеспечения большого ресурса такого двигателя. Таким образом, разработки ДАС готовы к переходу к их практическому использованию.

Алексей Иванович Морозов, также научный сотрудник ИАЭ, предложил идеи и выполнил несколько теоретических работ, определивших конструктивный облик первых моделей СПД и возможные направления управления процессами в этом двигателе. Под его руководством специалистами ИАЭ, начиная с 1962 г., практически одновременно с работами в США по аналогичным двигателям, была осуществлена разработка первых лабораторных моделей СПД. Некоторые из них, в отличие от разработанных в США, уже к 1967–1968 гг. оказались конкурентоспособными с другими ЭРД при уровне мощностей разряда около 1 кВт и в диапазоне скоростей истечения РВ 10–15 км/с, в то время как в США работы над подобными двигателями были прекращены в середине 1960-х гг. Поэтому по предложению Морозова была разработана, изготовлена и в 1972 г. успешно испытана экспериментальная модель СПД в составе искусственного спутника Земли (ИСЗ) “Метеор”, разработанного Всесоюзным НИИ электромеханики (ВНИИЭМ). Подготовка и проведение этого испытания были осуществлены командой специалистов ИАЭ, опытного конструкторского бюро (ОКБ) “Заря” и его филиала в г. Калининград (ныне АО ОКБ “Факел”) и ВНИИЭМ. Уже в процессе подготовки этого испытания началось расширение фронта работ по СПД с привлечением кроме названных ряда новых организаций, включая Московский авиационный институт имени С. Орджоникидзе (МАИ), центральный институт моторостроения

имени П.Г. Баранова (ЦИАМ) и др., а успех названного испытания дал толчок ускоренному дальнейшему развитию СПД, и принес значительные прикладные результаты.

Основной идеей Морозова была фокусировка ускоряемого в протяженном слое плазмы со скрещенными полями потока ионов созданием “фокусирующей” геометрии силовых линий магнитного поля в ускорительном канале (УК) двигателя и соответствующей геометрии эквипотенциалей электрического поля. Для обоснования этого предложения им была выведена формула (1) “термализованного” потенциала, позволяющая осуществлять оценку изменения потенциала вдоль силовой линии магнитного поля и отклонения эквипотенциалей электрического поля от ближайших к ним силовых линий. Также им было предложено применение диэлектрических стенок разрядной камеры (РК) для снижения температуры электронов, определяющей масштабы изменения потенциала вдоль силовых линий и отклонения эквипотенциалей электрического поля от магнитных силовых линий. И, хотя исходная идея “фокусировки” ионного потока в одноступенчатых СПД не сработала, сам подход к управлению процессами в разряде СПД изменением характеристик магнитного поля был воспринят и развит в МАИ и, как было показано в данной статье и других цитированных работах, оказался продуктивным. При этом применение диэлектрических стенок РК из стойкого к распылению ускоренными ионами материала также сыграло важную роль в обеспечении большого ресурса летных образцов СПД второго поколения, разрабатывавшихся в ОКБ “Факел” с учетом рекомендаций и при научно-технической поддержке МАИ, обеспечивая защиту полюсов магнитной системы в течение многих тысяч часов работы СПД.

Морозовым было дано предварительное обоснование целесообразности создания в УК СПД магнитного поля с нарастающей в выходном направлении магнитной, которое было подкреплено экспериментально специалистами ИАЭ, показавшими неустойчивость разряда в ускорителе со спадающей в выходном направлении магнитной индукцией, приводящей к увеличению электронной составляющей разрядного тока и снижению энергетической эффективности ускорителя и двигателя. Положение о целесообразности создания магнитного поля с возрастающей в направлении ускорения магнитной индукцией, хотя

бы в части УК, использовалось при разработке большинства созданных лабораторных моделей и летных образцов СПД в СССР и России. Впоследствии это положение неосознанно использовалось и в зарубежных двигателях, разрабатывавшихся по аналогии с российскими. К сказанному следует добавить, что реализация данного положения оказала положительное влияние на стабильность разряда и в одноступенчатых ДАС, а также на его тяговую эффективность, что является одним из подтверждений общих свойств разрядов в СПД и ДАС, обусловленных близостью их принципиальных схем.

Кроме того, Морозовым был предложен способ электромагнитного управления вектором тяги СПД созданием магнитных полей с разными направлениями силовых линий в различных по азимуту частях УК, при исследовании которого была обнаружена возможность существенного повышения тяговой эффективности СПД, что также способствовало активизации дальнейшей разработки СПД. Но созданные модели СПД с высокой тяговой эффективностью обладали небольшим ресурсом из-за распыления стенок РК двигателя попадающими на них ускоренными ионами. Поэтому дальнейшее развитие СПД (как и ДАС), было направлено на обеспечение как высокой тяговой эффективности, так и большого ресурса двигателя.

Эта проблема решалась в последующих работах МАИ и ОКБ “Факел” применительно к СПД и в ЦНИИМаш применительно к ДАС. В частности, как было показано в данной статье, с учетом рекомендаций и при научно-технической поддержке МАИ в ОКБ “Факел” сразу после первого испытания СПД в космосе были начаты разработки и постепенно созданы летные конструкции СПД второго поколения, работающие на ксеноне с достаточно высокой тяговой эффективностью и имеющие ресурс до 10000 и более часов. Началась также сначала опытная, а затем и штатная их эксплуатация в составе околоземных космических аппаратов (КА). В результате к началу 1990-х гг. в ОКБ “Факел” был накоплен значительный опыт разработки и создана база для производства и наземной отработки летных конструкций СПД и двигательных установок (ДУ) на их основе. Совместно с ВНИИЭМ и НПО прикладной механики (ныне АО “Информационные спутниковые системы” имени М.Ф. Решетнева) был накоплен также опыт их эксплуатации и при-

менения для управления движением КА. Все это обеспечило расширение дальнейшего применения СПД как в России, так и за рубежом.

После опубликования названных результатов в начале 1990-х гг. резко возрос интерес к СПД и ДАС за рубежом и начались работы по изучению советского опыта разработки и применения названных двигателей, организация применения российских двигателей на зарубежных КА, а также разработки собственных версий таких двигателей в США, Франции и других странах. И к настоящему времени разработки собственных версий рассматриваемых двигателей в США и Франции достигли достаточно высокого уровня. Проводятся они и в ряде других стран. Таким образом, отечественные работы в области ДЗДЭ дали толчок развитию аналогичных работ и в ряде других стран, что и привело к их широкому применению в космосе.

На первом этапе развития СПД специалистами ИАЭ были выполнены первые измерения распределений локальных параметров плазмы в УК СПД, позволившие получить общую картину процессов ионизации потока частиц РВ и формирования продольной составляющей образовавшихся потоков ионов в УК, а также определены основные характеристики колебаний параметров плазмы в УК и на выходе из него в достаточно широком диапазоне частот. Перечисленные результаты позволяли делать оценки возможного влияния неустойчивостей в плазме на увеличение переноса электронов поперек магнитного поля в разряде СПД по сравнению с “классическим” механизмом повышения подвижности дрейфующих электронов за счет их столкновений с другими частицами. Кроме того, Морозов предложил механизм “пристеночной” проводимости из-за столкновений электронов со стенками разрядной камеры (РК).

Принципиально важными с физической точки зрения являются результаты, полученные сначала в ИАЭ и впоследствии подтвержденные в МАИ, по экспериментальным оценкам параметра Холла, давших значения  $\omega_e \tau_e \geq 100$  в разряде СПД, поскольку они подтвердили существенную замедленность электронов, которая была базовым допущением при построении концепции УЗДЭ и ДЗДЭ, а также большинства теоретических моделей разряда в них. Полученные результаты позволяли разрабатывать физические модели для объяснения получаемой экспериментально “ано-

мально” большой доли электронной составляющей в разряде СПД. Однако на рассматриваемом этапе не удалось разработать верифицированные модели, позволяющие количественно предсказывать характеристики возникающих в плазме неустойчивостей в новых двигателях и их влияние на названную электронную составляющую разрядного тока и, соответственно, на распределения электрического поля и всех остальных параметров плазмы в УК. Как уже отмечалось в данной статье, эта задача до конца не решена и к настоящему времени в силу сложности процессов, происходящих в разряде со скрещенными электрическим и магнитным полями.

Достаточно сложными оказались физические процессы и в ДАС, экспериментальные исследования которых затруднены из-за малой толщины ЗУ и ее близости к аноду, что объясняет меньший объем таких исследований, выполненных в ДАС. С учетом отмеченной сложности процессов в ДЗДЭ основной прогресс в их дальнейшем развитии был достигнут экспериментальным методом.

На втором этапе развития СПД, который можно считать начавшимся с момента принятия в 1969 г. решения о проведении летных испытаний СПД, в МАИ при лидирующей роли научного сотрудника В.П. Кима был выполнен комплекс исследований возможностей магнитных систем УЗДЭ разных схем и влияния характеристик магнитного поля на работу и характеристики СПД. В результате была изобретена (получены авторские свидетельства СССР на имя МАИ) схема магнитной системы с так называемыми “магнитными экранами” (МСМЭ), охватывающими разрядную камеру СПД. Проведенные исследования показали, что она обладает расширенными возможностями управления характеристиками магнитного поля в разряде СПД. С ее использованием была проведена также серия исследований влияния изменений магнитного поля на интегральные характеристики двигателя и выполнены детальные измерения распределений локальных параметров плазмы в УК с использованием электростатических зондов и более развитой по сравнению с использовавшимися ранее методикой измерений. Эти измерения дали уникальные результаты, которые используются и до настоящего времени для анализа процессов в СПД во многих работах (частично они были представлены и в данной статье). В частности, эти результаты позво-

лили уточнить или скорректировать ряд выводов, которые были сделаны в ИАЭ по результатам, первых измерений, а также сделать ряд новых выводов о влиянии характеристик магнитного поля и других факторов на работу СПД. Наиболее важные из них для развития СПД (а в отдельных моментах и ДАС) рассмотрены далее.

Согласно выполненным в МАИ исследованиям, в разряде СПД потенциал плазмы в значительной части прианодной зоны незначительно превышает или близок к потенциалу анода, т. е. прианодное падение потенциала мало и отрицательно или близко к нулю. При этом ЗУ отделена от анода упомянутой прианодной зоной с малым падением потенциала в ней, и электрическое поле концентрируется в достаточно узком слое в области разряда с максимальными значениями индукции магнитного поля, что может быть объяснено особенностями переноса электронов поперек магнитного поля в разных частях разряда в СПД. Этот вывод был подтвержден измерениями распределений электрического поля в моделях СПД с разными магнитными полями, работающих на разных режимах работы, что позволило считать названную связь распределений электрического и магнитного полей общим свойством разряда в СПД, позволяющим управлять положением ЗУ в разряде относительно элементов конструкции двигателя изменением распределения магнитной индукции в объеме разряда. При этом толщина ЗУ с основным падением потенциала оказалась сопоставимой с получающейся в ДАС, и оказалось возможным анализировать влияние различных внешних факторов на толщину ЗУ в СПД с использованием упомянутой ранее формулы Жаринова.

Было показано также, что с использованием МСМЭ можно “сжимать” образующуюся при формировании “фокусирующего” магнитного поля магнитную линзу в радиальном и продольном направлениях со стороны анода, вызывая смещение магнитной линзы и области максимальных значений магнитной индукции в выходном направлении относительно “реперной” плоскости полюсов (как она была определена в статье). Это позволяет смещать часть распределения магнитной индукции с максимальными ее значениями во внешнее пространство относительно названной реперной плоскости полюсов на заметное расстояние, а также к сжатию в выходном направлении части “жгута” силовых линий магнитного



поля со стороны анода, сближающихся при их подходе к полюсам. Отмеченные изменения магнитного поля приводят к смещению ЗУ в выходном направлении как в силу рассмотренной выше связи распределения магнитной индукции и распределения электрического поля в разряде СПД, так и в результате смещения упомянутой части жгута силовых линий, идущих к полюсам, в выходном направлении.

Названное смещение ЗУ было подтверждено результатами ресурсных испытаний летных образцов двигателей СПД-100 второго поколения, проведенными в ОКБ “Факел”, и результатами измерений распределений потенциала и некоторых других параметров плазмы в лабораторных моделях СПД, часть которых была приведена и в данной статье. Было показано также, что упомянутое смещение названной части жгута силовых линий приводит к возникновению нового эффекта смещения частей анодной границы и всей ЗУ в выходном направлении вследствие “передачи” высокого потенциала из прианодной части разряда к выходным частям ограничивающих УК поверхностей стенок вдоль “граничных” силовых линий, проходящих из прианодной зоны к названным выходным частям поверхностей стенок без их пересечения. Это приводит к повышению потенциала вдоль названных силовых линий и значительному отклонению в выходном направлении эквипотенциалей электрического поля от близких к ним силовых линий из-за увеличения концентрации и потенциала плазмы при переходе вдоль названных силовых линий от стенок к центральной части УК в соответствии с формулой Морозова для расчета “термализованного” потенциала. Таким образом, создание фокусирующей геометрии в выходной части УК (как описано в данной статье) приводит к возникновению нового эффекта значительного смещения частей анодной границы и всей ЗУ в выходном направлении.

Как было отмечено в данной статье, рассмотренный эффект смещения анодной границы и всей ЗУ был реализован в первых двигателях СПД-50 и СПД-70 второго поколения, разработанных в ОКБ “Факел” с учетом рекомендаций МАИ по выбору МСМЭ в качестве базовой схемы магнитной системы для СПД и при научно-технической поддержке МАИ. Это позволило значительно сместить ЗУ в названных двигателях и сократить зоны эрозии стенок разрядной ка-

меры в 3–5 раз и тем самым уменьшить потоки ускоренных ионов и соответствующие потери энергии на стенках РК. В свою очередь, это позволило обеспечить приемлемую тяговую эффективность и увеличить ресурс уже первых летных образцов двигателя СПД-50 с мощностью около 400 Вт до 1500 ч и двигателя СПД-70 на режиме работы с мощностью около 700 Вт – до 3000 ч и начать их реальное применение для решения задач коррекции орбит околоземных КА.

В двигателе СПД-100 второго поколения с номинальной мощностью 1.35 кВт, также разработанном в ОКБ “Факел” с учетом рекомендаций и при научно-технической поддержке МАИ, было реализовано полное смещение ЗУ и выходных торцов стенок РК во внешнее пространство за реперную плоскость полюсов в начале работы этого двигателя за счет использования рассмотренного ранее эффекта создания фокусирующего магнитного поля в выходной части УК и большего смещения максимума распределения магнитной индукции за реперную плоскость полюсов, чем в двигателях СПД-50 и СПД-70. Указанное смещение ЗУ позволило не только уменьшить потоки ускоренных ионов на стенки РК, но и увеличить запасы на износ выходных частей стенок, торцы которых также вынесены за пределы реперной плоскости. В свою очередь это позволило повысить тяговую эффективность двигателя СПД-100 и увеличить его ресурс, как минимум, до 7000 ч, что обеспечило его широкое применение для решения задач управления движением КА в космосе.

Вывод о возможности управления положением ЗУ в разряде СПД был также реализован в соответствии с рекомендациями и при научно-технической поддержке МАИ при разработке двигателя СПД-140 с номинальной мощностью 4.5 кВт и ресурсом не менее 13 000 ч, который также начал применяться в космосе для решения задач довыведения и коррекции орбит геостационарных КА повышенной массы. Таким образом, была подтверждена обоснованность и эффективность применения положения о возможности управления положением ЗУ в разряде СПД созданием “фокусирующего магнитного поля в выходной части УК” со значительным смещением максимума распределения магнитной индукции вдоль срединной поверхности УК во внешнее пространство за пределы реперной плоскости полюсов.

В работе специалиста ЦНИИМаш А.В. Семенкина с учетом рассмотренных выше результатов работ по СПД и с использованием МСМЭ была исследована возможность выдвижения ЗУ из конструкции одноступенчатого ДАС за счет согласованного смещения полого анода и распределения магнитной индукции в выходном направлении при неизменном положении разрядной камеры и полюсов вплоть до размещения выходных торцов анода в реперной плоскости полюсов. При указанном перемещении было получено уменьшение скорости износа стенок разрядной камеры, которое при расположении торцов анода в реперной плоскости полюсов составило больше 10 раз. Такое смещение ЗУ привело к снижению тяговой эффективности двигателя не более, чем на 5%, что можно считать вполне приемлемой ценой за существенное снижение скорости износа. Тем самым была подтверждена возможность получения большого ресурса ДАС при сохранении достаточно высокой его тяговой эффективности. Следует добавить, что такое совместное смещение анода и распределения магнитного поля было реализовано в описанных экспериментах механическим (и электрическим) соединением торцов магнитных экранов с элементами анода. При этом торцевые части магнитных экранов впервые стали выполнять функции разрядной камеры и анода и обеспечивать примерно одинаковое возрастание магнитной индукции в прианодной области разряда в выходном направлении при разных положениях анода. Это обеспечивало, как и в СПД, достаточно стабильное горение разряда и сохранение высокой его тяговой эффективности при всех положениях анода. Важно также, что в рассматриваемом варианте разрядная камера впервые свелась к полости внутри магнитного экрана,

Важно также, что в описанной модели ДАС удалось полностью вынести ЗУ во внешнее пространство за пределы реперной плоскости полюсов за счет смещения анода и вынесения области максимальных значений индукции во внешнее пространство также за пределы “реперной” плоскости полюсов при реализации фокусирующей геометрии силовых линий магнитного поля. Таким образом, была подтверждена применимость рассмотренного выше положения о возможности такого вынесения ЗУ за счет создания соответствующего магнитного поля в разряде. Была реализована также концепция Жаринова “безэлектродного” и “безстеночного” ускорения ионов

в конструкции ДАС, пригодной для реального применения, и подтверждена возможность достаточно эффективной ионизации и ускорения ионов в ЗУ, размещенной вне конструкции такого двигателя.

В связи с проблемой управления положением ЗУ в разряде УЗДЭ важно также понимать физические условия, определяющие положение границ ЗУ и ее толщину. Судя по полученным до настоящего времени данным, выходная граница ЗУ в большинстве моделей СПД и одноступенчатых ДАС локализуется в части области максимальных значений индукции, где начинается ее спад в выходном направлении. Это может быть объяснено резким увеличением подвижности и коэффициентов диффузии электронов поперек магнитного поля в спадающей его части. Указанную локализацию выходной границы ЗУ можно считать еще одним свойством разрядов в УЗДЭ и принять, что “условная” выходная граница ЗУ проходит через точку на срединной поверхности УК, в которой значение магнитной индукции в спадающей части ее распределения вдоль срединной поверхности УК составляет определенную долю от максимального ее значения на названной срединной поверхности. В действительности выходная граница может иметь более сложную структуру и требует дальнейшего ее изучения, которое позволит уточнить физические условия (критерии) для ее определения.

Кроме того, специалистами ОКБ “Факел” были получены данные, позволяющие сделать ряд выводов о факторах, определяющих положение анодной границы ЗУ в разрядах двигателей СПД второго поколения СПД-70, СПД-100 и СПД-140 с цилиндрическими или близкими к цилиндрическим стенками УК, работающими на разных режимах на ксеноне. Так, согласно этим данным, оказалось, что “граничные” силовые линии, проходящие через границы зон эрозии со стороны анода на обеих стенках в УК названных СПД второго поколения, можно считать совпадающими. Далее, по данным специалистов ОКБ “Факел” зависимости от плотности расхода РВ оптимальных значений магнитной индукции в точках пересечения срединной поверхности УК названной общей граничной силовой линией, в упомянутых двигателях второго поколения, работающих на разных режимах, оказались близкими и могут быть описаны одной общей зависимостью.

С учетом изложенного В.П. Кимом было предложено считать названные точки пересечения находящимися на “условной” анодной границе ЗУ и, зная распределения магнитной индукции вдоль срединной поверхности УК для каждого из попавших в обработку двигателя и режима его работы, определять координаты точек пересечения анодной границей ЗУ срединной поверхности. Затем, считая, что “условная” выходная граница ЗУ пересекает срединную поверхность в области максимальных ее значений на спадающей в выходном направлении части ее распределения, можно было определить толщину ЗУ как разность координат точек пересечения срединной поверхности “условными” анодной и выходной границами ЗУ. В результате была получена зависимость нормированной толщины ЗУ для каждого двигателя и режима его работы, которая также оказалась близкой для названных ранее двигателей и разных режимов их работы. Нормирование было осуществлено делением получающейся описанным выше способом толщины на ширину УК с учетом того, что магнитные линзы на оптимальных режимах работы рассмотренных двигателей разного масштаба оказываются близкими к геометрически подобным. Таким образом, можно считать, что полученные данные отражают реальную зависимость толщины ЗУ в названных двигателях от различных факторов. В частности, они свидетельствуют о том, что плотность расхода РВ (в данном случае, ксенона) является доминирующим фактором, влияющим на толщину ЗУ во всех рассмотренных двигателях и режимах их работы. В.П. Кимом было также предложено использовать “граничную” силовую линию магнитного поля для задания положения анодной границы ЗУ созданием “граничной” силовой линии, проходящей через прианодную область разряда в УК и пересекающую стенки РК только во внешнем пространстве за пределами плоскости полюсов.

Анализ полученных результатов показал также, что доминирование плотности расхода в УК в формировании анодной границы ЗУ может быть объяснено доминирующей ролью частоты ионизационных столкновений электронов с атомами в формуле Жаринова и, соответственно, доминирующим влиянием уровня концентрации нейтральных атомов в ЗУ на толщину ЗУ в рассмотренных случаях. Конкретные количественные зависимости требуют дальнейшего уточнения с учетом “условности” принятого определения

границ и, как уже отмечалось, целесообразны дальнейшие исследования для уточнения физических условий и критериев формирования границ ЗУ.

Интересные результаты о влиянии геометрии УК были получены в процессе ресурсных испытаний двигателей СПД-100 с цилиндрическими начальными поверхностями, ограничивающими выходную часть УК, а именно: после 1-го этапа наработки двигателя на ресурс около 500 ч происходило смещение анодной границы ЗУ в сторону анода, приводящее к некоторому снижению тяговой эффективности. Затем на втором этапе после наработки около 2000 ч происходило смещение границы износа стенок (и ЗУ) со стороны анода уже в выходном направлении, и возникли “слабо изнашивающиеся части” стенок на прежде изнашивавшихся их частях. Эти данные показали, что, во-первых, на положение анодной границы ЗУ существенно влияет геометрия выходной части УК. Кроме того, если учесть, что, как было показано выше, концентрация нейтральных атомов РВ в УК, может считаться одним из доминирующих факторов, то можно объяснить смещение анодных границ зон износа и ЗУ к аноду после первого этапа длительной работы двигателя СПД-100 уменьшением концентрации нейтральных атомов РВ в УК вследствие расширения УК из-за износа стенок. Было показано также, что обнаруженное на втором этапе “обратное” смещение анодных границ износа и ЗУ можно объяснить снижением интенсивности взаимодействия плазмы (электронов) со стенками и доминирующим при больших расширениях УК из-за износа стенок уменьшением эффективной частоты столкновений электронов, определяющих их результирующую подвижность поперек магнитного поля в формуле Жаринова и соответствующим уменьшением толщины ЗУ. При фиксированном положении выходной границы ЗУ это должно приводить к наблюдаемому “обратному” смещению анодной границы ЗУ в выходном направлении. В конечном счете отмеченные тренды должны приводить к стабилизации толщины и положения ЗУ, когда влияние обоих названных факторов при очень больших расширениях УК станет незначительным. При этом понятно, что при предельном состоянии выходных частей стенок, когда ЗУ будет полностью вынесена из УК, толщина ЗУ будет минимальной. Поэтому при прочих равных условиях в этом случае коэффициент переработки



частиц РВ в ионы должен быть ниже, чем при положении ЗУ внутри УК. И это подтверждается имеющимися данными, полученными для СПД с разной степенью вынесения ЗУ из конструкции двигателя, а также снижением энергетической эффективности ДАС с полностью вынесенной зоной ускорения.

В прикладном плане важным оказалось возникновение “слабо изнашивающихся частей” стенок после второго этапа наработки на ресурс двигателя СПД-100 из-за смещения границ износа и ЗУ в выходном направлении. Этот эффект можно использовать различными способами. Один из них, разрабатывавшийся в России, свелся к тому, чтобы подобрать все факторы, определяющие положение торцов слабо изнашивающихся частей стенок такими, чтобы они сформировались во внешнем относительно реперной плоскости полюсов пространстве на расстоянии от названной плоскости полюсов, достаточном для защиты полюсов от распыления “радиальными” потоками ионов. Эти ионы рождаются в окрестности плоскости среза выходных торцов стенок разрядной камеры практически во всех СПД второго поколения и должны рождаться в двигателях с вынесенной ЗУ из УК. Часть из них имеет энергии, достаточные для распыления элементов конструкции, включая полюса магнитной системы. Для реализации названного подхода необходимо полностью вынести ЗУ из УК так, чтобы при этом анодная граница ЗУ, определяющая положение торцов “слабо изнашивающихся частей” стенок, формировалась на расстоянии от реперной плоскости полюсов, достаточном для защиты полюсов. И, как было показано в статье, работы, выполненные в НИИПМЭ МАИ и в Государственном научном центре Российской Федерации “Исследовательский центр имени М.В. Келдыша”, подтверждают такую возможность, а, следовательно, и возможность существенного повышения ресурса СПД по сравнению с двигателями второго поколения.

Второй подход развивается специалистами США и их последователями в разработках ХД с так называемым “магнитным экранированием” элементов конструкции, ограничивающих УК. Этот подход основан на использовании идеи Морозова “эквипотенциализации” магнитных силовых линий для управления движением ионов с целью создания у стенок эквипотенциалей, предотвращающих попадание на них ускоренных

ионов, и получения полностью слабо изнашивающейся РК с самого начала работы двигателя. Однако как было показано в работах ИАЭ и МАИ ранее, эта идея в одноступенчатых СПД (ХД) не работает. Тем не менее специалистами США в результате многих поисковых исследований удалось найти решения, обеспечивающие возникновение “слабо изнашивающихся частей стенок” с торцами, расположенными в близкой окрестности выходного сечения УК. Эти решения в принципе мало отличаются от того, что уже получалось в двигателе СПД-100 и его аналоге ХД ВРТ 4000, разработанном в США, после их достаточно длительной работы. Кроме того, в двигателях с “магнитным экранированием” не решалась задача выдвижения торцов слабо изнашивающихся частей стенок для обеспечения более длительной защиты ими полюсов. Поэтому найденные ими решения не обеспечивают защиты полюсов от распыления их “радиальными” потоками ионов, и их авторам пришлось защищать полюса дополнительными накладками из стойкого к распылению материала (графита) аналогично тому, как это делалось и делается в ДАС.

Анализ физической природы “магнитного экранирования”, предложенного специалистами США, показывает, что она основана на использовании тех же свойств разряда в СПД (ХД), что были рассмотрены в данной статье, а именно: эффекта смещения анодной границы и всей ЗУ за счет создания “фокусирующего магнитного поля в выходной части УК” и достаточно значительного вынесения области максимальных значений магнитной индукции из УК во внешнее пространство за реперную плоскость полюсов. Таким образом, “магнитное экранирование” фактически сводится к полному вынесению ЗУ из УК, физическая природа которого рассмотрена в данной статье.

К сказанному следует добавить, что в СПД (ХД) и ДАС с полностью вынесенной из УК зоной ускорения анодная граница ЗУ располагается у выходного сечения УК, где силовые линии магнитного поля близки к радиальным. Кроме того, в плазме у анодной границы разрядов СПД и ДАС потенциал и температура электронов близки к максимальным их значениям в ЗУ. Поэтому высокий потенциал должен передаваться вдоль силовых линий к оси двигателя и во внешнее пространство в окрестности плоскости выходного сечения УК в соответствии с формулой Морозова.

Сказанное приводит к тому, что в названных двигателях потенциал вторичной плазмы, образующейся в окрестности выходной плоскости двигателя будет выше по сравнению с получающимся в СПД второго поколения. Следовательно, в двигателях с вынесенной зоной ускорения целесообразна защита не только полюсов от радиальных потоков ионов, но и выходных торцовых их поверхностей от ионов из контактирующей с ними вторичной плазмы накладками или покрытиями из стойких к распылению ускоренными ионами материалов.

В целом приведенные в данной статье результаты свидетельствуют, что за время, прошедшее после первого этапа исследований и разработки УЗДЭ, накоплен достаточно большой объем новой информации о рабочих процессах в этих ускорителях и, в частности, о свойствах электрического разряда в них, знание которых обеспечило значительный прогресс в развитии УЗДЭ и будет полезно при анализе путей и разработке способов дальнейшего их совершенствования.

Авторы считают необходимым также отметить, что в получение рассмотренных в данной статье результатов, кроме уже упомянутых внесли значительный вклад многие другие специалисты ИАЭ, ЦНИИМаш, МАИ, ОКБ “Факел”, ВИАМ и МИРЭА, что лишь частично отражено в публикациях, приведенных в списке литературы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гришин С.Д., Ерофеев В.С., Жаринов А.В. Плазменные ускорители / Ред. Л.А. Арцимович. М.: Машиностроение, 1973. С. 54.
2. Есипчук Ю.В. Плазменные ускорители / Ред. Л.А. Арцимович. М.: Машиностроение, 1973. С. 75.
3. Гришин С.Д., Лесков Л.В., Козлов Н.П. Электрические ракетные двигатели. М.: Машиностроение, 1975. С. 272.
4. Марахтанов М.К. Плазменные ускорители и ионные инжекторы / Ред. Н.П. Козлов и А.И. Морозов. М.: Наука, 1984. С. 264.
5. Козубский К.Н., Мурашко В.М., Рылов Ю.П., Трифонов Ю.В., Ходненко В.П., Ким В.П., Попов Г.А., Обухов В.А. // Физика плазмы. 2003. Т. 29. С. 277.
6. Kim V., Kozubsky K.N., Murashko V.M., Semenkin A.V. // Proc. 30<sup>th</sup> Internat. Electric Propulsion Confer. Florence, 2007. Paper IEP-2007-142.
7. Ким В.П., Семенкин А.В., Хартов С.А. Конструктивные и физические особенности двигателей с замкнутым дрейфом электронов. М.: МАИ, 2016.
8. Юшманов Е.Е. Физика плазмы и проблемы управляемых термоядерных реакций / Ред. М.А. Леонтович. М.: АН СССР, 1958. Вып. 4. С. 235.
9. Ерофеев В.С., Лесков Л.В. Физика и применение плазменных ускорителей / Ред. А.И. Морозов. Минск: Наука и техника, 1974. С. 18.
10. Абдюханов В.А., Гришин С.Д., Ерофеев В.С., Жаринов А.В., Лесков Л.В., Ляпин Е.А., Наумкин В.П., Попов Ю.С., Сафронов И.Н. Ускорители ионов с анодным слоем (обзор). М.: ЦНИИМАШ, 1975. С. 5.
11. Ерофеев В.С., Жаринов А.В., Ляпин Е.А. Плазменные ускорители / Ред. Л.А. Арцимович. М.: Машиностроение, 1973. С. 68.
12. Гусев Ю.Г., Пильников А.В. // Электронный ж-л “Труды МАИ”. Вып. 60. [www.mai.ru/science/trudy](http://www.mai.ru/science/trudy).
13. Solodukhin A.E., Semanin A.V., Tverdokhlebov S.O., Kochergin A.V. // Proc. 27<sup>th</sup> Internat. Electric Propulsion Confer. Pasadena, 2001. Paper IEP-01-32.
14. Garkusha V.I., Lebedev Y.V., Semanin A.V., Zakharenkov L.E. // Proc. 29<sup>th</sup> Internat. Electric Propulsion Confer. Princeton, 2005. Paper IEP-2005-185.
15. Semanin A.V. // Proc. 23<sup>rd</sup> Internat. Electric Propulsion Confer. Seattle, 1993. Paper IEP-93-231.
16. Семенкин А.В. Сборник научных трудов ЦНИИМаш. Королев., 2006. С. 93.
17. Garkusha V., Kochergin A., Semanin A., Tverdokhlebov S. // Proc. 25<sup>th</sup> Internat. Electric Propulsion Confer. Cleveland, 1997. Paper IEP-1997-106.
18. Semanin A., Tverdokhlebov S., Solodukhin A., Zakharenkov L. // Proc. Internat. Electric Propulsion Confer. Florence, 2007. Paper IEP-2007-128.
19. Морозов А.И. Исследование стационарного электромагнитного ускорения плазмы: Дис. ... д-ра физико-математич. наук. М.: ИАЭ им. И.В. Курчатова, 1965.
20. Морозов А.И. // ДАН. 1965. Т. 163. С. 1363.
21. Salz A., Meyerand R., Lary E. // Bull. American Phys. Soc. 1962. Ser. 11. V. 8. P. 441.
22. Seikel G., Reshotko E. // Bull. American Phys. Soc. 1962. Ser. 11. V. 7. P. 414.
23. Lary C., Meyerand R.G., Glastonbury Jr., Salz F. // USA patent # 3 155 858. Nov. 3, 1964.
24. Ким В.П. // ЖТФ. 2015. Т. 85. С. 45.
25. Janes G.S., Dotson J. // Proc. 5<sup>th</sup> Sympos. eng. aspects magnetohydrodynamics. Massachusetts Inst. Techn., Camdridge, Mass. 1964. P. 235.
26. Janes G., Lowder R. // Phys. Fluids. 1966. V. 9. P.1115.
27. Арцимович Л.А., Андронов И.М., Есипчук Ю.В., Барсуков Н.А., Козубский К.Н., Левченко Ю.М., Михайличенко В.А., Морозов А.И., Петров Е.М., Романовский М.К., Рылов Ю.П., Снгарский Р.К., Тилинин Г.Н., Трифонов Ю.В., Трофимов А.В., Ход-

- ненко В.П., Шаров Ю.А., Щепкин Г.Я. // Космические исслед. 1974. Т. 12. С. 451.
28. Архипов А.С., Ким В.П., Сидоренко Е.К. Стационарные плазменные двигатели Морозова. М.: МАИ, 2012.
  29. Морозов А.И. Плазменные ускорители / Под ред. Л.А. Арцимовича. М.: Машиностроение, 1973. С. 85.
  30. Морозов А.И., Есипчук Ю.В., Капулкин А.М., Невровский В.А., Смирнов В.А. // ЖТФ, 1973. Т.43. Вып. 5. С. 972.
  31. Ким В.П., Попов Г.А., Шилов Е.А., Козубский К.Н., Приданников С.Ю. // Космическая техника и технологии. 2023. № 4(43). С. 55.
  32. Dan L., Myers R.M., Lemmer K.M., Kolbeck J., Keidar M., Koizumi H., Liang H., Yu D., Schönherr T., del Amo J.G., Choe W., Albertoni R., Hoskins A., Yan Sh., Hart W., Hofer R.R., Funaki I., Lovtsov A., Polzin K., Olshanskii A., Duchemin O. IEP-2017 // Proc. 35th Internat. Electric Propulsion Confer. Atlanta, 2017. Paper -242.
  33. Абраменков Г.В., Вертаков Н.М., Дронов П.А. Каплин М.А., Приданников С.Ю. // Космическая техника и технологии. 2023. № 4 (43). С. 36.
  34. Демьяненко В.Н., Зубков И.П., Лебедев С.В., Морозов А.И. Препринт ИАЭ. № 2934. М.: ИАЭ, 1967.
  35. Бугрова А.И., Версоцкий В.С., Харчевников В.К. // ЖТФ. 1980. Т. 50. С. 2238.
  36. Бишаев А.М., Ким В.П. // ЖТФ. 1978. Т. 48. С. 1853.
  37. Бишаев А.М., Ким В.П. // Источники и ускорители плазмы. Харьков: ХАИ, 1981. № 5. С. 3.
  38. Ким В.П. // Физика плазмы. 2017. Т. 43. С. 406.
  39. Морозов А.И. // ПМТФ. 1968. № 3. С. 19.
  40. Егоров В.В., Ким В.П., Семенов А.А., Шкарбан И.И. Ионные инжекторы и плазменные ускорители / Ред. А.И. Морозов и Н.Н. Семашко. М.: Энергоатомиздат, 1990. С. 56.
  41. Морозов А.И., Есипчук Ю.В., Тилинин Г.Н., Трофимов А., Шаров Ю.А., Щепкин Г.Я. // ЖТФ. 1972. Т. 42. С. 54.
  42. Морозов А.И., Есипчук Ю.В., Капулкин А.М., Невровский В.А., Смирнов В.А. // ЖТФ. 1973. Т. 43. С. 972.
  43. Есипчук Ю.В., Тилинин Г.Н. // ЖТФ. 1976. Т. 46. С. 718.
  44. Тилинин Г.Н. // ЖТФ. 1977. Т. 47. С. 1684.
  45. Белан Н.В., Ким В.П., Оранский А.И., Тихонов В.Б. Стационарные плазменные двигатели. Харьков: ХАИ, 1989.
  46. Бугрова А.И., Ким В.П. Плазменные ускорители и ионные инжекторы / Ред. Н.П. Козлов и А.И. Морозов. М., 1984. С. 107.
  47. Kim V. // J. Propulsion Power. 1998. V. 14. P. 736.
  48. Приданников С.Ю. Исследование характеристик стационарных плазменных двигателей при длительной работе: Дис. ... канд. техн. наук. Калининград: Российский государственный университет, 2003.
  49. Mitrofanova O.A., Gnizdor R.Yu. // Proc. 33rd Internat. Electric Propulsion Confer. Washington, D.C., 2013. Paper IEP-2013-51.
  50. Ким В.П., Гниздор Р.Ю., Ермошкин Ю.М., Меркурьев Д.В., Приданников С. Ю. // Поверхность. 2018. № 3. С. 18.
  51. Гаркуша В.И., Лесков Л.В., Ляпин Е.А. Плазменные ускорители и ионные инжекторы / Ред. А.И. Морозов, Н.Н. Семашко. М.: Наука, 1984. С. 129.
  52. Ляпин Е.А., Семенкин А.В. Ионные инжекторы и плазменные ускорители / Ред. А.И. Морозов, Н.Н. Семашко. М.: Энергоатомиздат, 1990. С. 20.
  53. Семенкин А.В. // Космонавтика и ракетостроение. М.: ЦНИИМАШ, 2004. Вып. 1(34). С. 5.
  54. Mikellides I.G., Katz I., Hofer R.R., Goebel D.M., de Grys K., Mathers A. // Phys. Plasmas. 2011. V. 18. P. 033501.
  55. Hofer R., Kamhawi H., Herman D., Polk J., Snyder J., Mikellides I., Huang W., Myers J., Yim J., Williams G., Ortega A., Jorns B., Sekerak M., Griffiths Ch., Shastry R., Haag Th., Verhey T., Gilliam B., Katz I., Goebel D., Anderson J., Gilland J., Clayman L. // Proc. 30th Internat. Symp. Space Technology and Science and 34th Internat. Electric Propulsion Confer. and 6th Nano-satellite Symp. Kobe, 2015. Paper IEP-2015-186 / ISTS-2015-b-186.
  56. Conversano R.W., Goebel D.M., Hofer R.R., Mikellides I.G., Katz I., Wirz R.E. // Proc. 30th Internat. Symp. Space Technology and Science and 34th Internat. Electric Propulsion Confer. and 6th Nano-satellite Symp. Kobe, 2015. Paper IEP-2015-100 / ISTS-2015-b-100.
  57. Ким В.П., Архипов А.С., А. М. Бишаев А. М., Меркурьев Д. В., Сидоренко Е. К. // Физика плазмы. 2014. Т. 40. С. 937.
  58. Lobb R.B., Ortega A.L., Reilly S., Conversano R.W., Mikellides I.G. // Proc. 36th Internat. Electric Propulsion Confer. Vienna, 2019. Paper IEP-2019-298.
  59. Морозов А.И. Плазменные ускорители / Ред. Л.А. Арцимович. М.: Машиностроение, 1973. С. 85.
  60. Janhunen S., Smolyakov A., Chapurin O., D. Sydorrenko D., Kaganovich I., Raitses Ye. // Phys. Plasmas. 2018. V. 25. P. 011608.
  61. Boeuf P. // Phys. Plasmas. 2019. V. 26. P. 072113. Doi: 10.1063/1.510216.
  62. Taccogna F., Garrigues L. // Revs. Modern Plasma Phys. 2019. V. 3. P. 12. Doi: 10.1007/s41614-019-0033-113.
  63. Chernyshev T., Krivoruchko D. // Plasma Sources Sci. Technol. 2022. V. 31. P. 015001. Doi: 10.1088/1361-6595/ac4179.
  64. Ким В.П., Гниздор Р.Ю., Грдличко Д.П., Меркурьев Д.В., Митрофанова О.А., Смирнов П.Г., Шилов Е.А., Захарченко В.С. // Поверхность. 2018. № 12. С. 101.



65. *Shashkov A.S., Lovtsov A.S.* // Proc. 36th Internat. Electric Propulsion Confer., Vienna, 2019. Paper IEPC-2019-392.
66. *Goebel D.N.* Hall thruster with magnetic discharge chamber and conductive coatings. US patent No. 10,082,133 B2 dated Sep.25, 2018.
67. *Sekerak M.J., Hofer R., Polk J.E, Jorns B.A, I.G. Mikelides I.G.* // Proc. 30th Internat. Symp. Space Technology and Science 34th Internat. Electric Propulsion Confer. and 6th Nano-satellite Symp. Hyogo-Kobe, Japan, 2015. Paper IEPC-2015-155/ ISTS 2015-b-155.

## PHYSICAL PRINCIPLES AND MAIN RESEARCH RESULTS DETERMINING THE DEVELOPMENT OF THRUSTERS WITH CLOSED ELECTRON DRIFT

**V. P. Kim<sup>a,\*</sup>, A. V. Semenkin<sup>b</sup>, and E. A. Shilov<sup>a</sup>**

<sup>a</sup>*Research Institute of Applied Mechanics and Electrodynamics,  
Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993, Russia*

<sup>b</sup>*Keldysh Research Center, Roscosmos, Moscow, 125438, Russia*

<sup>\*</sup>*e-mail: riame4@mai.ru*

The paper presents the results of many years of research carried out in various organizations of the USSR and Russia in the process of developing thrusters with anode layer (TALs) and stationary plasmathrusters (SPTs). They are known under the general name “thrusters with closed electron drift” (TCEDs), since they are developed on the basis of plasma ion accelerators with closed electron drift (ACEDs). TCEDs have come a long way in development. As a result, the SPT has become one of the most widely used electric rocket thrusters (ERTs) and continues to develop. The TAL development has also reached a fairly high level and is close to practical use. Therefore, here we consider the main physical principles and research results that determined the progress in the SPT and TAL development with the aim of their analysis and generalization, as well as assessment of their applicability for further development such thrusters. A brief overview of the main stages of the SPT and TAL development and the results achieved at these stages are given. It is shown that the main problem of their further development is to ensure both high thrust efficiency and a long service life. It is also shown that the main factor limiting the service life of TALs and SPTs is the ingress of accelerated ions onto their structure elements; therefore, in order to control the ion motion, it is first of all necessary to understand the patterns of electric field formation in TCED discharges. New properties of TCED discharges and the peculiarities of electric field formation are revealed and their known properties are clarified, which determine the thickness and position of the acceleration zone with the main potential drop in the discharge and the flows of accelerated ions onto the thruster structure elements. The methods of controlling the thickness and position of the acceleration zone in an TCED by varying the magnetic field characteristics, successfully tested at the second stage of the SPT and TAL development, are considered and analyzed. It is shown that these methods make it possible to effectively control the operation of an TCED and its characteristics, and physical conditions ensuring the efficiency of their application are determined. Physical conditions for the implementation and justification of the feasibility of completely removing the acceleration zone from the thruster as the main direction of modern TCED development are determined, taking into account the analysis of the properties of the discharge and the peculiarities of electric field formation in an TCED. The main conclusions on the issues considered are given.

**Keywords:** thrusters with closed electron closed drift, thrusters with anode layer, stationary plasma thruster, properties of electric discharge, control of working processes