

Конструктивные признаки и особенности рабочих процессов в современных стационарных плазменных двигателях Морозова

© В.П. Ким

Научно-исследовательский институт прикладной механики и электродинамики,
Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
125080 Москва, Россия
e-mail: riame4@sokol.ru

(Поступило в Редакцию 23 апреля 2014 г. В окончательной редакции 7 мая 2014 г.)

Приведены некоторые сведения из истории начального этапа разработки стационарных плазменных двигателей (СПД) и двигателей с анодным слоем, а также конструктивные схемы современных опытных и летных образцов СПД, выделены основные конструктивные признаки, характеризующие эти образцы, и обусловленные ими особенности рабочих процессов в двигателе. Рассмотрены также основные идеи А.И. Морозова, которые были заложены при разработке первых моделей СПД, и их влияние на формирование упомянутых признаков. Показано, что отдельные из названных идей подверглись заметной трансформации по мере практической разработки двигателей, что является естественным для развития любого вида техники.

Введение

Стационарный плазменный двигатель (СПД) Морозова — это космический электроракетный двигатель (ЭРД), созданный в СССР на основе плазменного ускорителя с замкнутым дрейфом электронов и протяженной зоной ускорения (УЗДП). Впервые он был испытан в космосе в 1972 г., т.е. более 40 лет назад [1], и с тех пор успешно используется в составе отечественных космических аппаратов (КА). С 2004 г. началось применение российских СПД и в составе зарубежных космических аппаратов [2,3], что свидетельствует о достаточно высоком техническом уровне этого отечественного ЭРД, созданного благодаря комплексу исследований и разработок, выполненных еще в СССР [4] и продолженных в России. Поэтому представляет интерес рассмотреть основные признаки современного СПД как технического устройства и связанные с ними физические особенности этих двигателей, сложившиеся по мере их разработки.

1. Краткие сведения о разработке плазменных ускорителей с замкнутым дрейфом электронов в СССР

В СССР было разработано два типа плазменных ускорителей, названных ускорителями с замкнутым дрейфом электронов (УЗДЭ) [5,6]:

— УЗДЭ с „узкой“ зоной ускорения или ускоритель с анодным слоем (УАС);

— УЗДЭ с „протяженной“ зоной ускорения (УЗДП).

Как уже отмечалось, СПД был разработан на основе УЗДП, а на основе УАС был создан двигатель с анодным слоем (ДАС). Оба назывались также двигателями с

замкнутым дрейфом электронов (ДЗДЭ). Для рассмотренных двигателей в СССР и России использовались и некоторые другие названия, но более распространенными были приведенные выше.

Из вышеназванных двигателей первым был предложен ДАС. Его разработкой в конце 1950-х годов начал заниматься сотрудник отдела плазменных исследований (ОПИ) института атомной энергии (ИАЭ) им. И.В. Курчатова Аскольд Владимирович Жаринов [4]. В этот период им с помощью других сотрудников ИАЭ был создан безэлектродный ускоритель ленточного пучка ионов водорода с энергией ионов до 30 keV, в котором ускорение ионов происходило электрическим полем в поперечном по отношению к направлению ускорения магнитном поле в слое плазмы с электронами, движущимися поперек направлений ускорения и магнитного поля и вращающимися в магнитном поле вокруг источника ионов по квазизамкнутым траекториям. На основе упомянутых работ А.В. Жариновым была подана заявка и получено авторское свидетельство СССР № 24371 с приоритетом 23.12.1961 г. на изобретение ДАС [4]. В то время эти работы были закрытыми, и в открытой печати результаты теоретических работ начали публиковаться лишь с 1967 г. [7], а результаты экспериментальных работ — с 1972–1973 гг. (см., например, [5]). Принципиальная схема предложенного Жариновым ДАС понятна из рис. 1, где 1 — источник ионов, 2 — магнитная система, создающая радиальное магнитное поле в кольцевом ускорительном канале, 3 — источник напряжения, создающий электрическое поле в ускорительном канале.

Согласно упомянутому изобретению индукция магнитного поля в зоне ускорения должна была быть такой, чтобы ларморовский радиус электронов был существенно меньше длины ускорительного канала. Поэтому электроны должны были дрейфовать в продольном электрическом с напряженностью E и радиальном магнитном с индукцией B („скрещенных“) полях в ази-

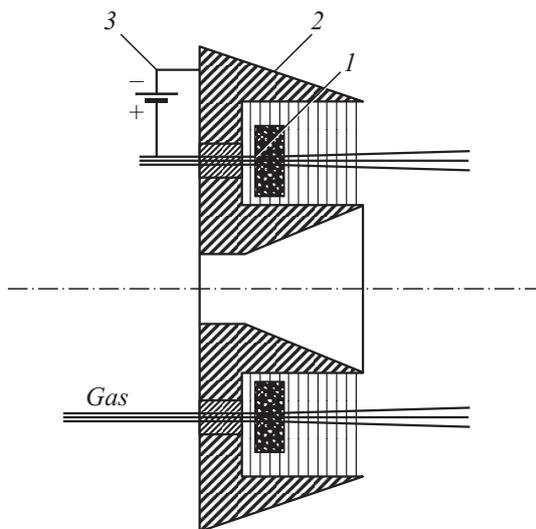


Рис. 1. Принципиальная схема ДАС, предложенная А.В. Жариновым.

мутальном ($\mathbf{E} \times \mathbf{V}$) направлении, формируя замкнутый „холловский“ ток. Кроме того, индукция магнитного поля в зоне ускорения должна была быть такова, чтобы магнитное поле слабо влияло на движение ионов. Поэтому они должны были ускоряться электрическим полем преимущественно в продольном направлении.

А.В. Жаринов предложил руководству ИАЭ развивать работы по ДАС, однако это предложение поддержано не было. Поэтому в 1962 г. он перешел на работу в центральный научно-исследовательский институт машиностроения (ЦНИИМАШ), где в отделении, возглавляемом профессором С.Д. Гришиным, под непосредственным руководством А.В. Жаринова были начаты практические разработки ДАС. И уже к концу 1960-х годов в ЦНИИМАШ были созданы и испытаны мощные и достаточно эффективные лабораторные модели ДАС [4,5,8]. Работы по исследованиям и разработке ДАС продолжались в СССР и России и до последнего времени, и они дали ряд значительных результатов в части совершенствования схемы и конструкции двигателя и повышения его характеристик [3,4].

Разработка принципиальной схемы СПД или УЗДП в СССР была также начата в ОПИ ИАЭ им. И.В. Курчатова в 1962 г. под руководством сотрудника этого института Алексея Ивановича Морозова в лаборатории, начальником которой являлся Герман Яковлевич Щепкин [4,9]. Основной идеей Морозова было ускорение ионов электрическим полем, созданном с помощью магнитного поля в протяженном слое плазмы, и реализация фокусировки ускоряемых ионов путем создания фокусирующей геометрии эквипотенциалей электрического поля с использованием соответствующей геометрии силовых линий магнитного поля и выравнивания потенциала вдоль силовых линий магнитного поля за счет относительно свободного перемещения электронов вдоль этих линий [9]. В 1964 г. в упомянутой лабо-

ратории была создана первая, достаточно эффективная лабораторная модель УЗДП (Е-1), а к 1968 г. были созданы радиационно-охлаждаемые модели этого ускорителя, которые можно было рассматривать в качестве прототипов космических двигателей [4]. Эти модели обладали тяговой эффективностью до 30–35% при работе на инертных газах (Xe, Kr) при мощностях двигателя ~ 1 kW и среднемассовых скоростях истечения потока плазмы из них до 18 km/s [4]. Такой уровень тяговых характеристик был достаточно привлекательным для того времени, названных рабочих газов, диапазона мощностей и скоростей истечения. Больше того, достигнутый уровень тяговой эффективности при скоростях истечения рабочего тела из двигателя 12–14 km/s обеспечивал возможность получения тяги при относительно небольших затратах мощности (примерно 200 W за 1 g силы тяги или 20 kW/N). Это обеспечивало возможность применения СПД уже при энерговооруженности КА ~ 1 kW на тонну массы КА, достигнутой к началу 1970-х годов для отечественных КА. Названные скорости истечения в 3–5 раз превышали скорости истечения лучших химических ракетных двигателей, что определяло перспективность применения СПД в качестве космического ракетного двигателя. С учетом отмеченного в 1968 г. А.И. Морозов вышел на руководство ИАЭ с инициативой проведения летных испытаний СПД в космосе аналогично тому, как это было осуществлено ранее с импульсными плазменными двигателями [10]. Эта инициатива была поддержана руководителем ОПИ ИАЭ академиком Л.А. Арцимовичем, директором ИАЭ академиком А.П. Александровым, а затем и директором Всесоюзного научно-исследовательского института электромеханики (ВНИИЭМ), главным конструктором искусственных спутников земли типа „Метеор“ академиком А.Г. Иосифьяном и руководителем управления опытно-конструкторских работ государственного комитета СССР по атомной энергии профессором Ю.И. Даниловым [4]. В результате было принято решение о проведении первых летных испытаний СПД в составе ИСЗ „Метеор“. К подготовке и проведению этих испытаний в течение 1969–1972 г. были привлечены сотрудники ИАЭ, ВНИИЭМ, опытного конструкторского бюро „Заря“ и его филиала в г. Калининграде (обл.) — ныне Опытное конструкторское бюро „Факел“ [4]. В результате их работы в конце декабря 1971 г. ИСЗ „Метеор“ разработки ВНИИЭМ с экспериментальной двигательной установкой „Эол“ с двумя СПД был запущен в космос, а в течение 1972 г. были проведены первые, очень успешные испытания СПД в космосе [1,4]. Достаточно сказать, что уже в процессе этих испытаний в результате работы одного из двигателей с тягой около 2 g силы в течение 170 h была изменена высота орбиты ИСЗ „Метеор“ с массой более 1 t на 17 km, и он был переведен на условно-синхронную орбиту, благоприятную для привязки метеорологической информации. Таким образом, уже в процессе первых испытаний СПД в космосе с его помощью была решена практическая задача.

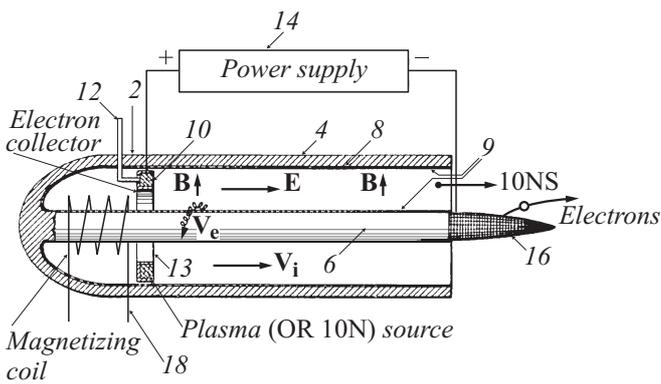


Рис. 2. Двигатель по патенту США № US 3 155 858.

Проведенные испытания по существу означали рождение нового космического ЭРД и дали толчок развитию работ по СПД в ИАЭ, опытном конструкторском бюро (ОКБ) „Факел“ и в ряде других организаций [4]. За прошедшее с тех пор время в СССР, а затем и в России были выполнены достаточно обширные исследования физических процессов в СПД и комплекс прикладных исследований по совершенствованию организации процессов в нем с целью повышения эффективности, увеличения ресурса и повышения надежности двигателей [2,4]. Это позволило создать физико-технические основы их проектирования и создания как изделий космической техники, разработать и создать серию летных образцов двигателей этого типа, в том числе, широко известный двигатель СПД-100, который успешно используется не только в отечественной, но и в зарубежной космической технике и до настоящего времени признается лучшим двигателем своего класса в мире.

Следует отметить, что работы по двигателям, аналогичным СПД, проводились в начале 1960-х годов и в США. Так, одна из первых заявок на изобретение двигателя, аналогичного СПД, была подана в США в 1962 г., и в 1964 г. был получен соответствующий патент на „устройство для ускорения ионов“ [11]. В течение 1960-х годов был выполнен также ряд теоретических и экспериментальных работ по этим двигателям (см., например, [12–16]).

Согласно упомянутой заявке, был предложен ускоритель (рис. 2, [11]), в котором так же, как и в ДАС, предполагалось ускорение ионов, произведенных в источнике ионов 10, в скрещенных электрическом и магнитном полях, созданных в кольцевом ускорительном канале. При этом, как и в ДАС, предполагалось за счет подбора индукции магнитного поля, обеспечивающей замагниченность электронов и их электрический дрейф в азимутальном направлении, создавать значительный объемный заряд электронов, нейтрализующий объемный заряд ионов. Кроме того, индукция магнитного поля должна была быть такой, чтобы магнитное поле мало влияло бы на движение ионов. Для обеспечения возможности создания продольного электрического поля

в ускорительном канале предполагалось покрытие его стенок диэлектриком.

На рис. 2: 2, 4, 6 — элементы магнитной системы, 8 — ускорительный канал, 9 — слой диэлектрика, 10 — пористая вставка-ионизатор, 12 — трубка подвода рабочего вещества в ионизатор, 13, 14 — источник напряжения, 16 — источник электронов, 18 — катушка намагничивания.

Приведенные факты поражают тем, как похожие идеи зарождались и разрабатывались в разных странах почти одновременно, несмотря на то, что обмен информацией между ними в то время был ограниченным. Сопоставляя известные данные, можно также заключить, что работы по ДАС начались в СССР раньше, чем где бы то ни было. Работы же по двигателям типа СПД были начаты в СССР и США практически одновременно. Далее, судя по исчезновению соответствующих публикаций во второй половине 1960-х г., работы по этим двигателям в США были прекращены вплоть до начала 1990-х г., вероятнее всего, с учетом невысокой тяговой эффективности первых моделей СПД и под влиянием значительного прогресса в разработке ионных двигателей, достигнутого в этот период в США. Отдельные работы по двигателям со схемами, похожими на схемы СПД и ДАС, были выполнены в конце 1960-х—начале 1970-х г. и в Европе (см., например, [17]), но скоро они были также прекращены. Поэтому достаточно длительный период времени работы по СПД и ДАС проводились только в СССР и, как уже отмечалось, были достигнуты достаточно хорошие прикладные результаты. После их опубликования в открытой печати в начале 1990-х г. резко повысился интерес к СПД и ДАС за рубежом, и в настоящее время их исследования и разработки представляют собой одно из лидирующих направлений в области ЭРД в мире. При этом в США и Франции достигнуты значительные результаты и в практических разработках. Достаточно сказать, что во Франции при участии Российского ОКБ „Факел“ создан СПД типа PPS-1350, который был использован Европейским космическим агентством для перевода исследовательского космического аппарата (КА) Smart-1 с околоземной на окололунную орбиту [18], а в США разработан и квалифицирован для летного применения СПД типа ВРТ 4000, который в 2010–2011 г. решил задачу до выведения КА АЕНФ-1 с аварийной промежуточной орбиты на рабочую геостационарную орбиту [19].

Прогнозы развития СПД свидетельствуют о том, что их применение в ближайшие годы будет расширяться. Поэтому будут разрабатываться новые двигатели для решения новых задач, работающие на новых режимах и обеспечивающие получение новых диапазонов выходных параметров. Так что СПД будет оставаться объектом повышенного интереса специалистов как по исследованию физических процессов, так и по их разработке и применению. Поэтому представляется полезным рассмотреть технические признаки, характеризующие современные СПД, и связанные с ними физические особенности основных процессов в них.

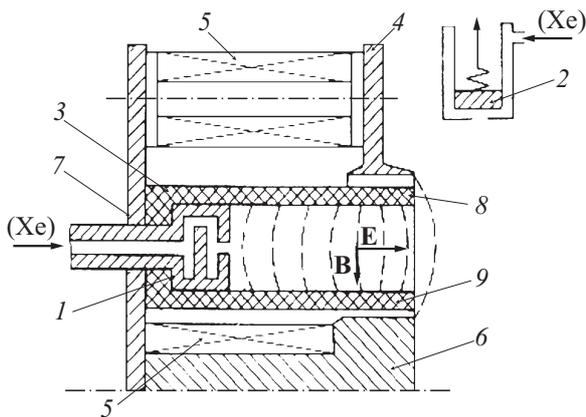


Рис. 3. Принципиальная схема СПД.

2. Принципиальная схема и основные конструктивные признаки современных СПД

Принципиальная схема СПД описана во многих работах. Поэтому ниже приведено лишь краткое ее описание. Типичный СПД (рис. 3) включает в себя анод 1, катод 2, диэлектрическую (керамическую) разрядную камеру 3, магнитную систему с наружным полюсом 4, катушками намагничивания 5, внутренним полюсом 6 и магнитопроводом 7. Выходные участки стенок 8, 9 разрядной камеры обычно располагаются в межполюсном зазоре.

В разрядной камере выполняется кольцевой ускорительный канал, в глубине которого размещается кольцевой анод, который, как правило, служит и для организации подачи и равномерного распределения потока рабочего газа (например, ксенона) в ускорительном канале. Катод располагается вне ускорительного канала и в двигательном исполнении представляет собой газоразрядный источник электронов на основе полого катода с эмиттером электронов, подогреваемым при запуске двигателя.

В ускорительном канале с помощью магнитной системы создаются преимущественно радиальное магнитное и преимущественно продольное электрическое поля путем приложения постоянного напряжения между анодом и катодом. В электрическом разряде в скрещенных электрическом и магнитном полях, который инициируется и поддерживается между анодом и катодом в потоке газа, движущемся в ускорительном канале и в катоде, удается достаточно эффективно ионизировать атомы (или молекулы) газа, поступающего в ускорительный канал обычно через анод, а также ускорить образовавшиеся ионы электрическим полем, созданным в плазме названного разряда.

Ионизация атомов рабочего газа осуществляется электронами, поступающими в разряд из катода и вновь образовавшимися в разряде. Ускоряемый ионный поток истекает из ускорителя и нейтрализуется второй частью электронов, поступающих в него из катода. В процессе

ускорения ионов создается реактивная тяга, которую можно использовать для перемещения объектов в космосе.

В работе [20] авторами были рассмотрены основные идеи А.И. Морозова, относящиеся к разработке СПД, и отмечалась его исключительная роль в разработке принципиальной его схемы и в продвижении СПД в космическую технику. В результате было предложено называть СПД стационарными плазменными двигателями Морозова. В настоящей работе этот вопрос рассмотрен более полно с тем, чтобы показать, что из названных идей сохранилось, а что потребовало дальнейшего развития или пересмотра.

Как уже отмечалось выше, А.И. Морозов предложил использовать протяженную зону ускорения и „фокусирующую“ геометрию силовых линий магнитного поля для создания соответствующей геометрии эквипотенциалов электрического поля. Поэтому для обеспечения протяженности зоны ускорения стенки ускорительного канала было предложено выполнять диэлектрическими. Использование диэлектрических стенок, ограничивающих ускорительный канал, предполагалось также для снижения температуры электронов в нем за счет повышенной вторичной электрон-электронной эмиссии таких стенок и замены „горячих“ электронов из плазмы при попадании их на стенки вторичными электронами с пониженной температурой электронов. Снижение температуры электронов в ускорительном канале должно было уменьшать отклонение эквипотенциалов электрического поля от силовых линий магнитного поля в соответствии с предложенной Морозовым же формулой „термализованного“ потенциала [21], которую для наглядности можно переписать следующим образом:

$$\Delta\varphi(\gamma) \approx -\frac{kT_e(\gamma)}{e} \ln \frac{n_0(\gamma)}{n(\gamma)}, \quad (1)$$

где $kT_e(\gamma)$, e , $\Delta\varphi(\gamma)$, $n_0(\gamma)$, $n(\gamma)$ соответственно, температура и заряд электронов, изменение потенциала вдоль силовой линии магнитного поля с индексом γ при переходе от точки с максимальной концентрацией плазмы $n_0(\gamma)$ на той же линии к точке с текущей концентрацией $n(\gamma)$.

Предполагалось также, что, как и в ДАС, электроны должны быть „замагниченными“, т.е. среда в зоне ускорения должна быть разреженной, а магнитное поле должно быть выбрано таким, чтобы выполнялись условия

$$\omega_e \tau_e \gg -1, \quad (2)$$

$$R_{Li} \gg L \gg R_{Le}, \quad (3)$$

где ω_e , τ_e — соответственно циклотронная частота и время между столкновениями электрона с другими частицами, R_{Li} , R_{Le} — ларморовские радиусы ионов и электронов при характерных их энергиях в зонах ускорения, L — характерный продольный размер зоны ускорения.

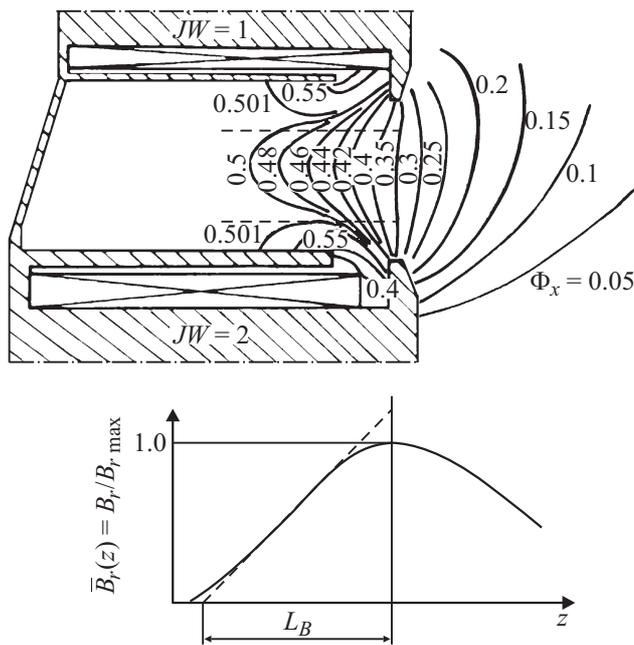


Рис. 4. Картина силовых линий магнитного поля в одной из магнитных систем (верхняя часть рисунка) и распределение радиальной составляющей индукции магнитного поля вдоль срединной поверхности ускорительного канала (нижняя часть рисунка), показанного штриховой линией на верхней части рисунка.

Ожидалось, что в этих условиях продольная (вдоль электрического поля) составляющая электронного тока должна быть мала.

Следует отметить, что создание фокусирующей геометрии силовых линий магнитного поля (рис. 4) приводит к созданию неравномерного распределения индукции магнитного поля в ускорительном канале. И если „фокусирующая“ геометрия создана в прианодной области, где предполагалось организовать ионизацию рабочего газа, то магнитная индукция будет нарастать по мере перемещения от анода к выходному сечению, по крайней мере, в части ускорительного канала.

В связи с этим Морозовым было показано [22], что нарастание индукции магнитного поля вдоль направления ускорения повышает стабильность ускоряемого потока, и в простейшем виде критерий стабильности может быть сформулирован в следующем виде:

$$\frac{\partial B_r(z)}{\partial z} > 0, \tag{4}$$

где $B_r(z)$ — радиальная составляющей индукции магнитного поля на срединной поверхности ускорительного канала в сечении с продольной координатой z .

Первые же эксперименты с лабораторными моделями СПД как в СССР, так и в США [6,14,15] показали, что электронная составляющая разрядного тока велика и значительно превышает величину, обусловленную рассеянием дрейфующих электронов на ионах. Из-за этого

тяговая эффективность первых моделей СПД составляла не более 30–35%, т.е. была невысока. Позже было осознано, что заметную роль может играть рассеяние дрейфующих электронов на атомах, концентрация которых значительно превышает концентрацию ионов в большей части ускорительного канала [23]. С учетом этого было введено понятие „аномальной“ подвижности и проводимости электронов поперек магнитного поля в СПД. В США, а затем и в СССР, для объяснения этого эффекта был использован механизм увеличения поперечной подвижности электронов за счет влияния плазменных неустойчивостей на нее [6,15], а Морозовым был предложен механизм пристеночной проводимости [24]. Суть его состоит в том, что при взаимодействии с диэлектрической стенкой дрейфующие электроны, как и при взаимодействии с тяжелыми частицами, могут рассеять дрейфовую составляющую скорости. Например, если дрейфующий электрон при столкновении со стенкой заменяется вторичным электроном, то эта замена эквивалентна тому, что электрон потерял дрейфовую составляющую скорости и начинает движение по новой траектории. Это будет приводить к смещению его траектории на величину порядка ларморовского радиуса электрона в направлении действия на него электрического поля. Можно показать также, что рассеяние дрейфовой составляющей скорости электронов возможно и в упругом рассеянии электронов от шероховатой стенки [23].

Продольная составляющая плотности j_{ez} электронного тока, обусловленного пристеночной проводимостью, может быть оценена в предположении максвелловского распределения электронов по скоростям, по следующему соотношению:

$$j_{ez} \approx (nV_e)_w k_2 R_{Le} e, \tag{5}$$

где $(nV_e)_w$, k_2 , R_{Le} , e — соответственно поток электронов, достигающий стенки из пристеночного слоя плазмы и взаимодействующий с ней, коэффициент, учитывающий величину среднего смещения траектории электронов после соударения со стенкой относительно ларморовского радиуса электронов и заряд электрона.

Величина $(nV_e)_w$ зависит от концентрации и функции распределения электронов по скоростям в пристеночном слое плазмы, величины пристеночного скачка потенциала, а также от возможных колебаний этого скачка во времени, коэффициента вторичной электронной эмиссии, шероховатости стенки и т.д. [25]. Поэтому точно рассчитать его достаточно сложно. Сложно также определить, какова средняя величина результирующего смещения электронов при соударении его со стенкой. С помощью простейших оценок с учетом стандартного смещения потенциала на диэлектрической стенке при максвелловской функции распределения электронов по скоростям при равенстве потоков ионов и электронов на нее и предположении о замене первичных электронов вторичными, можно получить значения поперечной подвижности электронов, превосходящие наблюдаемую аномальную подвижность электронов в ускорительном

канале. Это свидетельствует о том, что вклад пристеночной проводимости может быть значителен. Однако с учетом малых размеров пристеночных слоев и сложности происходящих при столкновении электронов со стенками процессов и их диагностики до настоящего времени не получены соотношения, позволяющие с необходимой для инженерных целей точностью рассчитывать пристеночный электронный ток. Аналогичное заключение, несмотря на значительное число выполненных и интересных исследований, можно сделать и относительно влияния плазменных неустойчивостей на перенос электронов поперек магнитного поля. Поэтому при разработке численных моделей процессов в ускорительном канале обычно используют поправочные коэффициенты, позволяющие получить близкую к наблюдаемой поперечную подвижность электронов и за счет этого добиться сходимости расчетных и экспериментальных данных.

В практическом плане важно то, что, согласно имеющимся данным [26], даже при значительной величине продольного электронного тока в СПД эффективное значение параметра Холла $(\omega_e \tau_e)_{\text{eff}} = j_H / j_{ez}$, где j_H , j_{ez} — соответственно азимутальная и продольная составляющие плотности электронного тока, в СПД составляет 200–300, т.е. достаточно велико. В ДАС оно должно быть еще больше в силу меньшей интенсивности взаимодействия электронов со стенками. Поэтому усредненные траектории электронов в кольцевом ускорительном канале являются почти замкнутыми. Это является специфической чертой СПД и ДАС, определившей одно из их названий в отечественной литературе как двигателей с замкнутым дрейфом электронов.

Важно также то, что типичная протяженность зоны ускорения в СПД, т.е. области со значительной напряженностью электрического поля, на типичных режимах работы двигателя составляет величину порядка 1 см и существенно превышает радиус Дебая. Поэтому плазму даже в зоне ускорения можно считать квазинейтральной. То, что ускорение осуществляется в условиях квазинейтральности, существенно ослабляет влияние объемного заряда ионов на их движение. Поэтому в зонах ускорения СПД и ДАС практически не наблюдается ограничения плотности тока ускоряемых ионов их пространственным зарядом. В результате в них удается получать существенно большие плотности ионного тока при значительно меньших разностях потенциалов и значительно больших ускоряющих промежутках, чем в классических электростатических системах.

Параллельно с отмеченными работами Морозова экспериментаторами в начале 1970-х г. была обнаружена возможность значительного повышения тяговой эффективности моделей СПД с повышенной скоростью нарастания индукции магнитного поля от анода к срезу ускорительного канала [4]. Совокупность отмеченных идей и результатов послужила основой для совершенствования схемы и конструкции СПД в СССР путем создания технических средств, обеспечивающих

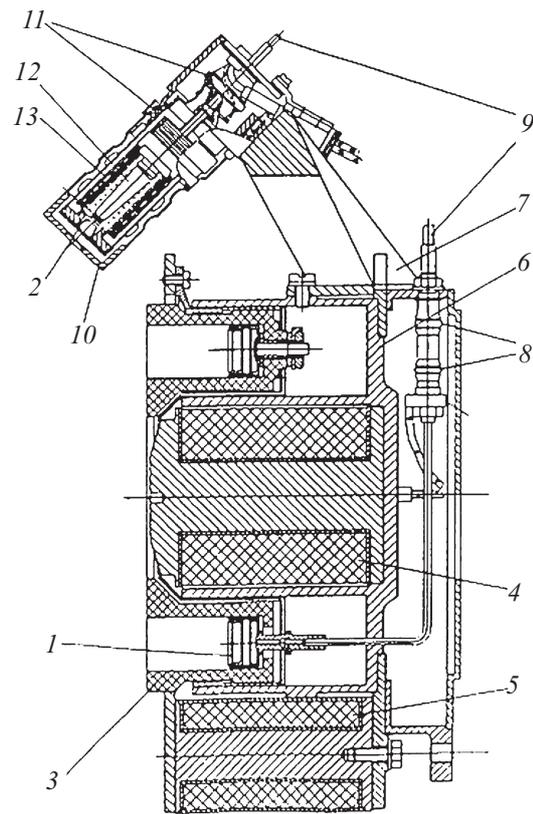


Рис. 5. Конструктивная схема серийного двигателя СПД-100: 1 — анод, 2 — катод, 3 — разрядная камера, 4, 5 — катушки намагничивания, 6 — магнитопровод, 7 — кронштейн, 8 — изоляторы, 9 — трубки подвода рабочего газа, 10 — поджигающий электрод, 11 — изоляторы, 12 — эмиттер электронов, 13 — нагреватель.

устойчивость рабочих процессов, высокую тяговую эффективность и большой ресурс двигателя [4]. В качестве примера результатов такой разработки можно привести конструктивную схему двигателя СПД-100 (рис. 5), разработанную в опытном конструкторском бюро „Факел“ при участии Московского авиационного института [4], которую можно назвать традиционной для современных летных образцов СПД. В двигателе этой схемы магнитное поле создается системой, содержащей внутреннюю катушку намагничивания и 4 наружных катушки, намотанные на магнитопроводящих сердечниках. Необходимая конфигурация силовых линий магнитного поля в ускорительном канале формируется магнитными экранами, охватывающими разрядную камеру, и квазиплоскими полюсами. Она обеспечивает создание распределения индукции магнитного поля с большой скоростью ее нарастания от анода к срезу ускорительного канала и положение максимума названного распределения у упомянутого среза. При этом обеспечивается смещение большей части ускоряющего слоя в выходном направлении за плоскость полюсов магнитной системы и уменьшение суммарного потока ионов на стенки, создается возможность увеличения тол-

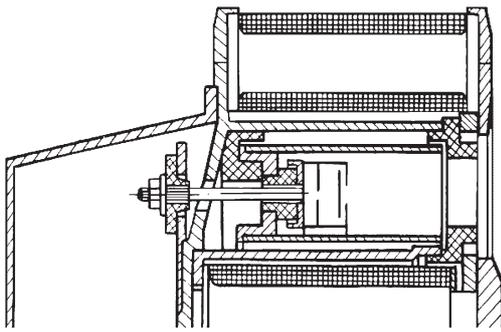


Рис. 6. Конструктивна схема двигателя с проводящей приаодной частью разрядной камеры.

шины выходных участков стенок разрядной камеры. За счет всего перечисленного обеспечивается возможность повышения ресурса двигателя при достаточно высокой его эффективности.

Конструктивная схема упомянутого ранее французского двигателя PPS-1350 аналогична конструктивной схеме двигателя СПД-100. Это понятно, если учесть, что он создавался при участии опытного конструкторского бюро „Факел“. Что касается конструктивной схемы двигателя ВРТ 4000, то она в открытой печати не раскрывается. Но есть основания полагать, что она также аналогична конструктивной схеме СПД-100.

Велись и ведутся разработки двигателей и новых конструктивных схем. В качестве примеров можно привести схему двигателя, часть разрядной камеры которого выполнена проводящей, а выходные части разрядной камеры выполнены в виде диэлектрических колец. Впервые лабораторные модели двигателя такой схемы были разработаны и испытаны в Московском авиационном институте (рис. 6, [4]), и было показано, что до тех пор, пока торцевые элементы проводящей части не попадают в зону ускорения, т.е. в зону с заметными электрическими полями, работа двигателя и его характеристики мало отличаются от работы и характеристик двигателей традиционной схемы.

Летные образцы двигателей такой схемы разрабатываются в настоящее время в исследовательском центре им. М.В. Келдыша [4,27].

Возможен вариант, когда и на выходе из ускорительного канала размещается вторая проводящая часть стенок разрядной камеры, изолированная от первой [4].

Проводящая часть разрядной камеры может выполняться изолированной от анода и на нее может подаваться смещение потенциала для реализации двухступенчатой схемы разряда в двигателе. Возможен также вариант, когда проводящая часть соединяется с анодами выполненна магнитопроводящей. В этом случае получается схема СПД с полым магнитным анодом (рис. 7, [28]).

Следует также отметить разработки двигателя типа АТОН в МИРЭА (рис. 8), а также схемы двухступенчатого двигателя типа МАГ, осуществлявшиеся с

участием А.И. Морозова [29,30]. Отличием их является выполнение расширенной форкамеры (поз. 23 на рис. 8), способствующей более равномерному распределению газового потока, и отделенный от анода (поз. 25 на рис. 8) газораспределитель (поз. 27 на рис. 8).

В схеме двухступенчатого двигателя типа МАГ в форкамере организуется дополнительная разрядная ступень с конфигурацией силовых линий магнитного поля изолирующей стенки [30].

Как уже отмечалось ранее, конструктивные схемы зарубежных СПД в основном аналогичны приведенным выше. Предлагаются, естественно, и новые схемы.

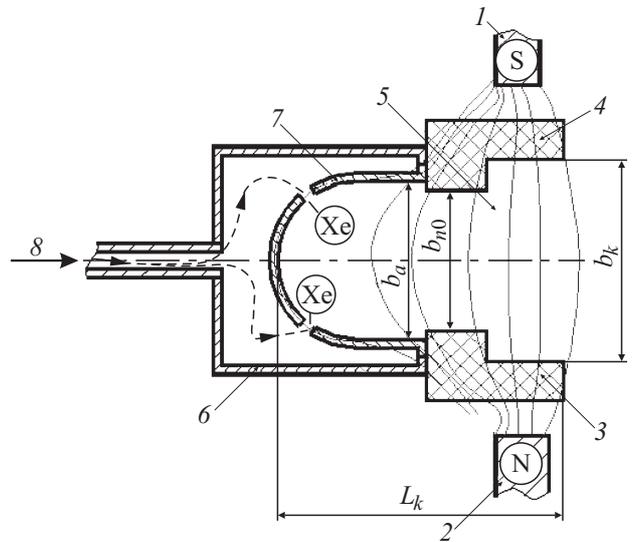


Рис. 7. Схема двигателя с полым магнитным анодом: 1, 2 — полюса магнитной системы, 3, 4 — керамические кольца, 5 — ускорительный канал, 6 — разрядная камера, 7 — магнитный экран, 8 — подвод рабочего газа.

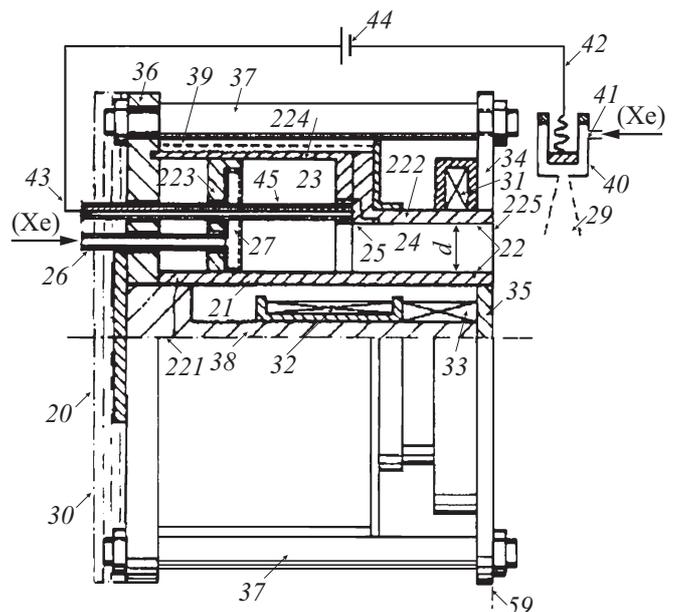


Рис. 8. Конструктивная схема двигателя типа АТОН.

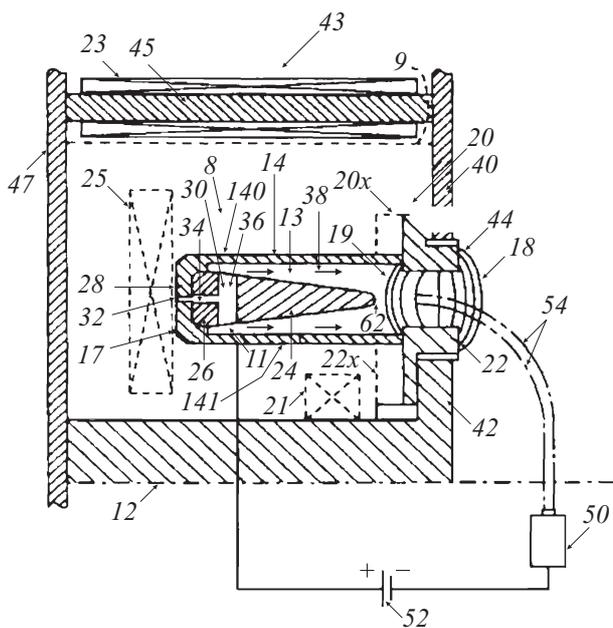


Рис. 9. Схема двигателя по патенту США № US6075321.

В одной из них по патенту США № US6075321 (см. рис. 9 [31]) анод предполагается составным, что обеспечивает возможность организации дополнительного разряда в прианодной области. Полюса магнитной системы выполнены плоскими, а на выходе из разрядной камеры установлены диэлектрические кольца (поз. 20 и 22 на рис. 9). Как видно, двигатели такой схемы должны иметь много общего с рассмотренными ранее. Предложено также несколько изобретений, развивающих эту схему.

Значительно отличается от рассмотренных схема так называемого „цилиндрического“ двигателя

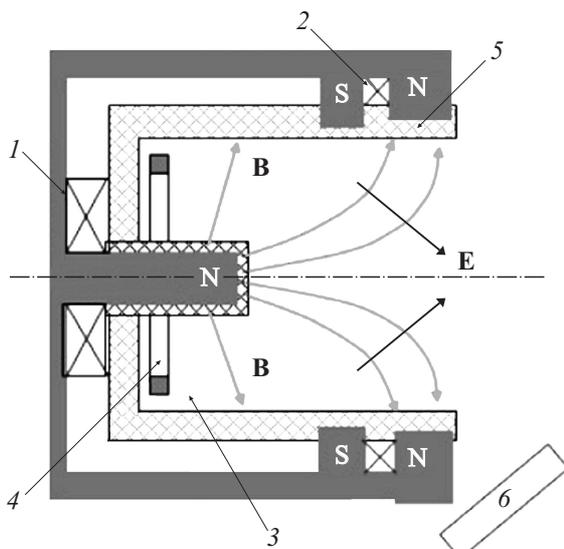


Рис. 10. Схема „цилиндрического“ СПД: 1, 2 — катушки намагничивания, 3 — разрядная камера, 4 — анод, 5 — разрядный канал, 6 — катод.

(рис. 10, [32]), впервые предложенного в Принстонском университете США и пригодная в основном для создания двигателей малой мощности. Но процессы в этом двигателе и его характеристики существенно отличаются от процессов и характеристик двигателей рассмотренных выше схем. Поэтому ниже они не рассматриваются.

Из приведенного рассмотрения следует, что разработка опытных и летных образцов СПД до настоящего времени осуществлялась с использованием схем, приведенных на рис. 5–7 и, возможно, 9 (конструктивные схемы двигателей, разрабатываемых в США, обычно не раскрываются). Названные схемы и режимы работы помимо родовых признаков, отраженных общими условиями (1) и (2), характеризуются следующим:

- в опытных и летных образцах используется одноступенчатая схема, позволяющая упростить конструкцию двигателя и схему его питания;

- ускорительный канал выполняется в виде кольцевой щели, ограниченной, по крайней мере, в выходной части стенками из термостойкой и стойкой к ионному распылению керамики;

- в ускорительном канале создается квазирадиальное магнитное поле с радиальной компонентой магнитной индукции, резко нарастающей от анода к срезу ускорительного канала, и максимум этого распределения располагается у выходного сечения ускорительного канала;

- для реализации требуемого распределения индукции магнитного поля используется система источников магнитодвижущей силы, близкая к плоской конфигурация полюсов магнитной системы и магнитопроводящие элементы, включая магнитные экраны (шунты и т.д., см. рис. 4–9), позволяющие управлять распределением индукции и конфигурацией силовых линий магнитного поля в ускорительном канале.

3. Особенности рабочих процессов в современных опытных и летных образцах СПД

Итак, для опытных и летных образцов современных СПД характерны перечисленные выше конструктивные признаки. В связи с этим представляет интерес рассмотреть, к каким особенностям рабочих процессов в двигателе они приводят.

Первый из названных признаков определяется тем, что в ускорительном канале должна обеспечиваться высокая степень равномерности азимутального распределения потока атомов в ускорительном канале. Дело в том, что возникновение значительной азимутальной неравномерности приводит к перекосам слоя ионизации и ускорения, приводящим к увеличению взаимодействия ускоренных потоков ионов со стенками и неравномерному их износу, увеличению доли электронной составляющей разрядного тока. В конечном счете все перечис-

ленное приводит к снижению тяговой эффективности и ресурса двигателя.

Второй из названных выше признаков отражает идею А.И. Морозова, касающуюся снижения температуры электронов за счет вторичной электрон-электронной эмиссии. Кроме того, поскольку в СПД значительная часть ускоренных ионов попадает на стенки, ограничивающие ускорительный канал в выходной его части, то выполнение этой части стенок из термостойкой и стойкой к ионному распылению керамики позволяет обеспечивать достаточно большой ресурс современных СПД.

С физической точки зрения важным является также то, что введение диэлектрических (керамических) стенок (помимо уже отмеченных эффектов) привело к увеличению поперечной подвижности электронов поперек магнитного поля и к увеличению электронной составляющей разрядного тока, которое имеет как положительные, так и отрицательные последствия. Действительно, с одной стороны чрезмерно большая электронная составляющая снижает тяговую эффективность двигателя. Но если в одноступенчатом двигателе она слишком мала, то снижается и эффективность ионизации потока рабочего газа в ускорительном канале. Дело в том, что одноступенчатый разряд в силу значительной поперечной подвижности электронов представляет собой проточную систему, и поток образовавшихся ионов прямо пропорционален току электронов, поступающих в разряд со стороны катода [23,33], а именно ионный ток, который образуется в разряде можно записать в виде

$$I_i = (e^{\alpha L} - 1)I_{eo}, \quad (6)$$

где I_i, I_{eo}, α, L — соответственно ток ионов на выходе из ускорительного канала, ток электронов, поступающих в разряд со стороны катода, среднее число ионизаций, осуществляемых одним электроном на единице длины пробега им в продольном направлении, и продольная протяженность слоя ионизации и ускорения.

Поэтому для обеспечения высокой степени переработки потока атомов в поток ионов, называемой специалистами по двигателям коэффициентом использования рабочего вещества, необходимо пропускать через разряд определенный поток электронов. И практика показывает, что в оптимизированных моделях СПД на оптимальных режимах работы удается добиться переработки более 90% потока атомов в ионы при доле электронной составляющей тока разряда на выходе из ускорительного канала порядка 20% [33].

Было показано также, что разряд, реализующийся в СПД, оказался достаточно эффективным и с энергетической точки зрения, а именно результирующая энергетическая цена иона в нем может составлять около 60–70 eV, т.е. эквивалентной энергии, соответствующей примерно 5–6 потенциалам ионизации [34]. Это значительно меньше, чем в других источниках ионов. Поэтому даже при достаточно большой электронной

составляющей разрядного тока тяговая эффективность, определяемая по кинетической мощности, соответствующей продольной составляющей среднемассовой скорости потока ионов и получаемой тяге, может достигать 50–70%.

Следующей особенностью разряда в СПД оказывается то, что продольная протяженность слоя ионизации и ускорения в СПД в силу большей поперечной подвижности электронов оказывается больше, чем в ДАС. Оценка названной продольной протяженности рассматриваемого слоя может быть осуществлена по формуле, впервые предложенной А.В. Жариновым для случая, когда поперечная подвижность определяется только рассеянием дрейфующих электронов на нейтральных атомах (см., например, [5]). Она получена из условия, что все образовавшиеся в слое электроны должны быть удалены из него электрическим полем. При наличии других механизмов, приводящих к изменению импульса электронов, эта формула может быть переписана в следующем виде:

$$L_c \approx \sqrt{\frac{eU}{m\omega_e^2} \frac{v_e}{v_1}}, \quad (7)$$

где $m, e, U, \omega_e, v_e, v_1$ — соответственно масса и заряд электрона, падение напряжения на слое, циклотронная частота электронов, эффективная частота „столкновений“, приводящих к изменению импульса дрейфующих электронов, и частота ионизационных столкновений электронов с атомами.

Приведенная эффективная частота столкновений может учитывать как влияние реальных столкновений электронов с тяжелыми частицами и стенками, так и влияние неустойчивостей на перенос электронов поперек магнитного поля. В данном случае важно то, что, как показывают измерения, в случае СПД продольный размер слоя ионизации и ускорения больше, чем в ДАС. Это может происходить, по крайней мере, из-за рассеяния дрейфующих электронов на диэлектрических стенках. В свою очередь, это означает, что ионизация в СПД может осуществляться на большей длине. Поэтому одна и та же степень переработки потока атомов рабочего вещества в ионы может быть получена при меньшей плотности потока атомов. Действительно, для получения высокой переработки потока атомов в ионы длина свободного пробега атомов до их ионизации должна быть значительно меньше протяженности слоя ионизации и ускорения L_c , т.е.

$$\lambda_i = \frac{V_{az}}{\langle \sigma_i V_e \rangle n} \ll L_c, \quad (8)$$

где $V_{az}, \langle \sigma_i V_e \rangle, n$ — соответственно скорость атомов, коэффициент скорости ионизации и концентрация электронов в ускорительном канале.

Характерное значение концентрации плазмы определяется расходом рабочего газа через ускорительный канал, и концентрацию плазмы можно оценить по сле-

дующему соотношению (см., например, [35]):

$$n \approx \frac{j_i}{e\bar{V}_{iz}} \approx \eta_m \frac{\dot{m}_a}{eMS_{ch}\bar{V}_{iz}}, \quad (9)$$

где i_i , \bar{V}_{iz} , η_m , \dot{m}_a , $S_{ch} \approx \pi db_{ch}$ — соответственно плотность тока и скорость ионов на выходе из зоны ионизации, коэффициент использования и расход рабочего вещества в ускорительном канале, площадь поперечного сечения названного канала со средним диаметром d и шириной b_{ch} .

Выражение для вероятности ионизации P_i атома в ускорительном канале, которую можно приравнять η_m , можно записать в следующем виде [35]:

$$P_i \approx 1 - \exp\left(-\frac{L_c}{\lambda_i}\right). \quad (10)$$

С учетом того, что практически всегда $P_i < 1$, из приведенных соотношений можно получить, что

$$f(P_i) = \left(1 + \frac{P_i}{2} + \frac{P_i^2}{3} + \dots\right) \approx \frac{L_c}{\lambda_{io}} = \frac{\langle\sigma_i V_e\rangle}{MV_{az}\bar{V}_{iz}} \frac{\dot{m}_a L_c}{S_{ch}}, \quad (11)$$

где

$$\lambda_{io} = M \frac{V_{az}\bar{V}_{iz}}{\langle\sigma_i V_e\rangle} \frac{S_{ch}}{\dot{m}_a}$$

— характерная длина свободного пробега атомов до их ионизации при концентрации ионов, соответствующей полной ионизации потока атомов рабочего газа через ускорительный канал.

Соотношение (11) в отличие от использовавшихся ранее (см., например, [35]) позволяет в явном виде проследить влияние плотности расхода и других параметров на вероятность ионизации атомов в ускорительном канале СПД и ДАС, поскольку функция $f(P_i)$ может быть рассчитана независимо от других величин. Она характеризует влияние разных факторов на вероятность ионизации и является быстро возрастающей функцией P_i (рис. 11, [36]). В частности, значения $f(P_i)$ и P_i при прочих равных условиях должны возрастать с увеличением плотности расхода \dot{m}_a/S_{ch} рабочего газа через ускорительный канал.

Такое влияние плотности расхода качественно подтверждается результатами определения зависимости среднемаховой скорости истечения потока ионов из двигателя или удельного импульса тяги двигателя I_{sp} (см., например, рис. 12, [36]) от расхода рабочего газа через ускорительный канал, которые пропорциональны результирующей вероятности их ионизации в ускорительном канале.

Поскольку вероятность ионизации при прочих равных условиях возрастает с увеличением отношения $\frac{L_c}{\lambda_{io}}$ и мало отличается от единицы при $\frac{L_c}{\lambda_{io}} \geq 3$, можно сформулировать соответствующее ограничение снизу для плотности расхода через ускорительный канал, которое будет обеспечивать эффективную ионизацию рабочего

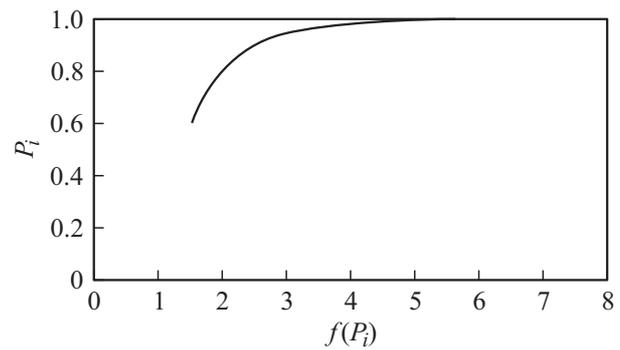


Рис. 11. Взаимосвязь $f(P_i)$ и вероятности ионизации.

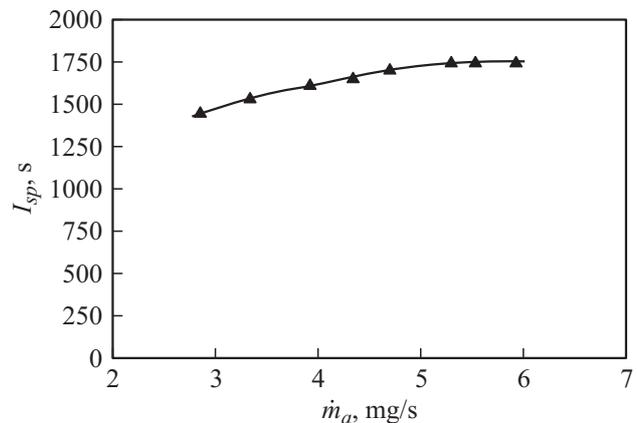


Рис. 12. Зависимость удельного импульса тяги лабораторной модели СПД-140 от расхода ксенона через ускорительный канал при разрядном напряжении 300 В.

газа:

$$\frac{\dot{m}_a}{S_{ch}} \geq 3 \frac{MV_{az}\bar{V}_{iz}}{\langle\sigma_i V_e\rangle L_c}. \quad (12)$$

Из приведенного соотношения видно, что при большей величине продольной протяженности слоя ионизации и ускорения в СПД можно добиться одной и той же степени переработки атомов в ионы при меньшей плотности расхода рабочего вещества через ускорительный канал, а при одинаковых разрядных напряжениях в СПД и ДАС эффективная работа СПД может достигаться при меньших плотностях расхода и токов разряда. Это подтверждается и экспериментальными данными, согласно которым минимальные значения плотности расхода в СПД, при которых обеспечивается приемлемая тяговая эффективность, оказывается в 2–3 раза меньше, чем в одноступенчатых ДАС. В совокупности с более высокой стойкостью керамических материалов по сравнению с проводящими (за исключением графита, см., например, [37]) это обеспечивает более благоприятные условия для увеличения ресурса двигателя. И это способствовало тому, что достигнут ресурс современных СПД порядка 10 000 h. Таким образом, предложение о применении диэлектрических стенок, ограничивающих ускорительный канал, по крайней мере, в зоне ускоре-

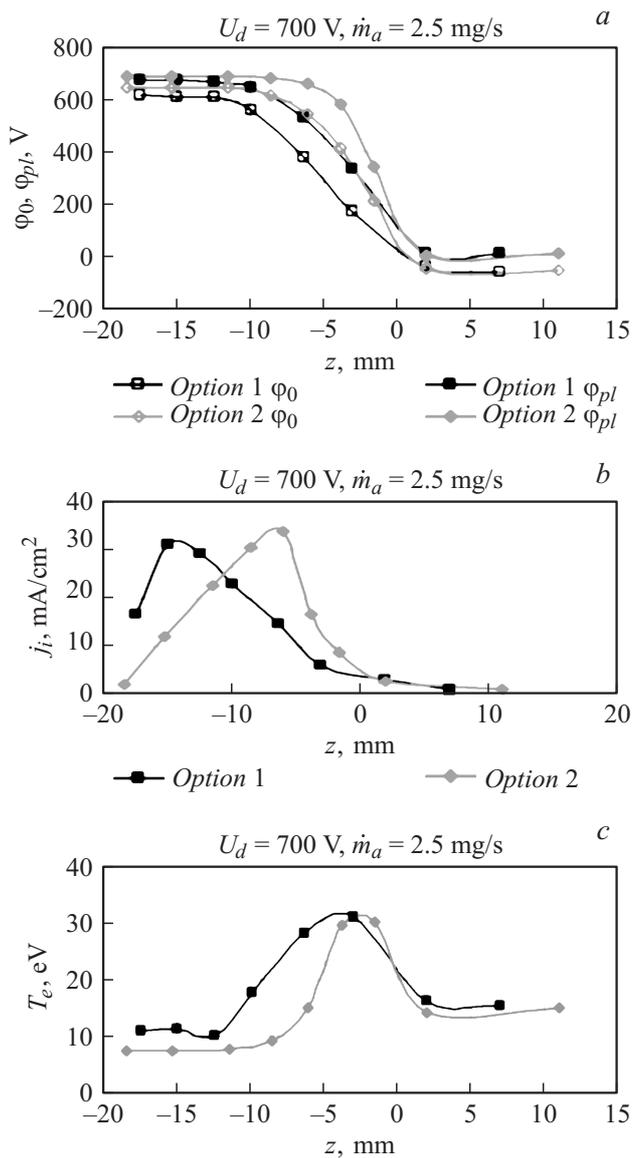


Рис. 13. Распределения по длине локальных параметров плазмы вдоль ускорительного канала с более „широким“ (вариант 1) распределением $B_r(z)$ и с более „узким“ и смещенным к срезу ($z = 0$) ускорительного канала (вариант 2) распределением $B_r(z)$: *a* — потенциала плавления ϕ_0 зондов и потенциала плазмы ϕ_{pl} , *b* — ионного тока на зонды j_i , *c* — температуры электронов T_e .

ния, привело к более обширным последствиям, чем это предполагалось в начале.

Третий из отмеченных выше признаков иллюстрирует результат развития и частичного пересмотра идей А.И. Морозова в части создания нарастающей индукции магнитного поля в зоне ускорения для обеспечения устойчивости ускоряемого потока и фокусировки ионного потока созданием „фокусирующей“ геометрии силовых линий магнитного поля. Названные идеи трансформировались в идею управления продольным распределением электрического поля в ускорительном канале

с целью минимизации потоков ускоренных ионов на стенки разрядной камеры и идею управления распределением потоков ионов на обе стенки в выходной части разрядной камеры с целью обеспечения большого ресурса двигателя. Дело в том, что идея фокусировки ускоренных ионов в одноступенчатых двигателях практически не работает из-за того, что при типовом распределении потенциала в одноступенчатом СПД (рис. 13, *a*, [36]) продольная составляющая напряженности электрического поля в зоне наиболее интенсивной ионизации мала (о положении этой зоны можно судить по распределению потенциала и максимуму ионного тока на пристеночные зонды, рис. 13, *b*, [36]).

В то же время в этой зоне электронная температура достигает максимальных значений (см. рис. 13, *c*, [36]). Поэтому радиальная составляющая напряженности электрического поля, которую можно оценить по приведенной выше формуле термализованного потенциала, оказывается выше продольной составляющей.

Сказанное приводит к тому, что ионы из значительной части названной зоны движутся почти в радиальных направлениях (рис. 14, [34,38]). Таким образом, в зону ускорения попадает существенно расходящийся и предварительно ускоренный ионный поток, который в дальнейшем сфокусировать сложно. Это объясняет значительную расходимость потока ускоренных ионов, истекающих из СПД (см., например, [39]). Кроме того, отмеченное обстоятельство приводит к тому, что на стенки разрядной камеры выпадает значительный поток частично ускоренных ионов, что приводит к распылению стенок, ограничивающих ускорительный канал, и к их износу.

Как уже отмечалось, одним из решений, реализованных, по крайней мере, в современных двигателях типа СПД-100, PPS 1350, ВРТ 4000 и позволяющих снизить потоки ионов и энергии на стенки, является смещение зоны ускорения к выходу из ускорительного канала

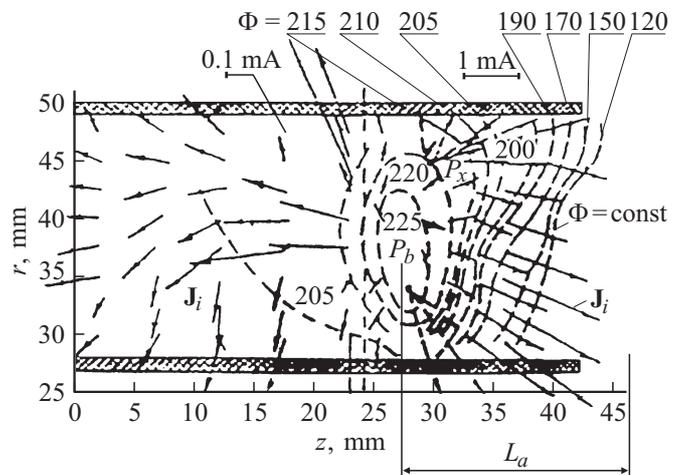


Рис. 14. Картина направленных ионных потоков J_i в ускорительном канале СПД, полученная с помощью направленных зондов.

и даже за его пределы плоскости полюсов магнитной системы за счет управления распределением электрического потенциала в ускорительном канале изменением распределения радиальной компоненты индукции магнитного поля по длине ускорительного канала.

Возможность управления распределением электрического потенциала изменением распределения радиальной компоненты индукции магнитного поля определяется влиянием магнитного поля на поперечную подвижность электронов. Это можно пояснить следующим образом. Создание электрического поля в СПД и ДАС, как и в других плазменных ЭРД, осуществляется приложением внешнего напряжения к объему плазмы и пропусканием тока через него. При этом плотность тока через плазму может быть описана обобщенным законом Ома, который может быть представлен в следующем виде [25]:

$$\mathbf{j} = \sigma \left\{ \frac{\nabla p_e}{ne} + (E + [\mathbf{V}_e \times \mathbf{B}]) \right\}, \quad (13)$$

где \mathbf{j} , σ , p_e , n , e , \mathbf{V}_e — соответственно плотность тока, проводимость плазмы, концентрация плазмы, заряд и скорость электронов.

Из выражения (3) следует, что электрическое поле в плазме можно создать тремя различными способами: за счет использования омического сопротивления плазмы (\mathbf{j}/σ), за счет градиента электронного давления ($-\nabla p_e/ne$) и за счет эффекта Холла ($-\mathbf{V}_e \times \mathbf{B}$), обусловленного взаимодействием движущихся электронов с магнитным полем.

Ускорение ионов холловским электрическим полем соответствует электромагнитному механизму ускорения, который аналогичен действию силы Ампера на проводник с током. Как известно [40], суть его сводится к тому, что в проводнике с током, помещенном в магнитное поле с индукцией \mathbf{B} , электроны, движущиеся в проводнике со скоростью \mathbf{u} , под действием силы Лоренца смещаются к одной из боковых стенок проводника в направлении $-\mathbf{u} \times \mathbf{B}$, создавая их дефицит со стороны противоположной боковой стенки проводника. В результате в проводнике возникает холловское электрическое поле с напряженностью \mathbf{E}_{Hall} , действующее на ионы и проводник в целом в направлении поперечного смещения электронов. Таким образом, движущиеся в проводнике электроны — носители электрического тока, смещаются магнитным полем и фактически „тащат“ за собой ионы и проводник в целом в направлении, поперечном к направлению основного движения электронов в проводнике и направлению магнитного поля.

В СПД и ДАС ситуация существенно отличается от описанной выше прежде всего тем, что в их зонах ускорения в требуемом направлении ускоряются только ионы. Преимущественное же движение электронов происходит в „азимутальном“ ($\mathbf{E} \times \mathbf{B}$) направлении, усредненная скорость которого равна скорости электрического дрейфа $\mathbf{u} = \mathbf{E} \times \mathbf{B}/B^2$. Кроме того, при столкновениях с другими частицами и стенками или под влиянием

колебаний электроны постепенно смещаются в направлении к аноду, т.е. в направлении, противоположном, направлению ускорения ионов. Не вдаваясь в детали, можно констатировать то, что в соответствии со всеми известными механизмами поперечная подвижность электронов и проводимость плазмы тем меньше, чем больше индукция магнитного поля. Поскольку ток разряда и электронный ток задаются внешним источником, то, создавая неравномерное распределение индукции магнитного поля, можно управлять поперечной подвижностью и концентрацией электронов при заданном электронном токе поперек магнитного поля. Действительно, плотность тока электронов $j_{e\perp}$ поперек магнитного поля пропорциональна поперечной подвижности электронов b_{\perp} и поперечной составляющей напряженности электрического поля E_{\perp} , т.е.

$$j_{e\perp} = b_{\perp} E_{\perp} ne. \quad (14)$$

Поэтому распределение индукции магнитного поля, определяя подвижность электронов, будет влиять на распределение концентрации электронов, которая вместе с концентрацией ионов определяет распределение электрического поля в ускорительном канале. С учетом этого можно говорить о квазиомическом формировании электрического потенциала в нем, имея в виду, что электрическое сопротивление для электронной компоненты тока играет роль своеобразного делителя напряжения в электростатическом ускорителе. Естественно, ситуация здесь намного сложнее из-за того, что распределение электрического поля в соответствии с уравнением Пуассона определяется концентрацией как электронов, так и ионов.

Из всего сказанного, в том числе и в начале данного раздела, следует, что важнейшее значение имеют исследования, направленные на изучение поперечной подвижности электронов в разряде СПД, и эти исследования проводились с самого начала разработки СПД и проводятся по настоящее время. Но, как уже отмечалось, в силу сложности происходящих процессов, они далеки от завершения. Сухой остаток экспериментальных исследований сводится к тому, что поперечная подвижность электронов велика в выходной части разряда, где магнитная индукция спадает по мере перемещения в выходном направлении, и в прианодной части разряда. Поэтому на разных режимах работы зона ускорения оказывается сосредоточенной в областях ускорительного канала с максимальными значениями индукции магнитного поля, при этом ее граница зоны со стороны анода локализуется в сечениях, где значения индукции различных режимах работы составляют 0.5–0.8 от ее максимального значения. Именно это позволяет изменением распределения индукции магнитного поля управлять распределением электрического потенциала и положением слоя ионизации и ускорения в ускорительном канале. При этом ширина распределения магнитной индукции в значительной мере определяет продольную протяженность названного слоя, а положение максимума — положение

этого слоя в канале. Сказанное проиллюстрировано на рис. 13, *a*, где распределения для варианта 1 соответствуют более „широкому“ распределению индукции магнитного поля, а вариант 2 — более „узкому“ или более крутому нарастанию магнитной индукции от анода к срезу ускорительного канала.

Следует также отметить, что в областях канала с максимальными значениями индукции в силу пониженной подвижности электронов поперек магнитного поля реализуются условия для создания избыточной концентрации электронов. В прианодной же части разряда, где индукция магнитного поля обычно задается небольшой, поперечная подвижность электронов оказывается большой, что способствует отсосу электронов из этой области на анод даже небольшими электрическими полями и созданию в этой области избыточного объемного заряда ионов. Больше того, в силу большой скорости образования ионов в зоне ионизации и большой подвижности электронов в прианодной области потенциал плазмы может превышать потенциал анода. Таким образом, в ускорительном канале одноступенчатого СПД в условиях квазинейтральности формируется двойной электрический слой с избытком положительных зарядов в прианодной части слоя ионизации и ускорения и избытком отрицательных зарядов в области максимальных значений магнитной индукции, между которыми и создается электрическое поле. В сказанном легко убедиться, дважды продифференцировав типовое распределение потенциала в ускорительном канале, представленное, например, на рис. 13, *a*.

Из приведенных рассуждений следует также, что ионы фактически ускоряются избыточным объемным зарядом электронов, „привязанных“ к магнитному полю, и ограничения на их движение связаны лишь с формированием совместно с электронами электрического поля и, в том числе с необходимостью обеспечения квазинейтральности плазмы. В результате формируются самоогласованные распределения концентрации частиц и электрического поля в ускорительном канале, которыми можно управлять распределением индукции магнитного поля.

Что касается третьей из названных возможностей создания электрического поля, то результаты исследований распределений локальных параметров плазмы, по крайней мере в зоне ускорения одноступенчатых СПД, свидетельствуют о том, что напряженности электрического поля $-\nabla p_e / ne$, обусловленные градиентом электронного давления ∇p_e , могут составлять в названной зоне десятки V/cm в то время, как суммарные напряженности электрического поля составляют на разных режимах работы СПД 100–1000 V/cm. Это свидетельствует о том, что в целом влияние градиента электронного давления на ускорение ионов в СПД невелико, но, как было отмечено выше, оно играет заметную роль в формировании направления суммарной напряженности электрического поля и траекторий ионов в начальной части зоны ускорения.

В заключение данного раздела следует отметить, что даже из приведенного рассмотрения следует, что до настоящего времени остаются недостаточно изученными механизмы переноса электронов поперек магнитного поля, играющие исключительную роль в работе двигателя. Поэтому актуальными продолжают оставаться исследования физических процессов, определяющих названный перенос, а именно пристеночные процессы и неустойчивости в плазме, их влияние на поперечную подвижность электронов.

4. Некоторые замечания по терминологии, относящейся к СПД

Из представленных выше данных и рассуждений вытекают определенные выводы и по терминологии, используемой в литературе. В частности, в работе [41] автором уже отмечалось, что использование названия холловские двигатели применительно к СПД и ДАС нельзя признать удачным по причинам, которые рассмотрены ниже.

Азимутальное движение электронов в СПД и ДАС формирует холловский ток с плотностью \mathbf{j}_H , и можно рассчитать объемную электромагнитную силу \mathbf{f}_{em} , действующую на электроны — носители этого тока

$$\mathbf{f}_{em} = \mathbf{j}_H \times \mathbf{B} = -nie \times \mathbf{B} = -\mathbf{f}_{Ee}, \quad (15)$$

где \mathbf{f}_{Ee} — сила, действующая на электроны со стороны электрического поля.

Таким образом, силы, действующие на дрейфующие электроны, в среднем уравновешены, т. е.

$$\mathbf{f}_{em} + \mathbf{f}_{Ee} = 0. \quad (16)$$

В этом проявляется замечательное свойство движения „замагнитненных“ электронов в скрещенных электрическом и магнитном полях и их „электрического“ дрейфа в плазме, реализующегося при выполнении условий (2), (3).

В силу квазинейтральности плазмы из соотношения (12) следует также, что \mathbf{f}_{em} равна силе \mathbf{f}_{Ei} , действующей на ионы со стороны электрического поля. Поэтому иногда трактуют создание силы, ускоряющей ионы в СПД и ДАС, как результат взаимодействия „холловского“ тока с магнитным полем и называют СПД и ДАС электромагнитными ЭРД. Это и послужило основанием для использования названия „холловские“ двигатели для СПД и ДАС за рубежом, а также в некоторых отечественных работах (см., например, [35]). Однако в случае зон ускорения СПД и ДАС движение электронов в направлении $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ практически ничем не ограничено. Соответственно, не возникает „холловской“ ЭДС. Больше того, если рассмотреть результирующие движения электронов и ионов, то электроны перемещаются в одну сторону, а ионы — в другую. Следовательно, в зонах ускорения СПД и ДАС электроны — носители „холловского“ тока, не могут „тащить“ ионы в направлении их

смещения магнитным полем аналогично тому, как это происходит в проводнике с током, помещенном в магнитное поле, т. е. силы, аналогичной „электромагнитной“ силе, действующей на ионы в проводнике, здесь нет.

Важно также отметить то, что воздействие объемного заряда ускоряемых ионов через созданное электрическое поле проявляется в виде электрической силы f_{Ee} , которая, как было показано выше, уравновешена электромагнитной силой, действующей на электроны со стороны магнитного поля. Таким образом, электромагнитная сила передает действие силы реакции ускоряемых ионов, действующей на электроны, через магнитное поле на магнитную систему двигателя. Следовательно, в СПД и ДАС существенно изменилась роль электромагнитной силы, а именно она не является силой, непосредственно ускоряющей ионы, а лишь обеспечивает связь электронов с магнитным полем и магнитной системой двигателя и передачу силы реакции ускоряемых электрическим полем (или объемным зарядом электронов) ионов, действующую на электроны, на магнитную систему двигателя.

Итак, названия „холловские“ двигатели или „двигатели с эффектом Холла“, во-первых, не различают СПД и ДАС. Во-вторых, известны так называемые торцевые „холловские“ двигатели, в которых эффект Холла играет большую роль и которые по принципу действия существенно отличаются от СПД и ДАС, но с не меньшим основанием должны относиться к „холловским“ двигателям. В третьих, как было показано выше, они не отражают реальный механизм формирования электрического поля и ускорения ионов в этих двигателях.

К сказанному следует добавить, что название „стационарный плазменный двигатель“ также нельзя признать удачным, поскольку существует несколько других типов стационарных плазменных двигателей. Поэтому предложение авторов работы [20] называть СПД с рассмотренными выше конструктивными признаками „стационарным плазменным двигателем Морозова“ с одной стороны позволяет сохранить уже установившееся название двигателя, а с другой — отделить СПД от других стационарных двигателей. Такой подход к названию двигателя уже используется в технике и, в частности, в области ЭРД. Так, известно название „ионные двигатели Кауфмана“ по имени одного из пионеров разработки ионных двигателей Харольда Кауфмана (США), под которыми понимаются ионные двигатели с определенными техническими признаками.

Поскольку ускорение ионов осуществляется электрическим полем, то можно называть СПД и ДАС электростатическими машинами. Но, как уже отмечалось выше, ускорение ионов в условиях квазинейтральности существенно отличается от реализуемого в классических электростатических системах. Поэтому можно разбить класс электростатических двигателей на два подкласса:

— двигатели с электростатическим ускорением униполярного потока заряженных частиц;

— двигатели с ускорением ионов квазиомическим электрическим полем в плазме, куда можно отнести СПД и ДАС.

Таким образом, представляется целесообразным навести определенный порядок и в области терминологии ЭРД.

Заключение

Как следует из изложенного, в результате большого объема выполненных исследований и разработок СПД Морозова приобрел технические признаки, превратившие его в эффективно работающее устройство. Продолжается также совершенствование организации рабочих процессов и конструкции этого двигателя. Однако до настоящего времени не все физические процессы в нем изучены достаточно полно. Поэтому он продолжает оставаться достаточно интересным объектом и для физических исследований.

Список литературы

- [1] Арцимович Л.А., Андронов И.М., Есипчук Ю.В., Барсуков Н.А., Козубский К.Н., Левченко Ю.М., Михайличенко В.А., Морозов А.А., Петров Е.М., Романовский М.К., Рылов Ю.П., Снарский Р.К., Тилинин Г.Н., Трифонов Ю.В., Трофимов А.В., Ходненко В.П., Шаров Ю.А., Щепкин Г.Я. // Космические исследования. 1974. Т. 12. Вып. 3. С. 451-468.
- [2] 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. № 3. С. 277-292.
- [3] Novikov I.K. // Proc. of the 32nd Int. Electric Propulsion Conf. Wiesbaden. Germany, 2011. IEP-2011-33.
- [4] Kim V., Kozubsky K.N., Murashko V.M., Semenkin A.V. // Proc. of the 30th Int. Electric Propulsion Conf. Florence. Italy, 2007. IEP-2007-142.
- [5] Гришин С.Д., Ерофеев В.С., Жаринов А.В. Плазменные ускорители. М.: Машиностроение, 1973. С. 54-60.
- [6] Есипчук Ю.В. Плазменные ускорители. М.: Машиностроение, 1973. С. 75-84.
- [7] Жаринов А.В., Попов Ю.С. // ЖТФ. 1967. Т. 37. Вып. 2. С. 294-299.
- [8] Ерофеев В.С., Лесков Л.В. Физика и применение плазменных ускорителей. Минск: Наука и техника, 1974. С. 18-47.
- [9] Морозов А.И. Исследование стационарного электромагнитного ускорения плазмы. Канд. дис. на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук. М.: Институт атомной энергии им. И.В. Курчатова, 1965.
- [10] Khrabrov V.A. // Proc. of the 30th Int. Electric Propulsion Conf. September 17-20, 2007. Florence. Italy, 2007. P. IEP-2007-109.
- [11] Lary C., Meyerand R.G., Glastonbury, jr., Salz F. // USA patent N 3 155 858. 1964.
- [12] Salz F., Meyerand R., Lary E. // Bull. Am. Phys. Soc. 1962. Ser. 11. Vol. 8. N 7. P. 441.
- [13] Seikel G., Reshotko E. // Bull. Am. Phys. Soc. 1962. Ser. 11. Vol. 7. N 6. P. 19.

- [14] Джейнс Г., Дотсон Дж. Прикладная магнитная гидродинамика. М.: Мир, 1965. С. 456.
- [15] Janes G., Lowder R. // Phys. Fluids. 1966. Vol. 9. N 6, P. 1115–1123.
- [16] Pinsley E. // AIAA. Second Annual Meeting. July 26–29. 1965. San Francisco. CA. USA. P. 65–300.
- [17] Zeyfang E. Plasmaquellen für Hall-Ionen-Triebwerke // DGLR. Symp. Elektrische Antriebsysteme. Juni. 1972. Braunschweig. Germany.
- [18] Estublier D., Koppel C. // Proc. of the 26th Int. Electric Propulsion Conf. Princeton. New Jersey, 2005. Paper IEPC-2005-119.
- [19] Ray J. Patience required as AEHF 1 recovery begins new mode // Space flight now. October 17. 2010. <http://www.spaceflightnow.com/atlas/av019/110814oneyear.html>.
- [20] Kim V., Popov G.A., Kozubsky K.N., Murashko V.M., Khodnenko V.P., Nazarenko I.P. // Proc. of the 31st Int. Elect. Propuls. Conf. Ann Arbor, USA, 2009. P. IEPC-2009-098.
- [21] Морозов А.И. // ДАН. СССР. 1965. Т. 163. № 36. С. 1363.
- [22] Морозов А.И. Плазменные ускорители. М.: Машиностроение, 1973. С. 85–91.
- [23] Белан Н.В., Ким В.П., Тихонов В.Б., Оранский А.И. Стационарные плазменные двигатели. Харьков: ХАИ, 1989. 315 с.
- [24] Морозов А.И. // ПМТФ. 1968. № 3. С. 19–23.
- [25] Морозов А.И. Введение в плазмодинамику. М.: Физматлит, 2006. 576 с.
- [26] Демьяненко В.Н., Зубков И.П., Лебедев С.В. и др. Индукционный метод измерения азимутального дрейфового тока в ускорителях с замкнутым дрейфом электронов. М.: препринт института атомной энергии им. И.В. Курчатова № 2934, 1978. 23 с.
- [27] Горшков О.А., Муравлев В.А., Шагайда А.А. Холловские и ионные двигатели для космических аппаратов / Под ред. А.С. Коротеева. М.: Машиностроение, 2008. 279 с.
- [28] Potapenko M.Yu., Goranchuk V.V. // Proc. of the 32nd Int. Electric Propulsion Conf. Wiesbaden. Germany, 2011. Paper IEPC-2011-042.
- [29] Валентиан Д., Морозов А.И., Бугрова А.И. Плазменный ускоритель уменьшенной длины с замкнутым дрейфом электронов. Патент РФ № 2 107 837. 1993.
- [30] Morozov A.I., Bugrova A.I., Desyatskov A.V., Kharchevnikov V.K., Priol M., Jolivet L. // Proc. of the 28th Int. Electric Propulsion Conf. Toulouse. France, 2003. Paper IEPC-290-03.
- [31] Hruby V.J. Hall field plasma accelerator with an inner and outer anode. U.S. Patent N 6 075 321. 1998.
- [32] Raitses Y., Fisch N.J. Cylindrical geometry Hall thruster. U.S. Patent N 6 448 721. 2002.
- [33] Kim V. // J. Propul. Power. 1998. Vol. 14. N 5. P. 736–743.
- [34] Бишаев А.М., Ким В. // ЖТФ. 1978. Т. 48. № 9. С. 1853–1857.
- [35] Гришин С.Д., Лесков Л.В., Козлов Н.П. Электрические ракетные двигатели. М.: Машиностроение, 1975. 271 с.
- [36] Архипов А.С., Ким В., Сидоренко Е.К. Стационарные плазменные двигатели Морозова. М.: МАИ, 2012. 292 с.
- [37] Егоров В.В., Ким В., Семенов А.А., Шкарбан И.И. Ионные инжекторы и плазменные ускорители. М.: Энергоиздат, 1990. С. 56–68.
- [38] Бугрова А.И., Ким В. Плазменные ускорители и ионные инжекторы. М.: Наука, 1984. С. 107–129.
- [39] Архипов А.С., Ким В., Сидоренко Е.К. // ЖТФ. 2012. Т. 82. № 5. С. 42–51.
- [40] Парсел Е. Электричество и магнетизм. М.: Наука, 1983. 415 с.
- [41] Kim V. // Proc of the 32nd Int. Electric Propulsion Conf. Wiesbaden. Germany, 2011. Paper IEPC-2011-007.