

УДК 629.7.036.7(091)

РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОРЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В ИНСТИТУТЕ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ им. И.В. КУРЧАТОВА

В.А. Щепетилов

НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Среди достижений Института атомной энергии особое место занимают работы по созданию космических электрореактивных двигателей, проводившиеся с начала 1960-х до середины 1970-х годов в Отделе плазменных исследований (затем Отделении физики плазмы) под руководством Л.А. Арцимовича, А.М. Андрианова, П.М. Морозова, Г.Я. Щепкина, С.П. Максимова, А.И. Морозова, и др. В 1964 г. прошла проверку работоспособности «плазменная система стабилизации» положения автоматической межпланетной станции «Зонд-2» в пространстве на основе импульсного плазменного двигателя. Она явилась первым в мировой практике применением электрореактивного двигателя на космическом летательном аппарате. В 1972 г. впервые в нашей стране на околоземной орбите (на метеорологическом спутнике «Метеор») испытывался ионный электрореактивный двигатель. Это был ионный двигатель с объёмной ионизацией рабочего вещества «Зефир». На этом же спутнике прошли первые в мире испытания стационарного плазменного двигателя — испытывалась корректирующая двигательная установка на основе двигателя «Эол». В течение ~170 ч работы двигателя решена практическая задача, «Метеор» был переведён на орбиту, близкую к условно-синхронной. В статье кратко описаны разработки моделей электрореактивных двигателей, названы участники этих работ, затронута предыстория исследований плазмы газового разряда и распространения потоков ионов и электронов через электромагнитные поля в процессах термоядерного синтеза и сепарационных (изотопных) технологий, даётся расширенный перечень публикаций по затрагиваемым в статье вопросам, в первую очередь принадлежащих сотрудникам института. Работа имеет информационную направленность, адресована лицам, интересующимся историей научно-технических разработок в нашей стране.

Ключевые слова: электрореактивные двигатели и установки, плазма, газовый разряд, импульсные и стационарные процессы.

DEVELOPMENT OF ELECTRIC JETS IN INSTITUTE OF ATOMIC ENERGY

V.A. Shchepetilov

NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

Among the achievements of the Institute of Atomic Energy, the works aimed at creating space electric jet engines, carried out from the beginning of 1960s till the mid 1970s in the Division of Plasma Research, later transformed into the Department of Plasma Physics, occupy particular place. Physical and engineering background for these jets was developed under the direct guidance of L.A. Artsimovich, A.M. Andrianov, P.M. Morozov, G.Ya. Shchepkin, S.P. Maksimov, A.I. Morozov et al. In 1964, the fitness of the plasma systems for the automatic interplanetary station «Zond-2» position stabilization in the space, based on a pulsed plasma engine, was tested. It was the first in the world application of an electric jet on spacecrafts. For the first time in the USSR, the operational availability of the ion jet was tested on the meteorological satellite «Meteor» in a near-earth orbit in 1972. It was an ion jet with volume ionization of a working substance «Zephyr». On the same satellite a stationary plasma jet was tested for the first time in the world. The jet «Aeolus» was used as corrective jet. During ~170 h of tests «Meteor» has been moved onto the orbit close to a conditionally synchronous one. The paper briefly describes the development of electric jet models. The participants of these works are named. The prehistory of studies of the gaseous discharge plasma, ion and electron fluxes propagation through electromagnetic fields under processes of thermonuclear fusion as well as separation (isotope) technologies are considered briefly. The enhanced reference list concerning the questions discussed in the paper, primarily on the works of Kurchatov Institute employees, was given. The paper has the informational orientation and is addressed to those who are interested in the history of scientific and technical developments in our country.

Key words: space electric jet engines and facilities, plasma, gaseous discharge, pulsed and stationary processes.

DOI: 10.21517/0202-3822-2017-40-2-5-18

«История отечественной техники, вычеркнутая как секретная, сегодня должна быть восстановлена».

Н.А. Доллежалъ [1, а]

ВВЕДЕНИЕ

Соединение в заглавии слов «электрореактивные двигатели» и «Институт атомной энергии» может показаться удивительным и даже странным. Ведь эти слова, нередко применяемые и широко известные в «своих» областях, тематически, казалось бы, несоединимы. Для многих их связь будет откровением даже сейчас, спустя более полвека с дат запуска Первого искусственного спутника Земли (ИСЗ) и полёта Первого Космонавта Земли. И объясняют эту «малоизвестность» (специалисты исключаются) как мини-

мум два факта. Во-первых, Институт атомной энергии им. И.В. Курчатова (ИАЭ) (сейчас институт называется Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт») никогда не замыкался на проблемах исследования собственно атома и использования атомной энергии. Во-вторых, современная российская космонавтика очень редко и мало применяет электрические реактивные двигатели (ЭРД)¹. В определённой мере это также связано с засекреченностью работ по ЭРД и ядерному реактивному двигателю (ЯРД) на начальном этапе исследований.

Пятьдесят лет назад «волна космического энтузиазма» увлекла многих учёных и инженеров ИАЭ. «Энергетики», естественно, нашли себе соответствующее дело, не остались в стороне и «плазменщики», ставшие «двигателистами». Институт, таким образом, включился в решение проблемы создания космической энергодвигательной установки (КЭДУ). В этой статье рассказывается о работах сотрудников Отдела плазменных исследований (ОПИ) ИАЭ и их непосредственных коллег из других организаций (так как многие задачи решались совместно) в период с конца 1950-х по начало 1970-х годов.

Следует сразу же оговориться, что главными целями работы являлись создание и исследование характеристик физических моделей — макетов «движительных» (тяговых) устройств. Определяемые при этом параметры электроцепей моделей могли быть использованы как исходные для проектирования первичной энергоустановки и преобразователей электроэнергии. Для этого первого этапа работ характерны широта и многовариантность исследований, связанные с новизной физических и технических проблем.

Летательный аппарат, выведенный в космическое пространство (КЛА), нуждается в устройствах (двигателях) для ориентации и стабилизации своего пространственного положения, коррекции орбиты и поддержания траектории своего движения. Требуемые для выполнения этих задач величины тяги двигателей на много порядков меньше, чем необходимые для преодоления земного (в общем случае — планетного) притяжения и сопротивления атмосферы (если она есть). Сила тяги при реактивном принципе её создания, т.е. за счёт отбрасывания ускоренной тем или иным способом массы, определяется произведением расхода рабочего тела (РТ), истекающего из двигателя, и скорости истечения РТ (в общем случае — изменения скорости, но для двигателей, РТ которых находится на борту летательного аппарата, эти параметры равны). Одно и то же значение тяги получается при пропорциональном увеличении скорости истечения и уменьшении расхода РТ. Электрические (первичные энергоисточники могут быть ядерные (реакторные с машинным или прямым преобразованием, радиоизотопные), солнечные (солнечные батареи), химические (аккумуляторы, топливные элементы (электрохимические генераторы)) тяговые устройства позволяют увеличить скорость истечения РТ во много раз по сравнению с химическими (как в ЖРД — жидкостном реактивном двигателе и РДТТ — ракетном двигателе твердотопливном). Уменьшение, в свою очередь, расхода РТ, а значит и количества РТ (при сопоставимых условиях), даёт в итоге увеличение полезной нагрузки КЛА, являющейся одним из его важнейших показателей².

Перспективность использования электрической энергии в космической технике для целей движения космического аппарата была понятна ещё пионерам ракетно-космической науки и техники. Ю.В. Кондратюк (Россия), Р. Годдард (США), Г. Оберт (Румыния/Германия) рассмотрели в своих работах некоторые конкретные идеи и технические решения по таким электродвигателям. В.П. Глушко начал свою инженерную и научную деятельность с разработки образца импульсного электротермического двигателя [2]. Однако реальные конструкции ЭРД для использования их в качестве штатных двигателей потребовались не сразу, а на этапе создания космических аппаратов с длительными периодами функционирования и достаточной энерговооружённостью. Можно считать, что этот этап развития космической техники, в том числе и разработки ЭРД, начался запуском первых ИСЗ и продолжается в настоящее время [3].

¹ ЭРД — это космический двигатель малой тяги с высокой скоростью истечения реактивной струи (высоким удельным импульсом тяги), получающий энергию от электрической установки на борту КЛА. (Здесь и далее — примечание автора.)

² Необходимость в специальном источнике электроэнергии для ЭРД снижает величину полезной нагрузки на величину массы этого источника, которая тем больше, чем больше его мощность. Поэтому для каждой транспортной задачи с ЭРД существует оптимальное значение удельного импульса (скорости истечения рабочего вещества).

Работы космической направленности начались в ИАЭ в конце 1957 г. с проработки идеи о создании мощного импульсного реактора¹ для опытов с тепловыделяющими элементами реактора ЯРД [1, б]. Летом 1959 г. начальник ОПИ Л.А. Арцимович призвал своих ведущих сотрудников уделять внимание проблемам ЭРД. В перспективе предполагалось создание двигателей и для пилотируемых полётов к ближайшим планетам, к Марсу в первую очередь. Параметры были заданы кратными 10: тяга 10 кг, удельный импульс 10 000 с (скорость истечения ~100 км/с), электрическая мощность КЭДУ 10 МВт² [4]. Эти величины основывались на эскизных проработках ОКБ-1 (в настоящее время — Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королева)³).

Определяющая, решающая роль С.П. Королева и руководимого им ОКБ-1 в формулировании и реализации отечественной космической программы общеизвестна. Выделим здесь лишь несколько фактов (документов), относящихся к периоду 1958—1960 гг. и отражающих иницирующую роль С.П. Королева в развёртывании научно-исследовательских и проектных работ по ЭРД (по материалам [5, 7]):

— 1958 г.: в ОКБ-1 (отд. 12, руководитель М.В. Мельников) начаты исследования по созданию ЭРД и ядерных энергетических установок (ЯЭУ);

— 1959 г.: 31 октября послано письмо президенту АН СССР А.Н. Несмеянову «О совместных работах с АН СССР по двигателям малой тяги» (конкретно с Лабораторией двигателей АН СССР (руководитель академик Стечкин Б.С.), начавшей НИР по ионным и плазменным движителям для КЛА);

— 1960 г.: проекты нового постановления ЦК КПСС и Совета Министров СССР по исследованию и освоению космического пространства (7 апреля и 30 мая); упомянуты ЯРД, ЭРД малой тяги (ионные, плазменные) с мощными энергетическими установками.

23 июня 1960 г. было принято Постановление ЦК КПСС и СМ СССР «О создании мощных ракет-носителей, спутников, космических кораблей и освоении космического пространства в 1960—1967 годах» (№ 715-296) [8]. Это Постановление затрагивало практически все аспекты Ракетно-космической техники (РКТ). Особо отметим требование создать в ближайшие годы новую тяжёлую ракету Н1 со стартовым весом ~2000 т для выведения на орбиту ИСЗ весом 40—50 т и тяжёлого межпланетного аппарата (ТМА) весом до 20 т. Для такого носителя предусматривалось создание новых ЖРД на освоенных (керосин + кислород и др.) и перспективных (водород + кислород) компонентах топлива, ЯРД и др., для ТМА — ЭРД (ионных и плазменных) с энергоустановками большой мощности и др.

С принятием Постановления от 23 июня 1960 г. исследования по ЭРД в ИАЭ (и др. организациях) стали плановыми. В ОПИ велись работы [9, а, б, в (с. 260)] по:

- плазменным импульсным ЭРД (сектор 42 А.М. Андрианова);
- ионным ЭРД с объёмной ионизацией (сектор 37 П.М. Морозова);
- плазменным стационарным ЭРД (сектор 38 Г.Я. Щепкина);
- ионным ЭРД с поверхностной ионизацией (группа «В» С.П. Максимова).

О этих работах рассказывается далее.

ИМПУЛЬСНЫЙ ПЛАЗМЕННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

С 1951 г. в ИАЭ начались сначала теоретические, а затем и экспериментальные исследования по проблеме энергетического использования управляемой термоядерной реакции синтеза (УТС) лёгких ядер при магнитной термоизоляции горячей плазмы [9, в, ч. 2]. О подходах к решению этой проблемы и результатах первого этапа работ подробно рассказано научным руководителем исследований по УТС

¹ Первое название — реактор взрывного действия (РВД), затем ИГР — исследовательский графитовый реактор.

² При высоком энергетическом к.п.д. $\eta = 0,9$ для создания тяги 10 кг при удельном импульсе 10 000 с достаточно 5,35 МВт, т.е. 10 МВт — это мощность на все нужды КЛА.

³ В настоящий период предельные требования к параметрам ЭРД, несмотря на различие задач конкретных КЛА, мало отличаются от указанных значений и находятся в диапазоне величин по оптимальному удельному импульсу 1500—8000 с, по мощности 0,005—50 МВт, по гарантийному ресурсу 15—20 тыс. ч. Сохраняются такие особенности, как требование высокой надёжности ЭРДУ, уникальность и высокая стоимость космических комплексов [5, 6].

Л.А. Арцимовичем в подготовленной им лекции¹, которую прочитал И.В. Курчатов 25 апреля 1956 г. в Харуэлле (Великобритания) [10], и в докладе на 2-й Международной женеvской конференции по мирному использованию атомной энергии в сентябре 1958 г. [11, а].

Одним из главных направлений исследований являлся сильноточный импульсный разряд в дейтерии (в основном), водороде, гелии и др. газах при низком давлении, большой скорости нарастания тока и малой длительности. Опыты проводились при следующих значениях основных параметров установок [11, б, в]²:

Напряжение на конденсаторных батареях, кВ. . .	20—120
Максимальный ток, кА . . .	200—1800
Скорость нарастания тока в начале процесса, А/с . . .	10^{10} — 10^{12}
Энергия, запасённая в конденсаторной батарее, Дж . . .	до $5 \cdot 10^5$
Рабочее давление, мм рт. ст. . . .	0,0025—30
Разрядные камеры . . .	Цилиндрические, прямые, 2-электродные, с непроводящими (керамическими) и металлическими стенками, диаметр 18,5—60 см, расстояние между электродами 5—90 см

В экспериментах, названных позднее прямым Z-пинчем, была достигнута температура выше 3—4 млн градусов, наблюдавшееся нейтронное излучение в небольшой доле могло быть обусловлено термоядерными реакциями в центральной зоне разряда.

Опыт работы с импульсными разрядами малой длительности явился основой при разработке импульсного двигателя (ИПД) малой мощности для систем ориентации и стабилизации космических аппаратов. Руководил работой признанный лидер этой группы исследователей д.ф.-м.н. начальник сектора 42 А.М. Андрианов (1911—1987). Ведущим исполнителем работ по этому направлению постепенно стал В.А. Храбров (1931—2009). Много позднее об истории, участниках и ходе работы над первой «космической» моделью ИПД Виктор Александрович рассказал в институтской газете «Курчатовец». Статья имеет подзаголовок «Курчатовский институт — колыбель первых в мире космических электрореактивных двигателей» ([12], см. также [13]).

Этим же вопросам уделил внимание и Б.Е. Черток в своей 4-томной истории РКТ [14], рассказывая о полётах автоматических межпланетных станций (АМС) к Марсу и Венере, в том числе об АМС «Зонд-2», на которой и была проверена 14 декабря 1964 г. работоспособность ИПД. В официальных сообщениях и публикациях об этом не было, к сожалению, конкретной информации о существовании сделанного и участниках испытаний. В этом проявился своеобразный компромисс между соображениями приоритета и секретности работ.

Сообщение ТАСС ««Зонд-2» в полёте» [15] в газете «Правда» сопровождается редакционным комментарием «Плазма работает в космосе». В нём основное внимание уделено перспективности использования на космических аппаратах плазменных ЭРД. Отмечено, что «...на большом расстоянии от Земли³ по команде с пункта управления система ориентации была переключена на плазменные двигатели, которые работали в соответствии с сигналами, поступающими из логических блоков системы ориентации. Шесть двигателей, установленных на ней, в течение продолжительного времени поддерживали требуемое положение станции относительно Солнца. Этим экспериментом практически доказана работоспо-

¹ Об этом упоминают:

— А.П. Александров. Мы начинали в Физтехе. — Сборник статей «Воспоминания об академике Л.А. Арцимовиче». — М.: Наука, 1988. 254 с.;

— Е.П. Велихов. Не позволяя душе лениться (К 95-летию со дня рождения академика Л.А. Арцимовича). — Вестник РАН, 2004, т. 74, № 10, с. 940—945.

² Ссылки сокращены. Для полноты рекомендуем ознакомиться с публикациями в:

— журнале «Атомная энергия», 1956, № 3, с. 76—106;

— сборнике «Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций», т. II, IV. М.: Изд-во АН СССР, 1958;

— Трудах 2-й Международной конференции по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1958 г.). Доклады советских ученых. Т. 1. — Ядерная физика. М.: Изд-во ГУИАЭ, 1959. 552 с.

³ Используя данные о расстояниях АМС «Зонд-2» от Земли по состоянию на 8 декабря (2,47 млн км) и 18 декабря (5,37 млн км), можно оценить её расстояние от Земли на 14 декабря (день включения ИПД по [14]) 4,2 млн км.

способность конструкции плазменного двигателя в условиях космического пространства. Так впервые плазма начала свою работу в космосе».

В этот же день вечером в газете «Известия» выступил с небольшой статьёй «Плазменные двигатели» вице-президент АН СССР (и заместитель директора ИАЭ им. И.В. Курчатова) М.Д. Миллионщиков [16]. Статья заканчивается словами: «...уже сейчас ясно, что у этих новосёлов космоса — блестящее будущее».

В первый день 1965 г. газета «Правда» опубликовала статью С.П. Королева (под псевдонимом профессор К. Сергеев) «Космические дали» [17, а]. Подробно и очень выразительно рассказывая о космических достижениях нашей страны в 1964 г., Сергей Павлович отметил и эксперимент с ИПД: «...Впервые в космической технике для целей ориентации был успешно опробован плазменный движитель, что представляет большой интерес для межпланетных полётов...»

Президент АН СССР М.В. Келдыш во вступительном слове на годовичном общем собрании АН СССР 1 февраля 1965 г. [17, б] в ряду значительных научных результатов упомянул испытания электрореактивных плазменных двигателей в полёте АМС «Зонд-2».

В своих комментариях к первой лабораторной модели первого в мире импульсного плазменного двигателя малой мощности для систем ориентации и стабилизации космических аппаратов, находящейся в Музее Курчатковского института (рис. 1), начальник Лаборатории импульсных физических исследований М.Н. Казеев написал: «Вскоре после запуска в октябре 1957 г. первого искусственного спутника Земли С.П. Королев обратился к И.В. Курчатову с предложением начать в Институте атомной энергии исследования с целью создания электрических ракетных двигателей различных типов, мощности и назначения. Исследования поручили отделу академика Л.А. Арцимовича, так как в 1956—1957 гг. именно им был предложен и экспериментально обоснован электродинамический метод ускорения плазмы.



Рис. 1. Первая лабораторная модель первого в мире ИПД: разрядная камера и блок конденсаторов — накопителей энергии

В результате интенсивных поисков к середине 1962 г. удалось доказать, что наиболее эффективное решение проблемы — импульсный плазменный двигатель абляционного (старое название — эрозионного) типа (АИПД). В таких ИПД плазма образуется за счёт «эрозии», а точнее, абляции диэлектрика в импульсном разряде большой мощности (10—200 МВт) длительностью несколько мкс. Происходит испарение тонкого слоя диэлектрика и ускорение плазмы, возникает реактивная тяга».

Любая разработка начинается с оценки исходных условий, имеющихся данных. В случае двигателя первым параметром является уровень энергопотребления. Выделяемая для работы устройств КЛА энергия дефицитна, её всегда не хватает. Храброву В.А. и его коллегам было предложено уложиться в несколько ватт (не более 10). На втором месте — имеющийся опыт. Импульсный характер работы (процесса) допускает значительную мощность при малом энергопотреблении и оказался как нельзя кстати, наиболее целесообразным. На третьем — известные экспериментальные факты, затем степень сложности устройства и др. Отметим, например, обнаруженное в экспериментах с мощными разрядами появление в спектре основного газа множество линий элементов, входящих в состав материала стенок разрядной камеры. Этот факт был использован самым непосредственным образом при проектировании модели ИПД.

Вот как кратко и образно А.И. Морозов и А.П. Шубин [3] написали о конструкции и достоинствах ИПД:

«...Если попытаться определить место импульсных плазменных двигателей среди ЭРД, то следует отметить присущие им существенные достоинства, делающие эти двигатели вполне конкурентоспособными в соревновании с другими ЭРД. Во-первых, устройство ИПД исключительно простое, особенно проста система подачи рабочего тела (...разряд сам «добирает» нужное ему количество

вещества...). Во-вторых, диапазон энергий и тяги у них, пожалуй, самый широкий из всех существующих в ЭРД, так как, варьируя частоту импульсов, можно как угодно изменять среднюю во времени тягу. В-третьих, они могут работать на самых разнообразных рабочих телах, даже простой бульжник, перед которым «спасует» любой другой современный ЭРД, окажется для ИПД вполне «съедобным». Наконец, в-четвёртых, они исключительно надёжны в работе».

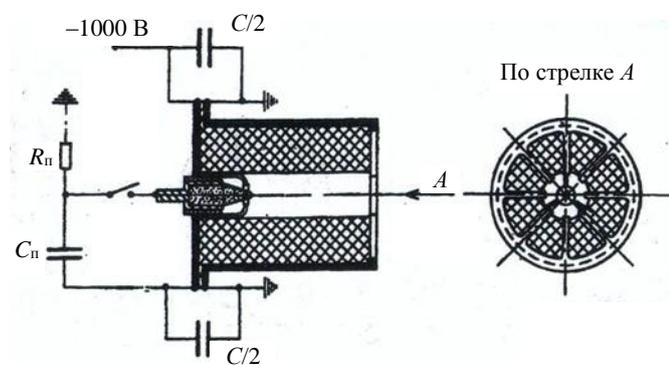


Рис. 2. Схема разрядной камеры

Первой научной публикацией сотрудников ОПИ по этой работе (в «открытой» печати) является статья [18]¹. Приведённый в ней рисунок является и принципиальной схемой, и общим видом устройства. Повторяем его здесь (рис. 2). Статья [19] является её продолжением и обсуждалась на 2-й Всесоюзной конференции по физике низкотемпературной плазмы (18—22 ноября 1968 г., г. Минск). Отметим здесь ещё статьи [20—23], обзор [24] и работы теоретиков [25].

Работы ряда сотрудников сектора были отмечены присуждением им учёных степеней. Кандидатами физико-математических наук стали Ю.А. Алексеев, В.В. Вихрев², А.И. Земсков,

М.Н. Казеев, В.В. Кисула, Ю.Г. Прохоров, В.В. Прут².

В.А. Храброву была присвоена степень доктора технических наук (при защите кандидатской диссертации [26] единогласно ходатайствовал Научный совет МФТИ).

Во Введении диссертации отмечено, что исследования проводились с середины 1960 г. и были инициированы конкретной задачей, предложенной ОКБ-1: создать электрический движитель, который мог бы служить в качестве исполнительного органа системы стабилизации и ориентации КЛА. Требовалось обеспечить импульс реактивной силы ~ 1000 дин·с (~ 1 г·с) за время ~ 1 мин при по возможности низкой величине рабочего напряжения ($V_0 \leq 1—2$ кВ) и минимально возможных расходе электрической энергии и весе системы в целом. Кроме того, состояние постоянной готовности к работе должно поддерживаться без расхода энергии. Конкретизировать все параметры предполагалось в ходе работы.

При рассмотрении различных возможных способов создания тяги предпочтение было отдано импульсным плазменным ускорителям.

Вначале исследовались импульсные электромагнитные коаксиальные ускорители плазмы с различными газами в качестве РТ, но при гораздо меньших, чем указано, размерах, энергиях в конденсаторах W_0 и напряжениях V_0 ($V_0 \sim 500—1000$ В, получен импульс реактивной силы $P \sim 1000$ дин·с при затрате энергии ~ 800 Дж и энергетическом к.п.д. $\sim 40\%$). На следующем этапе исследовалось использование материала электродов в качестве источника РТ. Создание высокоскоростных плазменных струй из паров металлов интересно и в связи с различными физико-техническими задачами.

Основная часть работы посвящена исследованию способа получения тяги в ИПД, когда источником РТ является запаасаемый между электродами твердофазный диэлектрик, служащий одновременно изолятором. При мощном импульсном скользящем разряде вдоль поверхности диэлектрика происходят его частичное испарение (абляция) и формирование реактивной струи. По этому способу были созданы два типа ИПД — электромагнитный ЭМПД и электротермический ЭТПД. В обоих двигателях результирующий импульс реактивной силы P складывается из двух составляющих — импульса электромагнитных сил P_m и «электротермического» импульса сил газокINETического давления P_T ($P = P_m + P_T$). Разграничение между типами определено авторами разработки относительной долей P_T в создании результирующего импульса P : в ЭМПД $P_T/P_m \sim 0,1—0,2$, в ЭТПД $P_T/P_m \sim 5—10$ (к промежуточному диапазону значений $0,2 \leq P_T/P_m \leq 5$ относятся так называемые комбинированные ИПД). Большое различие по параметру P_T/P_m , характеризующему соотношение между вкладываемой

¹ Поступила в редакцию 9 апреля 1968 г.

² В последующем была присуждена степень д.ф.-м.н.

в разряд джоулевской (нагрев) и электромагнитной (ускорение) энергией, обусловлено конструктивными особенностями типов.

В обоих типах ИПД использованы цилиндрические разрядные камеры с коаксиальными электродами, разделёнными слоем диэлектрика. На одном торце камеры располагаются кольцевой катод и иницирующее устройство для ввода внутрь первичной («поджигной») плазмы. Противоположный торец внешнего цилиндра является анодом. Electroды малоиндуктивной ошиновкой соединены с конденсаторной батареей. Через анодный торец камеры инжектируется сгусток РТ.

При уменьшении длины внутреннего цилиндра (катода) и одновременном увеличении экранирования анода диэлектриком под действием тепловых потоков из плазмы полное число частиц в разряде возрастает и в итоге P_v/P_m изменяется от минимума до максимума.

Для выбора диэлектрика были проведены целевые ресурсные испытания образцов из кварца, фарфора, винилпаста, полиэтилена, оргстекла, фторопластов и др. (до нескольких десятков тысяч разрядов). Оказалось, что оптимально удовлетворяют совокупности противоречивых требований (негигроскопичность, достаточно высокая температура сублимации, достаточная механическая прочность, сопротивляемость к импульсному тепловому удару, сохранение электрической прочности при повторяющемся воздействии мощных импульсных разрядов и др.) фторопласты. Рекомендован (и применён) фторопласт-4 (тефлон, C_2F_4).

В процессе исследований ЭМПД заданное значение реактивного импульса было достигнуто при расходе около 230 мкг тефлона и около 450 Дж энергии. Однако и такая величина энергопотребления превышала допустимую примерно вдвое.

Для получения цены тяги на уровне 200—250 Вт/г (авторы разработки ИПД использовали параметр 0,25 Дж/(дин·с)) пришлось уменьшать эффективную скорость инжектируемых сгустков путём увеличения испаряемой и ускоряемой массы. Экспериментально было доказано, что можно испарить около 11 мкг/Дж, если «скользящий» разряд развивается внутри полости, окружённой диэлектриком по возможности со всех сторон, при свободном истечении сгустков. В одном из лучших режимов ЭТПД расход массы составил 465 мкг при ~50 Дж и $P \sim 200$ дин·с (~0,2 г·с).

Уменьшение количества энергии до 50 Дж, вкладываемой в разряд за импульс, позволило «раздробить» требуемый импульс силы 1000 дин·с на пять импульсов по 200 дин·с, т.е. работать с частотой пять импульсов в минуту. При этом ёмкость питающего конденсатора уменьшилась в 5 раз. Соответственно в 5 раз уменьшился и его вес (удельный вес конденсаторов в тот период ~30 г/Дж).

Модель ЭТПД с указанными характеристиками была применена в качестве первого космического ИПД. Её размеры следующие: наружный диаметр фторопластового цилиндра 62 мм, первоначальный внутренний диаметр 20 мм, расстояние от катода до анода 70 мм, полная длина ~80 мм. Изготовление торца анода не сплошным, а в виде восьми спиц, увеличивает отверстие истечения и облегчает поджиг (обеспечивает регулярность поджига).

Результаты экспериментального исследования модели, процесса развития в ней импульсного разряда изложены в работах [18, 26]. Отметим здесь лишь несколько показательных параметров:

— ток разряда нарастает до ~19 кА к моменту 3,4 мкс, затем спадает до нуля при ~9,1 мкс, за ~4 мкс в разряд вкладывается 80% запасённой в конденсаторе энергии, к 10-й мкс выделение мощности в разряде практически заканчивается. По этим данным мощность импульса составляет 5—10 МВт;

— скоростное фотографирование вылетающих в вакуумный объём плазменных сгустков позволило оценить их скорость; максимальная продольная скорость слабосветящегося фронта у выходного среза модели $V_{сл} = (1,6 + 0,3)10^6$ см/с, для яркой части $V_{яр} = (7 + 1)10^5$ см/с. По этим данным удельный импульс двигателя несколько больше 700 с.

Модель была подвергнута ресурсным испытаниям в течение 160 ч при частоте импульсов 1 Гц. За ~580 000 разрядов импульс реактивной силы P изменился с начального значения 207 + 7 дин·с до значения 183 + 7 дин·с в конце испытаний. Относительное уменьшение составило ~12%. При этом внутренний диаметр разрядной камеры увеличился с 20 до 52 мм. Оставшегося количества диэлектрика могло бы хватить при продолжении испытаний ещё на 180 000 импульсов. Таким образом, ресурс модели по количеству запасённого в ней РТ превышает 750 000 импульсов (разрядов).

Экспериментальная плазменная система стабилизации (ПСС) АМС «Зонд-2» включала шесть ЭТПД, смонтированных в виде трёх блоков, три преобразователя напряжения 14 В (расчётное значе-

ние), вырабатываемого солнечной батареей КА, в напряжение 1060 В заряда конденсаторов, программно-коммутирующее устройство (ПКУ), герметичный отсек для размещения ПКУ и преобразователей (отсек, отдельный от основного гермоконтейнера КА, пришлось ввести из-за экспериментального характера герморазъёмов на рабочее напряжение 1060 В). Полный вес ПСС 28,5 кг.

Каждый двигательный блок содержал два движителя, расположенных один за другим и ориентированных противоположно, основной конденсатор $C = 100$ мкФ, общий для обоих движителей блока, также общий конденсатор «поджига» $C_n = 4$ мкФ и его зарядное сопротивление, два реле для включения соответствующего движителя блока.

Два двигательных блока обеспечивали стабилизацию положения КА «по крену», т.е. созданием момента относительно главной оси ОZ КА, при стабилизации по крену одновременно срабатывали два движителя. Третий блок «тангажных» движителей создавал момент относительно оси ОУ КА.

Работоспособность ПСС была подтверждена (как уже отмечено) её испытанием в течение ~70 мин при сеансе связи с КА 14 декабря 1964 г. В ходе дальнейшего полёта ПСС не включалась из-за утраты работоспособности систем КА, в том числе в связи с длительным пониженным электропитанием, и потери связи с ним в мае 1965 г.

Приведённое краткое описание экспериментальных исследований при разработке ИПД отражает необходимый, но лишь начальный этап работы по созданию действующей системы на реальном космическом аппарате. Обоснование параметров и разработка логики работы системы стабилизации, её конструкции и компоновки на КА, проведение конструкторских и предстартовых испытаний, монтаж системы и др. выполнены сотрудниками ОКБ-1. Разработку и изготовление высоковольтных электропреобразователей для питания ИПД, программно-коммутирующих устройств и другой электротехнической начинки системы осуществили сотрудники Государственного научно-исследовательского электротехнического института (ГосНИЭТИ, г. Воронеж, главный конструктор Э.А. Лодочников, в последующем НИИ электромеханики). Все участники этой работы от ИАЭ, ОКБ-1 и ГосНИЭТИ могут по праву гордиться и своим вкладом, и общим результатом.

Двигательный блок первого в мире ЭРД — импульсного плазменного двигателя передан в Государственный музей истории космонавтики им. К.Э. Циолковского [13].

Кроме упомянутых в работах по ИПД, участвовали сотрудники ИАЭ О.А. Базилевская (к.ф.-м.н., лауреат Ленинской премии), В.И. Васильев, Ю.Г. Прохоров, Б.П. Сафронов, А.К. Терентьев.

СТАЦИОНАРНЫЙ ПЛАЗМЕННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

Рассказывать о стационарном плазменном двигателе (СПД) и легко, и сложно. Легко, так как СПД описан подробно и многократно авторами и другими участниками разработки этого типа двигателя. По этой же причине и трудно, так как неизбежны повторения. Поэтому здесь мы ограничимся лишь перечислением основных этапов работы и главных, по нашему мнению, печатных трудов. Одновременно это позволит назвать непосредственных участников исследований.

В первую очередь необходимо упомянуть Алексея Ивановича Морозова (30 марта 1928 г. — 6 мая 2009 г.) — инициатора и научного руководителя разработки, «генератора» многих идей, наиболее активного автора публикаций по проблемам и СПД, и ЭРД в целом. Ранее уже указана брошюра [3] общества «Знание», вышедшая в серии «Новое в жизни, науке, технике: космонавтика, астрономия». Дополнением к ней являются разделы «Предисловие» и «Введение» монографии [27] и параграф 10.4 «Ионные и плазменные космические двигатели» монографии [28]. В [4] кратко описана история формирования принципов СПД. Рассказывается об идеях, заложенных в первую экспериментальную модель, о следующей модели «Е-1», «базовой» для физических исследований, о первой радиационно-охлаждаемой модели, о создании макета двигательной установки «Эол». Большой раздел посвящён научным итогам работ по созданию и исследованию СПД.

Перечень журнальных статей А.И. Морозова, написанных лично и с соавторами, очень обширен. Многие из них упомянуты в статье [29] (и следующих статьях, опубликованных в данном но-

мере журнала на с. 147—196), в статье [30] и других статьях раздела «Плазмодинамика»¹ и монографии [28].

Являясь по роду своей работы физиком-теоретиком, А.И. Морозов много внимания уделял проблемам экспериментаторов, постоянно искал подтверждение своих идей в результатах эксперимента.

Возглавлял сектор 38 с момента его создания в 1959 г. Герман Яковлевич Щепкин (1906—1980 гг.). О его работе в Ленинградском физико-техническом институте (теперь ФТИ им. А.Ф. Иоффе), в ИАЭ им. И.В. Курчатова и в том числе в «уникальной лаборатории» подробно рассказано в [31].

В секторе 38 сложилось несколько групп экспериментаторов, занятых исследованием генераторов и ускорителей потоков плазмы для использования в различных областях, в том числе в термоядерных исследованиях и космических плазменных двигателях. О первой идее коаксиального стационарного плазменного ускорителя с собственным магнитным полем и протяжёнными (профилированными) электродами рассказано в [4, 32]. Теперь этот ускоритель обозначается аббревиатурой КСПУ [29]. В последующем к этой работе добавились исследования ускорителей с внешним магнитным полем, замкнутым дрейфом электронов и протяжённой зоной ускорения ионов (УЗДП). Испытывались однолинзовые стационарные, двухлинзовые (и более — многолинзовые) квазистационарные модификации ускорителя.

Исследования сильноточного квазистационарного плазменного ускорителя с двухлинзовой конфигурацией магнитного поля в ускорительном канале описаны в работах [33—35]. Получены потоки ионов водорода с током ~500 А и средней энергией частиц до 2 кэВ.

Статья [36]² открыла серию работ, посвящённых экспериментальному и теоретическому исследованию однолинзового варианта УЗДП (названного позднее СПД). В ней отмечен год начала этих исследований — 1963 г.³ Её продолжением является статья [37] о выяснении влияния конфигурации магнитного поля в канале ускорителя на вольтамперные характеристики и колебания потенциала в системе. Статьи [38—40] входят в серию, начатую работой [36].

Наиболее значительным достижением начального этапа работ явилось экспериментальное подтверждение идеи о возможности создания в плазме объёмного стационарного сильного электростатического поля (в результате средняя энергия выходящих из канала ионов оказывается на уровне 2/3—3/4 напряжения разряда) [4, 28, 41]. Другая важная особенность оптимизированной системы — нарастание магнитного поля от анода к выходу из канала (условие (стабилизирующая роль) «положительного градиента магнитного поля»). Тем самым обеспечивается подавление низкочастотной «вращательной» неустойчивости плазмы (приводящей к значительному дрейфу электронов от катода к аноду), а также отжатие ускоряемого потока ионов от стенок к середине канала, чтобы бомбардировка стенок канала ионами была минимальна.

В начале 1973 г. вышел из печати сборник статей «Плазменные ускорители»⁴, в котором рассмотрены многие из результатов, полученных к началу 1970-х годов. Выделим здесь краткое предисловие Л.А. Арцимовича, обзоры А.И. Морозова (с. 5—15, с. 85—92) и Ю.В. Есипчука (с. 75—84). Широта и многообразие рассмотренных в книге вопросов физики, теории и техники ускорителей плазменных потоков позволяют и сейчас рекомендовать её как введение (обязательный материал) при ознакомлении и изучении этой проблемы.

К концу 1960-х годов существенно изменились энергетические возможности на борту космических аппаратов. Если в 1964 г. для электропитания ИПД на АМС «Зонд-2» было выделено несколько десятков ватт, то в последние годы десятилетия стала реальной величина ~500 Вт. Это позволяло сделать новый шаг в применении ЭРД в космосе — провести не только испытание двигателя, но и попытаться выполнить более энергоёмкую задачу по изменению орбиты КА. С таким предложением выступили специалисты ВНИИ электромеханики [42, а] в начале 1969 г. К маю были согласованы технические параметры

¹ Большинство статей раздела IX «Плазмодинамика» написаны Морозовым А.И.

² Поступила в редакцию 29 марта 1971 г. Просим читателя не удивляться «заметной» задержке с публикациями.

³ В [4] указано, что разработка конструкции модели двигателя началась во второй половине 1962 г. Этот год можно считать началом проектных (расчётных) работ.

⁴ Плазменные ускорители. Под редакцией акад. Л.А. Арцимовича, д. техн. н. С.Д. Гришина и др., в том числе д.ф.-м.н. А.И. Морозова. — М.: Машиностроение, 1973. 312 с.

создаваемой ЭРДУ: тяга двигателя 2 г при мощности ~400 Вт (энергетическая цена тяги 200 Вт/г) и удельном импульсе ~1000 с, электропитание от бортовой сети постоянного тока напряжением 27 (+5/-2) В при энергопотреблении ≤500 Вт, двигателей два (работают попеременно, ресурс каждого 100 ч), запас рабочего тела 2,4 кг, число включений ДУ не менее 50, время запуска (подготовки к работе) ~1 мин, суммарный вес ЭРДУ (два двигателя, система электропреобразования, управления и телеметрии, система хранения и подачи РТ) ≤35 кг (без учёта кабельной сети). На разработку отводилось около года [4].

Несколько месяцев заняли доработка, изготовление и контрольно-сдаточные испытания конструкторских и «лётных» экземпляров в ОКБ «Факел».

25 мая 1972 г. была напечатана в газете «Правда» статья профессора И. Андропова¹ [43, б] о созданной в нашей стране оперативной метеорологической космической системе «Метеор» длительного действия. В ней сообщено об испытании стационарных ионно-плазменных электрореактивных двигателей на спутнике «Метеор», запущенном 29 декабря 1971 г. Двигатели предназначены для коррекции и стабилизации параметров орбиты искусственного спутника.

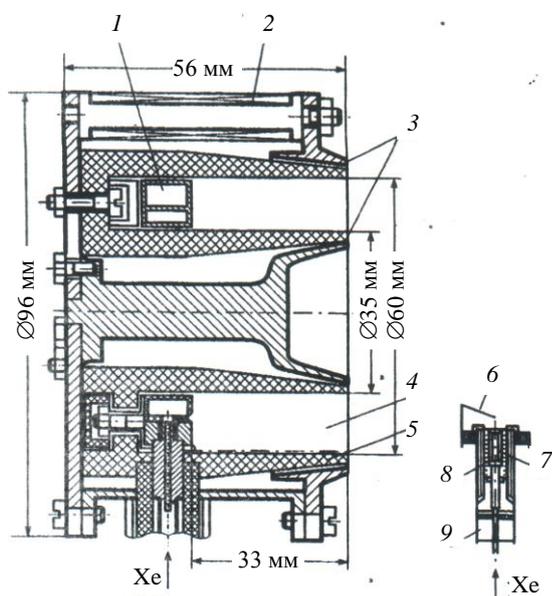
Подробная информация о двигателе, составе корректирующей двигательной установки (КДУ), предварительных наземных и рабочих космических испытаниях на орбите содержится в [42, в]. С этой публикации плазменные ускорители УЗДП в двигательном исполнении стали называться СПД (рис. 3). Название двигательной установки «Эол», принятое при разработке первой модели, появилось в печати несколько позднее.

Работа выполнена сотрудниками ВНИИЭМ, ИАЭ, ОКБ «Факел» и ОКБ «Заря». От ИАЭ, кроме авторов статьи [42, в], в работе участвовали В.Ф. Гаврилов, В.А. Гарбузов, Б.В. Даутер, Г.П. Илюхина, Б.Н. Маков^{2, 3}, В.Э. Марцинкевич, Г.Б. Попков, Л.В. Рябчикова, М.А. Цибизов, А.П. Шубин

В брошюре П.А. Румянцева⁴ отмечено, что «...с помощью двигательной установки, включённой с 14 по 22 февраля 1972 г., была увеличена высота орбиты ИСЗ на 16,5 км с целью доведения количества витков, совершаемых им в течение суток, до 14. Последнее позволило в дальнейшем осуществлять съём метеорологической информации с помощью ИСЗ «Метеор» строго с одних и тех же районов земного шара и почти в одно и то же время суток, что очень удобно для прогноза погоды».

Дополнительная информация о первых космических испытаниях СПД в январе—феврале 1972 г., а также в последующие годы, имеется в упомянутой ранее работе [4], в статье [43].

Рис. 3. Схема первого СПД «ЭОЛ» с электроразрядным катодом: 1 — анод; 2 — магнитные катушки; 3 — полюса магнита; 4 — ускорительный канал; 5 — изолятор; 6 — поджигной электрод; 7 — эмиттер из LaB₆; 8 — стартовый нагреватель; 9 — кожух катода



Успешные космические испытания ЭРДУ «Эол» явились основанием для продолжения испытаний и последующего использования ЭРД СПД на ИСЗ различного назначения (метеорологических, телекоммуникационных и др.) с целью прецизионной коррекции их орбит. ВНИИЭМ повторил эту работу на нескольких своих спутниках оперативного и экспериментального характера (назначения) для экологического и природоресурсного мониторинга Земли («Метеор» 1-19 (запущен 28.10.74), «Метеор» 1-25 (15.05.76), «Метеор» 1-27 (05.04.77), «Метеор» 1-31 («Метеор — Природа», 10.07.81), «Космос-1066» («Астрофизика», 23.12.78)). Установленные на этих ИСЗ двигательные установки «Эол-2» и «Эол-3»

¹ Псевдоним А.Г. Иосифьяна, директора и главного конструктора ВНИИЭМ (теперь АО «Корпорация «ВНИИЭМ», носящая имя Иосифьяна А.Г.).

² К. техн. н., лауреат Сталинской премии.

³ В последующем была присуждена степень д.ф.-м.н.

⁴ Румянцев П.А. Космическая система «Метеор». — М.: Знание, 1983, № 10, 64 с. (Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Космонавтика, астрономия»).

имели своими прототипами «Эол» и обладали улучшенными показателями по тяговому коэффициенту полезного действия, ресурсу, числу включений и др. В работе участвовали и сотрудники ОПИ (затем ОФП) ИАЭ им. И.В. Курчатова [4, 43, 44, а, б].

Испытания СПД «Эол» в 1972 г. показали эффективность нового в проблеме типа ЭРД. Последующие испытания подготовили переход к этапу целевого внедрения этого вида ЭРД в космическую технику, созданию на его основе штатных систем коррекции и стабилизации орбит космических аппаратов.

В Институте атомной энергии продолжились физические исследования, направленные в том числе на оптимизацию конструкции СПД, большее внимание стало уделяться приложениям этих ускорителей к технологическим задачам, для астрофизических экспериментов и др. В работах [4, 28, 41, 44, в] сообщено о создании модели с диаметром канала 290 мм на мощность до 25 кВт при тяговом к.п.д. $\geq 60\%$ и тяге ≥ 125 г. Тем самым продемонстрирована перспективность применения СПД на совершенно новом по сравнению с описанным в обзоре уровне вкладываемой в двигатель мощности и достигаемой тяги.

В Политехническом музее г. Москвы — национальном музее истории науки и техники — имеется стенд, посвящённый СПД «Эол» и его создателям [45].

А.И. Морозову была присуждена степень доктора физико-математических наук. Кандидатами физико-математических наук стали Ю.В. Есипчук, Ю.А. Шаров (к. техн. н.), Г.Н. Тилинин, В.А. Смирнов, А.Я. Кислов, И.П. Зубков, С.В. Лебедев, А.П. Шубин.

ИОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ «ЗЕФИР»

Ионный двигатель (ИД), получивший название «Зефир», создан объединённым коллективом специалистов Отдела плазменных исследований (ОПИ) ИАЭ им. И.В. Курчатова и ОКБ «Заря» (сейчас ОАО «Красная Звезда») под научным руководством начальника сектора 37 ОПИ д.ф.-м.н. проф. П.М. Морозова (1907—1982), изготовлен и испытан совместно сотрудниками этих же предприятий.

Этот двигатель является моделью электрореактивного двигателя с плазменными источниками положительных ионов и электронов и электростатическим ускорением ионов поперёк оси разряда. ИД «Зефир» — элемент экспериментальной космической корректирующей электродвигательной установки (КЭДУ), получавшей энергию от солнечных батарей космического аппарата. КЭДУ включала два двигателя «Зефир», два блока высоковольтных выпрямителей и блок преобразования, автоматики и телеметрии.

ИД «Зефир» принадлежит к семейству плазменных электростатических ЭРД, в конструкции которых реализован принцип разделения функций образования ионов и их ускорения для создания тяги. Ионы образуются в объёме разрядной камеры при ионизации атомов рабочего тела (ртути) электронами, эмитированными катодом, и плазменными электронами (электронным ударом). Затем значительная часть ионов ускоряется до заданной скорости электростатическим полем в ионно-оптической системе (ИОС). Чтобы космический аппарат не заряжался в результате ухода положительных ионов (другими словами, чтобы обеспечить уход ионов), на выходе ИОС устанавливается плазменный источник электронов для нейтрализации ионного пучка и компенсации тока ионов.

ИД «Зефир» рассчитан на создание тяги 0,7 г при удельном импульсе 5000 с и энергопотреблении 400 Вт. Ток ионов ртути 65 мА, ускоряющее напряжение 2,7 кВ, скорость ионов 50 км/с. Выбор таких параметров вызван ограничением энергопотребления двигательной установки величиной не более 500 Вт.

Материалы — сталь, молибден, титан, ртуть (рабочее тело), керамика, тефлон, размеры (габаритные): диаметр 170 мм, ширина по выступающей части 190 мм, высота 165 мм, масса 5,5 кг (с ртутью).

Космические испытания ИД «Зефир» проводились в январе, феврале и августе 1972 г. на ИСЗ «Метеор». Это были первые в нашей стране испытания ионной ЭРДУ на околоземной орбите [46—49].

В ходе испытаний по командам с пункта управления полётом были выполнены четыре контрольные кратковременные (по 1,5 мин) включения для проверки работоспособности электроцепей двигательной установки (ДУ), её управляемости и пять «рабочих» включений: два раза работал один двигатель, три раза — второй. Первые рабочие включения по 12 мин проводили для определения продолжительности выхода двигателя на рабочий режим, его устойчивости и наличия (отсутствия) помех функционированию других систем спутника. В последующих включениях установка работала 21 и 35 мин. Проводились

измерения развиваемой двигателем тяги и времени установления стабильных параметров установки. Этап длительных испытаний был выполнен частично: установка отработала 98 мин при пятом включении, но не вышла на режим при включении на «суточный» период. Причинами этого отказа могли быть электрические пробой в ускорительной системе двигателя, неисправность в блоке управления или другие.

Оценивая результаты этого эксперимента, можно отметить, несмотря на неполное выполнение программы, ряд положительных факторов:

— оправдались принятые технические решения по конструкции отдельных узлов двигателя и системы электропреобразования;

— элементы установки выдержали нагрузки этапа выведения на орбиту и последующего длительного пребывания в условиях космического пространства, установка включалась и довольно длительно работала;



Рис. 4. Ионный двигатель «Зефир»: вид двигателя со стороны щелевой ионно-оптической системы, над ней размещены два источника электронов («нейтрализаторы», основной и резервный)

— подтверждено соответствие определённых параметров ИД ожидаемым величинам, в том числе расчётной и реально создаваемой им тяги;

— испытания ИД показали совместимость ДУ с аппаратурой управления и радио-техническим оборудованием спутника, отказов по прохождению команд не было, отдельные сбои в передаче телеметрической информации не были явно связаны с работой двигателя.

Полученная в эксперименте информация важна как разработчикам будущих ЭРДУ с ионными двигателями, так и для совершенствования систем космических аппаратов с плазменными ускорителями.

В музее Курчатовского института находится ионный двигатель «Зефир» (рис. 4) — дублёр лётного экземпляра, испытанного на околоземной орбите впервые в нашей стране.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время стационарные плазменные двигатели, предложенные и разработанные советскими учёными и инженерами на рубеже 1960—1970 гг., остаются в нашей стране основным типом применяемых в космической технике электрореактивных двигателей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ¹

1. **Фаин Б.** Активная зона. Повесть об атомном институте. — М.: ИИФ «Скрипто», 1998. 256 с. (а); **Пономарев-Степной Н.Н.** Ядерные ракетные двигатели и энергетические установки. — Ракетно-космические двигатели и энергетические установки. Научно-технический сборник, 1999, вып. 1 (147), с. 6—17 (М., Центр Келдыша, 117 с.) (б).
2. **Кибальчич Н.И., Циолковский К.Э., Цандер Ф.А., Кондратюк Ю.В.** — Избранные труды. — М.: Наука, 1964. 672 с. (а); **Ветчинкин В.П., Глушко В.П., Королев С.П., Тихонравов М.К.** Избранные труды (1929—1945). — М.: Наука, 1972, 796 с. (б); **Гансвиндт Г., Годдарт Р., Эсно-Пельтри Р., Оберт Г., Гоман В.** Избранные труды (1891—1938). — М.: Наука, 1977. 632 с. (в).
3. **Морозов А.И., Шубин А.П.** Космические электрореактивные двигатели. — М.: Знание, 1975. 64 с.
4. **Морозов А.И.** Разработка идеологии стационарных плазменных двигателей. — Физика плазмы, 2003, т. 29, № 3, с. 261—276.
5. **Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королева (РКК «Энергия»).** — М., 1996. 671 с.
6. **Петросов В.А., Баранов В.И., Васин А.И. и др.** Разработка и перспективы развития ЭРД в НИИТП. — Ракетно-космические двигатели и энергетические установки. Научно-технический сборник. — М.: НИИТП, 1993, вып. 4(142), с. 49—57. (а); **Баранов В.И., Васин А.И., Петросов В.А.** Проблема проведения наземных ускоренных испытаний энерго-двигательного комплекса марсианской экспедиции. — Там же, вып. 3(141), с. 134—140 (б).
7. **С.П. Королев и его дело.** Свет и тени в истории космонавтики. Избранные труды и документы. Составитель д. техн. н. Г.С. Ветров. — М.: Наука, 1998. 716 с.

¹ В настоящее время накоплена огромная база литературных источников по затрагиваемым в статье проблемам. Поэтому ссылки даются, в первую очередь, на работы сотрудников НИЦ «Курчатовский институт».

8. **Советская** космическая инициатива в государственных документах. 1946—1964. Под ред. Ю.М. Батурина. — М.: Изд-во «РТСофт», 2008. 416 с.
9. **Романовский М.К.** Физика плазмы в проблеме электромагнитного разделения изотопов. Обзор. — М., ИАЭ, 1990. 76 с. (а); **Романовский М.К.** Термоядерные исследования в ИАЭ им. И.В. Курчатова за 1950—1958. Обзор. — М., ИАЭ, 1990. 191 с. (б); **Романовский М.К.** Газовая плазма в атомной проблеме. Курчатовский институт. История атомного проекта. Вып. 15. — М.: РНЦ «Курчатовский институт», 1998. 271 с. (Второе издание работ 9, а и 9, б в общем томе) (в); **Романовский М.К.** Термоядерные исследования в ИАЭ. Часть 2. Обзор работ 1958—1962 гг. — М., ИАЭ, 1992. 210 с. Изд. 2-е. — М., РНЦ «Курчатовский институт», 1994. 212 с. (з).
10. **Курчатов И.В.** О возможности создания термоядерных реакций в газовом разряде. — Атомная энергия, 1956, № 3, с. 65—75.
11. **Арцимович Л.А.** Исследования по управляемому термоядерным реакциям в СССР. — В сб.: Труды 2-й Международной конференции по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1958). Доклады советских ученых. Т. 1. Ядерная физика. — М.: Изд-во ГУИАЭ, 1959, с. 5—30 (а); **Андрианов А.М., Базилевская О.А., Брагинский С.И., Брежнев Б.Г., Ковальский Н.Г., Подгорный И.М., Прохоров Ю.Г., Филиппов Н.В., Филиппова Т.И., Хвощевский С., Храбров В.А.** Экспериментальное исследование импульсных разрядов при больших силах тока. — Там же, с. 31—52 (б); **Комельков В.С., Скворцов Ю.В., Церевитинов С.С.** Развитие мощного разряда в дейтерии. — Там же, с. 53—64 (в).
12. **Храбров В.** Через тернии к звездам! — Газета «Курчатовец», № 5—6 (954—955) (апрель — май), 1997, с. 3—7.
13. **Пец Л.А., Симонов А.И., Храбров В.А.** Как создавали первые ЭРД. — Земля и Вселенная, 2005, № 6, с. 57—60.
14. **Черток Б.Е.** Ракеты и люди. Т. 3 Горячие дни «холодной войны» (с. 653—656). — М.: Изд-во «РТСофт», 2007. 768 с. (с илл.).
15. **Сообщение ТАСС:** «Зонд-2» в полёте. — Газета «Правда», № 354 (16940), 19 декабря 1964 г., с. 1; Плазма работает в космосе. Редакционная заметка. — Там же.
16. **Миллионщиков М.Д.** Плазменные двигатели. — Газета «Известия», № 300 (14770), 19 декабря 1964 (суббота, воскресный выпуск), с. 5.
17. **Сергеев К.¹** Космические дали. — Газета «Правда», № 1 (16953), 1 января 1965, с. 4 (а); **Келдыш М.В.** Советская наука: итоги и перспективы — Там же, № 35 (16987), 4 февраля 1965 г., с. 2 (б).
18. **Андрианов А.М., Земсков А.И., Прут В.В., Храбров В.А.** Импульсные разряды в диэлектрических камерах. — ЖТФ, 1969, т. 39, вып. 3, с. 433—437.
19. **Вихрев В.В., Земсков А.И., Прут В.В., Храбров В.А.** Моделирование процесса разряда на ЭВМ. — В сб.: Вопросы физики низкотемпературной плазмы. — Минск: Изд-во «Наука и техника», 1970, с. 276—282.
20. **Земсков А.И., Прут В.В., Храбров В.А.** Физические процессы при импульсном разряде в диэлектрических камерах. — ЖТФ, 1972, т. 42, вып. 2, с. 358—363.
21. **Андрианов А.М., Алексеев Ю.А., Казеев М.Н., Кисула В.В.** Получение импульсных потоков плазмы в коаксиальном плазменном ускорителе с эрозией диэлектрика. — В кн.: Плазменные ускорители. — М.: Машиностроение, 1973, с. 198—200.
22. **Алексеев Ю.А., Казеев М.Н., Кисула В.В.** Численное моделирование ускорения плазмы в импульсном ускорителе с эрозией диэлектрика. — ЖТФ, 1973, т. 43, вып. 7, с. 1454—1458.
23. **Алексеев Ю.А., Казеев М.Н.** Численное моделирование двумерных течений в импульсных плазменных ускорителях. — Физика плазмы, 1981, т. 7, вып. 5, с. 1084—1098.
24. **Казеев М.Н.** Импульсные электродные ускорители плазмы. — В кн.: Энциклопедическая серия «Энциклопедия низкотемпературной плазмы». Кн. III. Под редакцией академика В.Е. Фортова. Раздел IX. Плазодинамика. — М.: Наука — МАИК «Наука—Интерпериодика», 2000, с. 488—503.
25. **Морозов А.И., Соловьев Л.С.** Об ускорении плазмы в коаксиале. — ЖТФ, 1960, т. 30, вып. 9, с. 1104—1108 (а); **Морозов А.И.** Равновесные конфигурации равномерно ускоряемых аксиально-симметричных плазменных сгустков. — ЖТФ, 1967, т. 37, вып. 1, с. 79—84 (б).
26. **Храбров В.А.** Исследование импульсных скользящих разрядов и создание плазменных движителей. Диссертация на соискание учёной степени к.ф.-м.н. Научный руководитель д.ф.-м.н. Андрианов А.М. — М., ИАЭ, инв. № Э-1061, Арх. 1/ндд-183, 184, 1965, т. 1 — 212 л., т. 2 — 105 л.
27. **Морозов А.И.** Физические основы космических электрореактивных двигателей. Т. 1. Элементы динамики потоков в ЭРД. — М.: Атомиздат, 1978. 328 с.
28. **Морозов А.И.** Введение в плазодинамику. — М.: Физматлит, 2006. 576 с. Издание второе, исправленное и дополненное. — М.: Физматлит, 2008. 614 с.
29. **Морозов А.И.** Принципы коаксиальных (квази) стационарных плазменных ускорителей (КСПУ). — Физика плазмы, 1990, т. 16, вып. 2, с. 131—146.
30. **Морозов А.И.** Физические процессы в СПД. — В кн.: Энциклопедическая серия «Энциклопедия низкотемпературной плазмы». Кн. III. Под редакцией академика В.Е. Фортова. Раздел IX. Плазодинамика. — М.: Наука — МАИК «Наука—Интерпериодика», 2000, с. 443—467.
31. **Жуков В., Лукьянов С., Морозов А.** Обрученный с физикой — по взаимности. — Газета «Курчатовец», № 2 (1056) (февраль), 2007, с. 11.
32. **Ковров П.Е., Шубин А.П.** Сильноточный коаксиальный плазменный ускоритель в квазистационарном режиме. — В сб.: Физика и применение плазменных ускорителей. Под ред. А.И. Морозова. Часть 1. — Минск: Наука и техника, 1974, с. 78—102.
33. **Зубков И.П., Кислов А.Я., Морозов А.И.** Экспериментальное исследование двухлинзового ускорителя. — ЖТФ, 1970, т. 40, вып. 11, с. 2301—2306.

¹ Псевдоним С.П. Королева.

34. **Зубков И.П., Кислов А.Я., Лебедев С.В., Морозов А.И.** Движение ионов в двухлинзовом ускорителе с «замкнутым» электронным дрейфом. — ЖТФ, 1971, т. 41, вып. 3, с. 526—533.
35. **Зубков И.П., Кислов А.Я., Морозов А.И.** Исследование потока ионов, выходящих из двухлинзового ускорителя. — ЖТФ, 1971, т. 41, вып. 5, с. 880—889.
36. **Морозов А.И., Есипчук Ю.В., Тилинин Г.Н., Трофимов А.В., Шаров Ю.А., Щепкин Г.Я.** Экспериментальное исследование плазменного ускорителя с замкнутым дрейфом электронов и протяженной зоной ускорения. — ЖТФ, 1972, т. 42, вып. 1, с. 54—63.
37. **Морозов А.И., Есипчук Ю.В., Капулкин А.М., Невровский В.А., Смирнов В.А.** Влияние конфигурации магнитного поля на режим работы ускорителя с замкнутым дрейфом электронов (УЗДП). — ЖТФ, 1972, т. 42, вып. 3, с. 612—619.
38. **Есипчук Ю.В., Морозов А.И., Тилинин Г.Н., Трофимов А.В.** Основные свойства плазменных колебаний в ускорителе с замкнутым дрейфом и протяженной зоной ускорения (УЗДП). — ЖТФ, 1973, т. 43, вып. 7, с. 1466—1473.
39. **Морозов А.И., Невровский В.А., Смирнов В.А.** Воздействие на поток плазмы в ускорителе с замкнутым дрейфом (УЗДП) системой с обратными связями. — ЖТФ, 1973, т. 43, вып. 3, с. 543—549.
40. **Есипчук Ю.В., Тилинин Г.Н.** Дрейфовая неустойчивость плазмы в УЗДП. — ЖТФ, 1976, т. 46, вып. 4, с. 718—729.
41. **Морозов А.И.** К истории развития плазмодинамики средних энергий (п. IX.12.2. Плазменные ускорители и двигатели). — В кн.: Энциклопедическая серия «Энциклопедия низкотемпературной плазмы». Кн. 3. Под редакцией академика В.Е. Фортова. Раздел IX. Плазмодинамика. — М.: Наука — МАИК «Наука—Интерпериодика», 2000, с. 568—574.
42. **Андронов И.М.¹, Рылов Ю.П., Тайнов Ю.Ф., Трифонов Ю.В.** Электрореактивные двигательные установки в космосе. — Космические исследования, 1974, т. XII, вып. 3, с. 447—450 (а); **Андронов И.** Вахту несут «Метеоры». — Газета «Правда», № 146 (19654), 25 мая 1972 г. с. 3 (б); **Арцимович Л.А., Андронов И.М., Есипчук Ю.В., Барсуков И.А., Козубский К.Н., Левченко Ю.М., Михайличенко В.А., Морозов А.И., 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.** Разработка стационарного плазменного двигателя (СПД) и его испытание на ИСЗ «Метеор». — Космические исследования, 1974, т. XII, вып. 3, с. 451—468 (в).
43. **Козубский К.Н., Мурашко В.М., Рылов Ю.П., Трифонов Ю.В., Ходненко В.П., Ким В., Попов Г.А., Обухов В.А.** СПД работают в космосе. — Физика плазмы, 2003, т. 29, № 3, с. 277—292.
44. **Шереметьевский Н.Н., Барсуков И.А., Козубский К.Н., Кондаков Ю.Г., Масленников Н.А., Мерзляков Б.Д., Морозов А.И., Прохоров Ю.Г., Романовский Ю.А., Рылов Ю.П., Снарский Р.К., Стоянов В.И., Трифонов Ю.В., Ходненко В.П., Шубин А.П.** Основные результаты космических испытаний ЭРДУ с СПД («Эол-2») на ИСЗ «Метеор — Природа». — IV Всесоюзная конференция по плазменным ускорителям и ионным инжекторам. Тезисы докладов Москва, 26—29 сентября 1978 г. — М.: ВНИИЦентр, с. 317—321 (а); **Шереметьевский Н.Н., Морозов А.И., Снарский Р.К., Трифонов Ю.В., Соболев Д.Н., Ходненко В.П.** Применение ЭРДУ с СПД в системах коррекции орбит спутников по изучению природных ресурсов Земли. — Там же, с. 324—325 (б); **Баркалов Е.Е., Васильев В.Н., Веселовзоров А.Н., Покровский И.Б.** Характеристики УЗДП в режимах сильноточных разрядов на различных рабочих веществах. — Там же, с. 65 (в).
45. **Морозов А.И.** Космический электровоз. — Наука и жизнь, 1999, № 9, с. 28—33.
46. **Романовский М.К., Морозов П.М., Атаманов М.В., Балаев Н.Ф., Баранов В.А., Борzych Л.А., Борисов А.И., Ветров В.А., Власов В.А., Григорьев Ю.П., Зимелев А.Г., Козлов А.Я., Кузьмин Р.Н., Наумов Д.В., Пигаров Ю.Д., Пильгунов Л.Н., Староверов Л.И., Трофимов А.С., Чижов Н.И., Щепетиллов В.А. (ИАЭ); Охатрин А.Ф., Антошин П.Н., Антропов Г.М., Васин В.Ф., Дворецкая Н.С., Демина Т.Е., Заргарян А.М., Лапкин В.К., Меркулов И.А., Попов Ю.С., Тарасенко И.А., Хан Гирун, Чельшев В.А., Шашков Е.И., Шеповалов И.Т. (ОКБ «Заря»); Трифонов Ю.В., Рылов Ю.П., Барсуков И.А., Бурков В.В., Коробков В.И., Кулешова Ф.И., Миронюк М.Н., Фурдак Н.П., Ходненко В.П., Хомяков Н.С. (ВНИИЭМ).** Космические испытания ионной ЭРДУ «Зефир» на объекте «Метеор». Отчет ИАЭ, № Инв. Э-2178, Арх. 1/нд-7218//, 1972. 58 л.
47. **Ходненко В.П., Рылов Ю.П.** К 30-летию космических испытаний ионных двигателей на ИСЗ «Метеор». XXVII академические чтения по космонавтике (29—31 января 2003 г.). Секция 4, доклад, [http://www.ihst.ru/~akm/section4\(2003\).htm](http://www.ihst.ru/~akm/section4(2003).htm).
48. **Кузьмин Р.Н., Ветров В.А.** Ионный двигатель «Зефир»: к 35-летию испытаний в космосе. — Газета «Курчатовец», РНЦ «Курчатовский институт», № 5—6 (1049—1050), 2006, с. 11.
49. **Мартыненко Ю.В.** Электромагнитное разделение изотопов и его наследие. — УФН, 2009, т. 179, № 12, с. 1354—1361.



Валерий Алексеевич Щепетиллов, н.с., в 1989 г. награжден серебряной медалью ВДНХ, ветеран атомной энергетики и промышленности; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
vashchepet@mail.ru

Статья поступила в редакцию 24 марта 2017 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Термоядерный синтез, 2017, т. 40, вып. 2, с. 5—18.

¹ Псевдоним Иосифьяна А.Г.