

УДК 629.7.036.5.064.001.4:621.453/.457

ЙОД КАК АЛЬТЕРНАТИВНОЕ РАБОЧЕЕ ТЕЛО ЭЛЕКТРОРАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

©2014 В.Г. Островский, А.А. Смоленцев, П.А. Щербина

Ракетно-космическая корпорация «Энергия», г. Королёв

В предлагаемой статье проведён анализ использования йода в качестве рабочего тела электроракетных двигателей (ЭРД) с замкнутым дрейфом электронов. При этом сравниваются характеристики двигателя, работающего на йоде, с аналогичными параметрами при использовании традиционного рабочего тела – ксенона. Показаны преимущества электроракетной двигательной установки на йоде по сравнению с установкой, использующей ксенон. Обосновано использование йода в качестве рабочего тела для двигателей большей мощности. Представлены предварительные разработки и приведены результаты первых испытаний стационарных плазменных двигателей на йоде. В статье приводится информация о проводимой в ОАО «РКК «Энергия» корпоративной НИР, целью которой является разработка стендовой системы хранения и подачи йода. Показана и описана схема системы хранения и подачи для экспериментальной отработки ЭРД на йоде. Представлен вариант двигателя большой мощности на рабочем теле йод, в котором предлагается решение задач обеспечения ресурса двигателя и предлагается использование безрасходного термоэмиссионного катода.

Йод, электроракетный двигатель, рабочее тело, система хранения и подачи.

Двигатели с замкнутым дрейфом электронов (ДЗДЭ) такие, как стационарные плазменные двигатели (СПД), двигатели с анодным слоем (ДАС), а также ионные двигатели традиционно используют плазмообразующие вещества с большим атомным весом и низким потенциалом ионизации.

В настоящее время в мире предпочтение отдают инертным газам в качестве рабочего тела (РТ) указанных выше ЭРД, в частности ксенону, имеющему наибольший атомный вес (131,3 а.е.м.) и сравнительно низкий потенциал ионизации (12,1 эВ). По своим физическим свойствам и складированию он превосходит все остальные газы (при давлении 760 мм рт. ст. и температуре 20°C плотность составляет 0,00589 г/см³). Он химически инертен и не конденсируется на элементах конструкции космических аппаратов (КА). Однако ксенон в качестве РТ ЭРД имеет ряд существенных недостатков:

- 1 кг ксенона стоит более 244 000 руб. (в ценах 2014 года);
- мировое производство ксенона составляет около 20 т. в год (из них только 10% идёт на космическую отрасль);
- при наземной отработке двигателя требуется установка гелиевых криопанелей,

что значительно удорожает и усложняет испытания рассматриваемых ЭРД, особенно ресурсные.

С увеличением активного срока существования КА, а также при решении транспортных задач дальнего Космоса (таких, как экспедиция к Марсу или задач, связанных с обеспечением больших грузопотоков к Луне), существенно возрастают потребные запасы РТ, а значит, и стоимость заправляемого ксенона. В разрабатываемом в РКК «Энергия» им. С.П. Королёва 80-х...90-х г.г. прошлого века многозоровом межорбитальном буксире «Геркулес» требуемые запасы рабочего тела ЭРДУ суммарной мощностью 500 кВт (ксенон) составляли 38т., т.е. при современном уровне добычи ксенона, на его накопление потребовалось бы два десятка лет.

Кроме того, за сутки эксплуатации двигатель с замкнутым дрейфом электронов, при потребляемой мощности 100 кВт, КПД 60% и удельном импульсе 3000 с, потребит количество ксенона, стоимость которого составит порядка 2,7 млн. рублей. При ресурсе двигателя 10000 часов, стоимость ксенона возрастет до более 1,1 млрд. рублей. При наземных испытаниях двигатель должен работать в условиях

космического вакуума, при этом производительность откачной системы должна превышать 4 млн. литров в секунду. При стоимости около 30 рублей за 1 л/с стоимость откачной системы составит 120 млн. рублей и при этом будет линейно возрастать по мере увеличения мощности двигателя. Для отработки электроракетной двигательной установки (ЭРДУ) мегаваттного уровня затраты составят десятки миллиардов рублей.

Анализ свойств йода показывает, что при использовании его в качестве РТ ЭРДУ в условиях космического вакуума он практически не конденсируется на элементах КА. Давление насыщенных паров йода при одинаковой температуре поверхности КА на два порядка выше, чем у ртути (рис. 1). При этом на КА SERT II ионный двигатель на рабочем теле ртути проработал в космосе 4000 часов.

Кроме того, в отличие от ЭРД на ксеноне, для наземной отработки ЭРД на йоде криопанели вакуумных камер достаточно охлаждать жидким азотом, что намного снижает стоимость наземной отработки ЭРД.

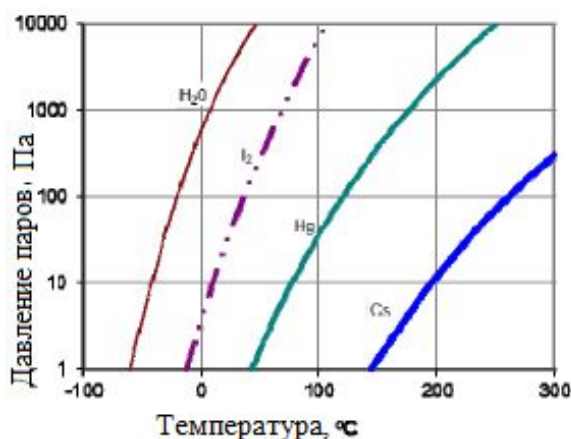


Рис. 1. Зависимость давления насыщенных паров от температуры для разных рабочих тел

К преимуществам использования йода относительно ксенона можно отнести следующее:

- стоимость одного килограмма йода в десятки раз ниже стоимости одного килограмма ксенона;
- годовой объём добычи йода составляет 25 000 тонн;

- плотность йода составляет $4,9 \text{ г/см}^3$, что приведёт к значительному снижению объёма и массы средства хранения и подачи (СХП);

- газообразный йод получают в СХП возгонкой из твёрдого состояния, что не требует многоступенчатой системы понижения давления и, следовательно, приводит к снижению количества потребной арматуры, т.е. к уменьшению габаритов и массы СХП;

- возможно обеспечение рециркуляции йода при ресурсных испытаниях ЭРД;

- стоимость наземной отработки ЭРД на йоде будет значительно ниже, чем при использовании ксенона.

Таким образом, технология использования альтернативного рабочего тела – йода (взамен используемого в настоящее время ксенона) для электроракетных двигателей (ЭРД) с замкнутым дрейфом электронов является важной космической технологией, необходимой для осуществления ряда космических проектов.

Для подтверждения возможности использования йода в качестве рабочего тела с минимальными материальными и временными затратами в РКК «Энергия» разработана модель ЭРД на базе СПД (рис. 2).

Проведённые предварительные испытания продемонстрировали принципиальную возможность применить йод в качестве рабочего тела СПД. При этом, как и ожидалось, характеристики двигателя на йоде, по крайней мере, не уступали параметрам ксенонового двигателя. Испытания показали, что при повышенном напряжении отношение тяги к мощности при работе на йоде выше, чем аналогичная характеристика на ксеноне, а также заметно выше анодный КПД и удельный импульс.

По результатам предварительных проработок был запатентован ряд ЭРД и способов их работы. Дальнейшие экспериментальные исследования предполагают получение новых результатов и значительное увеличение объектов правовой охраны.

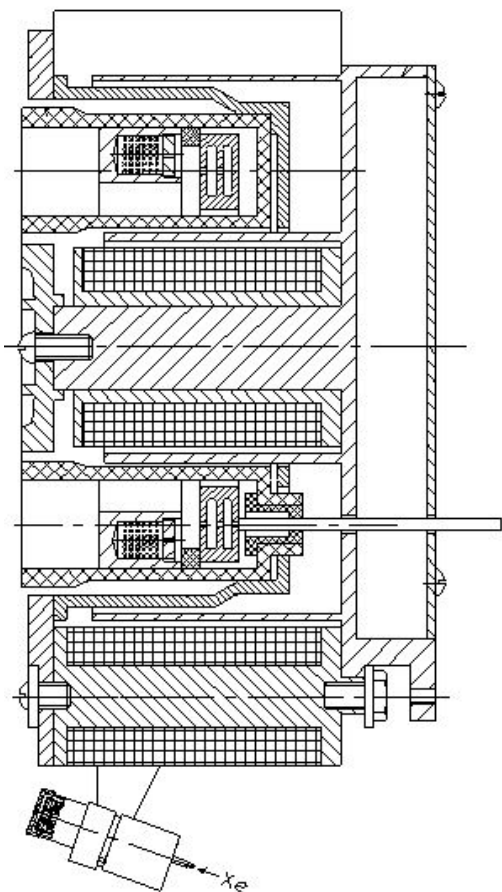


Рис. 2. Модель СПД-М70 для работы на йоде

В настоящее время в РКК «Энергия» проводится корпоративная НИР, целью которой является разработка системы хранения и подачи йода. СХП (рис. 3) йода располагается снаружи вакуумной камеры и включает в свой состав:

- ёмкость, содержащую йод и снабжённую нагревателем и датчиками температуры;
- участок трубопровода с датчиком температуры;
- участок трубопровода с датчиком давления;
- участок трубопровода с клапаном;
- участок трубопровода с двумя датчиками давления (датчик расхода йода), снабжённый датчиком температуры;
- участок трубопровода, часть которого введена в вакуумную камеру;
- весь газовый тракт, содержащий нагревательные элементы;
- контроллеры;
- блоки питания;
- персональную электронно-вычислительную машину.

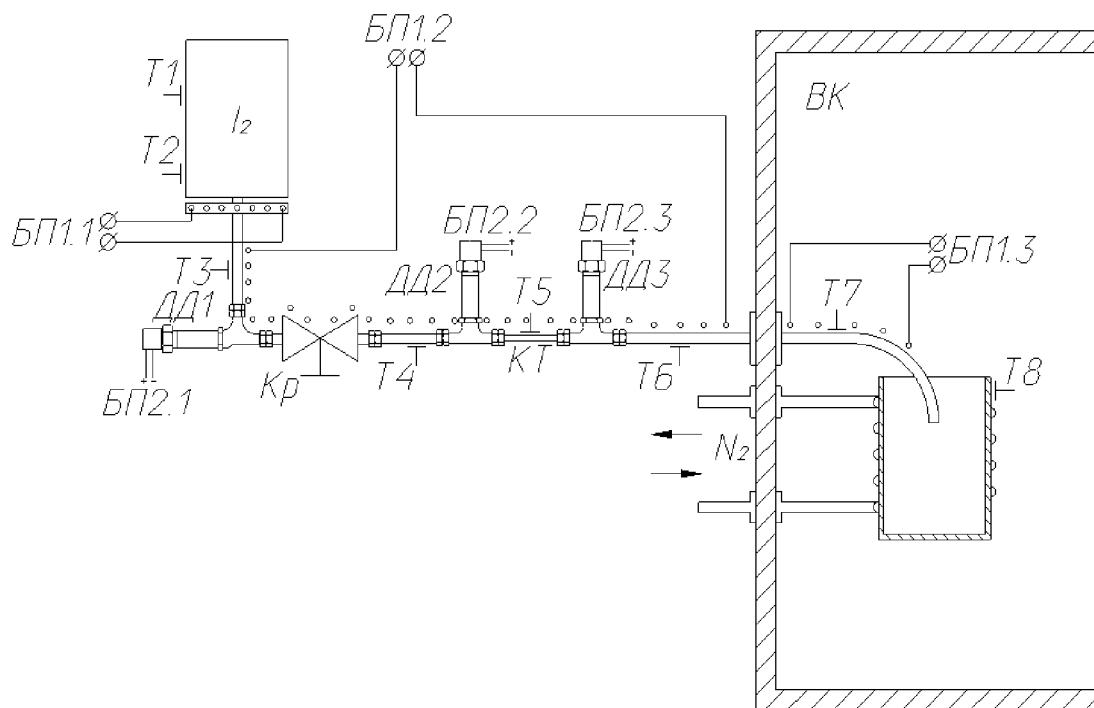


Рис. 3. Схема хранения и подачи йода для экспериментальной отработки ЭРД

Данная схема позволит отгарировать расход йода по температуре ёмкости. Преимуществом этой схемы является то, что нагревается лишь слой йода, обеспечивающий заданный расход.

В дальнейшем предполагается использовать СХП совместно с двигателем.

Использование йода в качестве рабочего тела ЭРД особенно большой мощности (до 100 кВт) может привести к значительному снижению массы и габаритов

ЭРДУ на базе СПД или ДАС и к большому экономическому эффекту за счёт применения более дешёвого и менее дефицитного рабочего тела, обладающего возможностью повторного использования при ресурсных испытаниях ЭРД.

На основе разработанного в РКК «Энергия» в 1983г. двигателя ДАС-200 на висмуте предложена конструкция ЭРД большой мощности на йоде (рис. 4).

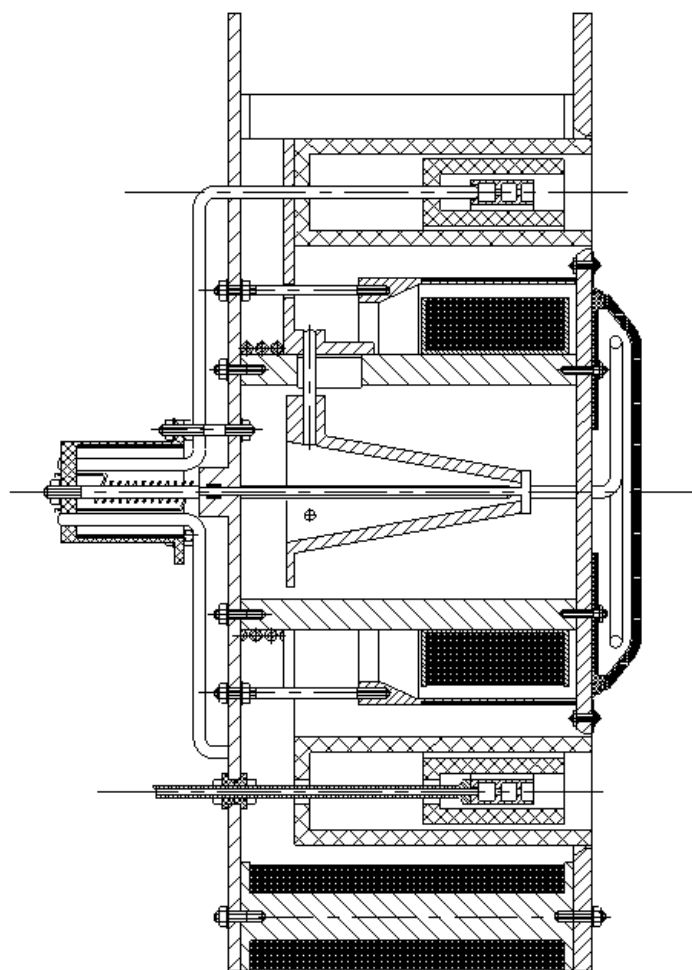


Рис. 4. ДАС большой мощности на йоде

В предложенном двигателе решаются вопросы увеличения ресурса за счёт подвижной разрядной камеры и термоэмиссионного катода-нейтрализатора. Использование безрасходного катода позволит обойтись без дополнительного газобразного рабочего тела (ксенона или аргона) и его сложной арматуры системы

подачи. Эти решения были запатентованы.

Разработка экспериментального образца ЭРДУ на альтернативном рабочем теле (йод), а также стендовых систем для её испытания позволит перейти к формулировке технических требований для ОКР по созданию электроракетной двигательной установки нового поколения, имею-

щей значительно меньшую массу и габариты и обладающей большой экономической эффективностью.

Йод как возможное альтернативное рабочее тело для СПД начали исследовать и за рубежом. В американской фирме Busek Co в 2010 -2013 гг. проводились эксперименты с подачей пара йода в ДЗДЭ мощностью от 0,1 до 10 кВт (при этом в катод, как правило, подавался ксенон). При этом параметры двигателей на

йоде как минимум не уступали аналогичным характеристикам ЭРД на ксеноне.

Помимо двигателей большой мощности, где преимущества ЭРДУ на рабочем теле йод неоспоримы, представляют интерес микро ЭРДУ. В 2014 г. NASA принята программа SBIR Этап II. Она предполагает выделение 1,5 млн. \$ на разработку 100 Вт двигателя Busek Co на рабочем теле йод для микроспутников типа CubeSat.

Информация об авторах

Островский Валерий Георгиевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Ракетно-космическая корпорация «Энергия». E-mail: valery.ostrovsky@rsce.ru. Область научных интересов: электроракетные двигатели, электроракетные двигательные установки, системы хранения и подачи рабочего тела, катоды ЭРД.

Смоленцев Александр Алексеевич, главный конструктор двигателей, двигательных и энергетических установок, руководитель НТЦ, Ракетно-космическая корпорация «Энергия». E-

mail: alexander.smolentsev@rsce.ru. Область научных интересов: электроракетные двигатели, электроракетные двигательные установки, системы хранения и подачи рабочего тела, жидкостные ракетные двигатели, энергетические установки.

Щербина Павел Александрович, инженер-конструктор, Ракетно-космическая корпорация «Энергия». E-mail: kosmolotmars@mail.ru. Область научных интересов: электроракетные двигатели, электроракетные двигательные установки, системы хранения и подачи рабочего тела, катоды ЭРД.

IODINE AS AN ALTERNATIVE PROPELLANT FOR ELECTROJET ENGINES

©2014 V.G. Ostrovskiy, A.A. Smolentsev, P.A. Scherbina

JSC RSC Energia, Korolyov, Russian Federation

In the article the analysis of iodine as a propellant electric propulsion for electric thruster with closed electron drift is provided. This compares the iodine thruster performance with the same parameters using the traditional propellant - xenon. Advantages of electro-propulsion on the iodine compared to installing, using xenon. Justified the use of iodine as a propellant for high power thrusters. Presents the preliminary design and the results of the first tests of stationary plasma thrusters on the iodine. The article provides information about the progress of RSC Energia corporate research, the purpose of which is to develop a bench-top system for the storage and supply of iodine. It is shown and described the system layout storage and supply for experimental testing electric propulsion on the iodine. Also shown plans of RSC Energia in further research on the development of electric propulsion on the iodine. The article presents a variant of the high power thrusters on a propellant of iodine, which offers the challenge of ensuring the life of the thruster and the use of thermionic cathode. This article provides an overview of Western achievements in the use of propellant iodine in electric thruster.

Electric thruster, electric propulsion systems, iodine, propellant.

About the authors

Ostrovsiy Valery Georgievich, Candidate of Science (Engineering), Senior research engineer at RSC Energia. E-mail: valery.ostrovsky@rsce.ru. Area of Research: electric thruster, electric propulsion systems, storage and supply systems, cathode of electric thrusters.

Smolentsev Alexander Alexeyevich, General Designer for propulsion and power systems, Head of STC at RSC Energia. E-

mail: alexander.smolentsev@rsce.ru. Area of Research: electric thruster, electric propulsion systems, storage and supply systems, liquid-propellant rocket engine, power plants.

Scherbina Pavel Aleksandrovich, Engineer at RSC Energia. E-mail: kosmolotmars@mail.ru. Area of Research: electric thruster, electric propulsion systems, storage and supply systems, cathode of electric thrusters.