

## **Крупногабаритные высокочастотные ионные двигатели**

Х.В. Лёб, Г.А. Попов, В.А. Обухов, Д. Фейли, Ш. Коллингвуд, А.И. Могулкин

### **Аннотация**

Описывается крупногабаритный высокочастотный (ВЧ) ионный двигатель (ИД) ВЧИД-45 с ионизатором диаметром 48.6 см номинальной мощностью 35 кВт, тягой 760 мН и удельным импульсом 7000 с. Планируемый ресурс должен быть не менее 50000 часов. Указанные параметры реализуются при токе пучка 7.0 А и положительном ускоряющем напряжении 4.5 кВ.

Ядерная энергетическая установка (ЯЭУ) мощностью 1 МВт может обеспечить электроэнергией кластер из тридцати таких двигателей. Двигательная установка может быть основана на меньшем числе двигательных модулей большей размерности и большей мощности, например, с диаметром ионизатора в 65 см при мощности 70 кВт или при диаметре 80 см с мощностью 105 кВт. Такой двигатель может развивать тягу до 1.08 Н.

Двигатель ВЧИД-45 был сконструирован с использованием опыта создания двигателей семейства RIT меньшей размерности. Заложенные в конструкции характеристики были выведены из законов подобия, установленных при разработке двигателей семейства RIT.

### **Ключевые слова**

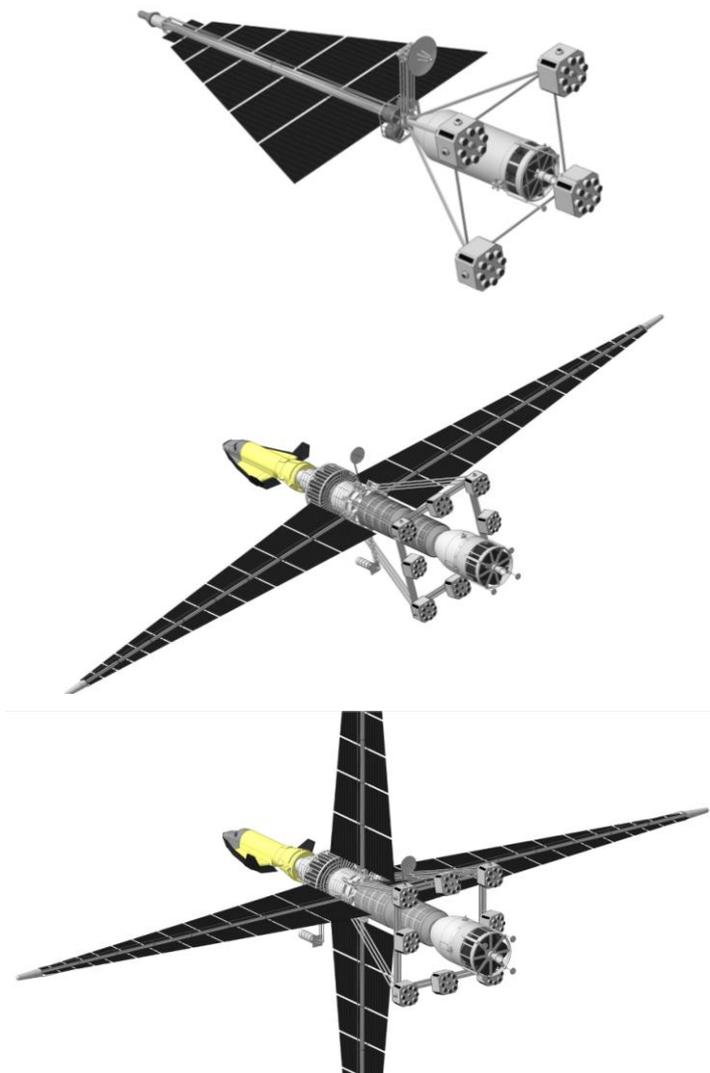
высокочастотные ионные двигатели; конструкция двигателя; законы масштабирования; высокая мощность; высокий удельный импульс; лунный грузовой корабль; пилотируемый марсианский корабль; космическая ядерная энергоустановка.

### **Введение**

В середине 2010 года Президент Российской Федерации одобрил разработку ядерного космической энергоустановки в 1 МВт под научным руководством исследовательского центра им. М.В. Келдыша [1].

При использовании электроракетной двигательной установки (ЭРДУ) в виде кластера высокомошных электрических ракетных двигателей (ЭРД), уникальная ядерная электроракетная двигательная установка (ЯЭРДУ) позволит осуществить [2]:

- амбициозные автоматизированные миссии в пределах Солнечной системы и вне нее;
- тяжелые грузовые транспортные перелеты с низкой околоземной орбиты (800 км) на геостационарную орбиту и поверхность Луны;
- пилотируемые экспедиции на Марс;
- защиту Земли от астероидной и кометной угрозы;
- увод больших объектов космического мусора и т.д.



**Рис.1. 1 МВт лунный грузовой КА (вверху), 2 МВт (в середине) и 4 МВт (внизу) пилотируемые марсианские корабли, все оснащены ионными двигателями ВЧИД-45**

Первый пример лунного грузового корабля был описан в [3, 4]. Рисунок 1 (вверху) представляет космический аппарат (КА), оснащенный ЯЭРДУ мощностью 1 МВт (20 тонн) на платформе с четырьмя кластерами по десять двигателей ВЧИД-45 в каждом (общая масса ЭРДУ составляет 5.7 тонны), масса спускаемой лунной ракеты, размещенной в задней части КА, составляет 25 тонн. За время активного существования ЯЭРДУ могут быть осуществлены пять транспортных операций с перелетом с низкой геоцентрической орбиты (800 км) на низкую селеноцентрическую орбиту (100 км) с

общей грузоподъемностью на низкой селеноцентрической орбите в 128.5 тонны и расходом рабочего тела порядка 10.8 тонн на каждый перелет туда и обратно.

Рисунок 1 (в середине и внизу) представляет два пилотируемых КА на Марс с мощностью в 2 МВт и 4 МВт, соответственно. Радиаторы ЯЭРДУ закреплены на цилиндрических жилых отсеках. На раме в задней части закреплены возвращаемый КА для маневрирования в атмосфере Земли и посадочно-взлетный КА для Марса. Анализ миссии показывает, что стартовая масса системы составляет 215 тонны, а время полета туда и обратно равно 2.5 года [5].

Все примеры миссий были основаны на применении кластеров ВЧИД-45 со следующими характеристиками:

1. энергопотребление двигательной установки - 35 кВт на двигатель;
2. удельный импульс – 7000 с, который соответствует положительному ускоряющему напряжению 4.5 кВт;
3. ресурс двигателя - 50000 часов.

Указанные характеристики системы трудно достижимы, они не могут быть реализованы с помощью имеющихся в настоящий момент двигателей. Однако ВЧИД-45 обещает достигнуть их.

## 2. Принцип работы двигателя

Принцип работы ВЧИД был уже неоднократно описан (см., например, [6]) и здесь он будет лишь дан схематично. Принципиальная схема ВЧИД приведена на рисунке 2.

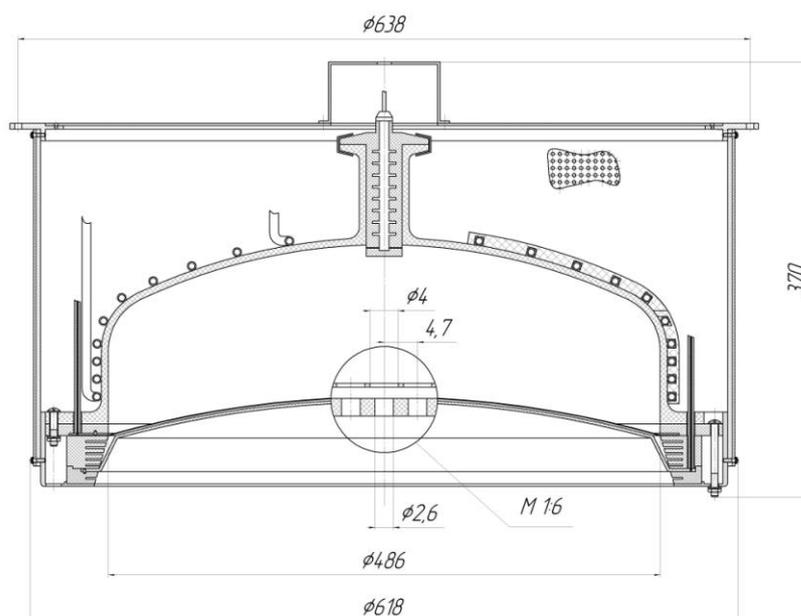


Рис.2. Поперечное сечение настоящих размеров двигателя ВЧИД-45

Индукционная катушка ВЧ-генератора (ВЧГ) окружает ионизационную камеру и индуцирует вихревое электрическое поле, которое нагревает электроны до энергии, достаточной для ионизации ксенона электронами в хвосте распределения Максвелла. Результатом является безэлектродный, самосогласованный разряд. Зажигание разряда производится подачей токового импульса от нейтрализатора.

Ионы ксенона извлекаются из ионизированной плазмы, ускоряются и фокусируются ионно-оптической системой, образованной парой профилированных электродов. Истекающий ионный поток нейтрализуется с помощью электронов из полого катода.

Существует несколько концептуальных преимуществ высокочастотного ионного двигателя над стационарными плазменными двигателями (СПД) и двигателями типа Кауфмана:

- существование системы электродов позволяет работать с напряжением ускоряющего электрода в 4.5 кВ, которое обеспечивает удельный импульс тяги в 7000 с;
- из-за использования ионно-оптической фокусировки, угол расходимости струи может быть сильно уменьшен, что приводит к увеличению ресурса;
- еще одним преимуществом перед двигателями типа СПД является сравнительно низкая рабочая температура;
- по сравнению с ионными двигателями Кауфмана, не требуется разрядных электродов с высоким напряжением (вместе с их электропитанием и блоками управления);
- внутри ионизационной камеры не присутствуют металлические части; за счет чего нет распыления материалов, продукты которого могут привести к короткому замыканию между высоковольтными электродами;
- так как ВЧ-разряд не чувствителен к примесям кислорода, ксенон не должен быть очень высокой частоты, что приведет к резкому снижению затрат на рабочее тело;
- механическая конструкция, система электропитания и блок управления системой относительно просты.

С другой стороны, некоторые концептуальные недостатки ВЧИД должны быть рассмотрены и отмечены, например, несколько усложняется система ввода мощности от ВЧГ в ВЧ-разряд, и необходимо рассматривать вопросы электромагнитной совместимости.

### **3. Конструкция двигателя**

Внешний вид ВЧИД-45 схож с двигателем RIT-22, однако его необходимо модифицировать.

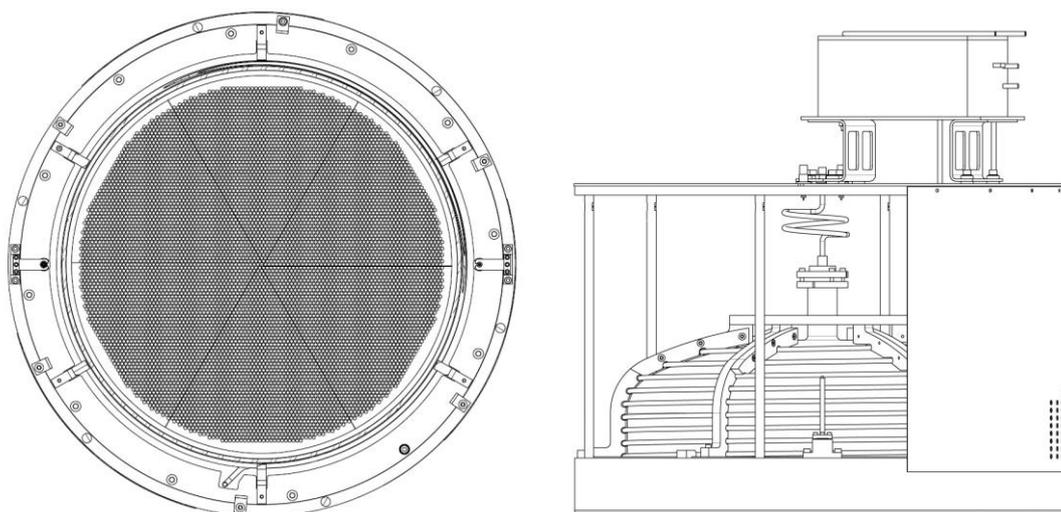
Изолятор узла ввода ксенона должен теперь гарантировать стойкость при напряжении свыше 4.5 кВ.

Специальная форма разрядной камеры из алюмооксидной керамики (см. рисунок 2) должна не только минимизировать потери мощности из плазмы, но также и обеспечить стойкость к вибрационным нагрузкам. Диаметр ионизатора  $2R$  составляет 486 мм. Оптимальная длина равна 130 мм, в соответствии с законом подобия (для ксенона):  $l_{opt} = (2R)^{0.066}$  [6].

Индуктор имеет десять витков и закреплен шестью фиксаторами. Индуктор подключен к помещенному рядом с двигателем ВЧГ (частота - 700 кГц, мощность - 3 кВт).

Двухэлектродная ионно-оптическая система (напряжение на электродах - 4.5 кВ; мощность - 0.5 кВ) была рассчитана в соответствии с законами подобия, опираясь на опыт создания РИТ-22 (+2.1 кВ/-0.215 кВ) критерий подобия:  $\beta \sim j_i^{-1/2} U_{ex}^{3/4}$  [6], был обоснован при расчете траекторий ионов с использованием программы IGUN.

В результате, система электродов содержит 8583 отверстия (рисунок 2) и имеет радиус кривизны порядка 80 см. Эмиссионный электрод может быть изготовлен из молибденового, титанового или углеродного композиционного материала толщиной 0.55 мм. Диаметр отверстий в нем 4.0 мм. Ускоряющий электрод может быть выполнен из графита или углеродного композиционного материала толщиной 2.5 мм. Рисунок 3 показывает общий вид двигателя.

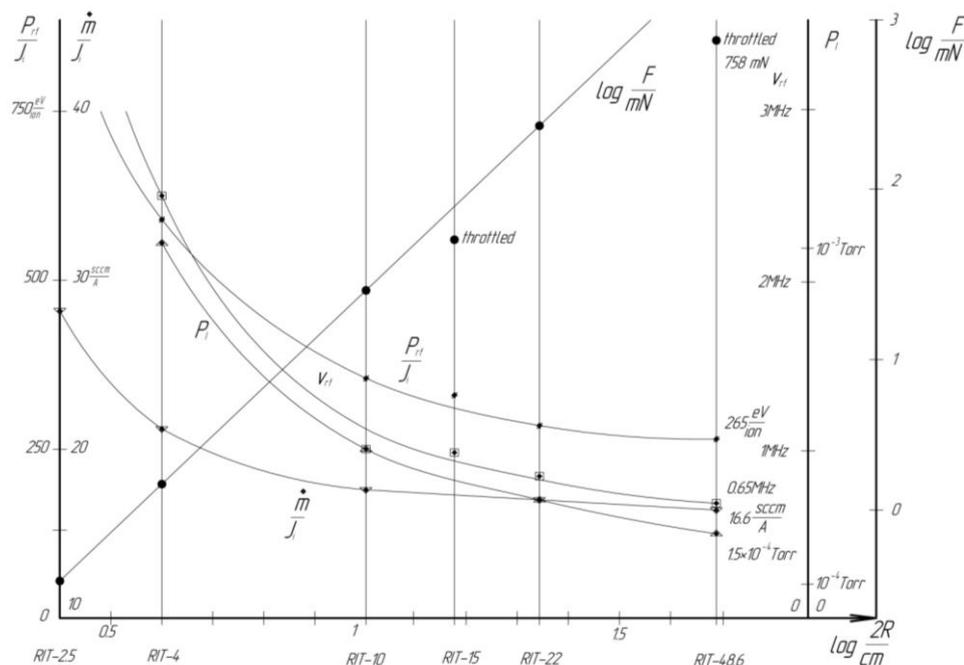


**Рис.3. Конструктивный образ двигателя ВЧИД-45**

#### **4. Производительность двигателя**

На основе принципа подобия при масштабировании были экспериментально определены оптимальное значение частоты, давления газа, затраты на производство иона

и т.д. (рисунок 4) для серии двигателей разного типоразмера от микродвигателя RIT-2.5 (диаметр 2.5 см) до двигателя RIT-22 (диаметр 22 см), и получены соответствующие значения для ВЧИД-45. Вместе со специфичными значениями, известные формулы позволили определить параметры двигателя (см. таблица 1), например, тягу 760 мН, и общий коэффициент полезного действия (КПД) (с учетом расходимости пучка ионов) который составляет примерно 79 %.



**Рис. 4. Удельные затраты на производство ионов  $P_{rf}/J_i$ , удельный расход рабочего тела  $\dot{m}/J_i$ , давление газа в ионизаторе  $P_i$ , ВЧ-частота  $V_{rf}$  и логарифм тяги  $F$  как функция логарифма диаметра ионизатора  $2R$**

**Таблица 1**

**Оценка технических характеристик ВЧИД-45 мощностью 35-кВт (данные в скобках показывают значение параметра при выработке половины ресурса)**

Ускоряющее напряжение	+4.5 кВ
Мощность ВЧ-разряда	1.85 (2.64) кВт
Давление газа в разрядной камере	$1.5 (2.1) \times 10^{-4}$ торр
Ток пучка	7 (10) А
Удельные затраты на производство иона	265 эВ/ ион
Плотность тока в эмиссионном электроде	6.5 (9.25) мА/см <sup>2</sup>
Потребляемая мощность двигателя*	33.4 (47.6) кВт
Потребляемая мощность энергодвигательной установки*	35.1 (50) кВт
Расход рабочего тела*	11.3 (16.1) мг/с
Энергетический КПД*	94.9 %
Коэффициент использования рабочего тела	84.1 %
Полный (тяговый) КПД	78.6 %
Тяга	758 (1080) мН
Удельный импульс тяги	6880 с
Ресурс	56500 (27800) часов
* без нейтрализатора, который рассматривается как отдельная единица	

Ресурс  $T$  был оценен по экспериментально подтвержденному ресурсу RIT-10 и RIT-22 при учете следующих параметров: скорости распыления  $Y$ , сечения перезарядки  $q_{cex}$ , плотности нейтрального газа  $n_0$  и плотности тока пучка  $j_i$  в системе электродов. Расчетная формула имеет вид:  $T \sim (Yq_{cex}n_0j_i)^{-1}$ . Для ВЧИД-45 имеем  $T = 56500$  часов = 6.45 лет.

Если при осуществлении некоторых миссий нет необходимости в большом ресурсе, как, например, при полете к Марсу и обратно, двигатель может регулироваться в широком диапазоне тяги при входной мощности ЭРДУ в  $P = 50$  кВт. Соответствующие данные даны в таблице 1, в скобках. При оценке ресурса можно полагать, что  $T \sim 1/P^2$ .

Конечно же, двигатель ВЧИД может быть смасштабирован и на другие номиналы, если есть потребность в увеличении тяги, если количество двигателей в кластере должно быть уменьшено. Например, 65-см или даже 80-см двигатель может быть разработан на тех же принципах, если потребуются уровни мощности на уровне 79 кВт или 105 кВт. Тяга двигателя будет составлять 1.52 Н и 2.27 Н, соответственно. Удельный импульс может быть повышен с 6880 с до 7120 с или 7320 с, а общий КПД - с 78.6 % до 81.3 % или даже 83.5 %. Однако, стоимости разработки и квалификации опытных образцов возрастут примерно пропорционально третьей степени диаметра двигателя, что делает дальнейший рост размерности не слишком привлекательным.

## 5. Выводы и перспективы

Была разработана теоретическая модель ВЧИД-45 с заданными техническими характеристиками. Следующим шагом будет изготовление и испытание демонстрационной модели. Учитывая большой опыт Германии в работе с ВЧИД, Российско-Германское сотрудничество в указанной области является не только возможным, но и целесообразным.

## Благодарность

Работа была выполнена в НИИПМЭ МАИ при поддержке Гранта № 11.G34.21.0022. Министерства образования и науки Российской Федерации, которому мы очень признательны за это.

## Библиографический список

1. И. Афанасьев «Ядерный космос России», Новости Космонавтики № 2, 2010.

2. А.С. Коротеев, В.Н.Акимов и С.А. Попов «Проект создания мегаваттного транспортно-энергетического модуля на основе ядерной энергетической установки», журнал Полет, № 4, стр. 93-99, 2011.
3. H.W. Loeb, D. Feili, G.A. Popov, V.A. Obukhov, V.V. Balashov, A.I. Mogulkin, V.M. Murashko, A.N. Nesterenko, and S.A. Khartov: “Design of High-Power High-Specific Impulse RF-Ion Thruster”, 32<sup>nd</sup> IEPC, Wiesbaden, Sept. 11-15, 2011.
4. H.W. Loeb and V.G. Petukhov: “Analysis of a Possible Lunar Transfer Vehicle Using Nuclear Electric Propulsion”, prepared for publishing 2012.
5. М.С. Константинов и В.Г. Петухов «Анализ некоторой концепции для человеческой миссии на Марс», 61-ый IAF Конгресс, IAC-10-A5.4.6. Сент./Окт. 2010.
6. H.W. Loeb, J. Freisinger, K.H. Groh, and A. Scharmann: “State-of-the-Art of the RF-Ion Thrusters and Their Applications”, IAC-88-258, 39<sup>th</sup> IAF Congress, Bangalore, 1988.

### **Сведения об авторах**

Хорст Вольфганг ЛЕБ, профессор, доктор, Первого института физики Гиссенского университета имени Юстуса Либиха, Justus-Liebig-Universität, I. Physikalisches Institut. Heinrich-Buff-Ring 16, 35392 Gießen.

ПОПОВ Гарри Алексеевич, профессор, директор Научно-исследовательского института прикладной механики и электродинамики Московского авиационного института, д.т.н., академик РАН.

МАИ, Волоколамское ш., д. 4, г. Москва, А-80, ГСП-3, 125993;  
e-mail: [riame@sokol.ru](mailto:riame@sokol.ru)

ОБУХОВ Владимир Алексеевич, заместитель директора Научно-исследовательского института прикладной механики и электродинамики Московского авиационного института, к.т.н.

1 МАИ, Волоколамское ш., д. 4, г. Москва, А-80, ГСП-3, 125993;  
e-mail: [riame@sokol.ru](mailto:riame@sokol.ru)

Давр ФЕЙЛИ, доктор Первого института физики Гиссенского университета имени Юстуса Либиха, Justus-Liebig-Universität, I. Physikalisches Institut.

Heinrich-Buff-Ring 16, 35392 Gießen;  
e-mail: [davar.feili@exp1.physik.uni-giessen.de](mailto:davar.feili@exp1.physik.uni-giessen.de)

Шерил КОЛЛИНГВУД, доктор Первого института физики Гиссенского университета имени Юстуса Либиха, Justus-Liebig-Universität, I. Physikalisches Institut.

Heinrich-Buff-Ring 16, 35392 Gießen;

e-mail: [cheryl.collingwood@physik.uni-giessen.de](mailto:cheryl.collingwood@physik.uni-giessen.de)

МОГУЛКИН Андрей Игоревич, инженер лаборатории ВЧИД Московского авиационного института.

МАИ, Волоколамское ш., д. 4, г. Москва, А-80, ГСП-3, 125993;

e-mail: [riame@sokol.ru](mailto:riame@sokol.ru)