

УДК 621.455.4

## **Лаборатория высокочастотных двигателей Московского авиационного института - новая форма Российско-Германского сотрудничества**

Х.В. Лёб, Г.А. Попов, В.А. Обухов

### **Аннотация**

Постановление № 220 Правительства Российской Федерации «О мерах по привлечению ведущих ученых в российские образовательные учреждения высшего специального образования» открыло путь к новым формам международного научного сотрудничества. Московский авиационный институт (МАИ) выиграл конкурс и получил грант на создание в МАИ «Лаборатории высокочастотных ионных двигателей (Лаборатории ВЧ ИД МАИ)» под руководством профессора Университета г. Гиссен Хорста Вольфганга Лёба для выполнения НИОКР: «Исследования и разработка космических высокоимпульсных высокочастотных электроракетных ионных двигателей» на период 2010-2012 г.г. В докладе приводится история развития сотрудничества между МАИ и университетами Германии в области электроракетных двигателей и результаты деятельности лаборатории ВЧ ИД как новой формы российско-немецкого сотрудничества в данной области.

### **Ключевые слова**

высокочастотный ионный двигатель; электроракетный двигатель; российско-германское сотрудничество

### **Введение**

Сотрудничество между МАИ и его подразделения Научно-исследовательского института механики и электродинамики (НИИ ПМЭ МАИ) с университетами Германии городов Гиссен, Берлин и Штутгарт в области электроракетных двигателей и их применений насчитывает более чем 20-летнюю историю. Сотрудничество осуществлялось в традиционных формах и охватывало различные сферы деятельности: совместные разработки, обмен преподавателями, научными и техническими специалистами,

проведение совместных конференций и семинаров, совместные публикации, обмен студентами. К важнейшим можно отнести следующие результаты сотрудничества:

**В 1990-1994 г.г.** НИИ ПМЭ МАИ и ОКБ «Факел», с российской стороны, и Гиссенский университет и Берлинский университет, с немецкой стороны, разработали по заказу фирмы HAUZER. (Нидерланды) технологические установки для получения многослойных тонкопленочных оптических покрытий с использованием немецкой технологии высокочастотных (радиочастотных) источников ионов, созданных на базе высокочастотных ионных двигателей (ВЧИД) (RIT – в европейской аббревиатуре) и российской технологии, основанной на стационарных плазменных двигателях (СПД) и замедлителях ионов с замкнутым дрейфом электронов. Результатом работы, в частности, стали четыре международных патента, разработанных российскими участниками проекта.

**В 1992-1995 г.г.** Объединенная Германско-Российская научная группа по заданию Российского и Германского космических агентств разработало проект «Перспективные межпланетные полеты с использованием электроракетных двигателей и ядерных энергетических установок» [1].

**В 1992-1994 г.г.** при непосредственном участии Гиссенского и Штутгартского университетов, а также МАИ и НИИ ПМЭ МАИ были организованы две Германо-Российские конференции и одна Российско-Германская конференция по электроракетным двигателям (ЭРД) и их применениям [2].

Совместные работы были полезны с многих точек зрения и как вклад в решение прикладных задач, и, что может быть еще важнее, для установления многолетних дружественных доверительных отношений между ведущими учеными Германии и России разных поколений в области ЭРД.

Важным результатом сотрудничества в 1990-2000 годах стало знакомство германских специалистов, а затем и специалистов других стран с российской технологией СПД, и, в свою очередь российских специалистов с германской технологией ВЧИД.

Сотрудничество в этих областях переросли характер чисто университетских проектов и вышло в 21 веке на уровень промышленной международной кооперации.

Новые возможности сотрудничества открывает создание в МАИ лаборатории ВЧИД МАИ. Лаборатория создана для выполнения НИОКР: «Исследования и разработка космических высокоимпульсных высокочастотных электроракетных ионных двигателей» с финансированием из госбюджета РФ в период 2010-2012 годов.

## **Структура и задачи лаборатории**

Победа МАИ в конкурсе на получение гранта по созданию лаборатории ВЧИД МАИ обусловлена тремя факторами: важностью заявленной тематики НИОКР для российской космической технологии, авторитетом ведущего ученого Хорста Лёба – создателя ВЧИД и одного из пионеров ЭРД в мире, способностью МАИ обеспечить функционирование лаборатории на своей территории, модернизировав экспериментальную базу и снабдив необходимыми материальными ресурсами. Лаборатория является структурным подразделением научно-исследовательской части (НИЧ) МАИ. В ее штате студенты, аспиранты, молодые инженеры, научные сотрудники и профессора Московского авиационного института. Координатором работ лаборатории по поручению ректора МАИ является академик Г.А. Попов.

Перед лабораторией поставлены следующие основные задачи: создание экспериментального комплекса для исследования и испытаний ИД на мировом уровне, формирование научного коллектива с приоритетом на омоложение штатного состава, выполнение конкретных поисковых и прикладных исследований в области ВЧИД и их применений. По условиям гранта лаборатория в рамках МАИ должна через некоторое время обеспечить самофинансирование своей деятельности.

### **Направления исследований**

Программа работ лаборатории имеет целью создание высокочастотных ионных двигателей (ВЧИД) с высоким удельным импульсом тяги, ранее не исследовавшихся в России. Особенностью данных устройств является использование высокочастотного электромагнитного поля для нагрева и ионизации газа (плазмы) в газоразрядной камере (ГРК) двигателя. Данный способ ионизации реализуется в самостоятельном ВЧ разряде индукционного типа, который можно охарактеризовать как «безэлектродный».

В связи с развитием космической техники и расширением круга задач, решаемых с помощью электроракетных двигателей, возрастают требования к уровню характеристик самих двигателей. При этом ключевым требованием к разрабатываемым ЭРД на современном этапе их развития является расширение рабочего диапазона по мощности, удельному импульсу тяги (скорости истечения рабочего тела из двигателя) и ресурсу в область высоких значений по сравнению с достигнутыми на сегодняшний день показателями. В новых двигателях, исследованием и разработкой которых занимается лаборатория ВЧИД МАИ, должны быть реализованы скорости истечения до  $8 \times 10^4$  м/с, а

ресурс – несколько десятков тысяч часов. Это позволит решать многие задачи освоения космического пространства на качественно новом, более высоком уровне.

Для решения поставленных задач необходимо развивать экспериментально-теоретические методы исследования, позволяющие создать надежные физико-математические модели основных физических процессов в ВЧИД и расчетные термомеханические и механико-динамические модели двигателей в целом.

При создании ВЧИД необходимо решить ряд технологических проблем на российской промышленной базе. По этой причине лаборатория совместно с НИИ ПМЭ МАИ и кафедрой 208 МАИ участвует в исследовательских и прикладных НИР, а также в разработке технических предложений и эскизных проектов в рамках ОКР, имеющих целью создание ВЧИД нового поколения и их применение в перспективных миссиях.

Одной из важных проблем применения ЭРД вообще и ВЧИД в частности является взаимодействие плазменной струи двигателя с системами КА. Решение этих проблем требуют проведения специальных исследований по интеграции двигателей с системами космических аппаратов по характеристикам ионных потоков, истекающих из двигателя, по их воздействию на элементы конструкции и системы радиоконтекста аппаратов.

Самостоятельным является блок научных задач, связанных с изучением проблем применения ВЧИД в различных космических проектах на основе проектно-баллистических исследований.

Потребность в высокоэффективных источниках ускоренных потоков имеется не только в космической технике, но и в наземных технологиях по модификации поверхности деталей и изделий, особенно для процессов нанотехнологий.

В связи с этим в рамках работ лаборатории запланирована разработка на базе ВЧИД источников заряженных частиц для процессов ионно-плазменной технологии, внедрение которых позволит окупить затраты на исследовательские работы в области космоса.

### **Модернизация экспериментальной базы**

В настоящее время лаборатории ВЧИД располагает тремя экспериментальными стендами: 2ИУ-2В, 2ИУ-3В и У-2В. В 2010 и 2011 г.г. были разработаны проекты и осуществлена глубокая модернизация всех стендов. Характеристики стендов приведены в таблице 1.

**Характеристики испытательных стендов**

Наименование стенда	Назначение	Объем вакуумной камеры, дополнительные сведения	Производительность и характеристика средств откачки
2ИУ2В	Испытания ВЧИД мощностью 1.5...4 кВт	2 м <sup>3</sup>	18600 л/с по ксенону (криосорбционный и турбомолекулярные насосы), динамический вакуум (1...2)×10 <sup>-5</sup> мм.рт.ст. при расходе 1.5 мг/с
2ИУ3В	Зондовые и другие измерения в плазме ВЧ разряда источников ионов с мощностью пучка ионов до 0.7 кВт	0.3 м <sup>3</sup>	8400 л/с по ксенону (турбомолекулярные средства откачки), динамический вакуум (1...2)×10 <sup>-5</sup> мм.рт.ст. при расходе 0.65 мг/с
У2В	Испытания ВЧИД мощностью 5-35 кВт, диагностика электромагнитного излучения двигателей от 1 МГц до 20 ГГц	20 м <sup>3</sup> подведенная электрическая мощность свыше 300 кВт, оснащен безэховой камерой	До 230 тыс. л/с (крионасосы и турбомолекулярные насосы), динамический вакуум (1...2)×10 <sup>-5</sup> мм.рт.ст. при расходе 15 мг/с

Фотография стендов 2ИУ-3В, 2ИУ-2В и У-2В приведены на рисунках 1, 2, 3, соответственно.



**Рис.1. Стенд 2ИУ-3В**



**Рис.2. Стенд 2ИУ-2В**



**Рис.3. Стенд У-2В**

Стенды оснащаются специализированными системами электропитания и контроля параметров ионных двигателей (ИД) и источников ионов (ИИ) мощностью от 100 Вт до 35 кВт. Стендовая база лаборатории позволяет проводить исследование рабочих параметров ИД и ИИ, включая зондовую диагностику разрядной плазмы и плазменной струи. Стенд У-2В оснащен средствами для исследования электромагнитного излучения ЭРД в диапазоне частот от 1 МГц до 20 ГГц [3].

### Разработка лабораторных образцов ВЧИД

Центральная задача лаборатории – разработка теории ВЧ разряда, освоение принципов конструирования, методик испытаний и исследования характеристик ВЧИД. Из инженерных задач следует выделить разработку лабораторных моделей ВЧИД и систем питания ВЧ разряда: ВЧ генераторов различной мощности с рабочей частотой в диапазоне 0,8 – 2 МГц. На рисунках 4 и 5 приведены конструкции лабораторных моделей ВЧИД-10 и ВЧИД-15 с диаметром рабочей части ИОС 100 мм и 150 мм, соответственно.

Создание лаборатории позволило привлечь специалистов Гиссенского университета к разработке лабораторного образца системы формирования пучка ионов (СФПИ) на основе технологического источника ионов RIM-20. В состав установки входят блоки ВЧГ и согласующей системы (match box), высоковольтного питания ИОС, управления и контроля основными параметрами СФПИ, программное обеспечение. Помощь специалистов Гиссенского университета важна для более быстрого освоения технологии ВЧИД и источников ионов для процессов ионно-плазменной технологии (рисунок 6) [4].



Рис. 4. Фото ВЧИД-100: а) без защитного кожуха; б) с кожухом



Рис.5. Лабораторная модель ВЧИД-15



**Рис.6. Монтаж ВЧ источника ионов RIM-20 для демонстрационных испытаний в Гиссене**

Одним из перспективных направлений лаборатории является разработка ВЧИД мощностью до 35 кВт, предназначенного для транспортно-энергетического модуля с ядерной энергетической установкой мегаваттного уровня мощности [5]. Эта разработка выполнена на уровне эскизного проекта и в части анализа проектных характеристик ВЧИД представлена в [6, 7].

### **Разработка физико-математических моделей**

Исследования разнообразных по своей физической природе процессов в ВЧИД позволяет разработать физико-математические модели основных узлов двигателя, использование которых значительно сокращает время проектных и конструкторских работ. Так, при разработке эскизного проекта по ВЧИД мощностью 35 кВт были разработаны следующие модели, решающие задачи проектирования:

Модель	Решаемая задача
Тепловая модель	Распределение температуры в элементах двигателя, определение критических значений температуры и градиентов температуры
Термомеханическая модель узла ИОС	Определение изменения формы и напряжений в элементах конструкции ИОС при тепловом нагружении
Модель ИОС	Расчет геометрических и электрических параметров ИОС, траекторий ионов пучка и ионов перезарядки, распределение потоков частиц и энергии по поверхности электродов. Моделирование процесса эрозии электродов и определение ресурса.
Инженерная модель расчета	Баланс частиц и мощности в ВЧ

параметров плазмы и характеристик ВЧ разрядной камеры

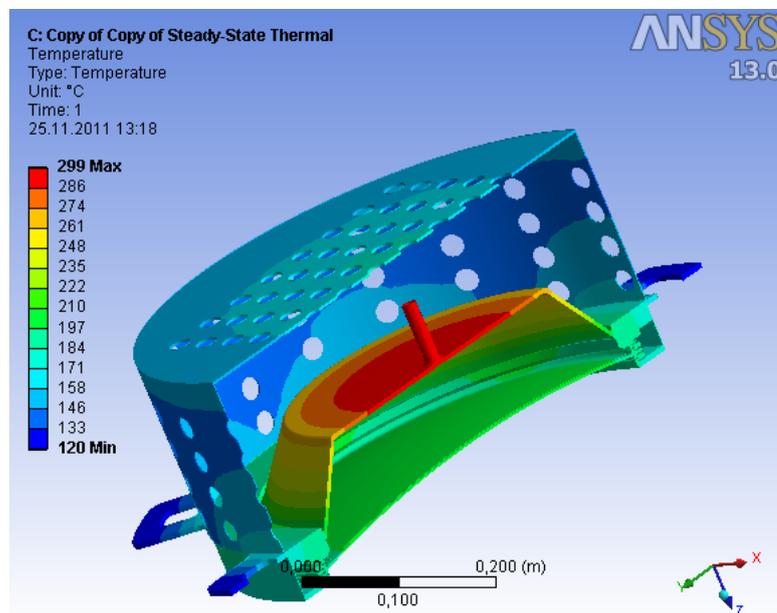
разряде, определение коэффициента ионизации, компонентного состава плазмы и удельных энергозатрат на ионизацию.

Модель радиоизлучений

Определение амплитудно-частотных характеристик собственного электромагнитного излучения двигателя.

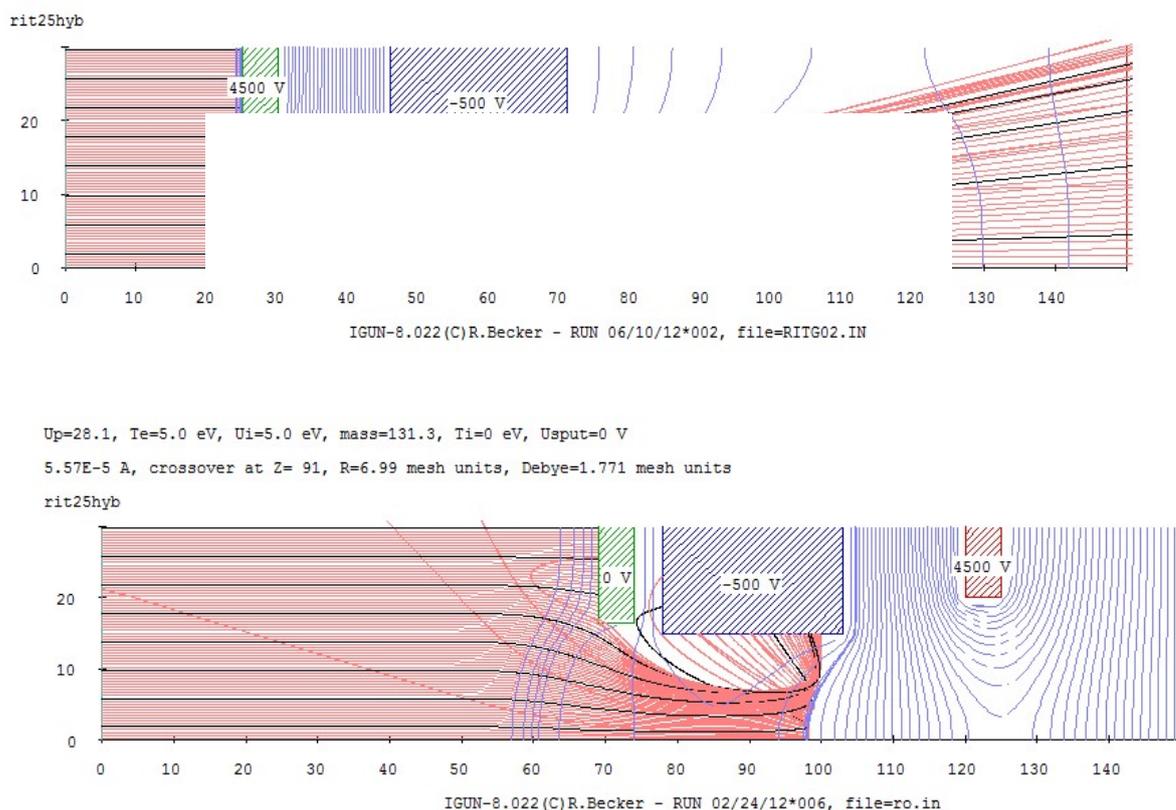
Расчетные модели связаны между собой, так расчеты по одной из них могут служить исходными данными для расчетов по другой. Например, данные по распределению потока мощности, полученные из модели разряда, используются в качестве исходных данных для тепловой модели.

Результаты численного моделирования температурных полей в двигателе диаметра 450 мм приведены на рисунке 7.



**Рис.7. Расчетное поле температур**

Результаты расчета потоков первичных ионов и ионов перезарядки приведены на рисунке 8.



**Рис.8 Пример расчета потоков первичных ионов (верхний рисунок) и ионов перезарядки (нижний рисунок)**

В задачи лаборатории входят также изучение перспектив применения ВЧИД в перспективных миссиях, а также проблем интеграции электродвигательных установок на базе ВЧИД с системами космических аппаратов.

Результаты сравнительных проектно-баллистических оценок эффективности применения двигателей RIT-22 и СПД-140 в проектах «Интергелио-Зонд» и «Mercury Lander» приведены в материалах данной конференции [3, 8]. Работы по данным направлениям проводятся при тесном сотрудничестве с немецкими организациями. Так, совместно с фирмой Astrium EADS и ОКБ «Факел» по заданию НПО имени С.А. Лавочкина лабораторией и НИИ ЕМЭ МАИ разработан эскизный проект на электродвигательный модуль на основе двигателя RIT-22 для КА «Интергелио-Зонд». В эскизном проекте использованы, в частности, результаты проектно-баллистического анализа миссии, расчетно-экспериментальная оценка корпускулярного и электромагнитного взаимодействия плазменной струи RIT-22 с системами КА. Работа над эскизным проектом является подтверждением важной роли лаборатории в установлении и научно-технической поддержке кооперативных связей промышленных организаций и высших учебных заведений двух стран.

## **Заключение**

1. Создание лаборатории ВЧИД МАИ, руководимой профессором Хорстом Лёбом, содействует расширению и углублению взаимовыгодных кооперационных связей промышленных организаций и учреждений высшей школы России и Германии, способствует разработке и реализации совместных проектов в области ЭРД.
2. В результате практической деятельности лаборатории ВЧИД МАИ формируется надежное стратегическое партнерство российских и германских специалистов по освоению технологии ВЧИД в России, в том числе на российской технологической базе.
3. Деятельность лаборатории за счет активного привлечения к работе аспирантов и студентов, проведению стажировок молодых специалистов и студентов в Германии, выполнению совместных разработок, в том числе за счет бюджета лаборатории, способствует повышению уровня подготовки специалистов в области ЭРД для космической отрасли обеих стран.
4. Практически закончено формирование стендовой базы лаборатории, отвечающей международным стандартам.
5. Созданы лабораторные образцы ВЧИД, ВЧ генераторов и согласующих блоков собственной разработки, начаты исследования инженерных и технологических решений применительно к ВЧИД большой мощности.
6. Сотрудники лаборатории активно участвуют в международных и внутри российских научных мероприятиях, на которых представлено 52 доклада, опубликовано 24 статьи, в том числе совместно с немецкими партнерами.
7. Проведены проектно-баллистические оценки применения ВЧИД RIT-22 в перспективных миссиях. Совместно с фирмой Astrium EADS, ОКБ Факел и НИИ ПМЭ МАИ выполнен эскизный проект на тяговый модуль на основе RIT-22 для КА «Интегелио-Зонд» и баллистические расчеты миссии.
8. В составе стендовой базы лаборатории создан первый в России специализированный стенд по исследованию проблем ЭМС, связанных с применением ЭРД, в частности, ВЧИД и разработаны методики проведения соответствующих исследований с использованием аппаратуры, отвечающей частотному диапазону 1МГц-15ГГц.
9. В ближайшие планы лаборатории входит создание образцов двигателей на отечественной технологической базе, размерность и характеристики которых ориентированы на применение на отечественных КА ближнего и дальнего космоса, их комплексное исследование и экспериментальная отработка.

Работа выполнена при поддержке Гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации НШ-

143.2012.8 и Гранта Совета по грантам Правительства Российской Федерации для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных учреждениях высшего профессионального образования № 11.G34.21.0022.

### **Библиографический список**

1. H.W. Loeb, H. Bassner, W. Berry, M. Heichler, et al. Electric Propulsion – Ready to Enhance Interplanetary Missions. Proceedings of Symposium “Scientific Satellites Achievements and Prospects in Europe, Paris, France, 1996.
2. H. Loeb. Russian – German Conferences and Joint activities. 4th Russian-German Conference “Electric Propulsion. New Challenges”. Moscow, 2012.
3. А.П. Плохих, Н.А. Важенин, Г.В. Соганова. 4 Российско-Германская конференция по электрическим ракетным двигателям. Новые вызовы. Москва, 2012.
4. В.К. Абгарян, Х.В. Лёб, В.А. Обухов, И.И. Шкарбан. Высокочастотные источники ионов инертных газов и химически активных газов. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. №1, 2012, с.
5. И. Афанасьев. «Российский ядерный космос». Новости космонавтики. №2, 2010.
6. H.W. Loeb, D. Feily, G.A. Popov, V.A. Obukhov, et al. Design of High-Power High-Specific Impulse RF-Ion Thruster. IEPC-2011-209, 2011.
7. H.W. Loeb, G.A. Popov, V.A. Obukhov, D. Feili, et al. Large Ion Engines. 4th Russian-German Conference “Electric Propulsion. New Challenges”. Moscow, 2012.
8. М.С. Константинов, В.Г. Петухов. Применение высокочастотного ионного двигателя RIT-22 в проекте «Интергелио-Зонд». 4 Российско-Германская конференция по электрическим ракетным двигателям. Новые вызовы. Москва, 2012.

### **Сведения об авторах**

Хорст Вольфганг ЛЁБ, профессор, доктор, Первый институт 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.,4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993;

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

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

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

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