

ГЕЛИКОН – ДУХОВОЙ МУЗЫКАЛЬНЫЙ ИНСТРУМЕНТ. ФИЗИКИ НАЗЫВАЮТ ЭТИМ СЛОВОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНУЮ ВОЛНУ, КОТОРАЯ ВОЗБУЖДАЕТСЯ В ПЛАЗМЕ, НАХОДЯЩЕЙСЯ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ. БЫТЬ МОЖЕТ, В БУДУЩЕМ СЛОВО “ГЕЛИКОН” СТАНЕТ НАРИЦАТЕЛЬНЫМ НАЗВАНИЕМ ПЛАЗМЕННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ, КОТОРЫЕ БУДУТ РАЗГОНЯТЬ ЗЕМНЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ КОРАБЛИ К ДАЛЕКИМ ПЛАНЕТАМ

Космический марш для плазмы и геликона

Текст: Дмитрий Мамонтов

За прошедшие полвека земная космонавтика уверенно освоила околоземное пространство и начала изучение планет Солнечной системы, опираясь на традиционные двигатели на химическом топливе. Конечно, еще многие годы космонавтика будет полагаться на старую добрую “химию”. Но химические двигатели имеют серьезное ограничение, связанное с энергетикой химических реакций.

ДВИГАТЕЛЬ

Они чрезвычайно “прожорливы”, то есть имеют низкий удельный импульс (отноше-

ние импульса к массовому расходу топлива). Поэтому космические аппараты, которые ученые посылают к окраинам Солнечной системы, несут совсем небольшую полезную нагрузку, даже с учетом гравитационных маневров в поле тяготения планет, используемом для дополнительного разгона.

Вполне возможно, что на смену “химии” придут электрореактивные двигатели (ЭРД). Именно на ЭРД в последнее время возлагают большие надежды конструкторы космической техники. “ПМ” уже

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО ПРОТИВ ХИМИИ

Пока на орбитах господствуют космические аппараты с химическими двигателями. Но конструкторы считают, что будущее – за гораздо более перспективными электрореактивными двигателями





писала об истории российских плазменных двигателей СПД (№ 12'2005), которые используются в качестве маневровых и корректировочных в некоторых спутниках связи. ЭРД этого же типа стоял на европейском зонде SMART-1, отправленном к Луне в 2003 году, американские же зонды Deep Space 1 (стартовал в 1998 году к комете Борелли) и Dawn (запущен в 2007 году для исследования астероидов Весты и Цереры) тоже оснащены ЭРД, правда, другого типа – ионными.

“Это лишь первые шаги, – говорит Олег Батищев, возглавлявший в Лаборатории космических двигателей (Space Propulsion Laboratory) факультета аэронавтики и астронавтики Массачусетского технологического института (MIT) группу по разработке плазменного ЭРД принципиально нового типа. – Но, конечно, будущее именно за плазменными двигателями”.

От термояда к плазменному мотору

В начале 1990-х Олег Батищев, молодой кандидат физико-математических наук, выпускник и доцент МФТИ, работал в Институте прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, где занимался численным моделированием систем кинетических уравнений для электронов, ионов и нейтральных атомов. Эти исследования были нужны Курчатовскому институту для проекта международного термоядерного экспериментального реактора ИТЭР (ITER). “В работе над ИТЭРом принимало участие множество исследовательских групп из различных стран мира, русские работали в Германии, Англии, Японии, даже Мексике и Бразилии, – вспоминает Олег. – Среди американских участников была группа, которая занималась проблемой дивертора – пластины, отводящей энергию из реактора. Министерство энергетики США пригласило меня поработать над этой темой в Центре ядерного синтеза (MIT Plasma Science and Fusion

ЛЕСТНИЦА К ЗВЕЗДАМ Изобретатель мини-геликонного плазменного двигателя Олег Батищев в фотостудии “Популярной механики” задумчиво смотрит вверх, представляя себе будущее, в котором такие двигатели будут разгонять космические корабли к планетам Солнечной системы

Именем закона (сохранения импульса)

ЛЮБЫЕ РАКЕТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ (И ХИМИЧЕСКИЕ, И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ) ИСПОЛЬЗУЮТ ОДИН И ТОТ ЖЕ ПРИНЦИП

Они отбрасывают рабочее тело и в соответствии с законом сохранения импульса приобретают такой же импульс, но направленный в противоположную сторону. В химических двигателях рабочим телом служат продукты сгорания, разогретые энергией окислительно-восстановительной реакции и выбро-

шенные с высокой скоростью из сопла. В ЭРД рабочим телом служит плазма или ионы, разогнанные в электрических и/или магнитных полях (в зависимости от типа двигателя конфигурация и комбинация этих полей может быть различной). Для этого используется электрическая энергия, источниками которой

могут служить солнечные батареи или ядерная энергетическая установка. Современные ЭРД пока дают очень малую тягу (миллиньютон), поэтому их применение ограничено корректировкой орбит или медленным разгоном космических аппаратов на протяжении длительного времени (тысячи часов).

Center) – до 1999 года, когда США вышли из проекта. Незадолго до этого я познакомился с Франклином Чанг-Диасом, физиком и астронавтом родом из Коста-Рики, выпускником MIT. Он в конце 1980-х в том же Центре ядерного синтеза занимался конструированием пробкотронов – магнитных ловушек для плазмы, не оправдавших ожиданий (плазма из них вытекала). Тогда ему и пришла в голову идея, как можно разогнать плазму и выталкивать ее в нужном направлении – то есть как сделать плазменный двигатель. Ему нужен был источник плотной плазмы, и мы его исследовали”.

Магнитоплазменная ракета

Проект своего двигателя Чанг-Диас назвал Variable Specific Impulse Magnetoplasma Rocket (магнитоплазменный двигатель с изменяемым удельным импульсом), сокращенно VASIMIR (станция “Мир” тогда еще была на орбите), чуть позже назва-

ние было изменено на VASIMR. До 2005 года Чанг-Диас разрабатывал свой проект в Лаборатории перспективных космических двигателей NASA (Advanced Space Propulsion Laboratory), а потом – в лабораториях собственной компании Ad Astra Rocket неподалеку от Хьюстона и в родной Коста-Рике.

Идея двигателя VASIMR весьма оригинальна. Он состоит из трех ступеней. Первая – геликонный источник плазмы, в котором газ ионизируется радиочастотным излучением специальной антенны в присутствии магнитного поля (это довольно распространенная конструкция). Во второй ступени происходит ускорение ионов резонансным высокочастотным полем: ионы вращаются в плоскости поперечного сечения, как в циклотроне (иногда это называют “циклотронным разогревом”). Последняя ступень – магнитное сопло, которое преобразует движение поперечно вращающихся частиц в продольное, выбрасывая разогнанную плазму с образованием тяги.

“Целью проекта VASIMR было создание мощного двигателя с большой тягой, порядка ньютонов, – объясняет Олег. – К тому же у этой конструкции есть важное достоинство, которого нет у существующих плазменных двигателей других типов: можно менять удельный импульс в широком диапазоне, ведь для максимальной эффективности ракеты скорость истечения рабочего тела должна быть в идеале равна ее скорости, тогда энергия расходуется оптимальным образом”.

Отбросить лишнее

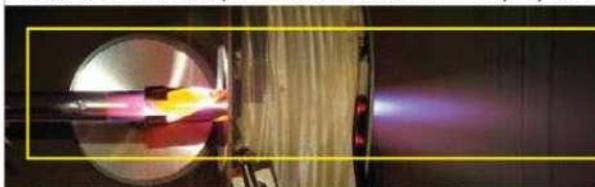
Как вспоминает Олег, в процессе конструирования геликонного источника плазмы для VASIMR обнаружилось любопытное теоретическое следствие: “Представьте себе, что вы начинаете закачивать энергию в газ с помощью антенны. Сначала ничего не происходит, потом происходит электрический пробой, газ ионизируется, образуется плазма. Именно такая холодная и плотная плазма поступает в цикло-

Как работает мини-геликонный плазменный двигатель

По своей конструкции двигатель очень прост. В кварцевую трубку (камеру) подается газ (N_2). На трубку навита обмотка, которая при пропускании электрического тока создает внутри сильное аксиальное (направленное вдоль оси) магнитное поле (B) (вместо обмотки могут быть использованы сильные постоянные магниты). Рядом с магнитами расположена специаль-

ная антенна, коротковолновое излучение которой ионизирует поступающий в трубку газ, превращая его в плазму, и разогревает ее электронную компоненту. Магнитное поле обеспечивает радиальное удержание плазмы и изоляцию стенок трубки, а также направляет поток электронов. При этом за счет высокого давления электронов образуется амбиполярное электрическое

поле (E_A), которое разгоняет ионы по образованному соленоидальным магнитным полем каналу. Тяга и импульс такого двигателя зависят от соотношения расхода газа и подаваемой на антенну мощности, а скорость истечения плазмы очень высока – до 40 км/с (для азота). Двигатель не имеет электродов, а стенки камеры не подвержены эрозии за счет магнитной изоляции.



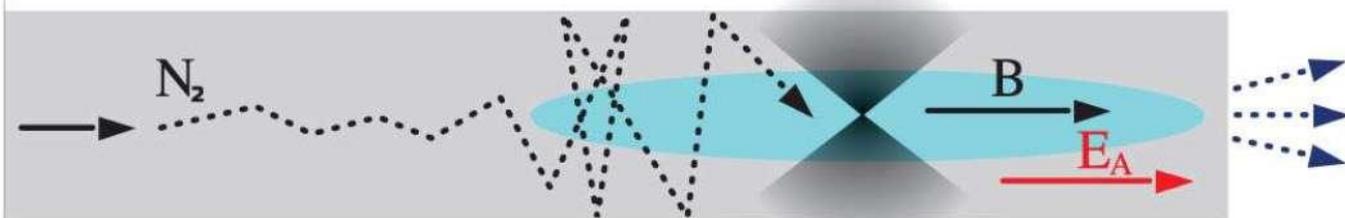
Двигатель на азоте В отличие от плазменных двигателей других типов, в которых в качестве рабочего тела обычно применяют дорогой ксенон, мини-геликонный двигатель Олега Батищева может использовать более дешевый аргон (на фото) или даже азот.

ПОДАЧА ГАЗА (АЗОТА)

КВАРЦЕВАЯ ТРУБКА

АНТЕННА

МАГНИТ



УДЕЛЬНЫЙ ИМПУЛЬС ПРОТОТИПА МИНИ-ГЕЛИКОННОГО ПЛАЗМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ РАБОТЕ НА АЗОТЕ СОСТАВИЛ 2000–4000 СЕКУНД, НА АРГОНЕ – 1000–2000. ДВИГАТЕЛЬ ПОКАЗАЛ ТЯГУ В 10 МИЛЛИНЬЮТОНОВ ПРИ МОЩНОСТИ 700 Вт И РАСХОДЕ АРГОНА 20 СМ³ В МИНУТУ

тронную ступень двигателя VASIMR, а горячая плазма там не нужна – это лишние затраты энергии. Если продолжить закачивать энергию в геликонный источник, по нашей теории должен наблюдаться резкий скачок в его эффективности: после полной ионизации газа ('выгорания') вся энергия идет на разогрев электронов плазмы, а потери на излучение составляют лишь малую часть. Эксперименты подтвердили наличие этого эффекта, что навело меня на идею создания эффективного и очень простого плазменного двигателя".

Прототип, который в MIT назвали мини-геликонным двигателем (mHT, mini-Helicon Thruster), по своей конструкции очень прост: это кварцевая трубка с навитой обмоткой для создания магнитного поля и антенной для возбуждения геликонной волны. Поступающий газ ионизируется высокочастотным радиоизлучением, плазма разогревается, а магнитное поле направляет плазменную струю в нужном направлении. "Наш двигатель отличается от VASIMR – он одноступенчатый, для нагрева плазмы не нужен циклотронный нагрев ионов, не нужно магнитное сопло, он компактнее, – объясняет Батищев. – При этом в качестве рабочего тела в VASIMR сначала использовали водород, потом перешли на гелий, сейчас используют аргон – более тяжелые газы снижают удельный импульс, зато повышают тягу. А наш двигатель способен работать практически на чем угодно – на азоте и даже на воздухе! Можно непрерывно менять состав рабочего тела, и двигатель будет продолжать работу".

По сравнению с современными плазменными двигателями мини-геликонный имеет ряд существенных преимуществ. Двигатели на эффекте Холла (к которым относятся российские СПД) не позволяют использовать полное сечение канала, разогнанные тяжелые ионы ксенона (очень дорогого и редкого газа) вызывают эрозию стенок камеры, для их работы необходимо высокое напряжение. СПД, как правило, снабжен двумя катодами, поскольку это одно из самых уязвимых мест конструкции, что зна-

чительно увеличивает габариты двигателя. "Мини-геликонный двигатель лишен всех этих недостатков: плазма не касается стенок, так что эрозия минимальна, зажигание автоматическое, не нужен катод, размеры могут быть любыми, от миниатюрных двигателей точной коррекции до больших и мощных – по нашим расчетам, двигатель мощностью 1 МВт будет иметь диаметр около 30 см, – говорит Олег Батищев. – Расходимость плазменного пучка у нас очень небольшая, около 10 градусов (для сравнения – в СПД она порядка 45 градусов). КПД нашего прототипа пока не очень высокое, около 20%, но это объясняется тем, что он работает на азоте, да и оптимизацией мы пока не занимались".

Двигатель из бутылки

Мини-геликонный двигатель столь прост по своей конструкции, что это навело Олега на мысль о популярной демонстрации: "Мы работали с мощными постоянными магнитами, и один из студентов не удержал их при изменении конструкции стенда – магниты устремились навстречу друг другу, столкнулись и раскололись на куски. А пока мы ждали новые, мне пришла в голову идея сделать двигатель из подручных средств, чтобы показать, насколько он прост. Я решил использовать в качестве камеры стеклянную бутылку из-под кока-колы, а геликонную антенну вырезать из жестяной банки".

Демонстрация плазменного двигателя из бутылки и банки принесла группе Батищева широкую известность и буквально мировую славу: телеканалы охотно транслировали эффектную запись эксперимента, где за кадром голос одного из студентов зачитывает показания амперметра, в бутылке загорается свечение, и струя плазмы вырывается из отпиленного донышка (разумеется, эксперимент проходит в вакуумной камере).

Чтобы убедиться, что мини-геликон представляет собой не просто источник плазмы, а именно двигатель, исследователи измерили характеристики полученной плазмы. Энергию ионов измеряли двумя методами – спектрометрическим, за

счет измерения доплеровского сдвига спектральной линии, и с помощью энергетического анализатора с замедляющим потенциалом. Скорость ионов составила от 10 до 40 км/с. Причем ее можно варьировать за счет изменения расхода газа и подаваемой мощности, изменяя тем самым удельный импульс. Но самым простым и эффективным способом демонстрации наличия тяги оказалось, по словам Олега, очень простое решение: "Мы просто подвесили наш прототип на двух лесках к потолку вакуумной камеры на магнитах и измерили отклонение трубочки при холодной продувке (подаче газа) и при истечении струи плазмы. Разницу было видно невооруженным глазом!"

К далеким планетам

Дальние космические полеты с использованием геликонных плазменных двигателей выглядят пока еще фантастически, но все же гораздо более предпочтительны, чем на химическом топливе, – была бы только энергия (ее планируется получать от ядерной энергетической установки). Рабочее тело может быть любым: азот, аргон, воздух, даже вода (правда, этот вопрос нуждается в дополнительных исследованиях).

По мнению Олега Батищева, плазменные геликонные двигатели имеют замечательные перспективы уже в самом ближайшем будущем – когда начнется освоение околоземного пространства и Луны частными компаниями. Сейчас срок службы различных спутников во многом ограничен запасом топлива или рабочего тела для двигателей коррекции орбиты. Мини-геликонные двигатели в этом отношении превосходят любые химические – они экономичны, имеют большой удельный импульс и способны использовать в качестве рабочего тела дешевый азот. "Или даже воздух, – добавляет Олег. – Представьте себе спутник на эллиптической орбите, который в перигее способен пополнять запасы рабочего тела, или низкоорбитальный спутник с неисчерпаемым запасом рабочего тела, которое он берет из атмосферы!"

ПМ