

УДК 621.455.32

М.Ю. ТИТОВ¹, Ф. ДЕОП², Т. ЖИБЕР², А.В. ЛОЯН¹¹Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина²Лаборатория ГРЕМИ, Орлеан, Франция

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТЕЙ ИОНОВ В ПЛАЗМЕННОЙ СТРУЕ ХОЛЛОВСКОГО ДВИГАТЕЛЯ МАЛОЙ МОЩНОСТИ СПД-20М МЕТОДОМ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ

В работе представлены результаты исследования распределения однозарядных ионов ксенона по скоростям с помощью метода лазерно-индуцированной флуоресценции. В работе кратко объяснен принцип лазерно-индуцированной флуоресценции и основанный на нем метод определения скоростей частиц. Приведено описание используемого стенда и устройств для ЛИФ-велоиметрии. Область исследования расположена за срезом двигателя; измерение скоростей осуществлялось вдоль центральной линии разрядного канала двигателя. Были получены функции распределения ионов по скоростям в разных сечениях за срезом двигателя. Определена граница окончания зоны ускорения ионов – 6...7 мм за срезом двигателя.

Ключевые слова: СПД, лазерно-индуцированная флуоресценция, скорость ионов, функция распределения.

Анализ проблемы и постановка задачи исследования

В настоящее время увеличивающийся спрос на малые космические аппараты (мини- и микроспутники) вызывает ответную потребность в двигательных системах для их ориентирования, коррекции их орбиты. Одним из главных факторов определяющих выбор ДУ для КА является его энерговооруженность. Как правило, для данных типов КА предельное значение энерговооруженности составляет не более 300 Вт, поэтому и потребление энергии двигательной системой должно находиться на уровне 100...200 Вт [1].

Одним из наиболее успешно используемых типов двигательных систем в космосе является система на базе стационарного плазменного двигателя (СПД) [2]. Полученные высокие показатели эффективности СПД (к.п.д. 60...70 %), касаются систем мощностью более 0,5 кВт. При снижении же мощности ниже 200 Вт наблюдается резкое ухудшение эффективности [3].

Поиск путей направленных на улучшение характеристик для двигателей мощностью 100...200 Вт ограничен сложностями при исследовании физических процессов происходящих в двигателе, ввиду его малых размеров.

Малые размеры рабочих объемов, увеличенное влияние пристеночных эффектов осложняет процесс измерения, обработку и интерпретацию полученных данных, ограничивает использование некоторых

современных методов и способов изучения и диагностики плазмы.

С этой точки зрения информативным является метод комплексной лазером-индуцированной флуоресценции (ЛИФ), позволяющий определить параметры заряженных частиц в струе двигателя: их температуру и концентрацию, скорость и направление движения [4].

Метод обеспечивает высокое пространственное разрешение, не вносит возмущений (газодинамических, электромагнитных) в объект исследования и не вызывает изменений в работе двигателя, что позволяет получить однозначные данные.

Осенью 2011 года в рамках научной стажировки были проведены совместные украинско-французские экспериментальные работы по изучению мало-мощного СПД с помощью ЛИФ метода. На базе ЛИФ-стенда в лаборатории ГРЕМИ (г. Орлеан, Франция) был испытан СПД-20М номинальной мощности 110 Вт разработанный в МНТЦ КЭД «ХАИ» (г. Харьков, Украина).

Целью проводимых работ являлось выявление особенностей распределения однозарядных ионов по скоростям в струе за срезом двигателя.

1. Флуоресценция, индуцированная лазером

Взаимодействие внешнего электромагнитного излучения (ЭМИ) на плазму может вызвать возбуждение частиц (ионов), их переход с одного энерге-

тического уровня на более высокий и возбуждение будет тем вероятней, чем ближе энергия ЭМИ к разности энергий между двумя уровнями. Это взаимодействие может быть исследовано наблюдением за последующей спонтанной эмиссией являющейся результатом девозбуждения частиц с верхнего энергетического уровня на нижний. В случае, когда источником ЭМИ является лазер, эта эмиссия называется лазером-индуцированной (вынужденной) флуоресценцией или ЛИФом.

Схема процесса возбуждения-флуоресценции однозарядных ионов ксенона применявшаяся при проведении экспериментов является общеиспользуемой [5], ее диаграмма представлена на рис. 1. При воздействии лазерного излучения на популяцию метастабильных ионов происходит их возбуждение с поглощением фотонов $\lambda=834,952$ нм (переход с уровня $5d \ ^2F_{7/2}$ на уровень $6p \ ^2D_{5/2}$). Дальнейшее их девозбуждение на уровень $6s \ ^2P_{5/2}$ сопровождается испусканием фотонов $\lambda=541,9$ нм.

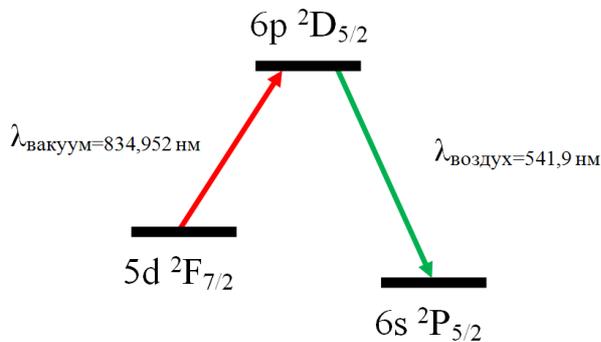


Рис. 1. Диаграмма перехода Xe+

2. ЛИФ-велосиметрия

Метод лазерно-индуцированной флуоресценции – невозмущающий метод диагностики плазмы позволяющий определить скорость частиц с использованием Доплеровского сдвига.

Суть метод ЛИФ-велосиметрии основана на следующем: если частица (ион) поглощающая лазерное излучение имеет компоненту скорости вдоль оси лазера, то согласно эффекту Доплера она поглотит свет с частотой, сдвинутой относительно той с которой частица была неподвижной. Величина сдвига частоты (Доплеровского сдвига) $\Delta\nu$ зависит от скорости частицы V_{\parallel} вдоль направления лазера и определяется следующей формулой:

$$\Delta\nu = \nu_0 \cdot \frac{V_{\parallel}}{c}, \quad (1)$$

где ν_0 – частота фотона лазера поглощенного покоящейся частицей; c – скорость света.

Определение абсолютного значения скорости частицы и ее направления в 3хмерном пространстве

предусматривает комплексное использование трех лучей для определения соответственно всех трех компонент скорости частицы.

Таким образом, зная частоту лазерного излучения, поглощаемого ионом можно определить Доплеровский сдвиг и соответственно скорость частицы.

Интенсивность флуоресценции для каждой частоты лазерного излучения зависит от количества ионов со скоростью, определенной по формуле 1 .

Поскольку частота лазера непосредственно связана со скоростью частицы, то зависимость интенсивности ЛИФ от частоты лазера является ничем иным как функцией распределения ионов по скоростям (ФРИС).

При проведении эксперимента контролировалась длина волны лазера, а не его частота, поэтому в дальнейшем все взаимосвязи будут выражены через длину волны лазера.

2. Экспериментальная часть

2.1. Стационарный плазменный двигатель СПД-20М

СПД-20М – маломощный электрореактивный двигатель Холловского типа (стационарный плазменный двигатель). Основным назначением двигателя является поддержка и коррекция орбит микро и мини спутников. Характеристики двигателя представлены в табл. 1:

Таблица 1

Характеристики двигателя

Мощность, Вт	60...120
Удельный импульс, с	1300...1600
Тяга, мН	2...5
К.п.д.	0,20...0,35
Ресурс, ч	>1000
Масса, гр	240

2.2. Вакуумный стенд GREMI

Вакуумный стенд, на котором проводился данный эксперимент, расположен в лаборатории ГРЭ-МИ и представляет собой цилиндрическую камеру объемом $0,2 \text{ м}^3$ выполненную из нержавеющей стали. В откачной системе используются 3 турбомолекулярных насоса с общей производительностью 2500 л/с (по ксенону).

Предельное давление составляет $3 \cdot 10^{-8}$ торр, а рабочее давление при суммарном расходе через двигатель 0,3 мг/с ксенона – $3 \cdot 10^{-5}$ торр.

2.3. ЛИФ установка

ЛИФ установка представляет собой совокупность оптических, измерительных и регистрирующих устройств необходимых с одной стороны для подведения лазерного луча с заданными свойствами к исследуемой области, а с другой стороны для регистрации результатов воздействия луча.

Схема установки представлена на рис. 2.

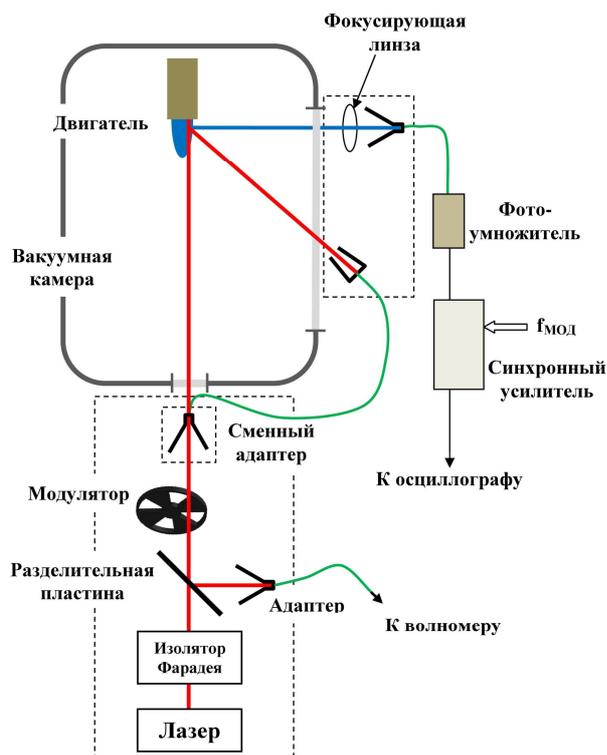


Рис. 2. Схема установки для эксперимента

Все основные элементы расположены на двух подвижных по 2м координатам платформах.

Установка дает возможность определить только две компоненты от полного вектора скорости.

Источником возбуждающего излучения является диодный лазер DL-100 (Toptica Photonics). Лазерный луч, пройдя через оптический изолятор Фарадея, необходимый для предотвращения попадания отраженных лучей обратно в лазер, разделяется на два: один из лучей с помощью адаптера поступает в оптоволоконно и передается на волномер; второй луч пересекает модулятор («чоппер») и, в первом случае, через прозрачный иллюминатор вакуумной камеры светит в РК двигателя параллельно его оси, а во втором случае (не совместимом с первым) с помощью оптических адаптеров и оптоволоконна направляется в струю двигателя под углом в 30° .

Вынужденное излучение собирается линзой ($f=100$ мм) в направлении перпендикулярном оси двигателя и передается в оптоволоконно.

Далее сигнал через интерференционный фильтр (541 ± 20 нм) поступает на фотоумножитель. Преобразованный световой сигнал в эквивалентный ему и усиленный электрический сигнал подается и записывается на осциллографе.

Излучение регистрируется в сечениях за срезом двигателя при перемещении всей боковой платформы, на которой установлена собирающая линза.

Настройка оптической системы осуществляется таким образом, что все три направления излучения (два от лазера и одно собираемое) пересекаются в одной точке. Это необходимо для обеспечения передачи сигнала из одной и той же области исследования для прямого и бокового направлений лазера.

3. Схема измерений

На рис. 3 представлена схема измерения компонент скоростей ионов Xe^+ в плазменной струе двигателя. Полный вектор \vec{V}_Σ скорости является суммой двух проекций векторов скорости на направления лазера: распространяющихся вдоль центральной линии разрядной камеры (РК) $\vec{V}_{//0}$ и под углом в 30° $\vec{V}_{//30}$ и определяется по правилу параллелограмма.

Скорость ионов Xe^+ определялась в 12 сечениях, начиная с сечения «срез двигателя» и далее вдоль струи двигателя на расстоянии 25 мм.

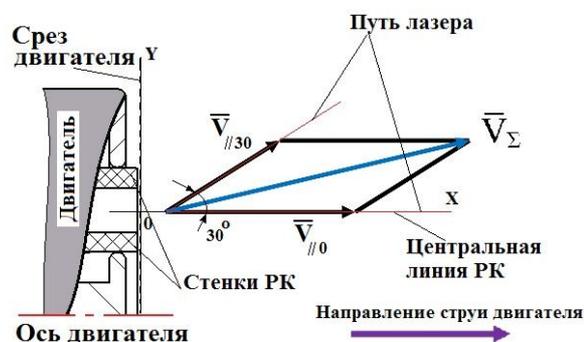


Рис. 3. Схема измерения скоростей ионов

4. Результаты эксперимента

Измерение скоростей ионов Xe^+ проводилось при следующих параметрах работы двигателя:

- анодный расход $M_A = 0,2$ мг/с;
- катодный расход $M_K = 0,12$ мг/с;
- разрядное напряжение $U_p = 245$ В;
- разрядный ток $I_p = 0,35$ А;
- магнитная индукция в РК - 16 мТл.

На рис. 4 и 5 представлены зарегистрированные сигналы флуоресценции ионов Xe^+ на расстоянии 9,0 мм от среза двигателя для двух направлений лазера.

Сканирование лазером осуществлялось в диапазоне 834,9835...835,0043 нм. Для заданного диапазона лазера возможно обнаружить частицы со скоростями в диапазоне 10,95...18,42 км/с.

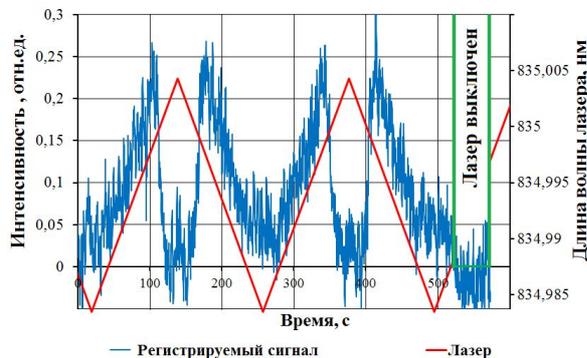


Рис. 4. ЛИФ сигнал Xe^+ на расстоянии 9,0 мм от среза двигателя при направлении лазера вдоль центральной линии РК

При осевом направлении лазера (рис. 4) уровень ЛИФ сигнала больше уровня шума (см. интенсивность сигнала на интервале, когда лазер выключен). Это свидетельствует о явном наличии ускоренных ионов вдоль центральной линии РК.

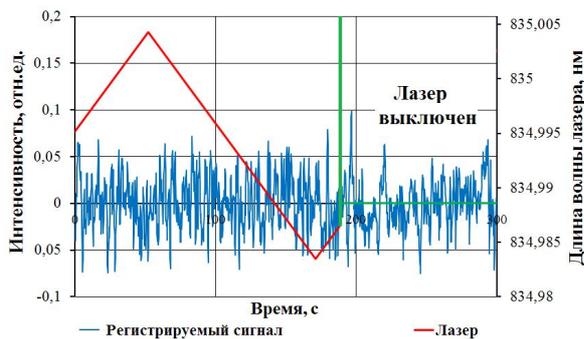


Рис. 5. ЛИФ сигнал Xe^+ на расстоянии 9,0 мм от среза двигателя при направлении лазера под углом в 30° к оси двигателя

При боковом направлении лазера (рис. 5) отсутствует сигнал с интенсивностью превышающей шум. Это свидетельствует о том, что максимальное значение проекции вектора скорости на направление лазера меньше 10,95 км/с. Эта же закономерность была обнаружена во всех сечениях за срезом двигателя. В связи со сложностью перенастройки лазера диапазон сканирования изменен не был и проекция скорости определена не была.

На рис. 6. представлены осредненные и сглаженные функции распределения ионов по скоростям в сечениях за срезом двигателя. При построении ФРИС учитывалась только проекция скорости на ось двигателя.

Полученные функции распределения имеют отличный от нормального распределения вид с явно

затянутым хвостом в область ионов с низкими скоростями.

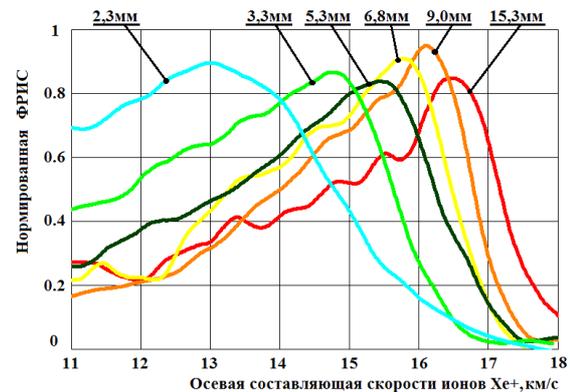


Рис. 6. Функции распределения ионов по скоростям в сечениях за срезом двигателя

На рис. 7 отображено распределение наиболее вероятной скорости (осевой составляющей скорости) за срезом двигателя. По распределению видно, что зона ускорения заканчивается на расстоянии 6...7 мм за срезом двигателя: резкое увеличение скорости заканчивается на 5 мм и достигает 15,5 км/с, в то время как скорость становится постоянной лишь на 15 мм достигая значения 16,5 км/с.



Рис. 7. Распределение наиболее вероятной скорости иона за срезом двигателя

Выводы и планы дальнейших работ

С использованием метода лазерно-индуцированной флуоресценции было исследовано распределение однозарядных ионов ксенона в плазменной струе маломощного двигателя СПД-20М. Функции распределения ионов по скоростям имеют асимметричный и затянутый в сторону ионов с меньшими скоростями вид. Зона ускорения ионов выходит за границы разрядной камеры и заканчивается на расстоянии 6...7 мм за срезом двигателя. Приблизительно 50 % приращения скорости происходит за срезом двигателя.

В дальнейшем планируется продолжить исследование СПД-20М методом ЛИФ велосиметрии.

Для более полного понимания физических процессов необходимо будет исследовать образование зоны ускорения ионов при переходе двигателя из аномального в ускорительный режим работы. Так же интерес представляет влияние магнитного поля на распределение ионов по скоростям. Необходимо будет определить влияние различных факторов на радиальную составляющую вектора скорости частиц в струе двигателя.

Литература

1. Biagioni, L. *An empirical performance prediction model for Hall Thrusters [Text]* / L. Biagioni, M. Saverdi // *Journal of Technical Physics*. – 2008. – Vol. XLIX, № 3-4. – P. 187-200.
2. *History of the Hall Thrusters Development in USSR [Electronic resource]* / V. Kim, K.N. Kozubsky, V.M. Murashko, A.V. Semenkin. – Access

mode:http://erps.spacegrant.org/uploads/images/images/iepc_articledownload_1988-2007/2007index/IEPC-2007-142.pdf. – 04.09.2007. – 12.06.2012 г..

3. *Концептуальные вопросы создания и применения малых космических аппаратов [Текст]* / Л.А. Макриденко, С.Н. Волков, В.П. Ходненко, С.А. Золотой // *Журн. Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ*. – М., 2009. – Т. 110. – С. 31-38.

4. *Лохте-Хольтгревен, В. Методы исследования плазмы. Спектроскопия, лазеры, зонды [Текст]* / В. Лохте-Хольтгревен; пер. с англ. под ред. С.Ю. Лукьянова. – М.: Мир, 1971. – 126 с.

5. *Manzella, D.H. Stationary Plasma Thruster Ion Velocity Distribution [Text]* / D.H. Manzella // *Paper AIAA-1994-3141 of the 30th AIAA/ASME/SAHASEE Joint Propulsion Conference, 27 – 29 June, 1994. – Indianapolis, USA, 1994.*

Поступила в редакцию 2.06.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедры № 402 А.И. Оранский, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского, «ХАИ», Харьков, Украина.

ВИМІР ШВИДКОСТЕЙ ІОНІВ В ПЛАЗМОВОМУ ПУЧКУ ХОЛЛОВСЬКОГО ДВИГУНА МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ СПД-20М МЕТОДОМ ЛАЗЕРНО-ІНДУКОВАНОЇ ФЛУОРЕСЦЕНЦІЇ

М.Ю. Тітов, Ф. Діоп, Т. Жіббер, А.В. Лоян

В роботі представлені результати дослідження розподілу однозарядних іонів ксенону за швидкостями за допомогою методу лазерно-індукованої флуоресценції. У роботі стисло пояснений принцип ЛІФ і заснований на ньому метод визначення швидкостей частинок. Наведено опис використовуваного стенда і пристроїв для ЛІФ-велосиметрії. Область дослідження розташована за зрізом двигуна; вимір швидкостей здійснювалося уздовж центральної лінії розрядного каналу двигуна. Були отримані функції розподілу іонів за швидкостями в різних перетинах за зрізом двигуна. Визначено кордон закінчення зони прискорення іонів – 6 ... 7 мм за зрізом двигуна.

Ключові слова: СПД, лазерно-індукована флуоресценція, швидкість іонів, функція розподілу.

IONS SPEED MEASURING IN PLASMA BEAM OF LOW-POWER HALL EFFECT THRUSTER SPT-20M USING LASER-INDUCED FLUORESCENCE VELOCIMETRY

M.Yu. Titov, F. Diop, T. Gibert, A.V. Loyan

Results of investigation of singly charged xenon ions velocity distribution using method of laser-induced fluorescence (LIF) are presented. Area research is located behind thruster exit section; velocity measurements were carried out along the center line of the discharge channel. The paper includes brief explanation of principle of LIF and method of particle velocities determination based on LIF. A description of the facility and devices used in experiments is given. Ion velocity distribution functions are received for different sections of thruster plume. The end boundary of ion acceleration zone was determined – 6...7 mm beyond exit section.

Key words: SPT, laser-induced fluorescence, the ion velocity distribution function.

Тітов Максим Юрьевич – інженер каф. 401 Национального аэрокосмического университета им.Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: titov@d4.khai.edu.

Діоп Фату – аспірант Політехнічного Університета г. Орлеан, Франція, e-mail: fatou.dior@univ-orleans.fr.

Жіббер Титаїна – доктор наук, керівник групи ЕРД в Політехнічному Університеті, г. Орлеан, Франція, e-mail: titaina.gibert@univ-orleans.fr.

Лоян Андрей Витальевич – канд. техн. наук, с.н.с кафедри 401 Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: a.loyan@khai.edu.