

СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ИМПУЛЬСА СТРУИ МПД ДВИГАТЕЛЯ

Ю.П. ЦАРЬГОРОДЦЕВ, доц. каф. физики МГУЛ, канд. техн. наук,
 И.И. УСАТОВ, ведущий инженер каф. физики МГУЛ,
 Н.П. ПОЛУЭКТОВ, проф. каф. физики МГУЛ, д-р техн. наук,
 А.Г. ЕВСТИГНЕЕВ, ведущий инженер каф. физики МГУЛ,
 А.А. ЖУРАВЛЕВ, МГУПИ,
 В.В. ГОРШКОВ, МГУПИ,
 Ю.В. КУБАРЕВ, проф. каф. приборы и информационно-измерительные системы, д-р ф.-м. наук МГУПИ

poluekt@mgul.ac.ru

ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет леса»
 141005, Московская обл., г. Мытищи-5, ул. 1-я Институтская, д. 1, МГУЛ
 Московский государственный университет приборостроения и информатики
 107996, г. Москва, ул. Стромынка, д. 20

Приведено описание автоматизированной системы измерения импульса струи плазменного двигателя, предназначенного для космических полетов. Легкий стальной диск диаметром 50 мм установлен на тонкой керамической трубке длиной 250 мм. На противоположном конце трубки установлены противовес и алюминиевая пластинка, с обоих концов которой установлены оптопары. В центре тяжести трубка закрепляется на вольфрамодовой нити $\varnothing = 0,35$ мм. К нити прикреплена пружина, на другом конце которой она соединена с винтом. Винт может вращаться с помощью шагового двигателя. Управление двигателем и оптопарами осуществляется с помощью ЭВМ через блок управления, собранный на базе USB NI-6008. Под действием плазменной струи пластинка отклоняется и пружина закручивается. Шаговый двигатель под управлением программы возвращает пластинку в исходное положение. Погрешность измерений определяется точностью возвращения в исходное положение. Исходное положение контролируется сигналами оптопар. Компенсирующее усилие, а следовательно, сила тяги, пропорциональны числу шагов двигателя N . Калибровка устройства включает в себя как определение нулевого положения, так и силового коэффициента шага двигателя k : $F = kN$. При среднем расходе аргона 0,2 мг/сек и мощности разряда 1,8 кВт сила, действующая дисковую пластинку, составила $5 \cdot 10^{-3}$ Н (0,5 г). Передвигая диск, можно измерить импульсы различных участков струи, а затем интегрирования, вычислить тягу плазменного двигателя.

Ключевые слова: удельный импульс, магнитоплазодинамический двигатель.

Магнитоплазодинамический (МПД) двигатель является одним из перспективных ускорителей плазменного типа для решения широкого спектра других задач как в космической технике, так и в промышленности: создание ускоренных потоков плазмы, решение проблемы нейтрализации электростатического заряда космического аппарата, создание ЭРД и управление его вектором тяги, создание радиопомех, нанесение тонких пленок на поверхность металла и другие задачи [1–4]. В основе работы МПД ускорителя лежат сложные физические механизмы, связанные, прежде всего, с взаимодействием плазменного образования с внешним магнитным полем. Результаты этих исследований предполагается использовать при разработке МПД двигателя большой мощности и будут пригодны при создании пилотируемого космического аппарата.

Однако создание устройства для эффективного решения этих проблемы требует

проведения ряда исследований, целью которых является выбор оптимальной структурной схемы двигателя и его геометрических параметров, величины основного и управляющего магнитных полей, при управлении вектором тяги и удельным импульсом

Важнейшими характеристиками магнитоплазодинамического (МПД) двигателя являются его тяга и удельный импульс – отношение тяги ракетного двигателя к секундному массовому расходу рабочего тела. Удельный импульс на расчетном режиме работы двигателя совпадает со скоростью реактивной струи. Выражается в $(\text{кг})/(\text{кг}/\text{с}) = \text{м}/\text{с}$ [1, 2].

Для определения тяги и удельного импульса применяются в основном 2 способа. В одном двигатель устанавливается в вакуумной камере на платформу, подвешенную на струнах или гибких металлических полосках, образуя таким образом маятниковую систему [5, 6]. При работе двигателя происходит

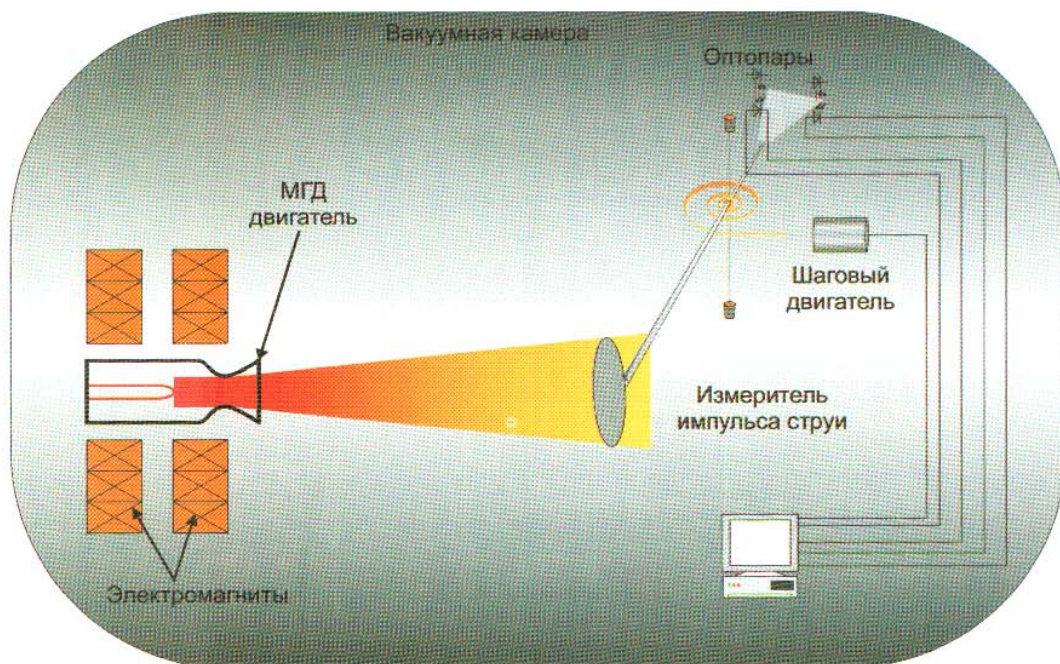
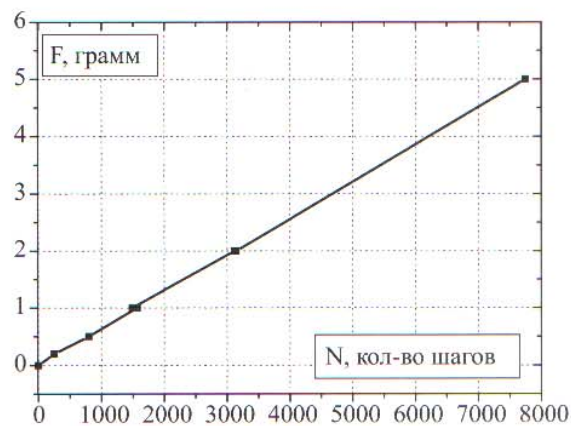


Рис. 1. Система измерений импульса струи
Fig. 1. Measurement system pulse jet



а)



б)

Рис. 2. а) фото процесса калибровки системы измерения импульса струи; б) калибровочная кривая
Fig. 2. а) photo process measuring system calibration pulse jet; б) calibration curve

смещение платформы, и после калибровки можно определить тягу. В этом способе приходится решать проблему гибких подводов проводов и шлангов охлаждения, жесткость которых может существенно исказить результаты измерений, учитывая малые величины (несколько граммов) тяги таких двигателей.

Другим способом определения тяги и удельного импульса является измерение импульса струи двигателя. Чтобы измерить тягу, необходимо установить преграду в виде диска, перекрывающую диаметр всей струи. Для определения импульса струи по ее сечению диск должен быть в несколько

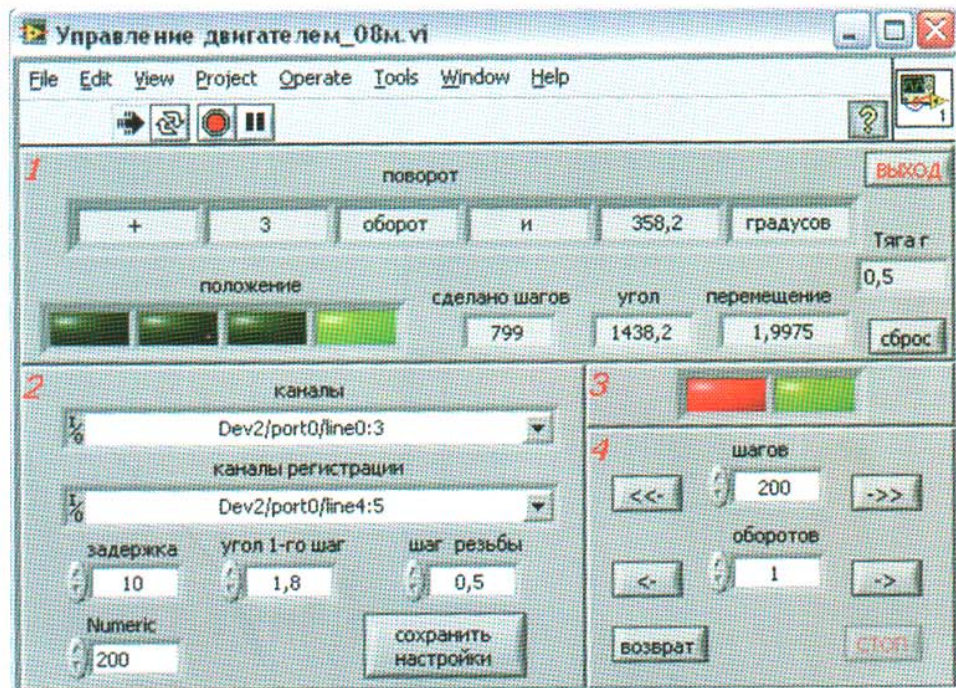


Рис. 3. Интерфейс программы измерения импульса струи двигателя
Fig. 3. Program interface measurement pulse jet engine

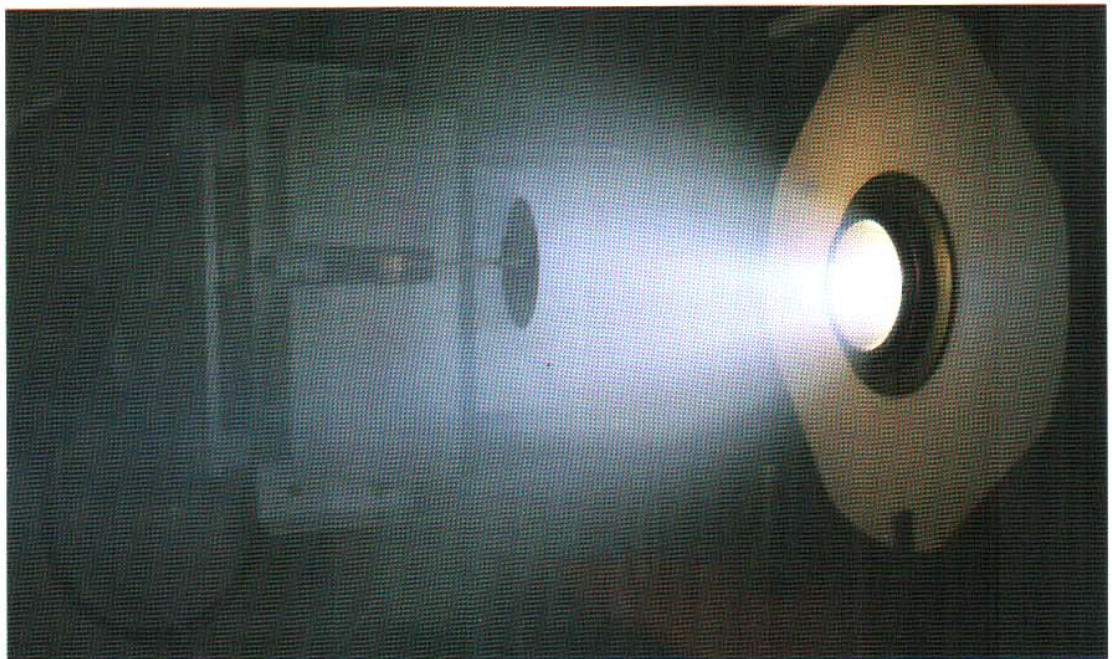


Рис. 4. Фото работы МГД ускорителя с системой измерения импульс струи
Fig. 4. Photo of MGD accelerator with pulse jet measurement system

раз меньше. Диск устанавливается на конце стержня, к которому прикреплена пружина с известной жесткостью [7]. Передвигая диск, можно измерить вклады различных участков, а затем, после интегрирования, вычислить тягу.

Для определения локальных импульсов струи было разработано устройство, схема которого представлено на рис. 1. На расстоянии 20 см от двигателя на пути плазменной струи располагается пластинка из нержавеющей стали толщиной 0,2 мм и диаметром 50 мм, за-

крепленная на керамической трубке $\text{Ш} = 2$ мм. На противоположном конце трубки установлены противовес и алюминиевая пластинка. С обоих концов пластинки установлены оптопары. В центре тяжести трубка закрепляется на вольфрамовой нити $\text{Ш} = 0,35$ мм. К нити прикреплена пружина, на другом конце которой она присоединена к винту с мелкой резьбой (0,4 мм). Винт может вращаться с помощью шагового двигателя. Управление двигателем и оптопарами осуществляется с помощью ЭВМ через блок управления, собранный на базе USB NI-6008. Такая система обладает большой добротностью, поэтому любое отклонение вызывает длительные колебания пластинки. Для того, чтобы предотвратить колебания, в систему вводится успокоитель. Он состоит из легкой стальной пластинки, которая прикреплена к керамической трубке. Пластинка погружена в стакан с вакуумным маслом.

Система работает следующим образом. Под действием плазменной струи пластинка отклоняется и пружина закручивается. Шаговый двигатель под управлением программы возвращает пластинку в исходное положение. Погрешность измерений определяется точностью возвращения в исходное положение. Исходное положение контролируется сигналами оптопар. Компенсирующее усилие, а следовательно, сила тяги, пропорциональны числу шагов двигателя N . Калибровка устройства включает в себя как определение нулевого положения, так и силового коэффициента шага двигателя k : $F = kN$. Последний определяется методом весовой калибровки, как показано на рис. 2.

Процесс калибровки осуществляется весовым методом.

Перед началом калибровки необходимо:

- слить масло из чаши масляного успокоителя;
- повернуть измеритель импульса струи на 90 % относительно рабочего положения;
- установить его на ровную горизонтальную поверхность;
- снять лопатку масляного успокоителя;

- установить трубку с приемным диском на необходимую для работы длину;
- отсоединить пружину от шагового двигателя;
- перемещением противовеса уравновесить коромысла;
- подсоединить пружину к шаговому двигателю, придав ей небольшой натяг;
- управляя шаговым двигателем при помощи программы установить коромысло в нулевое положение (нулевое положение контролируется по сигналам оптопар);
- нажать кнопку сброс в программе для присвоения нулевого положения измерителя тяги.

Для калибровки в центр пластинки устанавливаются грузы разных масс. При помощи программы производится возврат коромысла в нулевое положение. Данные о массе груза и о количестве шагов шагового двигателя заносятся в файл с калибровочными параметрами. Во время измерения тяга двигателя рассчитывается по этим данным. Калибровочная кривая приведена на рис. 2 б. Погрешность калибровки не более 2 %.

После окончания калибровки необходимо привести измеритель импульса струи обратно в рабочее положение. Для этого необходимо:

- установить лопатку масляного успокоителя;
- отсоединить пружину от шагового двигателя;
- перемещением противовеса уравновесить коромысла;
- подсоединить пружину к шаговому двигателю, придав ей небольшой натяг;
- управляя шаговым двигателем при помощи программы, установить коромысло в нулевое положение (нулевое положение контролируется по сигналам оптопар);
- установит измеритель импульса струи в рабочее положение;
- залить масло в чашу масляного успокоителя.

Для достижения погрешности измерений в несколько процентов необходимым условием является точность определения возврата в исходное состояние. Для этого используется система, состоящая из 2-х оптопар, и алюминии-

евая пластинка в виде трапеции. В нулевом положении боковые края пластинки находятся на расстоянии 0,5 мм от оптопар. Свет от светодиодов беспрепятственно проходит к фотодиодам, и на экране компьютера горят 2 зеленые кнопки. При смещении в любую сторону от нулевого положения один из светодиодов перекрывается, что отражается на экране: одна из кнопок становится красной. Управляя с компьютера шаговым двигателем, добиваются положения, при котором обе кнопки зеленые.

Программа измерения импульса струи написана на языке визуального программирования LabVIEW. Интерфейс программы приведен на рис. 3. Интерфейсе программы условно разделен на 4 области.

В области 1 на графических индикаторах отображается номер обмотки шагового двигателя, на которую подается ток в данный момент. На цифровых индикаторах отображаются: количество сделанных двигателем шагов от положения равновесия, угол поворота вала шагового двигателя, расстояние перемещения каретки, удерживающей пружину, а также рассчитанная по калибровочным данным тяга двигателя. В первой области также располагаются кнопка сброса положения на ноль и кнопка завершения программы.

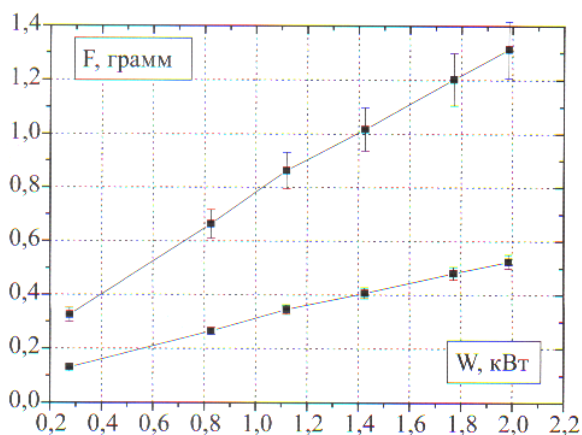


Рис. 5. Зависимость измеренной тяги двигателя (верхняя кривая) и импульса тяги (нижняя кривая) от мощности двигателя. Расход 0,2 мг/с, магнитное поле 300 Гс, ток накала катода 40 А

Fig. 5. Dependence of the measured engine thrust (upper curve) and the momentum thrust (lower curve) of the engine power. Consumption of 0,2 mg / s, the magnetic field of 300 G, the cathode filament current of 40 A

В области 2 приводятся основные параметры работы программы:

- адреса каналов управления двигателем и регистрации сигналов с оптопар;
- угол поворота шагового двигателя при перемещении на один шаг;
- задержка между шагами шагового двигателя;
- частота опроса оптопар в состоянии ожидания действий пользователя;
- шаг резьбы вала штифта, по которому передвигается каретка, удерживающая пружину.

Все эти данные хранятся в файле с параметрами установки, который считывается при запуске системы. Для изменения любого из этих параметров пользователю достаточно поменять его в панели 2 и записать его в файл с параметрами установки нажатием кнопки **сохранить настройки**.

В области 3 на графических индикаторах отображается: перекрыта или не перекрыта оптопара хвостовиком коромысла.

В области 4 производится управление шаговым двигателем. Пользователь может производить перемещение двигателя, как на один шаг, так и на несколько шагов или оборотов. Для выбора количества шагов для многократного сдвига двигателя служат два взаимосвязанных контроллера, в одном из которых можно задавать количество шагов шагового двигателя, а в другом – количество его оборотов. Направление вращения двигателя определяется соответствующими кнопками. Кнопка **стоп** служит для остановки вращения двигателя пользователем. Для возвращения измерителя импульса струи в нулевое положение используется кнопка **возврат**. После ее нажатия программа заставляет двигатель произвести перемещения в количестве, равном значению индикатора: **сделано шагов** в противоположном направлении.

Испытания системы проводились в вакуумной камере диаметром 0,7 м и длиной 2,5 м. МПД двигатель мощностью до 3-х кВт имеет изменяемую магнитную систему из 2-х электромагнитов, каждый из которых состоит из 3-х обмоток. Токи в обмотках

можно менять и таким образом изменять геометрию магнитного поля. Параметры двигателя существенно зависят от конфигурации магнитного поля и с помощью разработанной системы измерения импульса можно определить оптимальную геометрию поля. Измерительная пластинка устанавливалась на расстоянии 17 см среза двигателя. На рис. 4 приведена фотография работы МПД ускорителя с системой измерения импульса струи. На рис. 5 показаны зависимости тяги от мощности разряда. Нижняя кривая показывает измерение в одном положении датчика, а верхняя представляет полную тягу, полученную в результате измерения вдоль различных радиусов струи.

При среднем расходе газа (аргона) 0,2 мг/сек и мощности разряда 1,8 кВт сила, действующая на дисковую пластинку диаметром 5 см, составила $5 \cdot 10^{-3}$ Н (около 0,5 г). Как видно из рис.4, площадь струи много больше и полная тяга составит несколько грамм (порядка 1,5 г), что примерно соответствует характеристикам современных электрических двигателей в космическом исполнении [9, 10].

С помощью полученных данных можно сделать оценку средней скорости потока струи. Плотность потока частиц (поток через единицу площади в 1 с) определяется по формуле

$$f = nv, \quad (1)$$

где n – концентрация частиц;
 v – их скорость.

Импульс этого потока, равный давлению на пластинку, при допущении, что все частицы не отражаются, а поглощаются стенкой

$$F_p = mnv^2 = p = F/S, \quad (2)$$

где $F_{\text{плат}}$ – сила, действующая на пластинку;
 S – площадь пластинки.

Отсюда получаем

$$v = \sqrt{\frac{F_{\text{плат}}}{Smn}}$$

На пластинку, установленную на оси струи, действует сила $F_{\text{плат}} = 0,5 \text{ г} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ кг} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ Н}$. Площадь пластинки диаметром 5 см: $S = 20 \text{ см}^2 = 20 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$. Масса атома аргона $6,7 \cdot 10^{-26} \text{ кг}$.

Концентрация ионов аргона по зондовым измерениям равна $n = 2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3} = 2 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$. Тогда из (3) следует, $v \approx 8.7 \text{ км/с}$.

При допущении, что все частицы упруго отражаются от пластинки, рассчитанная скорость будет в $\sqrt{2}$ раза меньше и составит 6,1 км/с. Таким образом, средняя скорость находится в диапазоне $6 < v < 9 \text{ км/с}$. Заметим, что это скорость на расстоянии 20 см от ускорителя. На срезе сопла скорость не менее 15 км/с.

Библиографический список References

1. C. Charles. Plasmas for spacecraft propulsion. J. Phys. D:Appl. Phys. 2009. V. 42. pp. 163001.
2. S.D. Grishin, L.V. Leskov. Electrichekieskie raketnyie dvigateli dlya kosmicheskikh apparatov. Moscow, Mashinostroenie, 1989 (in Russian).
3. Martinez-Sanchez M and Pollard J E Spacecraft electric propulsion – an overview. J. Propulsion Power. 1998. V. 14. pp. 688-699.
4. E.A. Bering, M. Brukardt, J.P. Squire, T.W. Glover, V.Jacobson, G.McCaskill. Recent Improvements In Ionization Costs And Ion Cyclotron Heating Efficiency In The VASIMR Engine//44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibition AIAA-2006-766. Reno, Nevada, 9-12 January 2006, pp. 1-17.
5. S. Pottinger1, V. Lappas1, C. Charles, R. Boswell. Performance characterization of a helicon double layer thruster using direct thrust measurements. J. Phys. D: Appl. Phys. 2011. V. 44. pp. 1-5.
6. MD West, C Charles, R. Boswell. A high sensitivity momentum flux measuring instrument for plasma thruster exhausts and diffusive plasmas. Rev. Sci. Instrum. 2009. V.80. pp. 053509.
7. B.W. Longmier, E.A. Bering, J.P.Squire, T.W.Glover, F.R. Chang-Diaz, M. Brukardt. Hall thruster and Vazimr VX-100 force measurements using a plasma momentum flux sensor. 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibition AIAA-2009-246, Orlando, Florida, 5-8 January 2009, pp. 1-12.
8. M.L.R. Walker, A.D. Gallimore. Performance characteristics of a cluster of 5-kW laboratory Hall thrusters. J. Propulsion Power 2007. V. 23. pp. 35-43.
9. J. Prager, R. Winglee, T. Ziemba, B.R. Roberson, G. Quetin. Ion energy characteristics downstream of a high power helicon. Plasma Sources Sci. 2008. V. 17. pp. 025005.
10. S.A. Cohen, N.S. Siefert, S. Stange, R.F. Boivin, E.E. Scime and F.M. Levinton. Ion acceleration in plasmas emerging from a helicon-heated magnetic-mirror device. Phys. Plasmas 2003. V. 10, pp. 2593-2598.

THE AUTOMATED SYSTEM FOR MEASURING THE IMPULSE OF THE MHD THRUSTER

Tsar'gorodsev Yu.P., Associate Prof. Department of Physics MFSU, Cand., Usatov I.I., chief engineer Department of Physics MFSU, Poluektov N.P., Professor Dr technical. Sciences Department of Physics MFSU, Evstigneev A.G., chief engineer Department of Physics MFSU, Zhuravlev A.A., MGUPI, Gorshkov V.V., MGUPI, Kubarev Yu.V., prof. Department tools and information-measuring systems, Dr. Sc Sciences MGUPI

poluekt@mgul.ac.ru

Moscow State Forest University (MSFU) 1st Institutskaya st., 1, 141005, Mytishi, Moscow reg., Russia
Moscow State University of Instrument Engineering and Informatics 107 996, Moscow st/ Стромынка, 20

The article describes the automated system for measuring the impulse of the MHD thruster designed for spaceflight. Light stainless steel disk with a diameter of 50 mm mounted on a thin ceramic tube length of 250 mm. A counterweight and an aluminum plate, with both ends of which are set optocoupler are installed at the opposite end of the tube. The tube is attached to the tungsten filament $l = 0,35$ mm in the center of mass. One end of the spring is attached to the filament and the other end is connected to the screw. The screw can be rotated by a stepping motor. Operation of a motor and optocoupler is carried out by a computer via a control unit NI-6008. Plasma jet deflects a disk and spring spins. Stepper motor returns the disk to the original position using control program. Measurement error depends on the accuracy to return to its original position. Starting position is controlled by signals optocouplers. The compensating force and thrust force are proportional to the number of steps N . The calibration apparatus of the engine includes both determination of the zero position, and the power factor motor step k : $F = kN$. A force acting disk plate of about $5 \cdot 10^{-3}$ H (0.5 grams) is obtained at flow rate 0,2 mg / s and the discharge power 1,8 kW. Moving the disk across plasma jet one can calculate the total thrust of a engine.

Key words: specific impulse magneto-plasma-dynamic engine.