

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ВЕЛИЧИНУ ТЯГИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО НАНОСЕКУНДНОГО ИМПУЛЬСНОГО ПЛАЗМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ

© 2018 г. Ермилов В.А.¹, Казанкин Ф.А.¹, Потабачный Л.А.¹, Емлин Р.В.², Морозов П.А.²

¹АО «Научно-исследовательский институт машиностроения» (НИИМаш)
Ул. Строителей, 72, г. Нижняя Салда, Свердловская обл., Российская Федерация, 624740,
e-mail: mail@niimashspace.ru

²Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭФ УрО РАН)
Ул. Амундсена, 106, г. Екатеринбург, Российская Федерация, 620016,
e-mail: admin@iep.uran.ru

В работе представлены результаты измерения импульса тяги макета импульсного плазменного двигателя при воздействии внешнего магнитного поля на область разряда. Источником напряжения для макета двигателя служит генератор импульсов с магнитным накопителем энергии на 1 Дж и полупроводниковым обострителем тока. Длительность импульса напряжения составляет 60 нс при амплитуде 250 кВ. Приложенное магнитное поле сонаправлено с электрическим полем в разрядном промежутке, достигая 8 мТл в области протекания разряда. Измерения импульса тяги показывают, что при наличии магнитного поля он возрастает с 1,7 до 2,3 мкН·с. Оценки показывают, что в данных экспериментальных условиях электроны в разряде являются замагниченными. Это приводит к увеличению температуры и степени ионизации плазмы, что обуславливает увеличение импульса тяги. Таким образом, параллельное разряду магнитное поле является фактором, способным повысить рабочие характеристики импульсных плазменных двигателей.

Ключевые слова: импульсный плазменный двигатель, наносекундный импульсный разряд, магнитное поле.

INVESTIGATION OF INFLUENCE OF MAGNETIC FIELD ON THRUST OF HIGH-VOLTAGE NANOSECOND PULSED PLASMA THRUSTER

Ermilov V.A.¹, Kazankin F.A.¹, Potabachny L.A.¹, Emlin R.V.², Morozov P.A.²

¹Joint Stock Company «Research & development institute of mechanical engineering» (R&DIME)
72 Stroiteley str., Nizhnyaya Salda, Sverdlovsk region, 624740, Russian Federation,
e-mail: mail@niimashspace.ru

²Institute of Electrophysics of the Ural Division of the Russian Academy of Sciences (IEP UD RAS)
106 Amundsena str., Ekaterinburg, 620016, Russian Federation, e-mail: admin@iep.uran.ru

The paper presents thrust measurement results for a mockup of pulsed plasma thruster when the discharge area is exposed to an external magnetic field. A pulsed generator with 1J inductive energy storage and semiconductor opening switch serves as a voltage source for the thruster mockup. The voltage pulse duration is 60 ns at amplitude of 250 kV. The applied magnetic field coming up to 8 mT in the discharge field is co-directional with the electric field of the discharger. The thrust pulse measurements show that with the magnetic field available the pulse increases from 1,7 to 2,3 $\mu\text{N}\cdot\text{s}$. The estimates show that under these experimental conditions electrons in the discharge are fixed in a magnetic field.

This results in increase of plasma temperature and ionization degree, which causes a pulse increase. Therefore, the magnetic field parallel to the discharge is a factor enabling to improve the performance of pulsed plasma thrusters.

Key words: *pulsed plasma thruster, nanosecond pulsed discharge, magnetic field.*



ЕРМИЛОВ В.А.



КАЗАНКИН Ф.А.



ПОТАБАЧНЫЙ Л.А.



ЕМЛИН Р.В.



МОРОЗОВ П.А.

ЕРМИЛОВ Виталий Анатольевич – начальник лаборатории НИИМаш, e-mail: erm_vitaly@mail.ru
 ERMILOV Vitaliy Anatolyevich – Head of Laboratory at R&DIME, e-mail: erm_vitaly@mail.ru

КАЗАНКИН Филипп Андреевич – заместитель главного конструктора НИИМаш
 KAZANKIN Filipp Andreevich – Deputy General Designer at R&DIME

ПОТАБАЧНЫЙ Леонид Алексеевич – главный специалист НИИМаш, e-mail: potanin45@bk.ru
 POTABACHNY Leonid Alekseevich – Chief specialist at R&DIME, e-mail: potanin45@bk.ru

ЕМЛИН Рафаил Вениаминович – руководитель группы ИЭФ УрО РАН, e-mail: emlin@iep.uran.ru
 EMLIN Rafail Veniaminovich – Head of Group at IEP UD RAS, e-mail: emlin@iep.uran.ru

МОРОЗОВ Павел Александрович – младший научный сотрудник ИЭФ УрО РАН, e-mail: pav99369565@yandex.ru
 MOROZOV Pavel Aleksandrovich – Junior research scientist at IEP UD RAS, e-mail: pav99369565@yandex.ru

Введение

Создание электрических ракетных двигателей (ЭРД) и двигательных установок на их основе (ЭРДУ), а также постоянное совершенствование уже созданных ЭРД и ЭРДУ для применения в различных

по массе космических аппаратах является актуальной задачей современного этапа развития космических систем.

В настоящее время признанным лидером среди ЭРД средней и малой тяги является стационарный плазменный двигатель (СПД) [1]. Несмотря на то, что СПД

занимают устойчивое положение в классе плазменных двигателей, во многих странах активно ведутся исследования импульсных плазменных двигателей (ИПД) [2]. Интерес к ИПД продиктован тем, что они отличаются простотой конструкции и практическим отсутствием переходных режимов. ИПД наиболее перспективны для использования в системах управления малыми космическими аппаратами [3], где они могут успешно конкурировать с СПД, поскольку при небольших значениях тяги и кратковременном режиме работы эффективность традиционных СПД снижается [4].

Для улучшения эксплуатационных характеристик ИПД предлагаются различные способы, среди которых следующие:

- повышение используемого напряжения с 10 до 100 кВ с одновременным укорочением длительности импульса [2];
- использование жидкого рабочего тела [5];
- наложение магнитного поля на область разряда и др.

НИИМаш (г. Нижняя Салда) и ИЭФ УрО РАН (г. Екатеринбург) в течение последних лет исследуют ИПД на основе анодно-иницированного разряда под действием импульса высокого напряжения наносекундной длительности [6]. Процесс разряда этого типа обусловлен лавинообразно развивающейся полевой эмиссией электронов из поверхности диэлектрика, распространяющейся от анода к катоду. Расход массы рабочего тела на создание плазменного пучка при этом составляет ~1 мкг/Дж, что в три раза больше, чем у катодно-иницированного разряда [7]. В таком ЭРД скорость истечения плазмы превышает 50 км/с.

Задача настоящей работы заключалась в исследовании влияния внешнего магнитного поля, ориентированного вдоль тока разряда, на импульс тяги лабораторного макета высоковольтного наносекундного ИПД с жидким рабочим телом. Исследование проведено в рамках работы совместной проблемной лаборатории ИЭФ УрО РАН и НИИМаш.

Экспериментальная установка

Эксперименты с макетом ИПД выполнялись в вакуумной камере объемом 0,4 м³ при динамическом вакууме ~10⁻⁴ мм рт. ст. Источником напряжения для макета ИПД служил наносекундный генератор импульсов

напряжения амплитудой 250 кВ длительностью 60 нс с магнитным накопителем энергии, разработанный ИЭФ УрО РАН. Энергозапас генератора в выходном каскаде составляет 1 Дж, частота подачи импульсов достигает 50 Гц.

Разрядная камера [8] содержит электродную систему, подложку из радиотехнического фарфора и магнитную систему (рис. 1). Электроды 1 изготовлены из магнитомягкой стали и имеют заостренную форму. Под ними расположены пористые фитили, начальный участок которых контактирует с резервуаром, заполненным вакуумным маслом. Подложка 3 совершает возвратно-поступательное движение, в результате которого поверхность смазывается жидкостью. Подача масла осуществляется капиллярно-центробежным способом. Длина межэлектродного промежутка составляет 30 мм. Магнитная система расположена на 20 мм выше поверхности разряда, ее схема приведена на рис. 2. Она содержит четыре цилиндрических постоянных магнита 2 высотой 7 и диаметром 10 мм. Остаточная индукция магнитов составляет 0,24 Тл. Магниты включены в два плеча магнитопровода попарно, так что результирующее поле ориентировано преимущественно вдоль разрядного промежутка. Параллельные разрядному промежутку части магнитопровода 4 выполнены из феррита марки 3000НМ для обеспечения электрической изоляции между электродами. При достаточной компактности и малой массе данная конструкция обеспечивает индукцию магнитного поля порядка 0,01 Тл, при которой достигается заметное влияние на процесс разряда, однако в ней затруднительно проводить исследования в широком диапазоне магнитных полей.

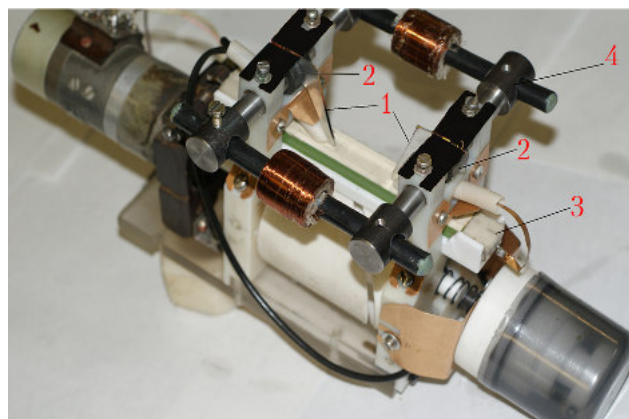


Рис. 1. Общий вид разрядной камеры макета импульсного плазменного двигателя: 1 – электроды, 2 – магниты; 3 – подложка; 4 – магнитопровод

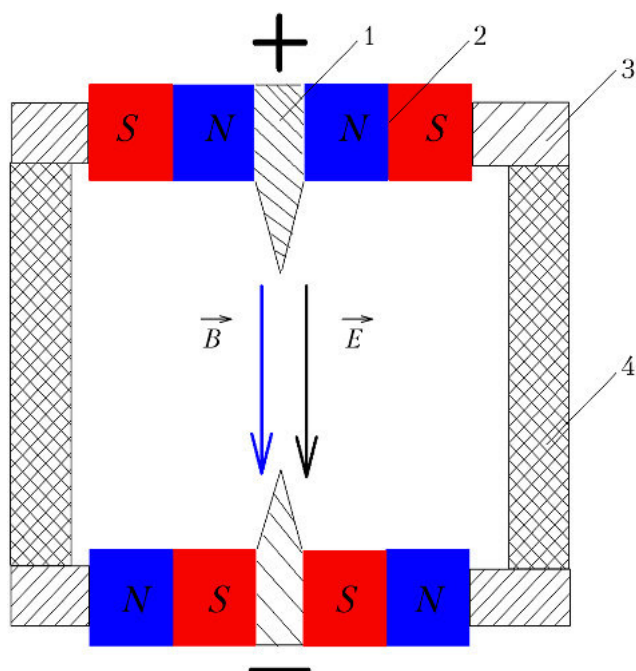


Рис. 2. Схема магнитной системы: 1 – электроды; 2 – постоянные магниты; 3 – стальные стержни; 4 – ферритовые стержни

Топология магнитного поля

Измерение топологии магнитного поля использовавшейся магнитной системы проводилось с помощью измерителя магнитной индукции Ш1–8. Чувствительным элементом является холловский датчик размером 1×0,25 мм. За начало отсчета принят центр разрядного промежутка (рис. 3). Ось *OX* системы координат направлена вдоль магнитного поля, ось *OZ* – по внешней нормали к рабочей поверхности диэлектрика (сонаправлена с преимущественным направлением вылета пучка частиц). Результаты измерений представлены на рис. 4–6.

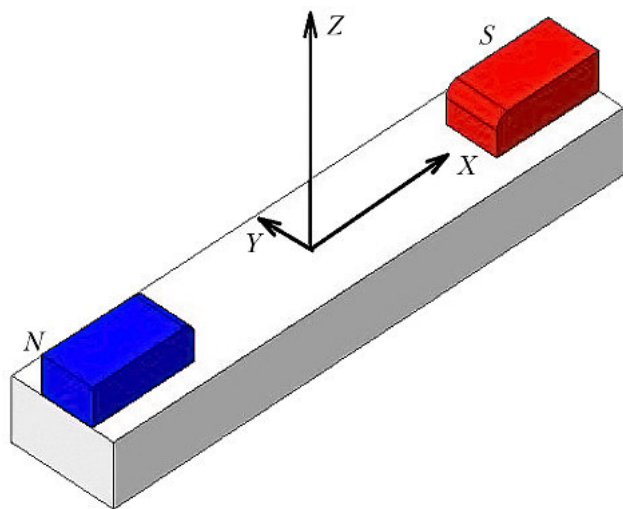


Рис. 3. Система координат для измерения топологии магнитного поля

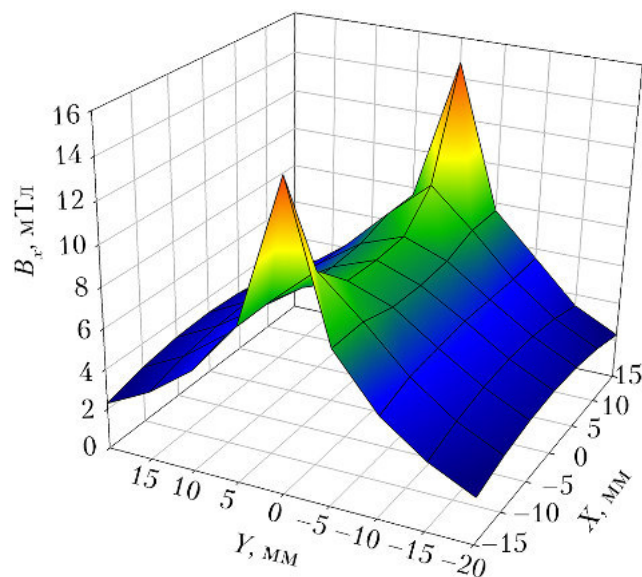


Рис. 4. Распределение *x*-компоненты магнитной индукции B_x в плоскости разряда ($z = 0$)

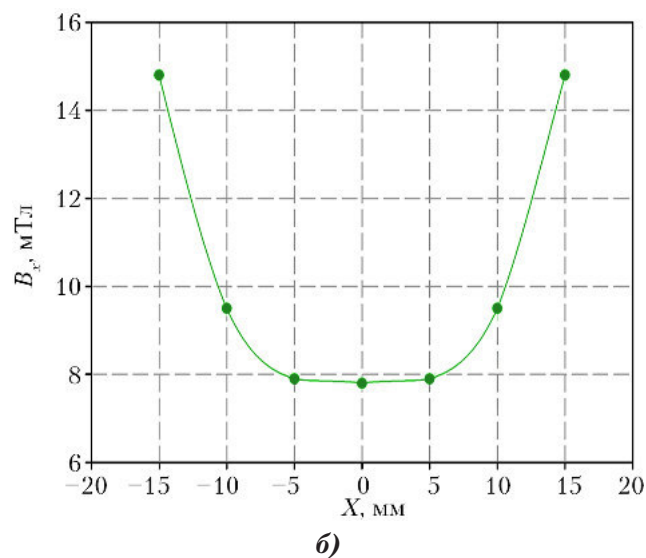
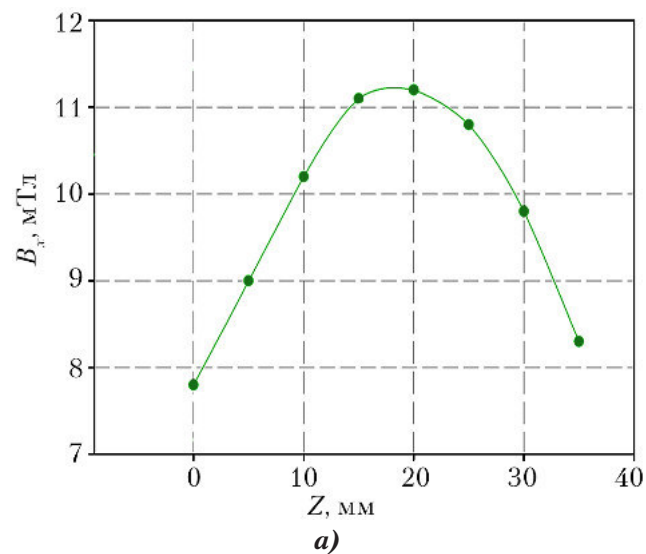


Рис. 5. Зависимость магнитной индукции B_x от расстояния z до разряда в середине разрядного промежутка при $x = y = 0$ (а) и от координаты x вдоль разрядного промежутка при $z = y = 0$ (б)

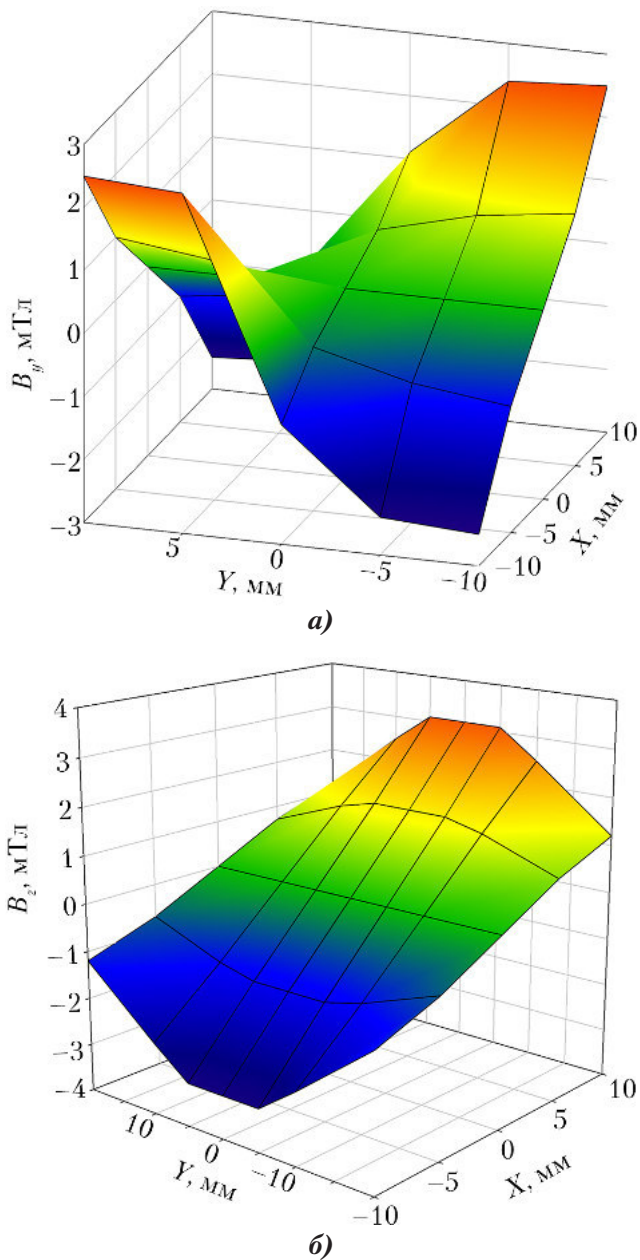


Рис. 6. Распределение компонент поля B_y (а) и B_z (б) в плоскости разряда ($z = 0$)

Компонента индукции магнитного поля, сонаправленная с вектором напряженности электрического поля, локализована в пределах области 5 см от разряда. Максимум достигается на уровне расположения магнитопровода, т. е. на высоте 2 см от поверхности диэлектрика. Величина магнитной индукции в максимуме равна 11 мТл, а градиент составляет 0,15 Тл/м. Поле неоднородно вдоль оси OX , вблизи электродов индукция магнитного поля возрастает. Нормальная к поверхности диэлектрика компонента магнитной индукции в месте протекания тока разряда равна нулю. Вблизи электродов эта компонента возрастает до 3 мТл, причем вблизи анода индукция направлена в сторону диэлектрика.

Измерение импульса тяги

Импульс тяги измерялся крутильными весами, в одном из плеч которых укреплена мишень для приема продуктов разряда (рис. 7). Весы подвешены на вольфрамовой проволоке диаметром 0,12 мм длиной 0,5 м. Период собственных колебаний системы составляет 90 с.

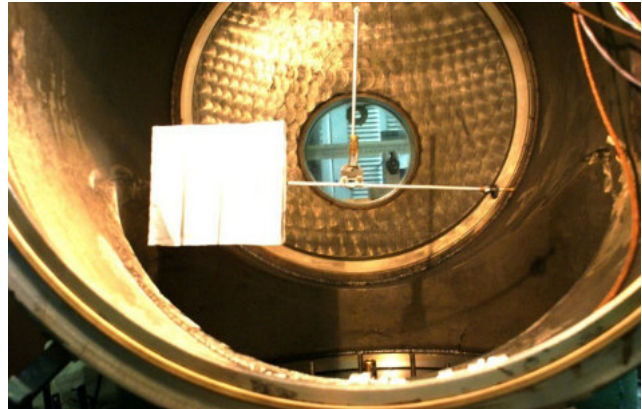


Рис. 7. Крутильные весы в вакуумной камере

Мишень располагалась на расстоянии 200 мм от разрядного промежутка. На этом расстоянии она при размерах 180×180 мм охватывает телесный угол более 1 стерадиана, что обеспечивает прием практически всего пучка частиц, истекающего из области разряда.

На крутильных весах располагалось зеркало, на которое падал луч от малоэнергетического лазера. Угол поворота крутильных весов после воздействия серии импульсов, суммарная длительность которой не превышала одной десятой периода собственных колебаний, определялся по отклонению этого луча на измерительной шкале. Измерения производились сериями по 100 разрядов с частотой 50 Гц. Нелинейность зависимости измеренного импульса от числа разрядов начиналась при их количестве, превышающем 300.

Импульс тяги I определялся по формуле

$$I = \frac{2\pi J}{Tr} \frac{x}{2R},$$

где J — момент инерции весов; T — период колебаний; r — расстояние от оси подвеса до центра области воздействия пучка (до центра мишени); R — расстояние от зеркала до измерительной шкалы; x — максимальное отклонение отраженного луча по шкале.

Импульс тяги двигателя полагался равным импульсу, сообщенному весам (приближение абсолютно неупругого

взаимодействия плазмы с мишенью). Результаты измерений приведены в таблице.

Значения импульса тяги

Магнитное поле в центре разряда, мТл	Импульс тяги, мкН·с/разряд
0	1,74
8	2,25

Из приведенных данных видно, что величина импульса тяги при наличии магнитного поля на 30% больше, чем в отсутствие поля. Проведенные ранее исследования [9] показывают, что если магнитное поле перпендикулярно электрическому току разряда, то оно существенным образом влияет на процесс развития пробоя по поверхности диэлектрика, уменьшая как плотность и скорость ионов, так и среднемассовую скорость частиц, истекающих из области разряда.

Обнаруженный эффект увеличения импульса тяги в присутствии продольного магнитного поля, скорее всего, связан с воздействием поля на электронную компоненту плазмы разряда, способствующим сжатию токового канала. Действительно, рассмотрим спектр скоростей ионов, приведенный на рис. 8. Этот спектр получен при исследовании разряда по поверхности пористой керамики, пропитанной вакуумным маслом, при близких значениях энергии генератора. Измерения проводились по времяпролетной методике [10]. Из рис. 8 видно, что основная масса ионов имеет скорость в несколько десятков километров в секунду. При таких скоростях ларморовский радиус иона C^+ в поле 10 мТл превышает 10 см. В самом токовом канале тепловые скорости ионов соответствуют энергии 2–5 эВ и, соответственно, ларморовский радиус в используемых полях превышает 5 см. Таким образом, используемые в эксперименте поля заметно не влияют на ионную компоненту плазмы ни в пучке, ни в разряде. При этом электроны уже при энергии 1 эВ имеют ларморовский радиус менее 1 мм, что сравнимо с диаметром разрядного канала. Таким образом, часть электронов, тепловая скорость которых перпендикулярна к направлению магнитного поля, захватывается им и движется по спирали вокруг направления силовых линий магнитного поля, сонаправленного с электрическим. Это, в свою очередь, способствует контрагированию разряда и увеличению температуры, концентрации

электронов и степени ионизации плазмы. Кроме того, удержанию электронов в дуге способствует наличие магнитных пробок, образованных у электродов (см. рис. 5, б).

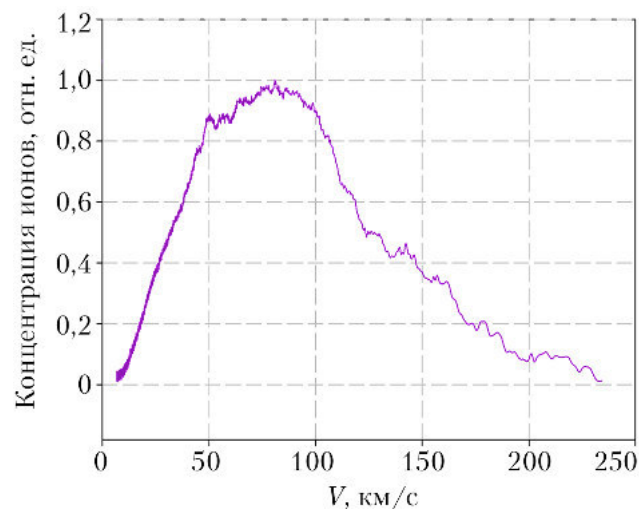


Рис. 8. Скоростной спектр ионной компоненты плазменного пучка

Для более полного понимания механизма воздействия магнитного поля на величину тяги желательно сравнить значения энергии, вводимой в разряд при наложении магнитного поля и, соответственно, в его отсутствие. Однако полученные нами осциллограммы тока содержат большое количество высокочастотных наводок и токовых шумов, что делает невозможным корректный расчет вводимой в разряд энергии и не позволяет сделать убедительный вывод об изменении этой величины при наличии магнитного поля.

Заключение

Разработан и изготовлен компактный макет разрядной камеры высоковольтного ИПД с возможностью наложения постоянного магнитного поля, направленного вдоль тока разряда. Показано, что в предложенной конфигурации магнитного поля при значениях магнитной индукции ~10 мТл импульс тяги увеличивается на 30%. Этот эффект, по-видимому, связан с замагничиванием электронов плазмы, скорость которых направлена под углом к направлению поля.

Тяговая эффективность разработанного макета составляет 2 мкН/Вт, что на порядок меньше характерных для практически используемых ИПД [2]. Однако, обнаруженный эффект увеличения тяги представляет собой дополнительный фактор, способный улучшить эксплуатационные свойства ИПД.

Список литературы

1. Козубский К.Н., Корякин А.И., Мурашко В.М. История космических стационарных плазменных двигателей и их применения в России, США и Европе. Новые вызовы для стационарных плазменных двигателей. К 40-летию первых космических испытаний стационарных плазменных двигателей // Электронный журнал «Труды МАИ». 2012. № 60. Режим доступа: <http://trudymai.ru/published.php?ID=35389> (дата обращения 08.06.2018 г.).
2. Burton R., Turchi P. Pulsed plasma thruster // *Journal on Propulsion and Power*. 1998. V. 14. № 5. P. 716–735.
3. Антропов Н.Н., Дьяконов Г.А., Pokryshkin A.I. Импульсные плазменные двигатели в системах управления космических аппаратов // Прикладная физика. 2002. № 1. С. 37–47.
4. Gopanchuk V.V., Potapenko M.Yu. Создание плазменных двигателей малой мощности для микроспутников // Космическая техника и технологии. 2015. № 4(11). С. 40–49.
5. Kakami A., Koizumi H., Komurasaki K., Arakawa Y. Design and performance of liquid propellant pulsed plasma thruster // *Vacuum*. 2004. V. 73. Issue 3–4. P. 419–425.
6. Патент RU 2119594. Российская Федерация. Способ получения реактивной тяги. Вершинин Ю.Н., Некрасов Б.А.;

заявители и патентообладатели — ИЭФ УрО РАН и НИИ машиностроения МОП; заявка 96117878/25; приоритет от 02.09.1996 г.; опубликован 27.09.1998 г.

7. Морозов П.А., Емлин Р.В., Пунанов И.Ф. Влияние полярности центрального электрода на параметры ионной компоненты плазменного пучка, генерируемого разрядом по поверхности диэлектрика в вакууме // Известия вузов. Физика. 2015. Т. 58. № 9/2. С. 209–213.

8. Патент RU 2503848. Российская Федерация. Импульсный электрический реактивный двигатель. Казанкин Ф.А., Потабачный Л.А., Ермилов В.А.; заявитель и патентообладатель — НИИ машиностроения МОП; заявка 2011124587/06; приоритет от 16.06.2011 г. // Изобретения. 2014. № 1.

9. Гилев А.С., Морозов П.А., Емлин Р.В., Пунанов И.Ф., Чолах С.О. Влияние магнитного поля на скорость ионной компоненты пучка частиц, образующихся при наносекундном вакуумном перекрытии диэлектриков // Известия вузов. Физика. 2012. Т. 55. № 6. С. 3–6.

10. Popov S.A., Panchenko A.V., Batrakov A.V., Ljubchenko F.N., Mataibaev V.V. Experimental study of the laser ablation plasma flow from the liquid Ga-In target // *IEEE Transaction of Plasma Science*. 2011. V. 39. Issue 6. P. 1412–1417.

Статья поступила в редакцию 28.05.2018 г.

Reference

1. Kozubskiy K.N., Koryakin A.I., Murashko V.M. Istoriya kosmicheskikh stacionarnykh plazmennykh dvigateley i ikh primeneniya v Rossii, SSHA i Evrope. Novye vyzovy dlya stacionarnykh plazmennykh dvigateley. K 40-letiyu pervykh kosmicheskikh ispytaniy stacionarnykh plazmennykh dvigateley [A history of space stationary plasma thrusters and their use in Russia, USA and Europe. New challenges for stationary plasma thrusters. To mark the 40th anniversary of space tests of stationary plasma thrusters]. *Elektronnyy zhurnal «Trudy MAI»*, 2012, no. 60. Available at: <http://trudymai.ru/published.php?ID=35389> (accessed 08.06.2018).
2. Burton R., Turchi P. Pulsed plasma thruster. *Journal on Propulsion and Power*, 1998, vol. 14, no. 5, pp. 716–735.
3. Antropov N.N., D'yakonov G.A., Pokryshkin A.I. Impul'snye plazmennye dvigateli v sistemakh upravleniya kosmicheskikh apparatov [Pulsed plasma thrusters in spacecraft control systems]. *Prikladnaya fizika*, 2002, no. 1, pp. 37–47.
4. Gopanchuk V.V., Potapenko M.Yu. Sozdanie plazmennykh dvigateley maloy moshchnosti dlya mikrosputnikov [Development of low-power plasma thrusters for small satellites]. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*, 2015, no. 4(11), pp. 40–49.
5. Kakami A., Koizumi H., Komurasaki K., Arakawa Y. Design and performance of liquid propellant pulsed plasma thruster. *Vacuum*, 2004, vol. 73, issue 3–4, pp. 419–425.
6. Patent RU 2119594. Rossiyskaya Federatsiya. Sposob polucheniya reaktivnoy tyagi [A method of generating reactive thrust]. Verшинin Yu.N., Nekrasov B.A.; the applicant and the patent owner — IEF UrO RAN i NII mashinostroeniya MOP; application 96117878/25; priority of 02.09.1996; published 27.09.1998.

7. Morozov P.A., Emlin R.V., Punanov I.F. *Vliyanie polyarnosti tsentral'nogo elektroda na parametry ionnoy komponenty plazmennogo puchka, generiruemogo razryadom po poverkhnosti dielektrika v vakuume* [The effect of polarity of the central electrode on the parameters of the ion components of the plasma beam generated by discharge over the surface of dielectric in vacuum]. *Izvestiya vuzov. Fizika*, 2015, vol. 58, no. 9/2, pp. 209–213.

8. Patent RU 2503848. Rossiyskaya Federatsiya. *Impul'snyy elektricheskiy reaktivnyy dvigatel'* [Pulsed electric jet thrusters]. Kazankin F.A., Potabachnyy L.A., Ermilov V.A.; the applicant and the patent owner – NII mashinostroeniya MOP; application 2011124587/06; priority of 16.06.2011. *Izobreteniya*, 2014, no. 1.

9. Gilev A.S., Morozov P.A., Emlin R.V., Punanov I.F., Cholah S.O. *Vliyanie magnitnogo polya na skorost' ionnoy komponenty puchka chastits, obrazuyushchikhsya pri nanosekundnom vakuumnom perekrytii dielektrikov* [The effect of magnetic field on the velocity of the ion component of the particle beam generated during a nanosecond vacuum spanning of dielectrics]. *Izvestiya vuzov. Fizika*, 2012, vol. 55, no. 6, pp. 3–6.

10. Popov S.A., Panchenko A.V., Batrakov A.V., Ljubchenko F.N., Mataibaev V.V. *Experimental study of the laser ablation plasma flow from the liquid Ga-In target*. *IEEE Transaction of Plasma Science*, 2011, vol. 39, issue 6, pp. 1412–1417.