

EDN: QFQRQA

УДК 629.7.018

Overview of Known Power Methods for Measuring the Jet Thrust of Ion Thrusters: Pivot Targets

Igor S. Vavilov*,
Dmitriy V. Lokotaev, Pavel S. Yachmenev,
Victor V. Fedyanin, Konstantin I. Zharikov,
Pavel V. Stepen and Anton I. Lukyanchik
*Omsk State Technical University
Omsk, Russian Federation*

Received 07.03.2024, received in revised form 06.04.2024, accepted 07.06.2024

Abstract. The paper provides an overview of most existing designs of power stands based on a hinged target designed to measure the thrust of ion thrusters. 14 unique designs of stands based on a hinged target are presented, and 2 designs of aerodynamic stands based on an elastic target are additionally added. The presented stands based on an elastic target have a measurement range of steady-state thrust from 15 μN to 300 mN. The stands based on hinged targets cover the range of measured steady-state thrust from 0.2 μN to 2.5 N and the range of measured thrust pulses from 20 $\mu\text{N} \cdot \text{s}$ to 1 mN·s. The temporary section from 1982 to 2015 is covered. The methods of recording micro-displacements of the sensing element, damping of parasitic vibrations and calibration of stands are shown. Data on errors in measuring thrust by stands are presented.

Keywords: pivot, target, disc, knife blade, optical sensor, jet propulsion, ion thruster, calibration, LVDS, capacitive sensor, cylindrical target.

Acknowledgements. The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 19–79–10038, <https://rscf.ru/project/19–79–10038/>.

Citation: Vavilov I. S., Lokotaev D. V., Yachmenev P. S., Fedyanin V. V., Zharikov K. I., Stepen P. V., Lukyanchik A. I. Overview of known power methods for measuring the jet thrust of ion thrusters: pivot targets. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2024, 17(4), 515–537. EDN: QFQRQA



Обзор известных силовых способов измерения реактивной тяги ионных двигателей: шарнирные мишени

**И. С. Вавилов, Д. В. Локотаев,
П. С. Ячменев, В. В. Федянин,
К. И. Жариков, П. В. Степень, А. И. Лукьянчик**
*Омский государственный технический университет
Российская Федерация, Омск*

Аннотация. В работе представлен обзор большинства существующих конструкций силовых стендов на основе шарнирной мишени, предназначенных для измерения тяги ионных двигателей. Представлено 14 уникальных конструкций стендов на основе шарнирной мишени, а также дополнительно добавлены 2 конструкции аэродинамических стендов на основе упругой мишени. Представленные стенды на основе упругой мишени имеют диапазон измерения установившихся тяг от 15 мкН до 300 мН. Стенды на основе шарнирных мишеней охватывают диапазон измеряемых установившихся тяг от 0.2 мкН до 2.5 Н и диапазон измеряемых импульсов тяги от 20 мкН·с до 1 мН·с. Охвачен временной участок от 1982 г. до 2015 г. Показаны способы регистрации микроперемещений чувствительного элемента, демпфирования паразитных колебаний и калибровки стендов. Представлены данные по погрешностям измерения тяги стендами.

Ключевые слова: шарнир, мишень, диск, лезвие ножа, оптический датчик, реактивная тяга, ионный двигатель, калибровка, LVDS, ёмкостный датчик, цилиндрическая мишень.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19–79–10038, <https://rscf.ru/project/19-79-10038/>.

Цитирование: Вавилов И. С. Обзор известных силовых способов измерения реактивной тяги ионных двигателей: шарнирные мишени / И. С. Вавилов, Д. В. Локотаев, П. С. Ячменев, В. В. Федянин, К. И. Жариков, П. В. Степень, А. И. Лукьянчик // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2024, 17(4). С. 515–537. EDN: QFQRQA

Введение

Данная работа заключительная в цикле публикаций авторов в части силовых методов определения реактивной тяги ионных двигательных установок. Ранее были представлены стенды на основе торсионных, вертикальных маятников (нормального и перевёрнутого типов) и качельных маятников, а также стенды на основе упругих мишеней. В данной статье представлены аэродинамические стенды на основе шарнирных мишеней. Определение тяги при смещении упругой мишени осуществляется на основе теории изгиба балки под действием сосредоточенной концевой силы. Упругие мишени могут быть расположены вертикально (нормально и перевёрнуто) и горизонтально, рычаг мишени имеет жёсткую заделку со станиной стенда. В стендах на шарнирных мишенях положение рычага только вертикальное, шарнир выполнен в виде подшипникового узла, опоры типа «лезвие ножа» или тонкой неупругой нити. Определение силы тяги основано на балансе силы давления струи на мишень и силы тяжести мишени.

Для стендов на основе шарнирных мишеней калибровка желательна для шарниров на основе подшипников. В случае малой величины трения в шарнире (например, при игольчатых осях, тонких нитях или опор типа «лезвие ножа») чувствительный элемент автоматически

занимает абсолютное нулевое положение относительно гравитационного поля Земли и калибровка не обязательна.

Стенды на основе мишеней (шарнирные и упругие) нашли широкое применение по объективным причинам:

- простота конструкции;
- низкие массогабаритные характеристики;
- высокая точность;
- возможность исследования различных конструкций двигателей на одном и том же стенде;
- простота калибровки, когда достаточно только калибровочных грузов или её отсутствие в принципе;
- простота уравнивания и низкая инерционность.

К недостаткам аэродинамического метода можно отнести неопределённость в области оптимальной конструкции мишени (явление отражения ионов и их обратный ток в сторону двигателя), необходимости её заземления (явление электростатического притягивания мишени к электродам ионно-оптической системы при высоком потенциале).

В статье представлено два стенда на основе упругой мишени, не вошедших в предыдущую публикацию.

Аэродинамические методы определения тяги: упругие мишени

В статье [1] представлен стенд для измерения тяги плоской упругой мишенью. Стенд предназначен для измерения тяги стационарного магнитоплазодинамического двигателя с приложенным полем (AF-MPDT). В экспериментах варьировалось расстояние до мишени и размер мишени, чтобы проанализировать их влияние на результаты измерения тяги. Полученные кривые зависимости тяги от расстояния увеличиваются до локального максимума, а затем уменьшаются с увеличением расстояния, что означает, что струя двигателя AF-MPDT все еще может ускоряться вне выхода двигателя. Положения пиков зависят от размеров мишеней: более крупные мишени могут располагаться дальше от двигателя и уменьшать погрешности измерений. Для дальнейшего повышения надежности результатов измерений предположение о тепловом равновесии в сочетании с законом косинуса Кнудсена адаптировано для анализа погрешности, вызванной обратным потоком частиц шлейфа. Согласно предположению, погрешность, вызванная обратным потоком частиц, составляет не более 3.6 %, а наибольшая разница между измеренной тягой и теоретической тягой составляет 14 %. Было подтверждено, что измерение тяги методом мишени может нарушить работу двигателя AF-MPD, влияние на результат измерения тяги в эксперименте составляет не более 1 %.

Как показано на рис. 1, стенд, используемый в эксперименте, в основном состоит из квадратной мишени, гибкой балки и лазерного датчика перемещения. Упорный стенд подвешен под подвижной платформой для регулировки положения измерений. Точность перемещения платформы составляет ± 0.5 мм, а рабочий ход – 600 мм. Гибкая балка и мишень соединены неподвижно и изготовлены из нержавеющей стали марки 304 и слюды соответственно. Слюда обладает оптимальной жесткостью и адиабатичностью, что позволяет снизить теплопроводность от мишени к балке и тепловую деформацию. Когда струя двигателя попадает в мишень, сила

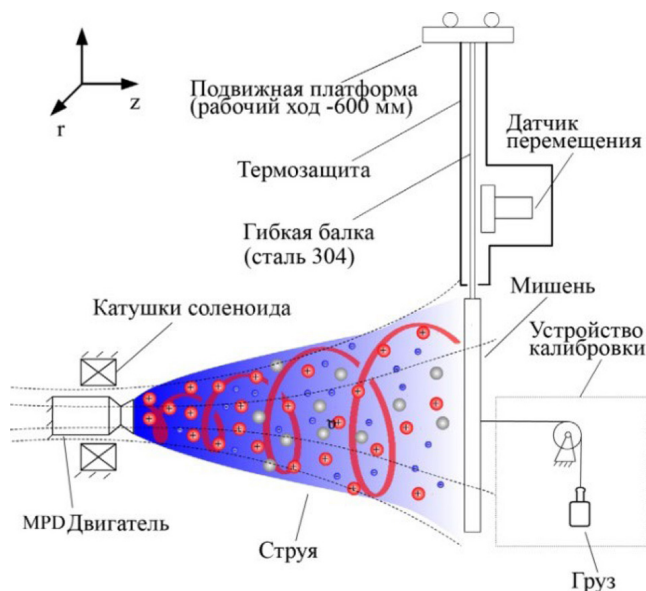


Рис. 1. Схема стенда с калибровочным устройством

Fig. 1. The schema of the stand with a calibration device

удара изгибает балку. Смещение пластины может быть измерено с помощью лазерного датчика смещения, установленного за балкой, с разрешением 0.5 мкм.

Согласно калибровке стенд может работать в диапазоне тяг 0–300 мН.

В источнике [2] авторы создали тягу уровня мкН при взаимодействии маломощного лазера непрерывного действия и алюминиевой фольги без какого-либо заметного удаления поверхности мишени. Для оценки характеристик тяги был разработан тяговый стенд с торсионными балансиром, способный измерять уровень тяги вплоть до микроньютонов. В случае применения мишени из алюминиевой фольги толщиной 12.5 мкм максимальный уровень тяги составлял 15 мкН при мощности лазера 20 Вт, или около 0.75 мкН/Вт. На рис. 2 показаны схематическое изображение и фотография упорного стенда, а также схема экспериментальной установки. Метательная мишень и набор противовесов были закреплены с каждой стороны медного кронштейна, подвешенного на двух проводах. Для устранения механического шума снаружи вакуумной камеры был использован пассивный гаситель вихревых токов. Калибровка упорного стенда осуществлялась с помощью электростатического привода, в котором подавались различные напряжения между двумя пластинами, а перемещения, возникающие из-за электростатической силы между электродами, измерялись лазерным датчиком перемещения. Напряжение калибровочного привода было ступенчато увеличено с 0 В до 300 В, при этом зазор между двумя пластинами был зафиксирован на уровне 13 мм.

Тяга измерялась при непрерывном облучении лазерным лучом твердого металлического топлива. Была использована мишень из алюминиевой фольги. В качестве лазерного генератора использовался непрерывный волоконный лазер (CHIP Lasers, SP-25C-0001) с длиной волны 1090 нм и переменной выходной мощностью от 0.1 до 20 Вт. Для выяснения влияния длины волны был использован непрерывный лазерный диод (JENOPTIK, JOLD-30-CPXF-1L) с длиной

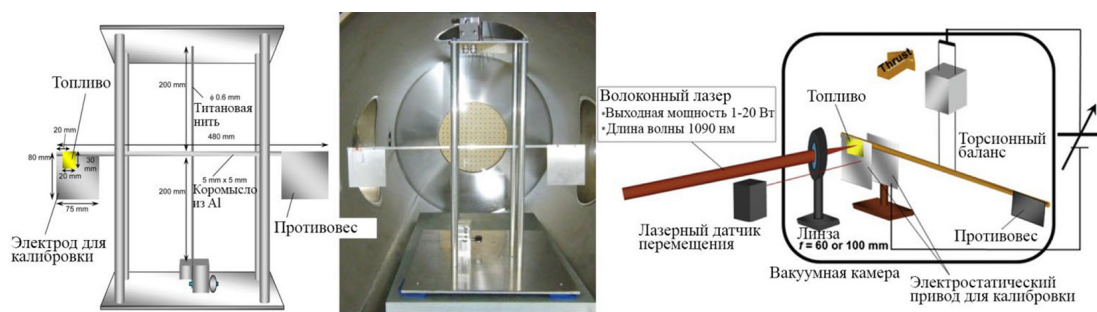


Рис. 2. Схема стенда, его фотографическое изображение и схема экспериментальной установки

Fig. 2. The scheme of the stand, its photographic image and the scheme of the experimental installation

волны 808 нм и максимальной мощностью 30 Вт. Измерение тяги двигателя проводилось в вакуумной камере. Для фокусировки лазерного луча использовалась выпуклая линза с фокусным расстоянием 60 мм. Топливо было закреплено на плоском держателе на тяговом стенде, смещение держателя измерялось с помощью лазерного датчика перемещения.

Аэродинамические методы определения тяги: шарнирные мишени

В работе [3] представлен прибор для измерения импульса интенсивного плазменного потока, для которого стандартные методы, используемые для газов низкого давления (< 10 Торр) при комнатной температуре, непригодны. При времени отклика < 50 мс измеритель импульса плазмы может измерять силу в диапазоне $10^{-5} - 10^3$ Н на поверхности различных материалов, погруженных в плотную плазму ($n \geq 10^{12}$ см $^{-3}$). Такие силы передаются преимущественно ионными и нейтральными частицами. Импульсный поток, поступающий на смещаемую пластину-мишень, передается через подвешенную кварцевую трубку на чувствительный датчик силы – емкостный манометр давления. Это защищает преобразователь от термического повреждения, образования дуги и распыления. Описана калибровка измерителя импульса плазмы (PMM – plasma momentum meter) по абсолютной силе с точностью до 1 %. Плоская углеродная мишень использовалась для измерения потока импульса плазмы He, Ne, Ar и Kr, получаемой в намагниченном линейном плазменном устройстве.

Элементом PMM является датчик давления баратрон. Его обычно используют в качестве датчика давления в диапазоне от 10^{-6} до 10^4 мТорр для газов комнатной температуры. Модель баратрона 317HS MKS рассчитана на применение при давлении до 1 Торр и усилиях в диапазоне 10^{-5} – 10^{-1} Н. Точность измерений до 1 %. Мощные атомные/ионные/плазменные струи не должны вступать в непосредственный контакт с датчиком давления из-за тонкости и хрупкости его диафрагмы. Импульсный поток контактирует с огнеупорной пластиной мишени и передается на диафрагму через кварцевую трубку с внутренним диаметром 3 мм, наружным диаметром 5 мм и длиной 68.5 см. Кварцевая трубка была выбрана из-за электроизоляционных свойств, малого веса, жесткости даже при повышенных температурах и низкой теплопроводности. Полая кварцевая трубка обеспечивает канал для подвода проводов к передней огнеупорной мишени. Это позволяет осуществлять электрическое смещение мишени или контролировать температуру

мишени с помощью термопары. Углеродная мишень изготовлена из графита АТJ. Он имеет форму двух соосных дисков диаметром примерно 1 и 3.5 см, толщиной 0.5 см каждый. Диск меньшего размера имеет коаксиальное отверстие диаметром 5 мм, что позволяет надежно закрепить его на кварцевой трубке. Диаметр диска большего размера был выбран таким образом, чтобы он превышал диаметр плазменной струи примерно на 1 см. Углеродные мишени могут быть заменены мишенями из различных материалов, форм и ориентации. Кварцевая трубка имеет вторую графитовую заглушку на конце, которая прижимается к мембране. Это распределяет усилие более равномерно по диафрагме, предотвращая деформацию пластика. Трубка удерживается в горизонтальном положении с помощью двух пар хромированных проводов, которые подвешивают трубку в точках примерно в 10 и 30 см от торцов мишени и заглушки соответственно (рис. 3). Точ-

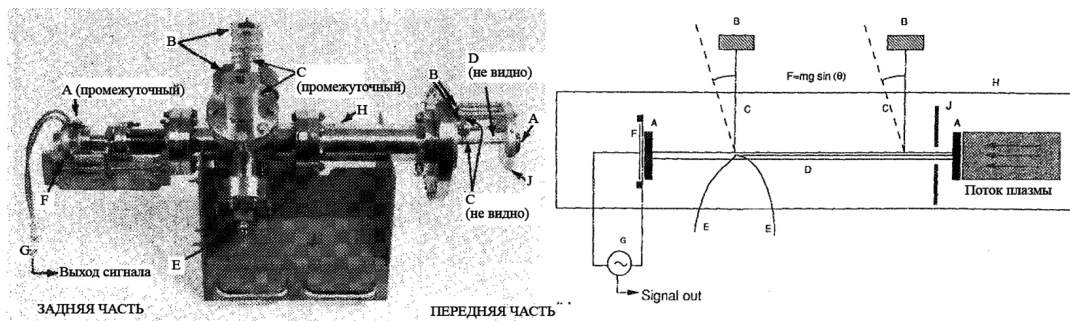


Рис. 3. Фотографическое изображение устройства и его принципиальная схема

Fig. 3. A photographic image of the device and its schematic schema

ное расположение каждой опоры было выбрано таким образом, чтобы избежать резонансов целой или дробной длины при изгибе трубы. Длина каждого провода, контролируемая с помощью креплений микрометрического типа, составляет около 10 см. Эта подвеска допускает только продольное, осевое смещение кварцевой трубки. Тонкий металлический экран перед РММ защищает провода от плазменной бомбардировки. Кварцевая трубка и провода смонтированы в вакуумном корпусе из нержавеющей стали с переходными отверстиями для креплений микрометрического типа. Баратрон прикреплен к одному концу корпуса с помощью сифона, сваренного из нержавеющей стали. Длина сифона также регулируется с помощью микрометрического крепления. Это используется для контроля контакта между графитовой пробкой, амортизирующей подушкой и диафрагмой и является важным элементом процедуры калибровки.

На рис. 3 буквами обозначены: А – передняя графитовая мишень и задняя графитовая заглушка; В – регулируемые опоры для горизонтального позиционирования и калибровки; С – подвесные провода для свободного горизонтального осевого перемещения; D – кварцевая трубка для теплоизоляции и передачи жесткого усилия; E – выводы термопары для контроля температуры и смещения пластины мишени; F – баратрон; G – емкостной мост для измерения давления; H – вакуумный корпус; J – защитный экран для подвесных проводов.

В источнике [4] представлен стенд на основе метода мишени с новым типом мишени – цилиндрическая мишень. В цилиндрической мишени большая часть отскакивающих частиц по-

кидает мишень радиально через прорезы, прикрепленные к ее боковой поверхности. Предполагается, что с этой мишенью исчезнет неоднозначность, присущая методам мишени, которая вызвана недостаточной аккомодацией импульса отскакивающих частиц. Оценка импульсных разрядов ППД для каждого отдельного импульса возможна с помощью метода мишени, хотя точность измерения ограничена из-за трудности точной оценки аккомодации импульса отскакивающих частиц. Мишень нового типа разработана для устранения эффекта отскакивающих частиц.

На рис. 4 показаны мишень и схема измерения тяги. Плазменный пучок от ППД попадает в мишень через входное отверстие на передней панели. Нижняя пластина имеет коническую форму, и большинство отскакивающих частиц газа от нижней пластины выходят радиально от мишени через множество щелей на боковой стороне цилиндра, поскольку общая площадь отверстий, перпендикулярных боковой стороне (A_s), велика по сравнению с площадью входного отверстия (A_e) ($A_s/A_e = 16$). Предполагается, что влияние отскакивающих частиц на измерение с этой мишенью незначительно. Основной корпус мишени изготовлен из неметаллического материала (пластина из поливинилхлорида (ПВХ) толщиной 0.2 мм) для предотвращения электромагнитных взаимодействий. Для исследования были использованы четыре твердотопливных ППД. Эксперименты проводились в вакуумной камере из нержавеющей стали диаметром 50 см и длиной 100 см с фоновым давлением ниже $1 \cdot 10^{-5}$ Торр.

Точность значений, полученных на стенде с мишенью, сравнивалась со значениями, полученными на тех же самых двигателях, но испытанных на маятниковом упорном стенде. Экспериментальные результаты показали, что по мере уменьшения расстояния между мишенью и двигателем с 10 до 0 см величина погрешности монотонно изменялась от -15 до $+8$ %.

Продолжение направления цилиндрических мишеней нашло в источнике [5]. На рис. 5 показана принципиальная схема экспериментальной установки для измерения тяговых характеристик и виды цилиндрической мишени спереди и сбоку. Струя плазмы, выбрасываемая

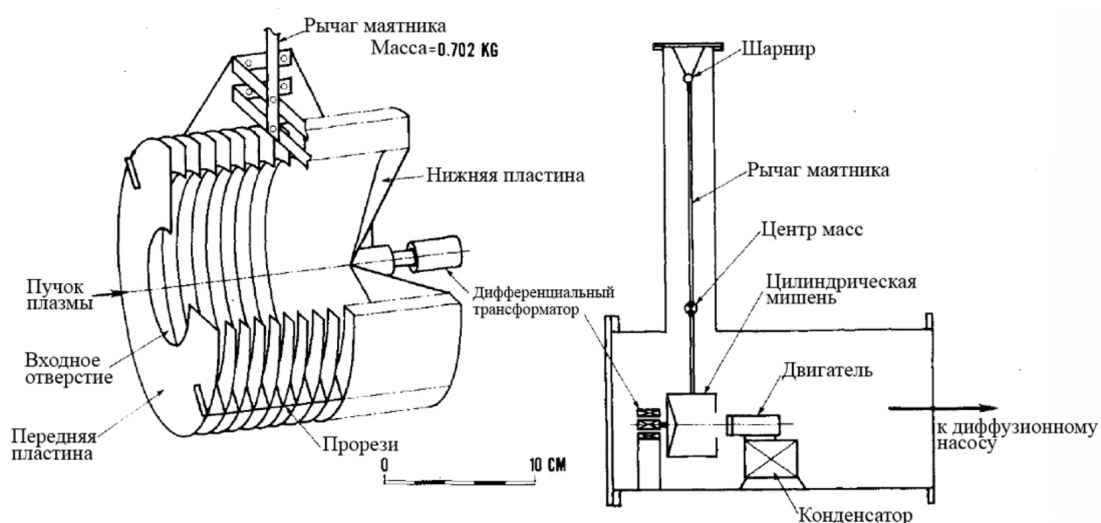


Рис. 4. Цилиндрическая мишень и схема экспериментальной установки

Fig. 4. Cylindrical target and experimental setup schema

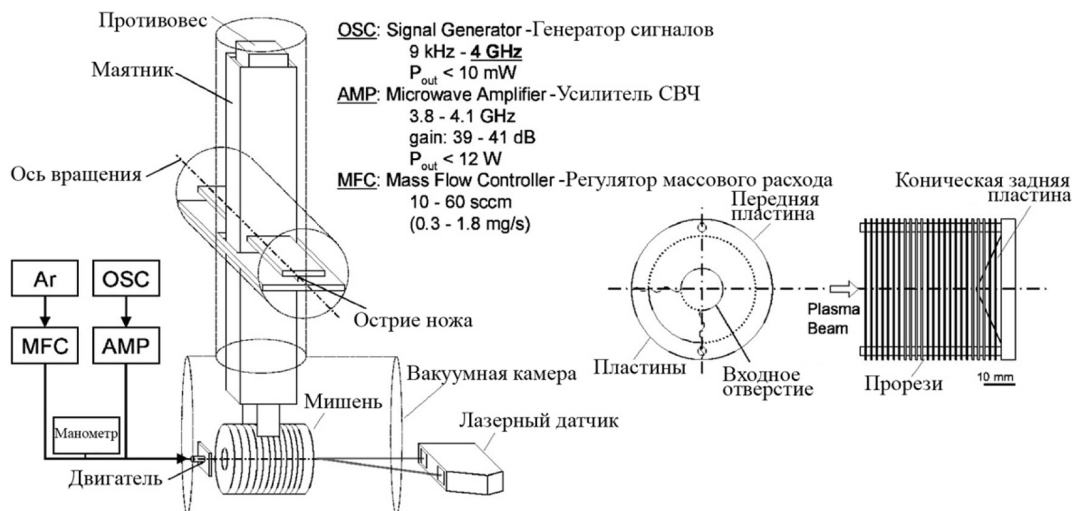


Рис. 5. Схема стенда и цилиндрическая мишень (вид спереди и вид сбоку)

Fig. 5. Schema of the stand and a cylindrical target (front view and side view)

из двигателя, попадает в цилиндрическую мишень, установленную на одном конце маятника, на другом конце которого для равновесия находятся несколько грузиков. Маятник вращается без трения вокруг точек опоры, которые представлены в виде двух лезвий ножа. Смещение маятника регистрируется лазерным датчиком Keyence, LK-G85, его разрешение составляет около $\pm 0.2 \text{ мкм}$. Микродвигатель и маятник установлены в вакуумной камере, изготовленной из нержавеющей стали. Пучок плазмы попадает в мишень, изготовленную из тефлона, через входное отверстие на передней панели. Нижняя пластина мишени имеет коническую форму, и большинство отскакивающих частиц газа от нижней пластины выходят радиально от мишени через ряд прорезей на боковой стороне цилиндра. Для измерения тяговых характеристик сначала микродвигатель устанавливается на маятник вместо мишени, затем вычисляется смещение двигателя при работе на холодном газе в зависимости от массового расхода. Далее цилиндрическая мишень устанавливается на маятник и смещение мишени измеряется как функция массового расхода при работе с холодным газом. Чтобы подтвердить точность измерения тяги методом мишени, сравнивается тяга, полученная маятниковым методом, с тягой, полученной методом мишени. После подтверждения того, что разница между показателями тяги, измеренными двумя методами, незначительна, тяга при работе с плазменным разрядом определяется методом мишени. Стенд позволяет определять тягу в диапазоне 0.2–2 мН.

Для измерения потока импульса плазмы в плазменной системе были разработаны высокочувствительные и прецизионные весы [6]. Они могут измерять силу, импульс или тягу до 0.1 мН без механических помех, электрических и магнитных датчиков. Двойная маятниковая система состоит из двух параллельных проводящих пластин. Одна или обе пластины могут быть подвешены на иглах. Подвешенная к игле пластина (или пластины) может свободно вращаться с незначительным трением из-за острых углов иглы. Когда на одну из пластин воздействует импульс, она будет качаться относительно неподвижной пластины или другой подвижной пластины. В результате изменяется емкость между пластинами. Изменение емкости в зависимости

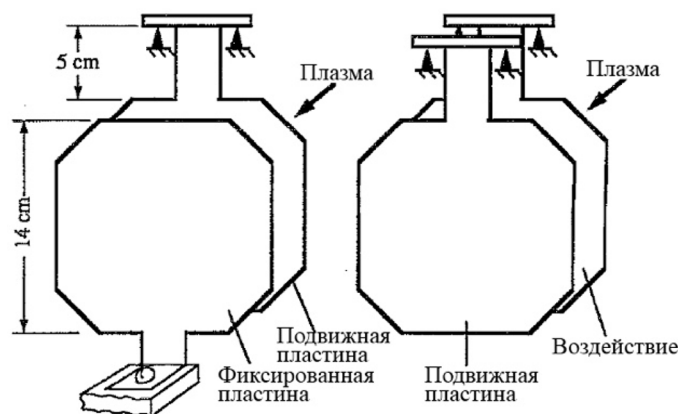


Рис. 6. Схема чувствительного элемента стенда

Fig. 6. Schema of the sensing element of the stand

от времени регистрируется в виде колеблющегося сигнала напряжения. Амплитуда такого сигнала напряжения пропорциональна силе воздействия или импульсу. С помощью этого стенда была измерена тяга на выходе тандемного зеркального плазменного двигателя (тяга составила 76 мН, удельный импульс 12852 с). Схема устройства представлена на рис. 6. Восьмиугольная форма пластин выбрана произвольно для удобства изготовления. Подвижная и неподвижная пластины идентичны по размеру и форме и изготовлены из алюминия. Смещение маятника преобразуется в изменение емкости пластин. Маятниковая пластина служит как мишенью, так и датчиком, а система представляет собой просто емкостный манометр. Толщина пластин составляет 1 мм, а расстояние между ними составляет 0.65 см. Пластины удерживались вместе во время механической обработки для гарантии того, что они будут иметь одинаковую конфигурацию и размеры.

В источнике [7] показан высокочувствительный прибор MFMI (momentum flux measuring instrument) для измерения потока импульса плазмы. Его работа основана на составном маятнике. Стенд разработан для использования с электрическими двигательными установками и плазмой с радиочастотным приводом. Лазерная система перемещения, основанная на методах, используемых в материаловедении для измерения поверхностных напряжений, применяется для измерения с высокой чувствительностью смещения пластины-мишени, помещенной в струю плазменного двигателя. Прибор калибровался двумя различными методами и способен измерять усилия в диапазоне 0.02–0.5 мН с разрешением 15 мкН. Мишень расположена на расстоянии одной средней длины свободного пробега для ионно-нейтральных зарядообменных столкновений после выхода из двигателя. В этом положении плазма на 10 % состоит из пучка ионов низкой плотности и на 90 % из гораздо большего нисходящего компонента. Измерения при различных скоростях потока показали, что с помощью стенда можно измерить изменения скорости ионного пучка и плотности плазмы, а также результирующий импульсный поток.

MFMI (рис. 7) представляет собой составной маятник, состоящий из пластины-мишени (кремниевая пластина диаметром 150 мм), прикрепленной к керамическому стержню. Таким образом, она электрически изолирована. Далее стержень прикреплён к трубке из нержавеющей

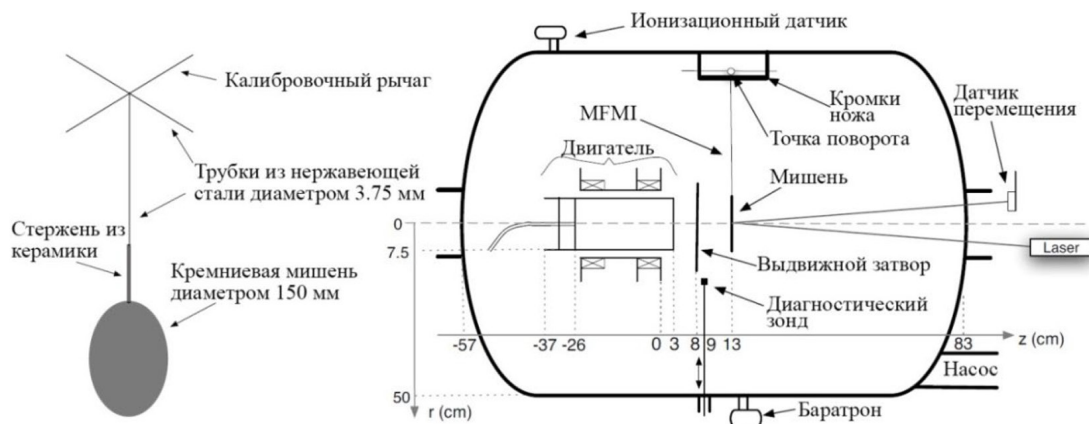


Рис. 7. Схема MFMI и схема экспериментальной установки

Fig. 7. MFMI schema and experimental setup schema

стали диаметром 3.75 мм. Керамический стержень скользит внутри трубки из нержавеющей стали и удерживается на месте с помощью небольшого крепежного винта. Это позволяет регулировать длину прибора по мере необходимости и легко заменять целевые пластины при необходимости. Перпендикулярно трубе прикреплена поперечина, также изготовленная из трубы из нержавеющей стали диаметром 3.75 мм, которая поворачивается на двух обработанных лезвиях ножа, прикрепленных к крышке испытательной установки. Другой отрезок трубы из нержавеющей стали диаметром 3.5 мм прикреплен перпендикулярно поперечине и имеет длину 200 мм. Эта деталь обеспечивает моментный рычаг длиной 100 мм с каждой стороны от точки поворота для целей калибровки. Одна сторона кремниевой пластины, которая используется в качестве пластины-мишени, имеет полированную поверхность, которую можно использовать для отражения лазерного луча. Общая масса прибора (мишени, керамического стержня и трубок из нержавеющей стали) составляет 67.948 ± 0.001 г.

В работе [8] описано применение баллистической маятниковой решетки для измерения импульса плазмы, создаваемой лазером. Описан метод калибровки на месте и результаты измерения маятника сравниваются с измерениями, выполненными с помощью других диагностических средств. В эксперименте использованы плоские мишени, облучаемые одним лазерным лучом. Так как мишени плоские, можно удобно измерить импульс плазмы (давление) и результирующее движение мишени. Мишень облучается импульсным Nd-лазером. В этом режиме мало быстрых электронов или ионов. Фактически ионы плазмы демонстрируют узкое распределение скоростей с одним пиком, поэтому имеет смысл применения интегрирующего баллистического маятника. Скорости ионов плазмы или обломков мишени варьируются от 10 до 600 км/с, давление на поверхность мишени колеблется от 0.1 до 6 Мбар. На рис. 8 показано экспериментальное устройство. Лазерный луч фокусируется на пятно диаметром от 300 до 1200 мкм на поверхности мишени с помощью асферической линзы диаметром 1.2 м. Сама мишень окружена массивом из шести баллистических маятников: три со стороны лазера и три с задней охлаждающей стороны мишени. Маятники находятся примерно в 20 см от мишени на -190° , -33° , -50° , 145° , 162° и 235° по отношению к нормали мишени. Типичный маятник со-

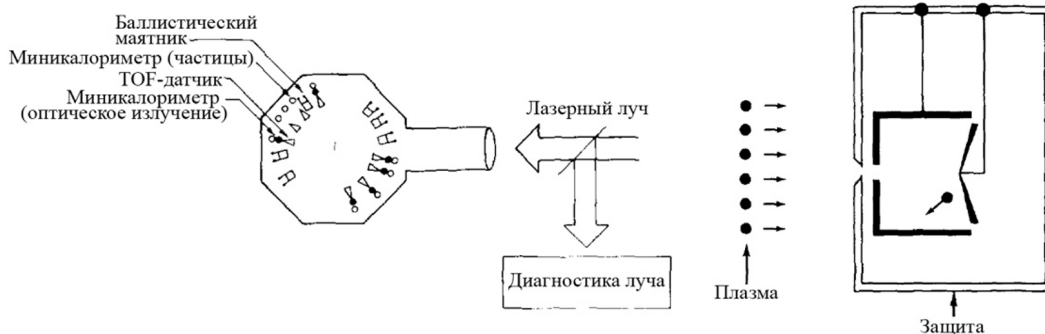


Рис. 8. Схема экспериментальной установки и схема двойного маятника

Fig. 8. The scheme of the experimental installation and the scheme of the double pendulum

стоит из прямоугольной собирающей поверхности, которая подвешена на нейлоновых нитях или, в некоторых случаях, на жесткой пластиковой конструкции, вращающейся на остром, как бритва, краю. Собирающие поверхности изготовлены либо из латуни, либо из майлара и имеют размер 2.5 x 4 см. Угловая скорость маятника измеряется с помощью измерительной катушки на 200–1000 витков, которая прикреплена с одной стороны к собирающей поверхности, в то время как другая ее сторона свободно перемещается между полюсами магнита весом 3 кг. Напряжение, индуцируемое в приемной катушке движением маятника, усиливается в 100 раз и затем фильтруется с помощью низкочастотного (10 Гц) шестиполосного фильтра Баттерворта. Такая фильтрация значительно снижает любое напряжение, вызванное вибрацией здания или вакуумными насосами. Дистанционно управляемый твердотельный переключатель используется для гашения движения маятника перед выстрелом.

Фотоионизация, упругий или неупругий характер столкновения плазмы с маятником или распыление могут повлиять на калибровку маятника на месте. Для измерения этих эффектов было сконструировано устройство с двойным маятником (рис. 8). Это устройство состоит из двух маятников, обращенных друг к другу, которые закрыты алюминиевым экраном с небольшим отверстием. Плазма, поступающая через отверстие в экране, ударяется о калибруемую поверхность маятника. Любой материал, отраженный, распыленный или фотоионизированный от этой поверхности, регистрируется вторым маятником, который выполнен в форме прямоугольной полости, так что он может улавливать большую часть этого материала.

В источнике [9] для измерения импульса плазмы предложена новая конструкция маятника – полый баллистический маятник. Его преимущество перед маятником, использовавшимся ранее в экспериментах с лазерной плазмой, заключается в том, что он нечувствителен к импульсу вещества, испаряемого и рассеиваемого стенкой маятника, находящейся под воздействием плазмы, который обычно превышает измеряемый импульс плазмы. Использование такого рода маятника в экспериментах по лазерному ускорению тонких пленок позволило измерить импульс ускоряемой фольги с точностью около 10 %. Измеряемая плазма поступает в полость через входное отверстие, площадь которого намного меньше площади самой полости (рис. 9). Вещество покидает полость в плоскости, перпендикулярной направлению импульса, измеряемого через отверстия, общая площадь которых намного превышает площадь входного отверстия. Только небольшая

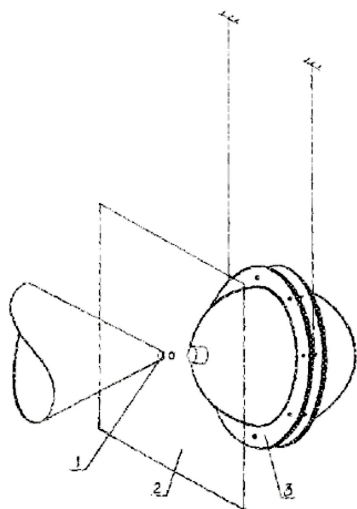


Рис. 9. Экспериментальная установка: 1 – мишень; 2 – экран; 3 – полый баллистический маятник

Fig. 9. Experimental setup: 1 – target; 2 – screen; 3 – hollow ballistic pendulum

часть испарившегося и рассеянного вещества выходит через входное отверстие, увеличивая измеренный импульс.

Мишень (1) нагревается излучением двух каналов лазерной установки УМИ-35. Луч фокусируется в фокусное пятно размером около 0.4 мм при интенсивности $5 \cdot 10^{-12}$ Вт/см² и длительности импульса 8 нс. Ускоренная часть мишени попадает в маятник через отверстие в экране (2). Отклонение маятника измеряется с помощью теневой графики с использованием луча He-Ne лазера. Этот метод очень точен, поскольку скорость маятника стремится к нулю, создавая резкую тень всякий раз, когда маятник приближается к точке поворота. В качестве мишени применялась майларовая фольга шириной 5 мм и толщиной 6 и 25 мкм.

В статье [10] описывается конструкция и тестирование подвесных маятниковых баланси́ров тяги непрямого действия с использованием лазерно-оптического рычажного принципа для обеспечения измерения тяги от микро- до миллиньютонов при разработке электрических силовых установок. Конструкция позволяет выбирать общий диапазон тяги для достижения максимальной разрешающей способности с помощью принципа уравновешенного маятника, а также пассивное магнитное демпфирование для обеспечения относительно быстрого измерения переходной тяги. Система измерения основана на лазерном оптико-механическом методе. Этот метод обеспечивает бесконтактное измерение угла поворота противовеса маятника с пассивным магнитным демпфированием. Изменяя вес и положение противовеса, следовательно, центр тяжести, можно регулировать диапазон тяги по мере необходимости. Стенд не требует поддержания веса двигателя и может быть настроен на очень высокий или очень низкий диапазон тяги, аналогично механическому усилению. Конструкция позволяет измерять уровни тяги от ионных двигателей (мН) до импульсных плазменных двигателей (мкН).

Оптическая установка состоит из He-Ne лазера Меллеса Грило (543.5 нм), пропущенного через кеплеровский расширитель луча и направленного через камеру на зеркало, жестко соединенное с подвешенной молибденовой маятниковой мишенью (рис. 10). Оптическая система направляет отраженный луч из камеры на светочувствительный детектор (PSD) с длиной пути 0.9 м, образуя лазерный оптический рычаг (ЛОР). Детектор соединен со схемой обработки сигнала С 4674 и предназначен для получения двумерных данных о местоположении падающего светового пятна. Выходные данные схемы обработки сигналов отображаются на двухканальном цифровом осциллографе Tektronix TDS 410A. Поворотный механизм позволяет расположить мишень как перпендикулярно к вектору тяги и полный диапазон углов поворота на 90°, так и возможность электрического перемещения, заземления или смещения маятника.

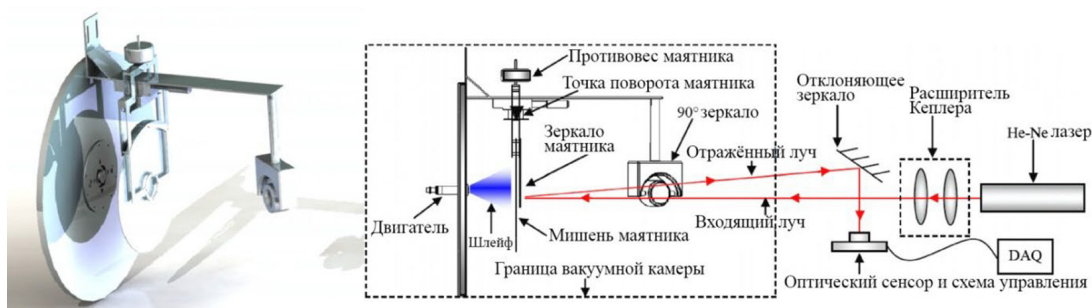


Рис. 10. 3D-модель станда и его принципиальная схема

Fig. 10. 3D-model of the stand and its schematic schema

Сигнал, возвращенный с мишени, приходит на двумерный четырехсторонний фоточувствительный детектор Hamamatsu размером 4.7×4.7 мм (разрешение 600 нм). Когда пятно лазерного излучения попадает на детектор, в месте падения генерируется электрический заряд, пропорциональный интенсивности света. Базовый диапазон максимальной тяги был определен как 0–1.8 мН. Размер возвращаемого лазерного пятна составлял ≈ 0.5 мм; поэтому маятник был сконструирован таким образом, что при требуемом диапазоне тяги максимальный проход пятна на PSD был ограничен 2 мм, что составляет ≈ 40 % от ширины полосы. Это гарантировало, что всё пятно падало на фотоприемник на максимальном расстоянии. При длине оптического пути 0.9 м и разрешении PSD 600 нм достигается разрешение измерения тяги ≈ 3 мкН, хотя это верхний предел из-за других неопределенных источников погрешности. Маятник состоял из круглой мишени из молибдена, подвешенной на осевой линии вектора тяги с помощью двух стальных шарниров, опирающихся на плоскую стальную полку с незначительным трением. Стенд сконструирован таким образом, чтобы центр тяжести располагался ниже точки поворота, которой можно было управлять с помощью регулируемого противовеса, установленного в верхней части узла. Маятник сконструирован в виде многослойной конструкции, чтобы обеспечить высокую степень жесткости и уменьшить вероятность динамических режимов колебаний, при этом он был сконструирован симметрично относительно точки поворота, чтобы свести к минимуму влияние любых геометрических изменений из-за тепловых воздействий в центре тяжести. Молибден был выбран в качестве предпочтительного материала мишени из-за его малого коэффициента теплового расширения и низкой эрозии.

В работе [11] описан эксперимент, в котором измеряется сила, оказываемая радиочастотной плазмой низкого давления на одну сторону испытываемой поверхности. Испытуемая поверхность представляет собой часть кубического объекта, погруженного в плазму, и установлена на маятнике, небольшие отклонения которого регистрируются цифровой камерой. Силовой баланс калибруется с помощью электростатического метода. Измеренные силы на площади поверхности (4.8 см^2) находятся в диапазоне микроныютонов и увеличиваются с увеличением плотности плазмы, в то время как повышенная вероятность столкновения уменьшает силу. Измеренные силы обсуждаются на основе простой модели, учитывающей потоки импульса через край оболочки. Сделан вывод, что ионно-нейтральные столкновения в предварительном нагреве усиливают силу, вызванную давлением электронов и потоком ионов.

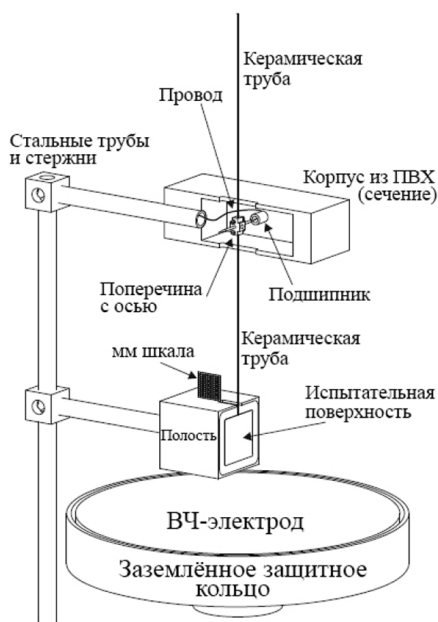


Рис. 11. Схема экспериментальной установки

Fig. 11. The scheme of the experimental installation

Экспериментальная установка представляет собой типичную конфигурацию асимметричного ВЧ-разряда с емкостной связью с горизонтальным электродом с питанием и вакуумной камерой в качестве заземленного противоэлектрода. Радиочастотный электрод представляет собой диск из нержавеющей стали диаметром 14 см, окруженный заземленным защитным кольцом (рис. 11). Цилиндрический вакуумный сосуд имеет диаметр 30 см и высоту 26 см. Разряд осуществляется с использованием аргона при трех различных давлениях (5 Па, 10 Па, 20 Па) и радиочастотной мощности в диапазоне 20–300 Вт на частоте 13.56 МГц. На рис. 9 показан радиочастотный электрод с маятниковым силовым датчиком и алюминиевой полостью за поверхностью датчика. Полость предназначена для исключения попадания плазмы из объема за поверхностью зонда. Полость и корпус из поливинилхлорида (ПВХ) для оси маятника поддерживаются стальными трубами и стержнями, установленными в нижней части вакуумной камеры. Стержни и полость могут быть заземлены, в противном случае они находятся под плавающим потенциалом плазмы. Положение центра испытуемой поверхности находилось на 40 мм выше центра электрода. Между краями поверхности площадью 4.8 см² и внутренними краями полости имеется зазор примерно в 4 мм. Маятник состоит из двух керамических трубок длиной около 100 мм, испытательная поверхность прикреплена к концу нижнего рычага; верхний рычаг служит противовесом. Два рычага соединены на оси вращения небольшой поперечиной. Ось вращения обеспечивается стальным стержнем, сужающимся с обоих концов и проходящим через поперечину перпендикулярно керамическим трубкам. Ось шарнирно установлена на двух конических металлических подшипниках. Испытательная поверхность изготовлена из стального листа толщиной 0.02 мм и имеет квадратную форму (длина кромки 22 мм) с закругленными вершинами. К тыльной стороне поверхности припаян тонкий провод. Провод проходит через керамическую трубку и оттуда к оси, которая находится в электрическом контакте с подшипниками. Подшипники, со своей стороны, подсоединены с помощью изолированного провода во внутренней части опорных стальных труб к вакуумному каналу, который обеспечивает смещение испытуемой поверхности. Диэлектрический корпус защищает поперечину, ось и подшипники от воздействия плазмы. Прорезь в верхней части куба-полости позволяет маятнику перемещаться внутрь. Измерение отклонения маятника осуществляется с помощью КМОП-камеры, которая смотрит через окно в вакуумной камере в направлении, параллельном оси вращения маятника. Поле зрения включает в себя керамический рычаг в том месте, где он проходит через прорезь полости, и миллиметровую шкалу, установ-

ленную в верхней части полости. По изображениям размером 2816×2112 пикселей определяется отклонение наблюдаемой точки на плече рычага (отклонение испытуемой поверхности больше в 1.22 раза из-за ее большего расстояния от оси). Плазму характеризовали измерениями ленгмюровским зондом с радиочастотной компенсацией на расстоянии 1 см перед исследуемой поверхностью. Цилиндрический зонд с вольфрамовой проволокой диаметром 100 мкм длиной $(3.0 \pm 0,2)$ мм в качестве активного наконечника зонда на конце тонкой керамической трубки пассивно фильтруется на радиочастотной частоте и ее первой гармонике и смещается через конденсатор электродом сравнения, который улавливает потенциал радиочастотной плазмы вариации. В данной конструкции электрод сравнения представляет собой медную трубку длиной 10 мм, установленную на конце другой тонкой керамической трубки параллельно первой, на расстоянии около 5 мм от наконечника зонда. Стендом зафиксированы усилия в диапазоне 0.2–16 мкН.

В источнике [12] авторы предлагают метода диагностики импульса ионного пучка силовым зондом на основе вращения (sputterpropelled instrument (SPIN)).

Основная часть прибора с распылительным приводом (SPIN) похожа на ротор ветряной мельницы. Прибор использует силу отталкивания от высвобождаемых частиц в процессе распыления, чтобы привести мишень в движение. Он состоит из четырех лопастей ротора и центрального пластикового соединителя в форме десятигранника, схематично показанного на рис. 12. Каждая лопасть ротора имеет крестообразный держатель мишени, который изготовлен из медной фольги и закреплен на концах двух керамических трубок. В качестве мишеней используются тонкие квадратные листы фольги с длиной кромки 20 мм. Другие концы трубок вставляются в поворотный соединитель, изготовленный из пластика. Стопорные винты удерживают соединитель и лопасть несущего винта в соединителе и позволяют плавно регулировать угол наклона мишени. Ротор прибора, приводимого в движение распылителем, состоит примерно из 40 компонентов и имеет конечный диаметр 10 см и массу около 10 г. Соединитель имеет центрированное отверстие, в которое сверху вставлен цилиндрический латунный подшипник. Коническая полость на нижней стороне цилиндра образует аналог опорной иглы из нержавеющей стали. Вершина конуса расположена над центром масс ротора, так что устройство устойчиво опирается на наконечник иглы и может свободно вращаться. Выбор материалов для иглы и подшипника направлен на обеспечение низкого трения и хорошей электропровод-

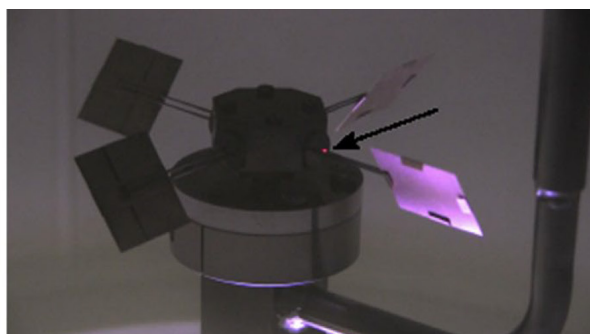
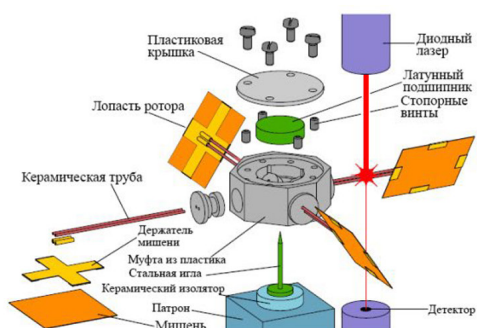


Рис. 12. Схема SPIN и его фотографическое изображение

Fig. 12. The SPIN schema and its photographic image

ности. Пластиковая крышка закрывает соединитель и фиксирует латунный подшипник. Между подшипником и крышкой зажаты тонкие металлические провода, которые проходят через керамические трубки и электрически соединяют держатели мишеней и латунный цилиндр. С помощью этого средства можно измерять ток на мишенях и смещать их. Игла электрически изолирована от гнезда керамической изоляцией. Для измерения временной зависимости угла поворота SPIN также состоит из лазерной детекторной системы. Диодный лазер (длина волны 650 нм) направлен вниз на кремниевый фотодетектор.

Во время вращения ротора детектор регистрирует моменты, когда пара керамических трубок пересекает лазерный луч. Между такими двумя последовательными моментами времени устройство поворачивается на $\pi/2$ рад. Толчок для вращения прибора, приводимого в движение распылителем, возникает в результате столкновения энергичных частиц. Энергичный ион аргона, или нейтрал, ударяется о медную мишень в вертикальном направлении с импульсом. В результате инициированного каскада столкновений некоторые атомы мишени покидают поверхность мишени в виде распыленных атомов. Иногда падающий ион аргона, или нейтрал, не остается в мишени и покидает поверхность мишени в виде отраженной частицы. Типичные значения измеренной движущей силы находятся в диапазоне от 10 мкН до нескольких 100 мкН.

В статье [13] представлено устройство для пространственно разрешенных и одновременных измерений сил и токов в пучках частиц, особенно в пучках, состоящих из ионов и нейтральных атомов. Силы, создаваемые падающими частицами пучка, воздействуют на плоскую круглую проводящую пластину-мишень диаметром 20 мм, установленную на маятнике с компенсацией электромагнитной силы. Измерение силы в диапазоне микроньютон доводится за счет электромагнитной компенсации с помощью статических катушек Гельмгольца и постоянных магнитов, прикрепленных к маятнику. Примерные измерения выполняются в пучке с энергией 1.2 кэВ источника ионов с широким пучком. Одновременные измерения сил и токов на одной и той же мишени сравниваются друг с другом и с измерениями в цилиндре Фарадея.

На рис. 13 показаны основные части прибора. Зонд представляет собой маятник с нижним поворотным рычагом, изготовленным из тонкой керамической трубки, и более коротким верхним рычагом, изготовленным из тонкого стержня с резьбой для установки противовеса. Два рычага соединены на оси вращения небольшой поперечиной. Ось вращения – тонкий стержень, заостренный с обоих концов и вставленный в поперечину перпендикулярно керамической трубке. Ось опирается на две конические металлические опорные втулки. Пластина-мишень предназначена для измерения как силы, так и электрического тока. Мишень плоская круглая диаметром 20 мм, изготовлена из проводящего материала. В данном зонде она изготовлена из листа меди толщиной 60 мкм. Мишень электрически подсоединена к тонкому проводу, который точно приварен к задней стороне мишени и проходит через керамическую трубку, а оттуда через ось и подшипники к внешней цепи для смещения и измерения тока мишени. Для этой цели токопроводящие подшипники изолированы от корпуса и от плазменной среды. Мишень установлена на конце нижнего поворотного рычага на расстоянии 121 мм от оси.

Верхняя часть поворотного рычага длиной 15 мм несет диск с центральной резьбой, который действует как противовес, он фиксируется контргайкой. Положение является переменным и выбирается таким образом, чтобы центр масс маятника смещался ближе к оси вращения, но был ниже оси, чтобы достичь больших перемещений при заданном воздействии силы на ми-

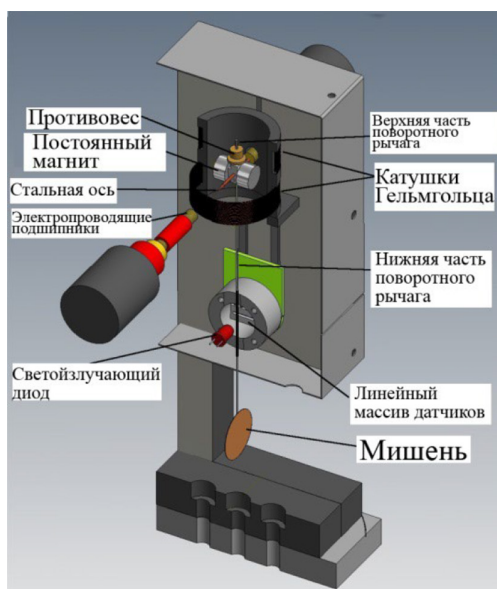


Рис. 13. Схема силового зонда с его основными частями (сечение)

Fig. 13. The schema of the power probe with its main parts (section)

шень. Для компенсации электромагнитной силы на поперечине установлены два небольших постоянных магнита в форме диска, дипольные моменты которых ориентированы в одном направлении перпендикулярно как поворотному рычагу, так и оси вращения. Весь маятник действует как ротор и вращается в статоре, состоящем из двух уложенных друг на друга пар катушек Гельмгольца, где одна пара катушек Гельмгольца была намотана поверх другой. Одна пара катушек используется для грубой компенсации усилия, другая пара катушек используется для тонкой компенсации. Количество витков последних катушек составляет одну треть от количества витков первой катушки. Центры пар катушек Гельмгольца находятся на поперечине маятника, и генерируемое магнитное поле вертикально ориентировано в центре, так что диполь постоянных магнитов перпендикулярен магнитному полю статора, когда маятник не отклонен. Ток, проходящий через катушки Гельмгольца, создает крутящий момент на маятнике, который эквивалентен силе, действующей на мишень в направлении нормали к мишени. Это усилие используется для компенсации внешней силы, которая должна быть измерена, т.е. для выравнивания маятника в желаемом вертикальном положении. Отклонение маятника определяется оптическим датчиком, который состоит из светодиода и микрочипа с линейной сенсорной матрицей из 128 фотодиодов. Он расположен горизонтально на 70 мм ниже оси вращения, так что керамический рычаг перемещается между двумя компонентами датчика. Керамическая трубка была зачернена в месте расположения датчика для лучшего поглощения света. При отклонении маятника тень керамической трубки перемещается по линейной матрице фотодиодов; ее желаемое вертикальное положение центрируется на матрице фотодиодов. Система управления с обратной связью, которая обеспечивает компенсацию усилия, реализована с помощью микроконтроллера, принимающего входные данные от диодной матрицы и приводящего в действие две пары катушек Гельмгольца. Во время измерения силы равновесное отклонение маятника

не изменяется из-за замкнутого контура. Необходимый ток, проходящий через катушки, служит мерой силы, действующей на мишень. Коэффициент преобразования тока в усилие получается путем калибровки. Каждое измерение силы состоит из предыдущего контрольного измерения при выключенной балке и последующего основного измерения в балке. Измерение разности исключает влияние внешних магнитных полей, в частности магнитных полей Земли и источника ионов. Поскольку устройство работает в среде плазмы и ионного пучка, большинство описанных деталей, за исключением нижней части поворотного рычага с мишенью, заключены в алюминиевый корпус. Это гарантирует, что никакие блуждающие токи не повлияют на систему управления с обратной связью или измерение тока.

В работах [14, 15] представлен стенд для исследования характеристик электрического двигателя ТИПТУС. Данный двигатель двухступенчатый. Первая ступень – это дуговая струя, вторая ступень – индуктивный нагрев дуговой струи. Тяга двигателя измеряется с помощью мишени. При изменении соотношения мощности и массового расхода между двумя ступенями измеряется тяга. Показано, что тяга, полученная с помощью двух методов измерения, хорошо согласуется друг с другом и находится в диапазоне от 1.7 до 2.5 Н для соответствующих условий эксплуатации двигателя малой тяги. Тяга уменьшается тем больше, чем больше мощности (в сумме 50 кВт) подается на вторую, индуктивную ступень. Однако когда нагрев активен на второй ступени, при увеличении массового расхода (в общей сложности 300 мг/с) тяга увеличивается. Для измерения тяги была разработана отражательная пластина (ударная мишень). Генератор плазмы прикреплен к крышке вакуумной камеры, мишень подвешивается на кромках ножа поперек плазменного столба (рис. 14). Его центр выровнен по оси струи, так что гарантируется симметричный поток. Аэродинамические эффекты, такие как подъемная сила или лобовое сопротивление ударной пластины, сводятся к минимуму, когда угол отклонения равен нулю. Измерительным элементом является датчик силы. Датчик представляет собой типичную конфигурацию тензометрического датчика с мостом Уитстона, что исключает температурную зависимость.

Пластина-мишень представляет собой медную пластину толщиной 5 мм и диаметром 1 метр. Это намного больше, чем доля плазменной струи (<200 мм). Мишень весит около 50 кг.

В работе [16] был исследован твердотельный МРД-двигатель с приложенным магнитным полем. МРД работал с приложенными полями до 0.4 Тл. Были измерены ток, разрядность импульса и удаляемая масса. Двигатель показал пороговое значение приложенного магнитного

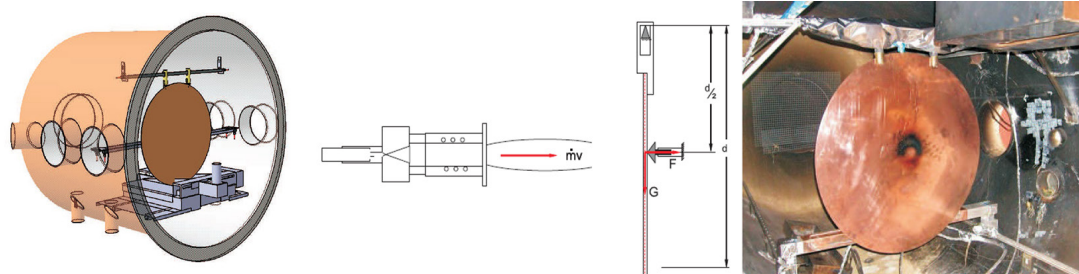


Рис. 14. 3D-модель стенда, схема измерения и фотографическое изображение мишени

Fig. 14. 3D-model of the stand, measurement scheme and photographic image of the target

поля, при превышении которого он не работает, это пороговое значение увеличивается с увеличением энергии выстрела. Вдали от этого порогового значения ток показывает небольшое изменение в зависимости от приложенного поля. Для исследования тяги двигателя использовался метод мишени. Используемая измерительная система подходит для небольших вакуумных камер. Мишень состоит из алюминиевого конуса с углом наклона 30° от оси двигателя и ряда пластиковых дисков; она установлена на подвижном шарнирном параллелограмме, свободном от ограничений (например, электрических соединений с двигателем) и свободном от какого-либо влияния приложенного магнитного поля. Мишень и сочлененный параллелограмм изображены на рис. 15.

Плазменная струя, выброшенная из двигателя, попадает в мишень и сталкивается с алюминиевым конусом. Падающие частицы после нескольких столкновений покидают цель с остаточным импульсом, который является преимущественно радиальным. Эта система динамически эквивалентна простому маятнику. Импульс, передаваемый ему плазменной струей, может быть вычислен по движению этой системы, измеренному с помощью оптико-электронного датчика перемещения.

Несовершенное знание процессов взаимодействия между мишенью и частицами плазмы, в частности степень, в которой импульс передается мишени, и процессы углового отражения определяют неопределенность в измерении. В зависимости от степени упругости столкновений между частицами и мишенью импульс, передаваемый мишени, может быть в два раза больше импульса налетающих частиц плазмы. Чтобы учесть этот эффект, был введен коэффициент аккомодации. Этот коэффициент был определен путем сравнения измерений тяги, выполненных с помощью этой мишени, с измерениями, выполненными с использованием «обычного» баланса тяги. Было обнаружено, что коэффициент аккомодации очень близок к единице с небольшим изменением (порядка нескольких процентов) в зависимости от уровня тяги, что свидетельствует о том, что плазменная струя покидает цель практически без остаточного осевого импульса. С помощью данного стенда были получены значения тяги единичного импульса от $10 \text{ мН}\cdot\text{с}$ до $32 \text{ мН}\cdot\text{с}$.

В работах [17, 18] представлена оценка производительности и визуализация двухфазной схемы течения микродвигателя с испаряемой жидкостью (VLM), относящегося к категории

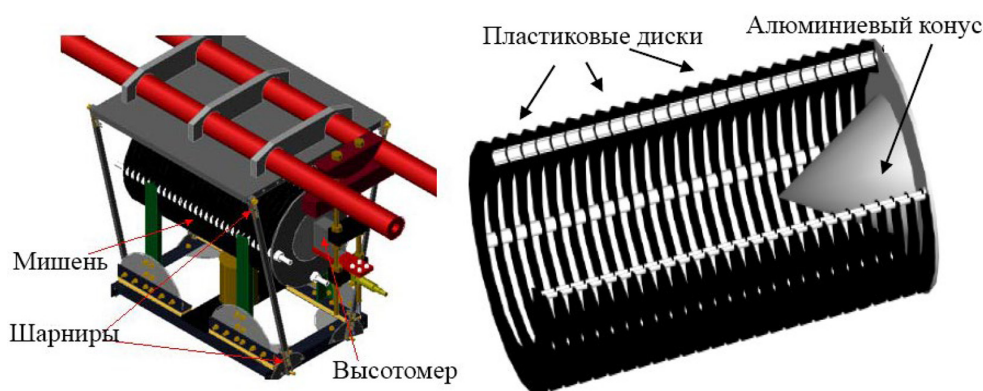


Рис. 15. 3D-модель мишени, установленной на шарнирном параллелограмме и самой мишени

Fig. 15. 3D-model of a target mounted on a hinged parallelogram and the target itself

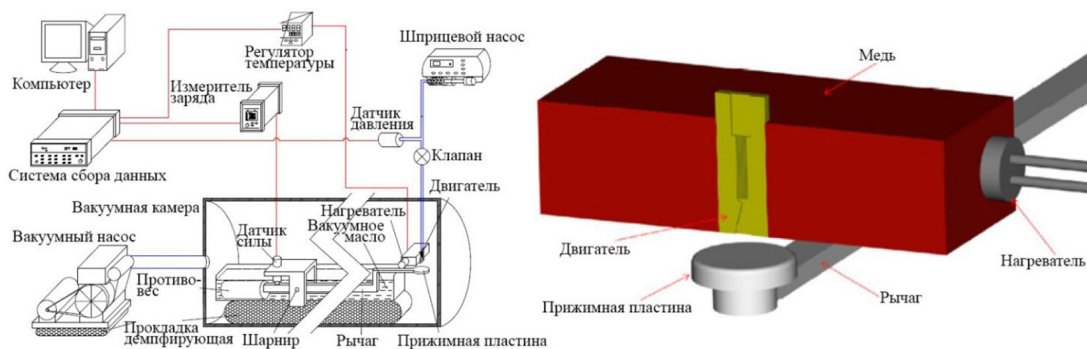


Рис. 16. Схема экспериментальной установки и увеличенный фрагмент стенда с мишенью

Fig. 16. The schema of the experimental setup and an enlarged fragment of the target stand

MEMS-микродвигателей. Сила микродвигателя в несколько миллиньютонов (2–7 мН при расходе газа 100–500 мг/мин) была измерена с помощью испытательной установки с рычагом.

Микродвигатель, прикрепленный к блоку обогрева (рис. 16), был установлен на направляющей (на рисунке не показан). Направляющая может перемещаться вертикально или горизонтально для регулировки относительного положения между двигателем и прижимной пластиной (мишенью) на конце рычага. Сопло установлено на высоте 2 мм над прижимной пластиной. Микродвигатели выбрасывали газ на ударную пластину, сила удара увеличивалась за счёт разности длин рычагов. Затем увеличенная сила воспринимается пьезоэлектрическим датчиком, установленным на другой стороне рычага. Датчик силы находился на расстоянии 5 мм от точки опоры, что было намного меньше расстояния от точки опоры до ударной пластины. Рычаг был погружен в вакуумное масло, чтобы заглушить паразитные вибрации. Чтобы уменьшить трение об опору, рычаг был изготовлен из легкого материала (алюминиевый сплав). Опора состояла из двух подшипников диаметром 2 мм и вала. Они также были погружены в вакуумное масло. Эффект смазки еще больше уменьшил трение точки опоры.

Испытательный стенд был помещен внутрь цилиндра с наружным диаметром 21 см и длиной 140 см. Баллон вакуумировался вакуумным насосом со скоростью откачки 15 л/с. Давление в камере могло поддерживаться ниже 20 Па во всех диапазонах условий испытания.

Обсуждение результатов

Представленные конструкции стендов можно систематизировать по времени публикации, типу шарнира (Н – нить, П – подшипник, ЛН – лезвие ножа, О – ось), уровню и типу (стационарный или импульсный режим) измеряемой тяги, типу применяемого датчика регистрации смещения чувствительного элемента, способу демпфирования паразитных колебаний, типу калибровки стенда и оцениваемой погрешности измерения тяги. Данные сведены в табл. 1. Стенды на основе шарнирных мишеней впервые появляются в 1982 г. Родоначальниками таких стендов являются баллистические маятники. С 1982 г. по 2015 г. было создано 14 уникальных конструкций. В стендах с наибольшей чувствительностью (мкН) применяются баратрон, высокопроизводительные камеры, катушки Гельмгольца, в стендах с чувствительностью более 1 мН применяются тензодатчики, LVDT, ёмкостные, оптические датчики. Демпфирование практически не применяется.

Таблица 1. Систематизация рассмотренных конструкций стендов

Table 1. Systematization of the considered stand designs

Год	Публ.	Тип шарнира	Изм. уровень тяг	Тип датчика	Демпфирование	Тип калибровки	Δ , %
АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ СТЕНДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЯГИ НА ОСНОВЕ УПРУГИХ МИШЕНЕЙ							
2013	[2]	Н	До 15 мкН	Лазерный датчик перемещения	Вихретоковое	Электростатика	10–15
2018	[1]	-	до 300 мН	Лазерный датчик перемещения	-	Калибровочные грузы	14
АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ СТЕНДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЯГИ НА ОСНОВЕ ШАРНИРНЫХ МИШЕНЕЙ							
1982	[4]	-	Имп. 0.8–1 мН·с	LVDT	-	-	До 15
	[8]	Н, ЛН	Имп. 20–500 мкН·с	Ток на катушке	-	Двойной маятник, калибровочные грузы	До 10
1988	[9]	Н	4–5 мН	Теневая графика	-	Калибровочный маятник	10
1990	[3]	Н	10 мкН-1 кН	Баратрон	Амортизирующая подушка	По осевому перемещению	1
1995	[6]	ЛН	0.1–100 мН	Изменение ёмкости	-	По отклонению маятника	-
2007	[5]	ЛН	0.2–2 мН	Лазерный датчик перемещения	-	Калибровочный маятник	2
2007 2009	[14, 15]	ЛН	1.7–2.5 Н	Тензодатчик	-	Калибровочные грузы, трубка Пито	10–25
2007	[16]	О	Имп. 10 мН·с – 32 мН·с.	Оптический датчик	-	Баланс тяги	До 20
2009	[7]	ЛН	0.02–0.5 мН	Лазерный датчик перемещения	-	Калибровочные грузы	До 20
2009 2010	[17, 18]	П	2–7 мН	Пьезоэлектрический датчик	Вакуумное масло	Калибровочные грузы	-
2010	[10]	ЛН	0.2–2.5 мН	PSD и ЛОР	Вихретоковое	-	До 5
2013	[12]	П	10 мкН – 100 мкН	Датчик числа оборотов	-	Численное моделирование	До 6
2015	[11]	П	0.2–16 мкН	КМОП-камера	-	Электростатика	20–30
	[13]	П	0–50 мкН	По току в катушке	-	Калибровочные грузы	До 20

Калибровка стендов преимущественно калибровочными грузами, реже – электростатические методы и численное моделирование. Оригинальна конструкция по источнику [12]. Здесь величина тяги определяется по скорости вращения колеса с мишенями. Соответственно, требуется не датчик перемещения, а устройство учёта количества оборотов.

Заключение

В статье представлены 2 дополнительные конструкции стендов на основе упругих мишеней и 14 конструкций аэродинамических стендов на основе шарнирных мишеней. Аэродинамические методы измерения тяги основаны на силовом воздействии ускоренного потока на чувствительный элемент измерительного устройства. Исследуемый двигатель устанавливается неподвижно, что упрощает конструкцию стенда и уменьшает его габаритные размеры. Метод мишеней широко применяется для лабораторных исследований экспериментальных микродвигателей, параметров плазмы ускорителей элементарных частиц. При этом по точности измерения уровня тяги аэродинамический метод не уступает стендам других конструкций. Стенды на основе шарнирных мишеней имеют простую конструкцию подвижного соединения мишени со станиной, которое практически лишено трения – соединение типа «лезвие ножа». Соответственно, основные достоинства стендов на основе шарнирных мишеней: простота сопровождающего математического аппарата; техническая простота при соблюдении условия достаточной точности измерений; простота калибровки.

Список литературы / References

- [1] Wang B., Yang W., Tang H., Li Z., Kitaeva A., Chen Z., Zhang K. Target thrust measurement for applied-field magnetoplasmadynamic thruster, *Measurement Science and Technology*, 2018, 29(7), 075302.
- [2] Horisawa H., Sumida S., Yonamine H., Funaki I. Thrust generation through low-power laser-metal interaction for space propulsion applications, *Vacuum*, 2013, 88, 75–78.
- [3] Cohen S. A., Zonca F., Timberlake J., Bennett T., Cuthbertson J., Langer W. & Motley R. An instrument for measuring the momentum flux from atomic and charged particle jets, *Review of Scientific Instruments*, 1990, 61(11), 3586–3591.
- [4] Yanagi R. & Kimura I. New Type of Target for the Measurement of Impulse Bits of Pulsed Plasma Thrusters, *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1982, 19(3), 246–249.
- [5] Takao Y., Eriguchi K. & Ono K. A miniature electrothermal thruster using microwave-excited microplasmas: Thrust measurement and its comparison with numerical analysis, *Journal of Applied Physics*, 2007, 101(12), 123307.
- [6] Yang T.F., Liu P., Chang-Díaz F. R., Lander H., Childs R. A., Becker H.D., Fairfax S. A. A double pendulum plasma thrust balance and thrust measurement at a tandem mirror exhaust, *Review of scientific instruments*, 1995, 66 (9), 4637–4643.
- [7] West M.D., Charles C., & Boswell R.W. A high sensitivity momentum flux measuring instrument for plasma thruster exhausts and diffusive plasmas, *Review of Scientific Instruments*, 2009, 80(5), 053509.
- [8] Grun J., Ripin B.H. Ballistic pendula for measuring the momentum of a laser-produced plasma, *Review of Scientific Instruments*, 1982, 53(12), 1878–1881.

- [9] Goncharov S. F., Pashinin P. P., Perov V. Y., Serov R. V., Yanovsky V. P. Hollow ballistic pendulum for plasma momentum measurements, *Review of Scientific Instruments*, 1988, 59(5), 709–711.
- [10] Grubišić A. N., Gabriel S. B. Development of an indirect counterbalanced pendulum optical-lever thrust balance for micro- to millinewton thrust measurement, *Measurement Science and Technology*, 2010, 21(10), 105101.
- [11] Trottenberg T., Richter T., Kersten H. Measurement of the force exerted on the surface of an object immersed in a plasma, *The European Physical Journal D*, 2015, 69, 1–7.
- [12] Rutscher J., Trottenberg T., Kersten H. An instrument for direct measurements of sputtering related momentum transfer to targets, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2013, 301, 47–52.
- [13] Spethmann A., Trottenberg T., Kersten H. Instrument for spatially resolved simultaneous measurements of forces and currents in particle beams, *Review of Scientific Instruments*, 2015, 86(1), 015107.
- [14] Bohrk H., Auweter-Kurtz M. TIHTUS Thrust Measurement with a Baffle Plate, 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2007, 5297.
- [15] Böhrk H., Auweter-Kurtz M. Thrust Measurement of the Hybrid Electric Thruster TIHTUS by a Baffle Plate, *Journal of Propulsion and Power*, 2009, 25(3), 729–736.
- [16] Coletti M., Balsetra A., Sensini M. Paccani G. Solid state MPD thruster with applied magnetic field, In Proceedings of the 30th International Electric Propulsion Conference (IEPC 2007), Electric Rocket Propulsion Society, 2007, 1–10.
- [17] Cen J. W., Xu J. L. Experimental investigation on the relation between micro-thrust and impinging force, *J. Propulsion Technology*, 2003, 30(1), 114–118
- [18] Cen J. W., Xu J. L. Performance evaluation and flow visualization of a MEMS based vaporizing liquid micro-thruster, *Acta Astronautica*, 2010, 67(3–4), 468–482.