

КАЛОРИМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СВЧ ИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

И. С. Вавилов, К. И. Жариков, П. С. Ячменев, В. В. Федянин,
П. В. Степень, А. И. Лукьянчик, И. А. Кузьменко

Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

Авторы продолжают работу в области калориметрических исследований параметров ускоренной ионизированной струи газа прототипов СВЧ ионных микродвигателей с энергопотреблением до 10 Вт. В данной работе представлен усовершенствованный калориметрический метод. Введение в конструкцию теплоприемника в виде тонкого экрана позволяет выделить тепловую составляющую, образованную прохождением электрического тока через плазму в ускоряющем промежутке. Были проведены калориметрические исследования прототипа с двухэлектродной ускоряющей системой при одинаковых ускоряющих напряжениях и мощности СВЧ генератора и разных массовых расходах газа. Показано, что при расходе азота $5,668 \cdot 10^{-9}$ кг/с скорость смешанной струи (нейтральный газ с ионизированной компонентой) газа составила 63,75 м/с, реактивная тяга составила 0,36 мкН. При расходе азота $1,611 \cdot 10^{-8}$ кг/с скорость смешанной струи газа составила 47,9 м/с, реактивная тяга составила 0,77 мкН.

Рабочим телом прототипа являлся азот при давлении в вакуумной камере 22 Па.

Ключевые слова: калориметр, СВЧ, плазма, малый космический аппарат, азот, тяга, скорость, тепловизор.

Введение

В настоящее время авторы ведут работы, подержанные Российским научным фондом, в части проектирования, изготовления и исследования СВЧ ионных двигателей с элементами ускорительной техники. Первые работы [1–4] носили оценочный теоретический характер, где представлялась концепция проектируемого двигателя и предсказывались его характеристики. Практическая реализация проекта привела к внедрению зондового метода диагностики невозмущённой СВЧ плазмы [5] и развитию методов определения параметров ускоренной ионной струи (рис. 1). На материально-технической базе научно-исследовательской лаборатории «Двигательные установки микротяги малых космических аппаратов» ОмГТУ были разработаны и внедрены в исследовательский процесс: расходомер для определения малых расходов рабочего газа [6, 7]; теоретическая основа и техническое обеспечение для определения скорости ионной струи ионно-меточным методом (ИМ-метод) [8]; теоретическая основа и техническое обеспечение для определения силы давления реактивной струи аэродинамическим методом двойного угла (АМав-метод) [9] как вариация крутильных весов; теоретическая основа и техническое обеспечение для определения силы давления реактивной струи резонансным аэродинамическим методом (РАМ-метод) [10]; калориметрический метод определения мощности смешанной (нейтральный + ионизированный газ) струи [11].

В ходе ранних исследований прототипов ионных двигателей (электростатический ионный двигатель и двухзазорный СВЧ ионный двигатель) был выявлен существенный недостаток калориметрического

метода: при увеличении расхода газа калориметр фиксирует тепловой эффект разряда, повышение тока между электродами ионно-оптической системы (ИОС) ведёт к увеличению тепловыделения по закону Джоуля – Ленца. Суммарный тепловой эффект струи увеличивается, т.к. в показаниях калориметра включена не только энергия заторможенной струи, но и тепловая составляющая нагретого газа.

В данной работе авторы представляют калориметрические исследования простейшего ионного двигателя с магнитным кольцевым высокочастотным зазором и двухэлектродной ИОС с постоянной ускоряющей разностью потенциалов на усовершенствованном калориметре. Таким образом, основная цель данной работы — представить усовершенствованную конструкцию калориметра, позволяющую выделить тепловую компоненту струи, обусловленную Джоулевым тепловыделением.

Постановка задачи

Авторами был разработан и изготовлен прототип СВЧ ионного двигателя с двухэлектродной ИОС (рис. 2). Ускоряющая система представлена двумя перфорированными электродами с одинаковой апертурой отверстий (0,5 мм), выполненных из нержавеющей стали (поз. 1). Electroды ИОС установлены на корпус из АБС-пластика (поз. 3) на расстоянии 2 мм друг от друга. Рабочее тело (азот) подводится в полость двигателя по газоводу (поз. 2). В полости соосно расположены кольцевой и дисковый магниты, таким образом, создаётся кольцевой зазор. В корпусе (поз. 4) расположены контакты от СВЧ генератора и защитные плоские конденсаторы, предотвращающие пробой высоковольтного напряжения ИОС на СВЧ-транзистор. Полость

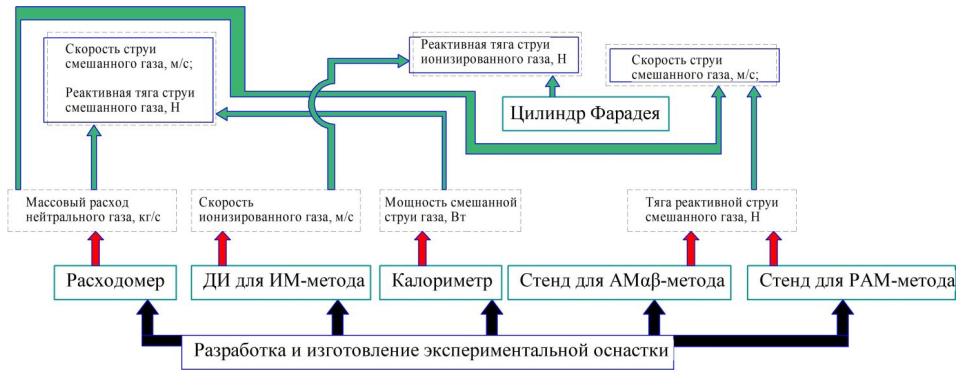


Рис. 1. Методы исследования ионных двигателей
 Fig. 1. Methods of research of ion thrusters

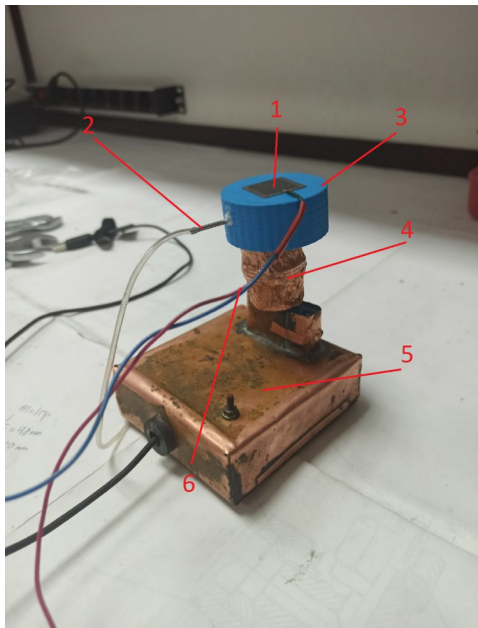


Рис. 2. Экспериментальный прототип СВЧ ионного двигателя с кольцевыми магнитами
 Fig. 2. Experimental prototype of a microwave ion thruster with ring magnets

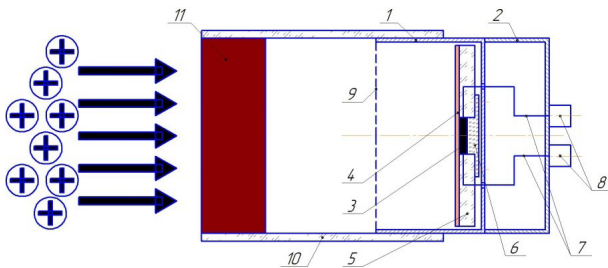


Рис. 3. Схема усовершенствованного калориметра
 Fig. 3. Scheme of the improved calorimeter

(поз. 4) заполнена диэлектриком — парафином. СВЧ генератор установлен в медном корпусе (поз. 5) и снабжён системой охлаждения — элементом Пельтье. Горячая сторона элемента Пельтье контактирует с медным корпусом через медную проставку. По проводникам (поз. 6) к электродам ИОС подводится высокое напряжение. Питание СВЧ генератора осуществляется от внешнего источника, расположенного вне вакуумной камеры.

Работа прототипа осуществляется следующим образом: обеспечивается подвод газа низкого расхода (до 0,5 мг/с), обеспечивается подвод электрической энергии к плате автогенератора, визуально определяется наличие высокочастотного емкостного разряда (белое свечение в кольцевом зазоре), обеспечивается подвод высокого напряжения на сетки ионно-оптической системы (максимальное напряжение ограничено моментом возникновения вторичного тлеющего разряда в межэлектродном промежутке, который визуально определяется как единичные мощные пробои в отверстиях сеток ИОС).

В эксперименте питание СВЧ генератора всё время было фиксированным и составляло 7 В и 0,51 А (на замере № 1) и 0,56 А (на замере № 2). Неизменным было напряжение на сетках ИОС: номинальное напряжение 608,3 В, установившееся — 595 В (в первом замере) и 593,4 В (во втором замере).

Схема калориметра представлена на рис. 3. В металлической ёмкости (поз. 1) установлен диск из органического стекла (поз. 5) с отверстием, диаметром 20 мм. В отверстие установлен датчик теплового потока ДТП 0924-Э-Д-20-0. Посредством термопасты датчик контактирует с медным диском (поз. 4), который служит для сбора тепловой энергии потока. Датчик с помощью прижима (поз. 6) фиксируется в диске (поз. 5). Приборный отсек (поз. 2) выполнен из металла, гальванически связан с ёмкостью поз. 1 и служит для ограждения сигнальных проводов датчика (поз. 7) от электромагнитного излучения и установки коаксиальных разъёмов (поз. 8). Сетка (поз. 9) также служит для электромагнитной защиты датчика и сигнальных проводов. На корпусе (поз. 1) установлены две рейки из органического стекла (поз. 10), на которых растянута экран (поз. 11) из тонкой бумаги (масса экрана -0,043 гр.). Экран расположен так, чтобы разрезать ионный поток при входе того в полость калориметра. Масса экрана известна, удельная теплоёмкость экрана является табличной величиной (взята для целлюлозы). В процессе эксперимента производится термографирование экрана тепловизором Testo 872i.

Характеристики датчика плотности теплового потока приведены на сайте производителя [12] и в формуляре:

1. Рабочий диапазон температур +10 ... +150 °С;
2. Диапазон измерения плотности теплового потока 10 ... 1500 Вт/м²;
3. Термическое сопротивление датчика 0,004 ... 0,03(м² · °С)/Вт;

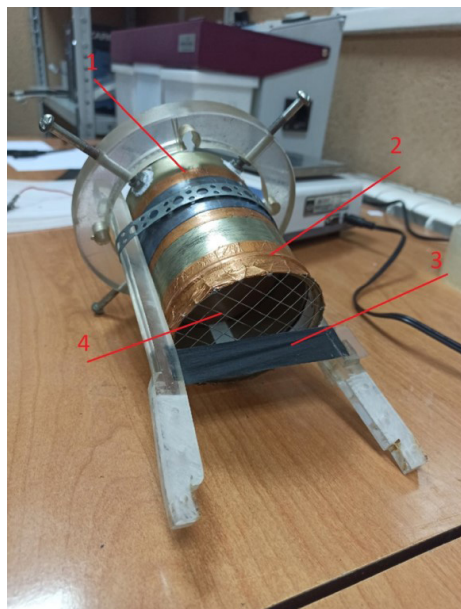


Рис. 4. Экспериментальный калориметр
Fig. 4. Experimental calorimeter

4. Значение основной относительной погрешности 6 %;

5. Коэффициент преобразования 37,08 Вт/м²·мВ;

6. Габаритные размеры не более 20 мм.

На рис. 4 представлено фотографическое изображение усовершенствованного калориметра. На рисунке позициями обозначены: 1 — приборный отсек; 2 — ёмкость калориметра (теплоприёмник); 3 — экран из целлюлозы; 4 — сетка электромагнитной защиты датчика.

Калориметрические исследования прототипа производились ступенчато с последовательным подключением энергетических воздействий. На режиме «НОЛЬ» производилось термографирование экрана калориметра при отсутствии подачи газа и электромагнитной энергии. На режиме «ГАЗ» производился замер температуры экрана калориметра при подаче нейтрального газа в камеру двигателя. На режиме «ГАЗ + СВЧ + РП» производился замер температуры экрана калориметра при подаче нейтрального газа, существовании высокочастотного емкостного разряда в присутствии ускоряющего напряжения на сетках ИОС. На последнем режиме «ВЫКЛ. ВСЕГО» производилось одновременное отключение вех воздействий и остывание экрана калориметра.

Время проведения исследования ограничено ёмкостью аккумулятора тепловизора. За всё время были получены данные с двух замеров. Каждый замер характеризуется ростом давления газа в ёмкости расходомера, установлением установившегося режима и падением давления в результате перекрытия питающей магистрали.

В результате термографирования на первом замере было получено 34 термограммы экрана калориметра: 4 термограммы режима «НОЛЬ», 11 термограмм режима «ГАЗ», 12 термограмм режима «ГАЗ + СВЧ + РП» и 7 термограмм режима «ВЫКЛ. ВСЕГО». Полученные термограммы позволяют определить точное время произведения замера и среднюю температуру экрана калориметра.

В результате термографирования на втором замере было получено 34 термограммы экрана кало-

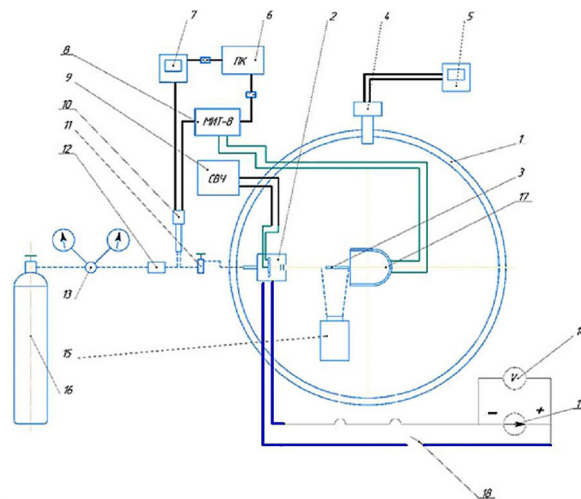


Рис. 5. Схема калориметрических исследований
Fig. 5. Scheme of calorimetric studies

риметра: 3 термограммы режима «НОЛЬ», 9 термограмм режима «ГАЗ», 13 термограмм режима «ГАЗ + СВЧ + РП» и 9 термограмм режима «ВЫКЛ. ВСЕГО».

Принципиальная схема проведения экспериментальных исследований приведена на рис. 5. Эксперимент проводился в условиях вакуумной камеры (поз. 1) при давлении 22 Па. Прототип СВЧ ионного двигателя (поз. 2) установлен напротив входа в калориметр (поз. 17), экран калориметра (поз. 3) «разрезает» ионный поток. Термографирование экрана калориметра производится тепловизором (поз. 15). Контроль давления в вакуумной камере производится датчиком ПМТ-6-3М-1 (поз. 4) и вакуумметром «МЕРАДАТ-ВИТ» 14Т (поз. 5). Азот из баллона (поз. 16) через газовый редуктор (поз. 13) и электромагнитный клапан (поз. 12) поступает в полость расходомера (поз. 10). Значения давления в ёмкости расходомера через вакуумметр «МЕРАДАТ-ВИТ» 16Т (поз. 7) с частотой 1 с⁻¹ заносятся в самописец и отображаются на экране ПК (поз. 6). Температура газа в ёмкости расходомера определяется термпарой ТХА и с частотой один раз в 5 с⁻¹ через преобразователь МИТ-8 (поз. 8) заносятся в память ПК. Показания датчика плотности теплового потока через прибор МИТ-8 заносятся в память ПК. Частота опроса датчика — один раз в пять секунд. Ротаметр (поз. 11) является регулирующим элементом, через него газ поступает в полость прототипа (поз. 2). На магнитные электроды прототипа подаётся СВЧ энергия от генератора, который питается от внешнего источника энергии (поз. 9). Напряжение на сетках ИОС подаётся от внешнего источника напряжения (поз. 19), контроль напряжения производится вольтметром (поз. 14). ИОС запускается замыканием ключа (поз. 18).

Теория

Для определения массового расхода рабочего газа используются данные с вакуумметра «МЕРАДАТ-ВИТ» 16Т и многоканального измерителя температуры МИТ-8. Строится временная диаграмма изменения давления и температуры газа в измерительной ёмкости расходомера (рис. 6). На участке стационарного режима выделяются точки установившегося давления и температуры

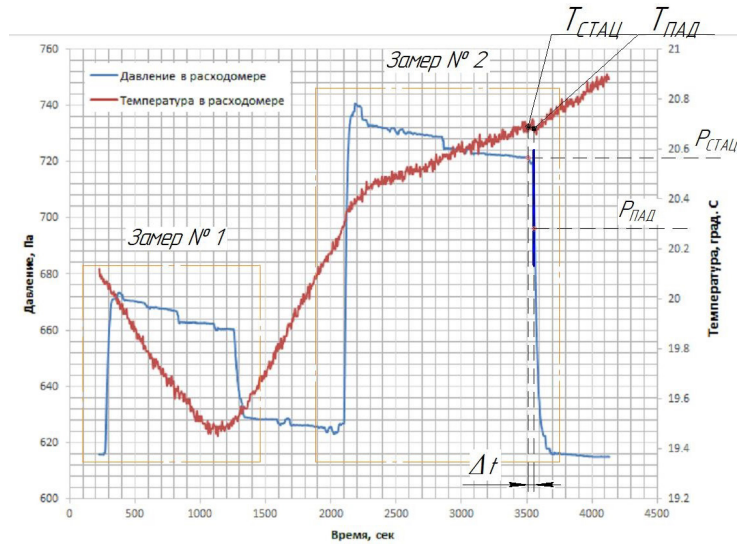


Рис. 6. Диаграмма к определению массового расхода газа
 Fig. 6. Diagram for determining the mass flow rate of gas

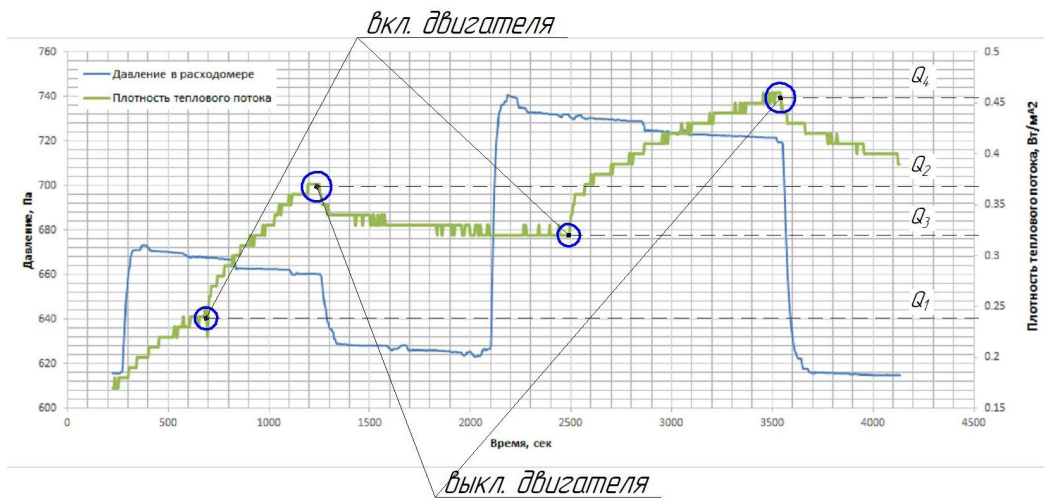


Рис. 7. Диаграмма изменения плотности теплового потока в калориметре
 Fig. 7. Diagram of the change in heat flux density in a calorimeter

(РСТАЦ и ТСТАЦ). После перекрытия магистрали происходит падение давления в ёмкости, в начальный период времени — практически прямолинейно. На прямолинейном участке выбираются точки РПАД и ТПАД. На диаграмме определяется период между стационарным режимом и режимом падения давления $-\Delta t$. Зная объём ёмкости расходомера можно определить массовый расход газа по формуле:

$$\dot{m}_{\text{ГАЗ}} = \left(\frac{M \cdot V}{\Delta t \cdot R} \right) \cdot \left[\left(\frac{P_{\text{СТАЦ}}}{T_{\text{СТАЦ}}} \right) - \left(\frac{P_{\text{ПАД}}}{T_{\text{ПАД}}} \right) \right], \quad (1)$$

где M — молекулярная масса исследуемого газа (азот); R — универсальная газовая постоянная; $V = 8,621 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$ — объём ёмкости расходомера.

Тепловая мощность $P_{\text{полн}}$, приходящая на чувствительный элемент калориметра, равна сумме тепловых мощностей скоростного напора смешанного газа (ионизированный газ с нейтральным газом) $P_{\text{скор}}$ и джоулева тепла $P_{\text{тепл}}$ (нагрев газа осуществляется за счёт прохождения электрического тока через газ в зазоре между сетками ИОС):

$$P_{\text{полн}} = P_{\text{скор}} + P_{\text{тепл}}. \quad (2)$$

Отсюда:

$$P_{\text{скор}} = P_{\text{полн}} - P_{\text{тепл}}. \quad (3)$$

Полная тепловая мощность $P_{\text{полн}}$ получена экспериментально по показаниям датчика плотности теплового потока. Тепловая мощность $P_{\text{тепл}}$ получена путём теоретической обработки экспериментальных данных по термограммам.

Мощность скоростного напора можно выразить через уравнение кинетической энергии потока:

$$P_{\text{скор}} = \frac{\dot{m}_{\text{ГАЗ}} \cdot v^2}{2}, \quad (4)$$

где $\dot{m}_{\text{ГАЗ}}$ — получено экспериментально по формуле (1).

Соответственно, скорость потока смешанного газа можно получить по формуле:

$$v = \sqrt{\frac{2(P_{\text{полн}} - P_{\text{тепл}})}{\dot{m}_{\text{ГАЗ}}}}. \quad (5)$$

Для определения полной тепловой мощности строится временная диаграмма изменения плотно-

сти теплового потока. Диаграмму плотности теплового потока удобно рассматривать относительно диаграммы давления в полости расходомера (рис. 7).

На диаграмме видны характерные точки начала роста плотности теплового потока при включении прототипа двигателя (Q_1 — для первого замера, Q_3 — для второго замера) и точки теплового установившегося режима (Q_2 — для первого замера, Q_4 — для второго замера).

Соответственно, полная тепловая мощность для первого замера определяется по формуле:

$$P_{полн1} = (Q_2 - Q_1) \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}, \quad (6)$$

для второго замера

$$P_{полн2} = (Q_4 - Q_3) \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}, \quad (7)$$

где $D=20$ мм — диаметр датчика плотности теплового потока.

Для определения элементарного теплового потока на экран калориметра используется формула:

$$Q_{ТЕПЛА,mn} = c \cdot m_э \cdot (T_m - T_n), \quad (8)$$

где $c = 1200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ — удельная теплоемкость экрана (целлюлоза); $m_э$ — масса экрана; T_m — средняя температура экрана в момент времени t_m ; T_n — средняя температура экрана в момент времени t_n . Средние температуры экрана определяются из термограмм.

Мощность теплового воздействия на экран является суммой элементарных подводов тепловой энергии к экрану калориметра, отнесенных ко всему времени измерения:

$$P_{тепл} = \sum \frac{Q_{ТЕПЛА,mn}}{\Delta t_\tau}. \quad (9)$$

где Δt_τ — время теплового переходного процесса.

По формуле (1) по данным с вакуумметра и прибора МИТ-8 для первого замера было получено значение массового расхода нейтрального газа — $5,668 \cdot 10^{-9}$ кг/с, для второго замера массовый расход составил — $1,611 \cdot 10^{-8}$ кг/с. Для первого замера по формуле (6) имеем полную тепловую мощность ионизированной ускоренной струи (при $Q_1 = 0,24$ Вт/м² и $Q_2 = 0,37$ Вт/м²), которая равна 40,841 мкВт. Для второго замера по формуле (7) имеем полную тепловую мощность ионизированной ускоренной струи (при $Q_3 = 0,32$ Вт/м² и $Q_4 = 0,46$ Вт/м²), которая равна 43,982 мкВт. В табл. 1 приведены средние значения температуры экрана в различные моменты времени. Часы тепловизора синхронизированы с часами ПК, в память которого заносятся данные о плотности теплового потока, давления и температуры в расходомере. Таким образом, в табл. 1 время термографирования экрана синхронно с временной шкалой диаграмм (рис. 6 и рис. 7). По формулам (8) и (9) и табл. 1 для режима «ГАЗ + СВЧ + РП» первого замера получаем величину тепловой мощности $P_{тепл} = 29,32$ мкВт.

По формуле (5) скорость смешанного газа при воздействии СВЧ поля и ускоряющей разности потенциалов составила 63,75 м/с. Тягу двигателя можно определить по соотношению:

$$W = \dot{m}_{ГАЗ} \cdot v. \quad (10)$$

Таким образом, тяга двигателя на первом замере составила 0,36 мкН. Если не производить учёт тепловой составляющей потока, то теоретический анализ показывает завышенные значения величин: скорость 120 м/с, тяга — 0,68 мкН. По формулам (8) и (9) и табл. 2 для режима «ГАЗ + СВЧ + РП» второго замера получаем величину тепловой мощности $P_{тепл} = 25,48$ мкВт. По формуле (5) скорость смешанного газа при воздействии СВЧ поля и ускоряющей разности потенциалов составила 47,925 м/с. Тяга двигателя по формуле (10) равна 0,77 мкН. Если не производить учёт тепловой составляющей потока,

Таблица 1. Средние температуры экрана калориметра на замере № 1

Table 1. Average temperatures of the calorimeter screen on the measurement № 1

«НОЛЬ»		«ГАЗ»		«ГАЗ+СВЧ+РП»		«ВЫКЛ. ВСЕГО»	
Время, сек.	Температура, °С	Время, сек.	Температура, °С	Время, сек.	Температура, °С	Время, сек.	Температура, °С
27	18,8	289	18,8	742	19,1	1294	19,1
55	18,9	326	18,8	757	19,1	1309	19,2
162	19,0	352	19,0	777	19,1	1316	19,2
255	18,9	376	18,9	800	19,1	1329	19,1
		387	18,9	828	19,2	1702	19,2
		408	18,9	847	19,2	1785	19,2
		425	18,9	871	19,2	1831	19,2
		459	19,0	922	19,2		
		533	18,9	986	19,2		
		559	18,9	1034	19,2		
		670	19,0	1141	19,3		
				1206	19,3		

Таблица 2. Средние температуры экрана калориметра на замере № 2
Table 2. Average temperatures of the calorimeter screen on the measurement № 2

«НОЛЬ»		«ГАЗ»		«ГАЗ+СВЧ+РП»		«ВЫКЛ. ВСЕГО»	
Время, сек.	Темпер., °С	Время, сек.	Темпер., °С	Время, сек.	Темпер., °С	Время, сек.	Темпер., °С
1921	19,1	2119	19,2	2519	19,5	3556	19,7
1971	19,2	2125	19,2	2528	19,5	3564	19,7
2011	19,2	2149	19,2	2544	19,5	3580	19,7
		2162	19,2	2569	19,5	3599	19,7
		2179	19,2	2585	19,5	3624	19,8
		2217	19,2	2620	19,5	3668	19,7
		2313	19,3	2637	19,5	3737	19,6
		2335	19,3	2674	19,5	3752	19,6
		2423	19,3	2722	19,5	3799	19,8
				2870	19,7		
				2965	19,6		
				3377	19,9		
				3451	19,8		

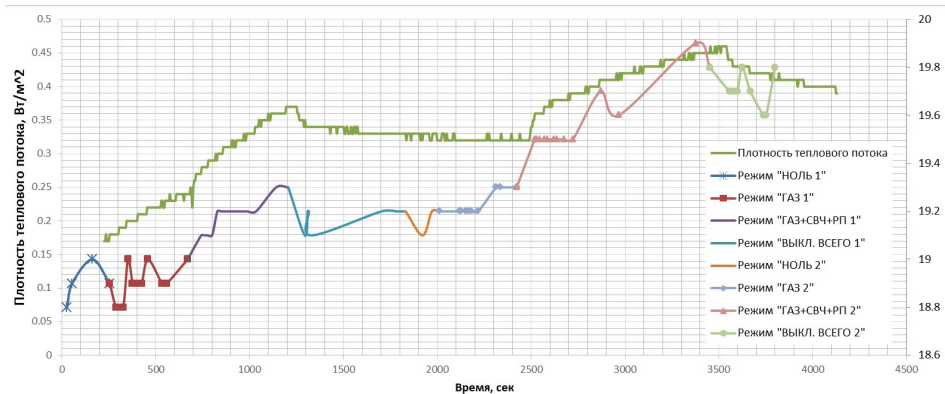


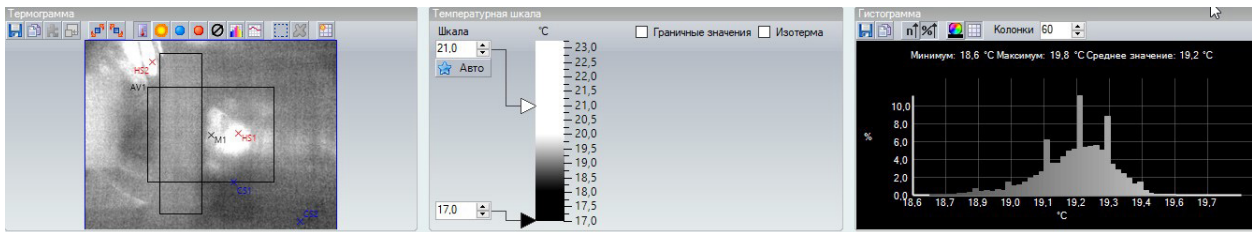
Рис. 8. Диаграмма изменения температуры экрана при подводе энергетических воздействий
Fig. 8. Diagram of the screen temperature change during the supply of energy influences

то теоретический анализ показывает следующие значения величин: скорость — 73,893 м/с, тяга — 1,19 мкН. По данным, представленным в табл. 1 и табл. 2, построена диаграмма изменения температуры экрана калориметра (рис. 8). Для наглядности совместно представлена диаграмма изменения плотности теплового потока. На рис. 9 представлены термограммы экрана калориметра основных режимов замера № 2. Для наглядности, термограммы приведены к единой температурной шкале.

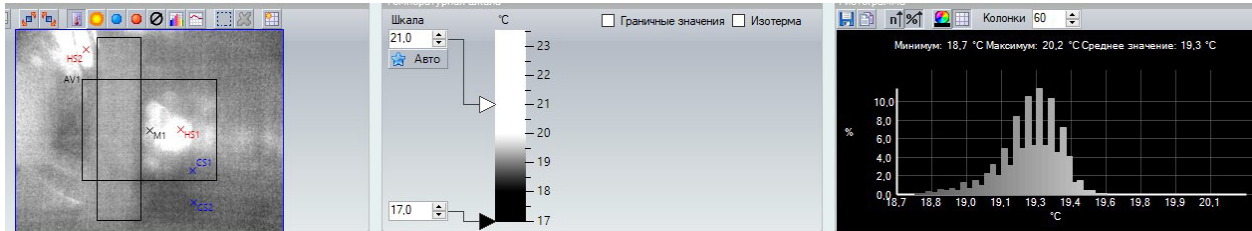
Обсуждение результатов

В результате калориметрических исследований для двух последовательных замеров были получены данные, которые можно представить в виде табл. 3. Массовый расход на замере № 2 в 2,84 раза выше массового расхода на замере № 1. При этом полная тепловая мощность струи (показания датчика плотности теплового потока) при подаче СВЧ энергии и постоянной ускоряющей разности потенциалов увеличивается в 1,08 раза. Тепловая мощность, обусловленная джоулевым тепловыделением, падает в 1,15 раза. Увеличение расхода газа при отсутствии вторичного тлеющего разряда между электродами ИОС приводит к меньшему нагреву экрана калориметра. Установившееся напряжение между сетками ИОС в первом замере составило 595 В, а во втором

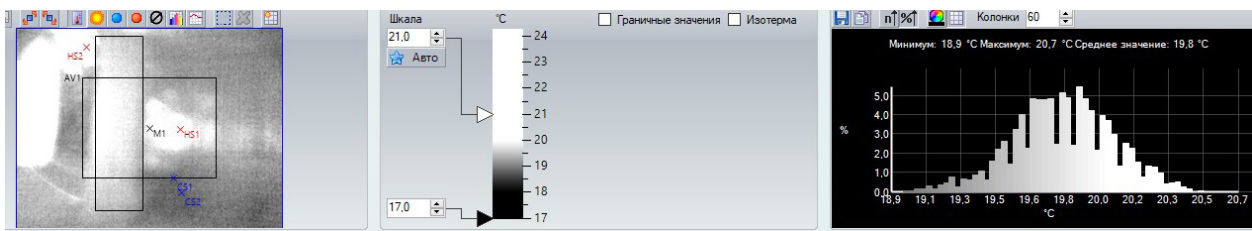
замере — 593,4 В. Видно, что ток между сетками при увеличении расхода увеличился незначительно, следовательно, прироста резистивного теплового потока не произошло. Соответственно, одна и та же тепловая энергия распределялась в разных объемах нейтрального газа. Нагрев газа во втором замере был ниже, чем в первом, что и обусловило меньший нагрев экрана калориметра. По формулам (8) и (9) и табл. 1 и табл. 2 для режима «ГАЗ» первого и второго замера величины тепловой мощности составили 12,62 мкВт и 12,72 мкВт соответственно. Показания датчика плотности теплового потока на режиме «ГАЗ» не менялись (рис. 8). Это означает, что влияние скоростного напора газа, без подведенной энергии, во всех замерах ничтожно мало и не меняется при увеличении расхода нейтрального газа. По формуле (3) мощность скоростного тепловыделения составила 11,5 мкВт (на первом замере) и 18,5 мкВт (на втором замере). Скоростная тепловая мощность во втором случае выше того же параметра первого случая в 1,6 раза. Из сказанного можно сделать вывод, что прирост скоростной энергии обусловлен не увеличением скорости ионизированного потока (ускоряющее напряжение в обоих замерах одинаковое), а увеличением количества ионизированных частиц, движущихся с той же скоростью. Отчасти это подтверждается снижением установившегося ускоряющего напря-



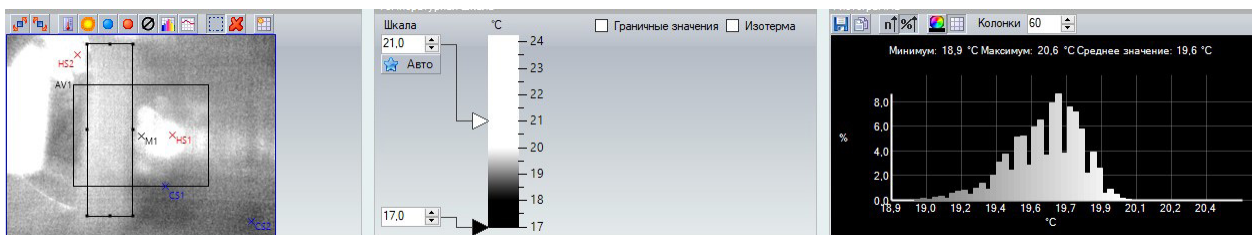
Режим «НОЛЬ», время замера — 2011 сек.



Режим «ГАЗ», время замера — 2423 сек.



Режим «ГАЗ+СВЧ+РП», время замера — 3451 сек.



Режим «ВЫКЛ. ВСЕГО», время замера — 3737 сек.

Рис. 9. Пример термограмм экрана калориметра замера № 2
Fig. 9. Example of thermograms of the screen of the calorimeter of measurement № 2

Таблица 3. Сводная таблица расчётных значений
Table 3. Summary table of calculated values

	$\dot{m}_{\text{ГАЗ}}$, кг/с	$P_{\text{полн}}$, мкВт	$P_{\text{тепл}}$, мкВт	v_i , м/с	W , мкН
Замер № 1	$5,668 \cdot 10^{-9}$	40,841	29,32	63,75	0,36
Замер № 2	$1,611 \cdot 10^{-8}$	43,982	25,48	47,925	0,77

жения во втором замере на 1,6 В и увеличением тока потребления СВЧ генератора с 0,51 А до 0,56 А. То есть увеличение давления в рабочей камере экспериментального прототипа способствует большему плазмообразованию (уменьшается длина свободного пробега молекул, частицы дольше находятся под воздействием высокочастотного излучения), электропроводность плазмы увеличивается, ток, проходящий через СВЧ транзистор, повышается. Имеет место инжекторный эффект, когда ускоренные ионы, сталкиваясь в ускоряющем зазоре с нейтральными молекулами, передают им часть своей кинетической энергии. Скорость ионов падает, скорость смешанного газа растёт. Увеличение массового расхода приводит к росту давления в зазоре, увеличивается частота столкновений, ветви передачи кинетической энергии разрастаются. Во втором замере скорость нейтрального газа со-

ставила около 48 м/с, когда в случае низкого давления (замер № 1) она составила 63,75 м/с. Несмотря на снижение скорости за счёт увеличения массового расхода нейтрального газа, общая тяга во втором случае выше в два раза, чем в первом.

Выводы и заключение

Авторами представлен усовершенствованный калориметрический метод определения параметров струи ионизированного газа. Видно, что учёт резистивного тепловыделения снижает расчётную величину тяги в 1,9 раза (для замера № 1) и в 1,5 раза (для замера № 2). Как было сказано выше, в ряду методов и методик определения параметров ионных двигателей, разработанных и освоенных авторами (рис. 1), калориметрический метод выделяется завышением величин скоростных и тяговых

параметров. Учёт джоулева тепла выравнивает этот дисбаланс. Можно отметить такой недостаток метода, как длительность экспериментального процесса, обусловленную высокой тепловой инерцией при малых тепловых потоках. По данному критерию он значительно уступает аэродинамическому методу и ионно-методному (времяпролетному) методу. Однако только калориметрический метод позволяет оценить потери энергии на нагрев рабочего газа в межэлектродном промежутке и распределение энергий в зависимости от массового расхода (давления) и степени развитости вторичного тлеющего разряда.

Благодарности

Данные исследования проводятся в рамках финансовой поддержки Российского научного фонда (проект № 19-79-10038).

Список источников

1. Vavilov I. S., Lukyanchik A. I., Yachmenev P. S., Litau R. N., Lysakov A. V. A small spacecraft microengine with SHF impact on working medium: cooling and dilatometric evaporator valve // *Journal of Physics: Conf. Series*. 2018. Vol. 1050. 012095. DOI: 10.1088/1742-6596/1050/1/012095.
2. Blinov V. N., Shalay V. V., Vavilov I. S., Kositsin V. V., Ruban V. I., Lykanchik A. I., Yachmenev P. S., Vlasov A. S. Gas dynamic model of electrothermal thrusters of small spacecraft and possibility of applying microwave heating of a working // *Journal of Physics: Conf. Series*. 2017. Vol. 858. 012004. DOI: 10.1088/1742-6596/858/1/012004.
3. Вавилов И. С., Лукьянчик А. И., Ячменев П. С., Литай Р. Н., Кузьменко И. А. Дилатометрический микродвигатель малого космического аппарата с резонансным СВЧ-ускорителем // *Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение*. 2018. Т. 2, № 4. С. 36–41. DOI: 10.25206/2588-0373-2018-2-4-36-41.
4. Вавилов И. С., Косицын В. В., Лукьянчик А. И., Ячменев П. С., Власов А. С., Лысаков А. В. О возможности разложения аммиака СВЧ-воздействием в корректирующем микродвигателе малого космического аппарата // *Омский научный вестник*. 2016. № 6 (150). С. 58–63.
5. Vavilov I. S., Fedyanin V. V., Yachmenev P. S., Stephen' P. V., Lukyanchik A. I., Zhariikov K. I. Investigation of plasma parameters of a single-gas ion engine using a single Langmuir probe // *Journal of Physics: Conf. Series*. 2021. Vol. 1791. 012032. DOI: 10.1088/1742-6596/1791/1/012032.
6. Вавилов И. С., Ющенко В. А., Жариков К. И., Ячменев П. С. Определение массового расхода газа низкого давления // *Материалы XIV Всерос. науч.-техн. конф., посвященной памяти главного конструктора ПО «Полет» А. С. Клинышкова*. Омск, 2020. С. 10–14.
7. Ющенко В. А., Ячменев П. С. Определение массового расхода газа низкого давления, поступающего к рабочему объекту, находящемуся в условиях вакуума // *Молодой исследователь: вызовы и перспективы: сб. ст. по материалам СХСХVI Междунар. науч.-практ. конф. Москва: Интернаука, 2021. Т. 1 (186). С. 548–555.*
8. Федянин В. В., Вавилов И. С., Ячменев П. С., Жариков К. И., Лукьянчик А. И., Степень П. В. Определение скорости ионного пучка ускорительного двухазорного микродвигателя // *Динамика систем, механизмов и машин*. 2021. Т. 9, № 2. С. 108–118. DOI: 10.25206/2310-9793-9-2-108-118.
9. Вавилов И. С., Ячменев П. С., Жариков К. И., Федянин В. В., Степень П. В., Лукьянчик А. И. Определение тяги ионного двигателя аэродинамическим методом двойного угла (АМдВ-метод) // *Динамика систем, механизмов и машин*. 2021. Т. 9, № 2. С. 78–85. DOI: 10.25206/2310-9793-9-2-78-86.

10. Вавилов И. С., Ячменев П. С., Федянин В. В., Степень П. В., Лукьянчик А. И., Жариков К. И. Определение тяги ионного двигателя резонансным аэродинамическим методом (РАМ-метод) // *Динамика систем, механизмов и машин*. 2021. Т. 9, № 2. С. 70–78. DOI: 10.25206/2310-9793-9-2-70-77.

11. Вавилов И. С., Федянин В. В., Ячменев П. С., Жариков К. И., Лукьянчик А. И., Степень П. В. Определение параметров СВЧ ионного двигателя калориметрическим методом // *Динамика систем, механизмов и машин*. 2021. Т. 9, № 2. С. 48–53. DOI: 10.25206/2310-9793-9-2-48-53.

12. Датчики теплового потока ДТП 0924. URL: <https://omsketalon.ru/datchiki-teplovogo-potoka-dtp-0924> (дата обращения: 19.01.2022).

ВАВИЛОВ Игорь Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Авиа- и ракетостроение» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 3468-6744

AuthorID (РИНЦ): 518332

AuthorID (SCOPUS): 56610211900

ResearcherID: B-2634-2014

Адрес для переписки: vava-igg@mail.ru

ЖАРИКОВ Константин Игоревич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Авиа- и ракетостроение» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 9469-0544

ORCID: 0000-0002-4966-1788

AuthorID (SCOPUS): 57192074889

ResearcherID: E-9087-2014

ЯЧМЕНЕВ Павел Сергеевич, ассистент, аспирант кафедры «Авиа- и ракетостроение» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 4744-0940

ORCID: 0000-0003-3483-4321

AuthorID (SCOPUS): 57193405041

ResearcherID: P-5381-2016

Адрес для переписки: yachmenev-pavel@mail.ru
ФЕДЯНИН Виктор Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрическая техника» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 1728-1697

ORCID: 0000-0003-3126-9865

AuthorID (SCOPUS): 57194235343

ResearcherID: O-9899-2015

СТЕПЕНЬ Павел Валерьевич, ассистент кафедры «Авиа- и ракетостроение» ОмГТУ, г. Омск.

ЛУКЪЯНЧИК Антон Игоревич, ассистент, аспирант кафедры «Авиа- и ракетостроение» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 2378-9723

ORCID: 0000-0002-3309-4125

AuthorID (SCOPUS): 57189506536

ResearcherID: O-8722-2016

Адрес для переписки: lukyanchik1991@mail.ru
КУЗЬМЕНКО Ирина Анатольевна, старший преподаватель кафедры «Авиа- и ракетостроение» ОмГТУ, г. Омск.

Для цитирования

Вавилов И. С., Жариков К. И., Ячменев П. С., Федянин В. В., Степень П. В., Лукьянчик А. И., Кузьменко И. А. Калориметрические исследования СВЧ ионного двигателя // *Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение*. 2022. Т. 6, № 1. С. 118–127. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-6-1-118-127.

Статья поступила в редакцию 10.02.2022 г.

© И. С. Вавилов, К. И. Жариков, П. С. Ячменев, В. В. Федянин, П. В. Степень, А. И. Лукьянчик, И. А. Кузьменко

CALORIMETRIC STUDIES OF MICROWAVE ION THRUSTER

I. S. Vavilov, K. I. Zharikov, P. S. Yachmenev, V. V. Fedyanin,
P. V. Stepen, A. I. Lukyanchuk, I. A. Kuzmenko

Omsk State Technical University,
Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

The authors continue their work in the field of calorimetric studies of the parameters of an accelerated ionized gas jet of prototypes of microwave ion micro-thrusters with an energy consumption of up to 10 watts. This paper presents an improved calorimetric method. The introduction into the design of a heat receiver in the form of a thin screen makes it possible to allocate the thermal component formed by the passage of an electric current through the plasma in the accelerating gap. Calorimetric studies of the prototype with a two-electrode accelerating system are carried out at the same accelerating voltages and power of the microwave generator and different mass gas flow rates. It is shown that at a nitrogen consumption of $5,668 \cdot 10^{-9}$ kg/s, the velocity of the mixed jet (neutral gas with ionized component) of the gas was 63,75 m/s, the jet thrust is 0,36 μ N. With a nitrogen consumption of $1,611 \cdot 10^{-8}$ kg/s, the speed of the mixed gas jet was 47,9 m/s, the jet thrust was 0,77 μ N.

Keywords: calorimeter, microwave, plasma, small spacecraft, nitrogen, thrust, speed, thermal imager.

Acknowledgments

The research is carried out at the expense of a grant from the Russian science Foundation (Project No. 19-79-10038).

References

1. Vavilov I. S., Lukyanchuk A. I., Yachmenev P. S., Litau R. N., Lysakov A. V. A small spacecraft microengine with SHF impact on working medium: cooling and dilatometric evaporator valve // *Journal of Physics: Conf. Series* 2018. Vol. 1050. 012095. DOI: 10.1088/1742-6596/1050/1/012095. (In Engl.).
2. Blinov V. N., Shalay V. V., Vavilov I. S., Kositsin V. V., Ruban V. I., Lykanchuk A. I., Yachmenev P. S., Vlasov A. S. Gas dynamic model of electrothermal thrusters of small spacecraft and possibility of applying microwave heating of a working // *Journal of Physics: Conf. Series* 2017. Vol. 858. 012004. DOI: 10.1088/1742-6596/858/1/012004. (In Engl.).
3. Vavilov I. S., Lukyanchuk A. I., Yachmenev P. S., Litau R. N., Kuzmenko I. A. Dilatometricheskij mikrodvigatel' malogo kosmicheskogo apparata s rezonansnym SVCh-uskoritelem [Dilatometric Microdrive of small spacecraft with resonant microwave accelerator] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Seriya Aviatcionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2018. Vol. 2, no. 4. P. 36–41. (In Russ.).
4. Vavilov I. S., Kosicyn V. V., Lukyanchuk A. I., Yachmenev P. S., Vlasov A. S., Lysakov A.V. O vozmozhnosti razlozheniya ammiaka SVCh-vozdjstviem v korrektruyushchem mikrodvigatele malogo kosmicheskogo apparata [On the possibility of ammonia microwave discharge decomposition for corrective truster small spacecraft] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Omsk Scientific Bulletin*. 2016. No. 6 (150). P. 58–63. (In Russ.).
5. Vavilov I. S., Fedyanin V. V., Yachmenev P. S., Stepen' P.V., Lukyanchuk A. I., Zharikov K. I. Investigation of plasma parameters of a single-gas ion engine using a single Langmuir probe // *Journal of Physics: Conf. Series* 2021. Vol. 1791. 012032. DOI: 10.1088/1742-6596/1791/1/012032. (In Engl.).
6. Vavilov I. S., Yushchenko V. A., Zharikov K. I., Yachmenev P. S. Opreddeniye massovogo raskhoda gaza nizkogo

dvleniya [Determination of the mass flow rate of low pressure gas] // *Materialy XIV Vseros. nauch.-tekhn. konf., posvyashchennoy pamyati glavnogo konstruktora PO «Polet» A. S. Klinyshkova. Materialy XIV Vseros. nauch.-tekhn. konf., posvyashchennoy pamyati glavnogo konstruktora PO «Polet» A. S. Klinyshkova*. Omsk, 2020. P. 10–14. (In Russ.)

7. Yushchenko V. A., Yachmenev P. S. Opreddeniye massovogo raskhoda gaza nizkogo dvleniya, postupayushchego k rabochemu ob'yektu, nakhodyashchemusya v usloviyakh vakuuma [Determination of the mass flow rate of low-pressure gas flowing to a working object in vacuum conditions] // *Molodoy issledovatel': vyzovy i perspektivy. Young Researcher: Challenges and Prospects*. Moscow, 2021. P. 548–555. (In Russ.).

8. Fedyanin V. V., Vavilov I. S., Yachmenev P. S., Zharikov K. I., Lukyanchuk A. I., Stepen' P. V. Opreddeniye skorosti ionnogo puchka uskoritel'nogo dvukhzazornogo mikrodvigatelya [Determination of the ion beam velocity of an accelerator two-gap ion thruster] // *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin. Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*. 2021. Vol. 9, no. 2. P. 108–118. DOI: 10.25206/2310-9793-9-2-108-118. (In Russ.).

9. Vavilov I. S., Yachmenev P. S., Zharikov K. I., Fedyanin V. V., Stepen' P. V., Lukyanchuk A. I. Opreddeniye tyagi ionnogo dvigatelya aerodinamicheskim metodom dvojnogo ugla (AMaB-metod) [Determination of the thrust of an ion thruster by the aerodynamic method of double angle (AMaB-method)] // *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin. Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*. 2021. Vol. 9, no. 2. P. 78–85. DOI: 10.25206/2310-9793-9-2-78-86. (In Russ.).

10. Vavilov I. S., Yachmenev P. S., Fedyanin V. V., Stepen' P. V., Lukyanchuk A. I., Zharikov K. I. Opreddeniye tyagi ionnogo dvigatelya rezonansnym aerodinamicheskim metodom (RAM-metod) [Determination of the thrust of an ion thruster by the resonant aerodynamic method (RAM-method)] // *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin. Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*. 2021. Vol. 9, no. 2. P. 70–78. DOI: 10.25206/2310-9793-9-2-70-78. (In Russ.).

11. Vavilov I. S., Fedyanin V. V., Yachmenev P. S., Zharikov K. I., Lukyanchuk A. I., Stepen' P. V. Opreddeniye parametrov SVCh ionnogo dvigatelya kalorimetricheskim metodom [Determination of the parameters of the microwave ion thruster by the calorimetric method] // *Dinamika sistem, mekhanizmov*

i mashin. *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*. 2021. Vol. 9, no. 2. P. 48–53. DOI: 10.25206/2310-9793-9-2-48-53. (In Russ.).

12. Datchiki teplovogo potoka DTP 0924. URL: <https://omsketalon.ru/datchiki-teplovogo-potoka-dtp-0924> (accessed: 12.02.2022). (In Russ.).

VAVILOV Igor Sergeevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Aviation and Rocketry Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

SPIN-code: 3468-6744,

AuthorID (RCSI): 518332

AuthorID (SCOPUS): 56610211900

ResearcherID: B-2634-2014

Address for correspondence: vava-igg@mail.ru

ZHARIKOV Konstantin Igorevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Aviation and Rocketry Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 9469-0544

ORCID: 0000-0002-4966-1788

AuthorID (SCOPUS): 57192074889

ResearcherID: E-9087-2014

YACHMENEV Pavel Sergeevich, Assistant, Graduate Student of Aviation and Rocketry Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 4744-0940

ORCID: 0000-0003-3483-4321

AuthorID (SCOPUS): 57193405041

ResearcherID: P-5381-2016

Address for correspondence: yachmenev-pavel@mail.ru

FEDYANIN Viktor Viktorovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Electrical Equipment Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 1728-1697

ORCID: 0000-0003-3126-9865

AuthorID (SCOPUS): 57194235343

ResearcherID: O-9899-2015

STEPEN Pavel Valer'yevich, Assistant of Aviation and Rocketry Department, OmSTU, Omsk.

LUKYANCHIK Anton Igorevich, Assistant, Graduate Student of Aviation and Rocketry Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-код: 2378-9723

ORCID: 0000-0002-3309-4125

AuthorID (SCOPUS): 57189506536

ResearcherID: O-8722-2016

Address for correspondence: lukyanchik1991@mail.ru

KUZMENKO Irina Anatolievna, Senior Lecturer of Aviation and Rocketry Department, OmSTU, Omsk.

For citations

Vavilov I. S., Zharikov K. I., Yachmenev P. S., Fedyanin V. V., Stepen P. V., Lukyanchuk A. I., Kuzmenko I. A. Calorimetric studies of microwave ion thruster // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2022. Vol. 6, no. 1. P. 118–127. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-1-118-127.

Received February 10, 2022.

© I. S. Vavilov, K. I. Zharikov, P. S. Yachmenev, V. V. Fedyanin, P. V. Stepen, A. I. Lukyanchuk, I. A. Kuzmenko