

НЕОДНОРОДНОСТЬ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЧАСТИЦ И КИНЕТИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ В КОЛЛОИДНОМ ЭЛЕКТРОРАКЕТНОМ ДВИГАТЕЛЕ

Александр Филиппович ШТЫРЛИН родился в 1929 г. в городе Баку. Ведущий научный сотрудник МАИ. Кандидат технических наук, старший научный сотрудник. Основные научные интересы — в области коллоидных электроракетных двигателей и технических устройств на их основе для решения космических, авиационных и земных задач. Автор более 175 научных работ. E-mail: k.208@mai.ru

Alexander F. SHTYRLIN, Ph.D., was born in 1929, in Baku. He is a Principal Research Associate at the MAI. His research interests include colloidal electrojet thrusters as well as devices basing on these engines for aeronautical, space and terrestrial applications. He has published more than 175 technical papers. E-mail: k.208@mai.ru

Для определения полидисперсности распыления жидкого рабочего тела двигателя использована и отработана методика время-пролетных измерений параметров пучка. Исследование проведено на модуле коллоидного двигателя, содержащего 18 эмиссионных ячеек, формирующих на выходе из модуля пучок диаметром 75 мм. Кинетический коэффициент полезного действия модуля изменяется в пределах 0.55–0.75 в зависимости от расхода жидкости и скорости истечения частиц.

The time-of-flight measurement technique for beam parameters is studied to estimate polydispersity of sputtering for liquid working media in a colloidal electrojet thruster. The investigation is carried out using a module of the thruster equipped with 18 emission units. These 18 units generate in total the beam with 75 mm diameter on the outlet of the module. A kinetic efficiency value for the module varies in the 0.55..0.75 range depending on fluid flow rate and particle outlet velocity values.

Ключевые слова: неоднородность заряда, кинетические потери, коллоидный электроракетный двигатель.

Key words: charge nonuniformity, kinetic losses, colloidal electrojet thruster.

Условные обозначения

J — ток эмиссии;
 J' — производная тока по времени;
 \dot{m} — массовый расход;
 N — мощность пучка;
 P — тяга модуля;
 q/m — удельный заряд частиц;
 R — радиус пролета частиц;
 $R_{1,2}$ — сопротивление в цепи;
 U — напряжение в цепи;
 v — скорость частиц;
 $\langle v \rangle$ — среднеимпульсная скорость;

$\langle v^2 \rangle$ — среднеквадратичная скорость;
 η_v — кинетический КПД;
 τ — текущее время;
 α — половинный угол расходимости.

Одной из главных особенностей генерирования заряженных частиц в коллоидном двигателе является неоднородность удельного заряда частиц и скорости истечения, что приводит к дополнительным потерям преобразования энергии в тяговую энергию двигателя. Если в непрерывном спектре

распределения скорости истечения принять нормальный закон распределения, то можно в аналитической форме найти зависимость кинетического коэффициента полезного действия от дисперсии функции распределения скорости частиц. Однако такая зависимость дает только качественное совпадение результатов, так как реальное распределение параметров пучка значительно отличается от распределения в расчете, но в дальнейшем могут быть использованы и другие более точные функции распределения. Наиболее достоверные результаты дают экспериментальные методы непосредственного измерения неоднородности параметров распыления жидкости в электрическом поле по удельному заряду капель и методика расчета кинетического коэффициента полезного действия пучка на основе полученных опытных данных.

Для экспериментального исследования параметров электрического распыления жидкостей американскими специалистами Шельтоном и Коеном был создан ионизационный спектрометр, принцип действия которого основан на измерении времени пролета заряженных частиц между эмиттером и коллектором. Схема такого время-пролетного спектрометра приведена на рис. 1. Устройство состоит из трехэлектродной эмиссионной ячейки с высоковольтными источниками тока, экранированной мишени с цепью измерения протекающего тока, осциллографа и быстродействующего ключа с триггером. При стационарной работе эмиссионной ячейки на мишени измеряется суммарный ток рас-

ходящегося пучка частиц, имеющих разные удельные заряды и разные скорости пролета промежутка R . Действие спектрометра основано на мгновенном прекращении эмиссии частиц, что достигается закорачиванием на массу высоковольтного источника распыливающего электрода быстродействующим ключом, и измерения спада тока на мишени во времени. Осциллограф запускается импульсом от триггерного устройства с некоторым опережением по отношению к моменту подачи сигнала к снижению напряжения в системе электропитания распыливающего электрода. Время движения частиц в пролетном пространстве зависит от скорости частиц и длины R . Так как частицы имеют дисперсию по удельному заряду и скорости, то спад тока протекает не мгновенно, а плавно и в течение какого-то отрезка времени.

Для нормальной работы спектрометра должны выполняться следующие три физических условия: мгновенное временное отключение напряжения в высоковольтной системе, короткое пространственное ускорение частиц до полной располагаемой энергии U_1 и отсутствие вторичной эмиссии заряженных частиц с токоприемной мишени. В действительности отключение тока происходит за конечный отрезок времени, ускорение частиц до полной энергии происходит на некоторой длине, а при соударении пучка с мишенью происходит выход вторичных заряженных частиц. В реальных условиях работы спектрометра необходимо, чтобы эти конечные величины слабо влияли на результаты из-

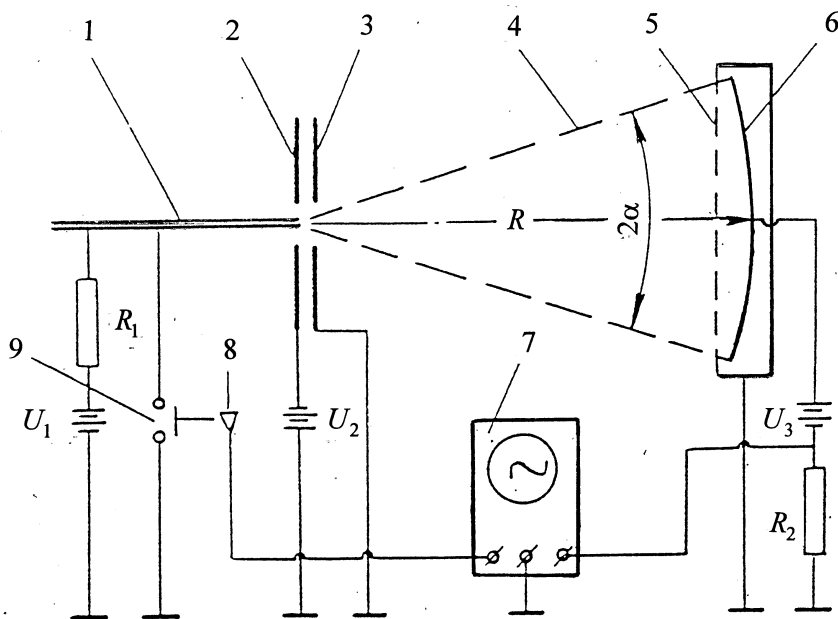


Рис. 1. Схема время-пролетных измерений параметров пучка:

- 1 — эмиссионный электрод; 2 — вытягивающий электрод; 3 — экранирующий электрод;
- 4 — конус пучка частиц; 5 — экранирующая сетка; 6 — мишень; 7 — осциллограф;
- 8 — триггер; 9 — электронный ключ

мерения параметров пучка. До данным работ [1, 2], характерное время сброса напряжения в системе при использовании электронного ключа, измеренное в экспериментальных условиях, находится в пределах 1—3 мкс, а длина ускорения заряженных частиц в эмиссионной ячейке не превышает 1 см. В выполненных спектрометрах длина пролета частиц составляет 0,4—1,9 м [3] и при исследовании заряженных частиц с удельным зарядом 10^2 — 10^4 Кл/кг время пролета находится в области от нескольких десятков до нескольких сотен мкс.

В процессе проведения эксперимента снимается время-пролетный след сгустка пучка, ограниченно радиусом R . Типичная форма такого следа показана на рис. 2. В пучке частицы движутся с разными скоростями и проходят межэлектродное расстояние с неодинаковым временем. Самые легкие частицы пролетают за время τ_1 , а самые тяжелые — за время τ_2 . Время вывода всех частиц из пучка составляет $\tau_2 - \tau_1$. Время-пролетный след, который фиксируется на запоминающей трубке осциллографа, фотографируется или подается на ЭВМ для обработки, что обеспечивает практически мгновенную диагностику пучка. Значения тока и массового расхода являются интегральными параметрами пучка, но каждому времени пролета соответствуют определенные значения локальных параметров пучка — скорости и удельного заряда:

$$v = \frac{R}{\tau}; \tag{1}$$

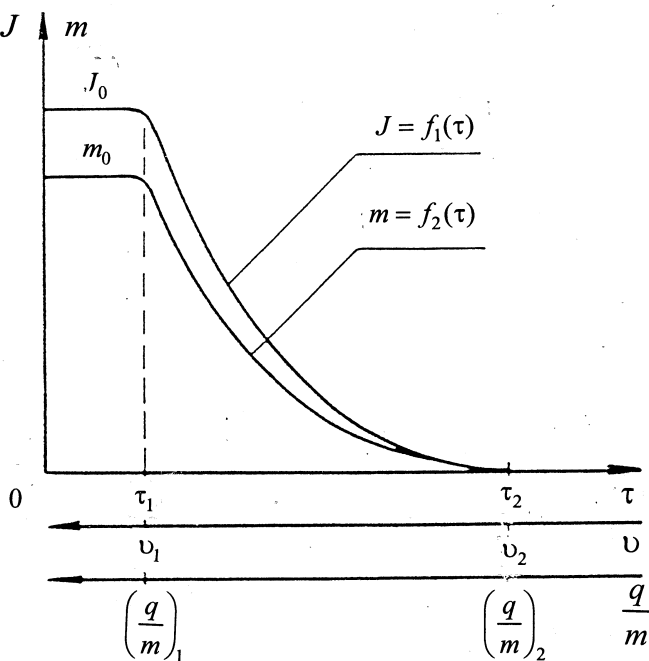


Рис. 2. Время-пролетный след по току мишени

$$\frac{q}{m} = \frac{v^2}{2U_0} = \frac{R^2}{2U_0\tau^2}. \tag{2}$$

Используя полученные соотношения, после преобразований определяем интегральные параметры пучка:

тягу

$$P = \int_0^{J_0} v dm = \frac{2U_0}{R} \int_0^{J_0} \tau dJ = \frac{2U_0}{R} \int_0^{\tau_2} J d\tau = \frac{2U_0 J_0 \tau_2^2}{R} \int_0^1 \bar{J} d\bar{\tau}; \tag{3}$$

удельный импульс тяги, равный среднеимпульсной скорости:

$$P_{уд} = \langle v \rangle = R \frac{\int_0^{J_0} \tau dJ}{\int_0^{J_0} \tau^2 dJ} = \frac{R}{2} \frac{\int_0^{\tau_2} J d\tau}{\int_0^{\tau_2} J \tau d\tau} = \frac{R}{2\tau_2} \frac{\int_0^1 \bar{J} d\bar{\tau}}{\int_0^1 \bar{J} \bar{\tau} d\bar{\tau}}; \tag{4}$$

среднеквадратичную скорость

$$\langle v^2 \rangle = \frac{2U_0 J_0}{\dot{m}} = \frac{J_0 R^2}{\int_0^{J_0} \tau^2 dJ} = \frac{J_0 R^2}{2 \int_0^{\tau_2} J \tau d\tau} = \frac{R^2}{2\tau_2^2} \frac{\int_0^1 \bar{J} \bar{\tau} d\bar{\tau}}{\int_0^1 \bar{J} \bar{\tau} d\bar{\tau}}; \tag{5}$$

кинетический коэффициент полезного действия

$$\eta_v = \frac{\langle v \rangle^2}{\langle v^2 \rangle} = \frac{\left(\int_0^{J_0} \tau dJ \right)^2}{J_0 \int_0^{J_0} \tau^2 dJ} = \frac{\left(\int_0^{\tau_2} J d\tau \right)^2}{2 J_0 \int_0^{\tau_2} J \tau d\tau} = \frac{\left(\int_0^1 \bar{J} d\bar{\tau} \right)^2}{2 \int_0^1 \bar{J} \bar{\tau} d\bar{\tau}}. \tag{6}$$

Из полученных формул видно, что методика измерения тяговых параметров время-пролетным способом основана на определении двух интегралов:

$$\int_0^{\tau_2} J d\tau \text{ и } \int_0^{\tau_2} J \tau d\tau \text{ [4].}$$

В частном случае, когда все частицы имеют одинаковый удельный заряд, первый интеграл равен

произведению $J_0 \tau_2$, а второй — $\frac{J_0 \tau_2^2}{2}$, тогда формулы для расчета массового расхода и тяги примут

вид $2 \frac{U_0 J_0 \tau_2^2}{R^2}$, $2 \frac{U_0 J_0 \tau_2}{R}$, а среднеимпульсной скорости, среднеквадратичной скорости и кинетического

коэффициента полезного действия — $\frac{R}{\tau_2}, \frac{R^2}{\tau_2^2}$ и 1.

Время-пролетный метод является достаточно простым, но косвенным методом определения тяговых параметров двигателя. Большим недостатком метода является невысокая точность измерения. Главными погрешностями метода являются точность определения интегралов, т.е. амплитуды тока и времени пролета. Приемлемая техническая точность измерения тяговых параметров до 10% достигается в случае использования измерительных осциллографов с повышенной точностью измерения параметров, составляющей не менее 3%, длиной пролета частиц, превышающей 1 м, и других измерительных приборов не менее первого класса точности. Однако при низком уровне мощности и тяги двигателя данный метод является практически единственным для диагностики этих параметров.

Для проведения время-пролетных измерений была модернизирована высоковольтная система установки с разработкой электронного ключа руководителем приборного отдела НИО-208 А.А. Перцевым. Схема ключа была выполнена на базе пяти электронных ламп ГП-5 с высоким анодным напряжением и блока управления, состоящего из резис-

торного усилителя. При стационарной работе ток от высоковольтного источника подается на распыливающие электроды движительного модуля и на аноды электронных ламп. На сетках ламп поддерживается отрицательный потенциал -34 В, который запирает лампы, а при подаче импульса от генератора Г5-54 транзистор открывается, сетки ламп принимают потенциал катода, сопротивление электронных ламп резко падает и высоковольтный источник тока закорачивается на землю. Выполненные измерения с учетом шунтирующих сопротивлений и паразитных емкостей в используемой высоковольтной системе при включении электронного ключа показали, что ток эмиссии прекращается за 3—5 мкс.

Экспериментальные измерения время-пролетного следа пучка заряженных частиц были выполнены при испытании модуля коллоидного двигателя. Модуль разработан при использовании эмиссионной ячейки с повышенной тягой по сравнению с капиллярным распылителем, имеющим более низкую тягу. Такая ячейка рекомендована для разработки конструкций коллоидных электроракетных двигателей космических микроаппаратов [5]. Конструкция разработанного лабораторного макета коллоидного двигательного модуля показана на рис. 3,

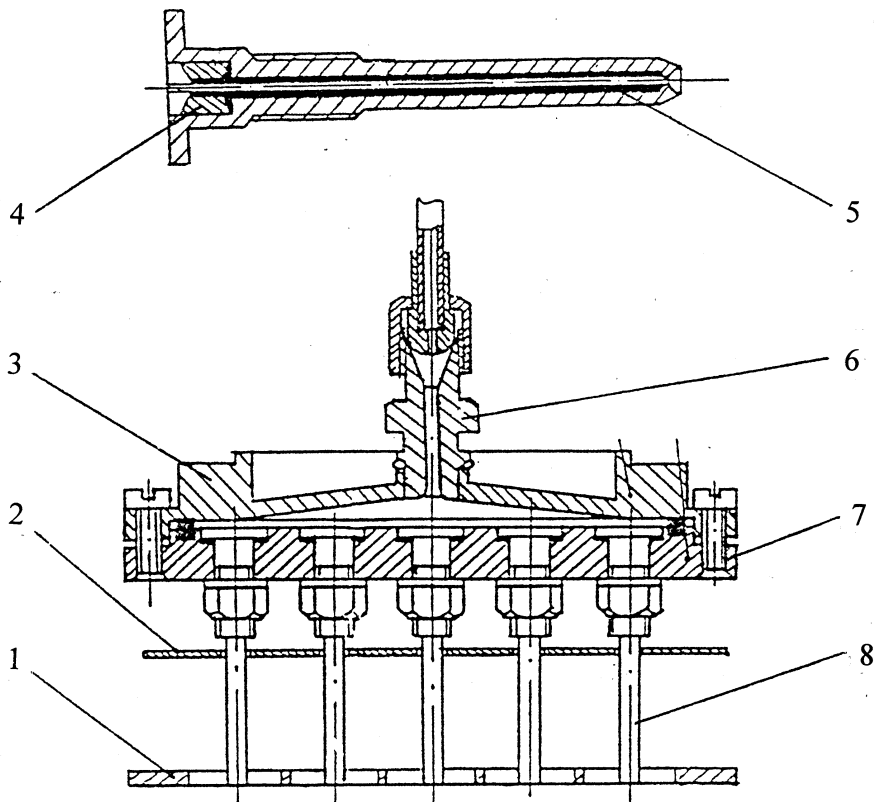


Рис. 3. Конструкция модуля коллоидного двигателя:

- 1 — вытягивающий электрод; 2 — электростатический экран; 3 — крышка;
4 — центровочная втулка; 5 — капиллярная трубка; 6 — штуцерный ввод жидкости; 7 — корпус источника; 8 — распыливающий электрод

а внешний вид — на рис. 4. Модуль содержит 18 работающих эмиссионных ячеек с диаметром кромок распыливающих электродов 2 мм. Диаметр отверстия вытягивающего электрода 14 мм, шаг

— на рис. 6. Общее время измеренного следа, от момента отсечки напряжения распыления до завершения перехода частиц на коллектор, составляет около 70 мкс, дисперсия по удельному заряду находится в пределах 10^3 — 10^5 Кл/кг, а среднее зна-

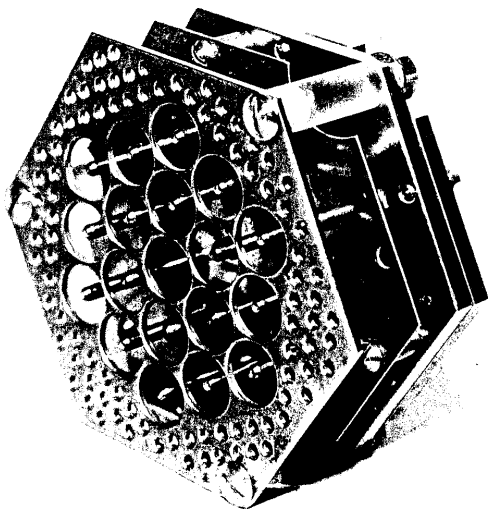


Рис. 4. Внешний вид модуля коллоидного двигателя

гексагонального размещения 15 мм и толщина перемычки 1 мм. В модуле центральная ячейка работает нестабильно, поэтому не используется, и в дальнейшем в ней может быть размещен электронный нейтрализатор. Модуль имеет коллектор рабочего тела и входной штуцер с диаметром проходного сечения 2 мм. Габаритные размеры модуля 107×70 мм, диаметр выходящего пучка 75 мм. Над модулем проделана большая доводочная и экспериментальная работа по улучшению технологического процесса изготовления и повышению эмиссионных параметров.

Осциллограмма следа представлена на рис. 5, а обработанные данные по удельному заряду частиц

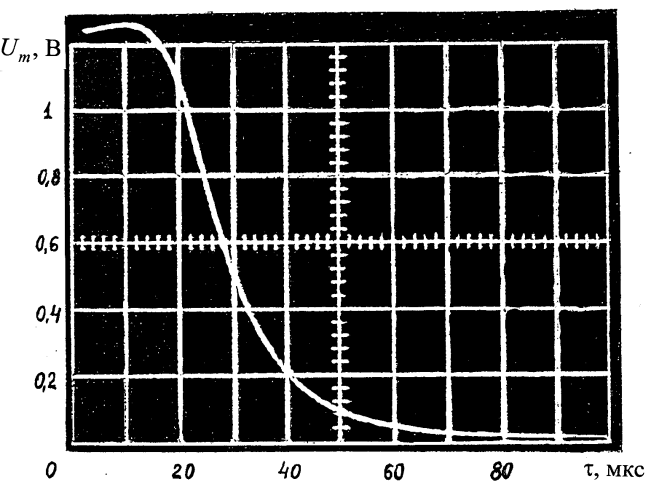


Рис. 5. Осциллограмма время-пролетного следа пучка заряженных частиц:

$I_0 = 410$ мкА; $U_1 = +11,1$ кВ; $U_2 = -50$ В; $U_3 = +150$ В

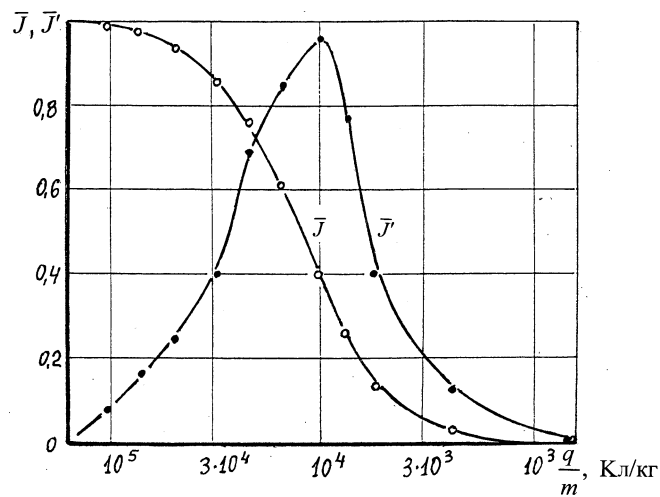


Рис. 6. Удельный заряд измеренных частиц модуля коллоидного двигателя ($\bar{q}/m = 10^4$ Кл/кг)

чение — 10^4 Кл/кг. Экспериментальные данные по кинетическому коэффициенту полезного действия модуля, снятые при больших и малых расходах рабочего тела, даны на рис. 7. При невысоких значениях среднего удельного заряда 400—700 Кл/кг и среднеимпульсной скорости 2.8—4.1 км/с кинетический коэффициент полезного действия изменяется в пределах 0.55—0.67. Причем видна тенденция повышения экономичности при росте интен-

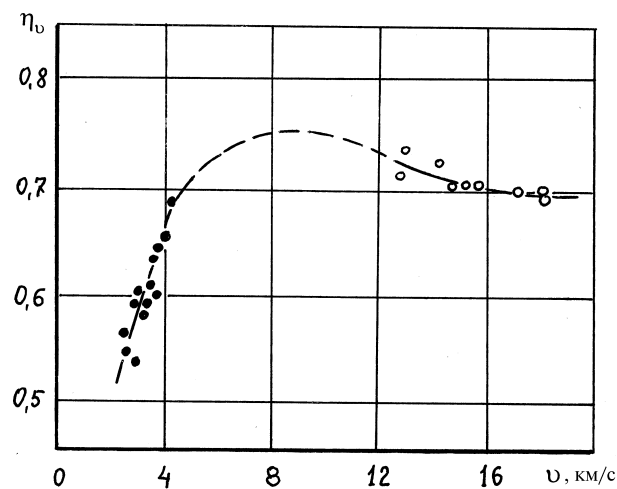


Рис. 7. Кинетический коэффициент полезного действия модуля коллоидного двигателя:

••• — эксперимент № 223, 226;
 ○○○ — эксперимент № 229, 230

сивности процесса распыления рабочего тела, т.е. удельного заряда капель. Действительно, при более низких расходах жидкости скорость истечения увеличивается до 13—18 км/с, а кинетический коэффициент полезного действия возрастает до 0.69—0.73. Экстраполируемый максимум эффективности 0.75 в области скоростей истечения 7—10 км/с необходимо дополнительно исследовать на основе физико-технических представлений о механизмах процесса распыления жидкости в электрическом поле, рассмотренных в работах [6, 7].

В экспериментальных условиях при вакууме около 10^{-2} Па были определены тяговые параметры модуля с использованием время-пролетного спектрометра, которые приведены на рис. 8. Экспериментальные данные снимались при уменьше-

нными при измерении вольт-амперных характеристик высоковольтного разряда в эмиссионных единичных ячейках.

Выводы

1. Время-пролетный спектрометр позволяет получить большой объем экспериментальной информации о неоднородности электростатического диспергирования рабочей жидкости и кинетического коэффициента полезного действия коллоидного двигателя.

2. Кинетический коэффициент полезного действия двигателя зависит от неоднородности удельного заряда частиц при электростатическом распылении жидкости и в настоящее время по измерен-

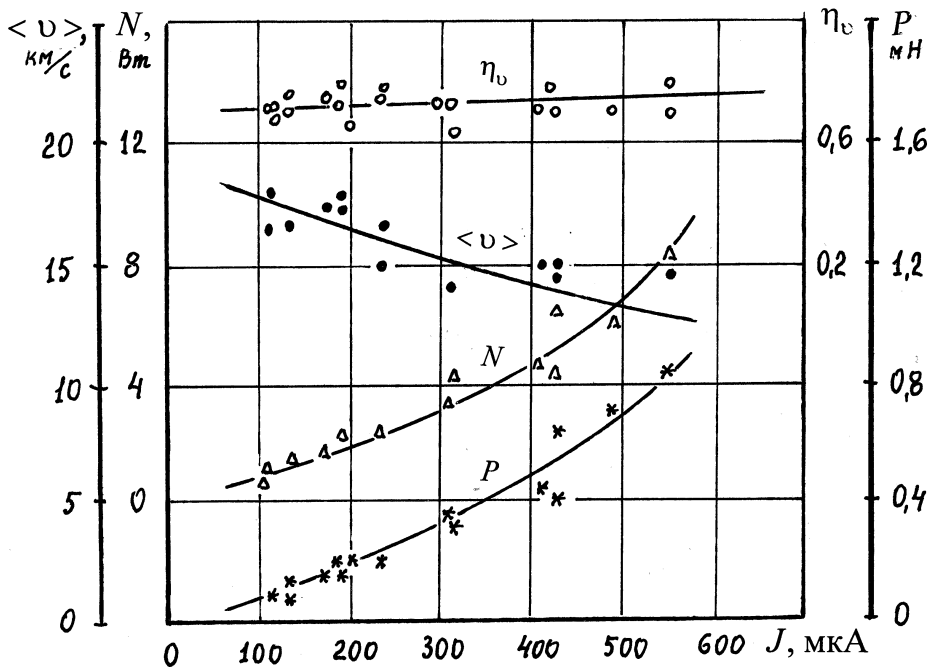


Рис. 8. Экспериментальные параметры модуля коллоидного двигателя. Эксперимент № 229, 230. Проходной канал в эмиссионных электродах — кольцевая щель $\varnothing 0,17 \times 0,31$ мм; $\Delta p = 30$ мм рт.ст.

нии поперечного сечения капиллярного канала диаметром 0.31 мм распыливающих электродов постановкой дроссельной проволоки диаметром 0.17 мм с образованием кольцевой щели около 70 мкм и при перепаде давления $4 \cdot 10^2$ Па. При радиальном зазоре в электронной оптике эмиссионной ячейки 6 мм и средней напряженности поля до $3 \cdot 10^6$ В/м ток эмиссии регулировался в пределах $(1 \div 5.5) \cdot 10^{-4}$ А, а мощность — $(1 \div 8)$ Вт. При этом тяга изменялась $(1 \div 8) \cdot 10^{-4}$ Н, удельный импульс — $(1.2 \div 1.7) \cdot 10^4$ Н·с/кг, а кинетический коэффициент полезного действия — 0.7—0.75. Электрические параметры модуля согласуются с данными, полу-

ченным экспериментальным данным изменяется в пределах 0.55—0.75.

3. Полученные результаты свидетельствуют о значительных потенциальных возможностях дальнейшего повышения эффективности преобразования подведенной электрической энергии в тяговую энергию пучка двигателя с перспективой достижения 0.8—0.9.

4. Практическая реализация этих возможностей зависит главным образом от исследования условий выравнивания неоднородности рабочего процесса получения заряженных частиц и физико-технических свойств используемой жидкости двигателя.

Библиографический список

1. *Baily A.J.* Investigation of a single spraying site of a colloid thruster // Journal of physics. D: Applied physics. 1973. Vol. 6. №2. P. 276—288.
2. *Kidd P.W.* et al. A Comparison of time-of-flight and thrust stand data for two 100 lb colloid thrusters // AIAA Paper. 1970. No.1114.
3. *Lear* et al. Thrust density colloid source development // AIAA Paper. 1971. № 694.
4. *Mahdavi M.* et al. Developments in a linear slit colloid thruster // Propulsion électrique applications spatiales journées etud. Toulouse. 1972. P. 133—143.

5. *Штырлин А.Ф.* Коллоидные электроракетные двигатели для космических микроаппаратов // Нано-микросистемная техника. 2006. №9. С. 43—47.

6. *Штырлин А.Ф.* Исследование физического механизма электростатического распыления жидкости с ионной проводимостью // Электричество. 2006. №12. С. 51—57.

7. *Штырлин А.Ф.* Эмиссия тока при электростатическом распылении жидкостей с ионной проводимостью // Электричество. 2007. №7. С. 60—66.

Московский авиационный институт
Статья поступила в редакцию 29.09.2008