

# УСКОРЕНИЕ ПУЧКА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОЛЛОИДНОГО ЭЛЕКТРОРАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

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 180 научных работ. E-mail: k.208@mai.ru

Alexander F. SHTYRLIN, Ph.D., was born in 1929, in Baku. He is a Senior Research Associate at the MAI. His research interests include colloidal electrojet engines as well as devices based on these engines for aeronautical, space and terrestrial applications. He has published 180 technical papers. E-mail: k.208@mai.ru

*Рассмотрены необходимые условия достижения в двигателе скорости истечения рабочего тела от 3 до 30 км/с. Движение заряженных частиц в пучке исследовано по распределению электростатического поля в межэлектродном пространстве единичной ячейки двигателя. Эффективность двигателя определена расчетным путем по энергетическому коэффициенту полезного действия. При использовании напряжения от 3 до 30 кВ энергетическая эффективность процесса ускорения изменяется в пределах 0,5–0,9.*

*Necessary conditions are examined to achieve thruster working medium velocity in the range from 3 to 30 km/sec. Charged particles motion in the thruster beam was studied according electric field distribution in the single thruster cell volume. Thruster effectiveness is estimated numerically taking into account its energetic efficiency. It is found out that for voltage varied from 3 to 30 kV the acceleration efficiency is changed in the range from 0,5 to 0,9.*

**Ключевые слова:** коллоидный двигатель, ускорение рабочего тела, высокое напряжение, энергетическая эффективность.

**Key words:** colloid thruster, working medium acceleration, high voltage, energy efficiency.

Работа коллоидного двигателя (КД) основана на трех физических процессах: электризации нейтральной рабочей жидкости с разделением образованием заряженных частиц обоого знака, ускорении частиц в электрическом поле до высокой скорости и нейтрализации заряда в выходящей струе двигателя. По классификации ракетных двигательных

установок этот двигатель относится к электростатическому типу ЭРД. В настоящее время используется наиболее простая схема КД, выполненная при использовании униполярно заряженных положительных частиц и электронной нейтрализации заряда пучка, которая показана в схеме единичной эмиссионной ячейки на рис. 1. В эмиссионный

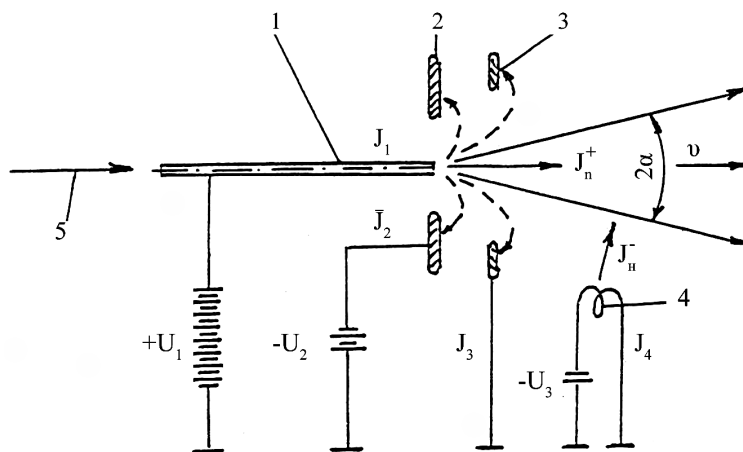


Рис. 1. Схема единичной ячейки коллоидного электроракетного двигателя:  
1 — эмиссионный электрод; 2 — вытягивающий электрод; 3 — экранирующий электрод;  
4 — электронный нейтрализатор; 5 — распыляемая жидкость

электрод по капиллярному каналу подается концентрированный раствор иодида натрия в глицерине, а на острых краях с высокой напряженностью электростатического поля происходит образование жидких положительно заряженных частиц. В межэлектродном промежутке осуществляется их ускорение, а на выходе из ускорителя — нейтрализация, например при термоэмиссии электронов из нагретой вольфрамовой нити.

Ускорение заряженных частиц осуществляется в электрическом поле в соответствии с уравнением движения частиц, которое в дифференциальной форме записывается в виде

$$m \cdot \left( \frac{d\vec{v}}{d\tau} \right) = q \cdot \vec{E}. \quad (1)$$

Для частного случая, когда частицы имеют стабильные параметры, а электрическое поле однородно, скорость истечения частиц из двигателя определяется по формуле

$$v_{\text{дв}} = \left( 2 \cdot \eta_{\text{дв}} \cdot \frac{q}{m} \cdot U \right)^{0,5}, \quad (2)$$

где  $\eta_{\text{дв}}$  — тяговый коэффициент полезного действия двигателя;  $q/m$  — удельный заряд частиц;  $U$  — напряжение ускорения.

Из формулы видно, что потенциальная энергия электрического поля преобразуется в кинетическую энергию частиц, приращение скорости которой зависит только от удельного заряда частиц и пройденной разности потенциала поля. Главной особен-

ностью КД является использование многозарядных наноразмерных жидких частиц и высокого напряжения ускорения. Коллоидный электроракетный двигатель по скорости истечения занимает промежуточное положение между электротермическими и ионными двигателями.

Взаимосвязь главных параметров двигателя — скорости истечения, напряжения ускорения и удельного заряда частиц — показана на рис. 2. На графике выделена заштрихованная область, которая представляет собой наиболее реальную и оптимальную зону достижимых рабочих параметров двигателя. Коллоидный двигатель является высоковольтным техническим устройством, и для его работы необходимо электрическое ускоряющее поле с разностью потенциалов 10—100 кВ. Электрический метод распыления жидкости обеспечивает получение тяжелых заряженных частиц с удельным зарядом до  $10^3$ — $10^4$  Кл/кг [1]. В этих условиях возможно достижение скорости истечения рабочего тела в пределах 3—30 км/с, причем нижний диапазон с 3 до 17 км/с уже получен экспериментальным путем при испытании лабораторных моделей КД. Работа двигателя возможна и при других параметрах удельного заряда частиц и ускоряющего напряжения, но при одновременном снижении тяговых характеристик, энергетической экономичности или надежности работы двигателя.

При работе двигателя всегда небольшая часть тока из рабочего объема пучка попадает на вытягивающий и экранный электроды ионно-оптической системы. Наличие этого тока приводит к эро-

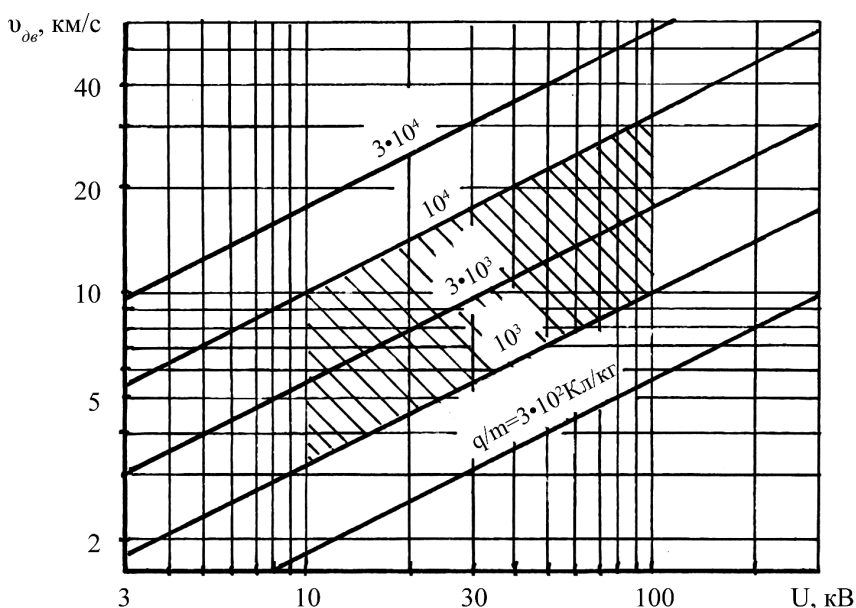


Рис. 2. Зависимость скорости истечения рабочего тела двигателя от удельного заряда частиц и напряжения ускорения (тяговый коэффициент полезного действия двигателя  $\eta_{\text{дв}} = 0,5$ )

зии электрода, что наряду с другими факторами снижает ресурс системы и создает дополнительные энергетические потери, уменьшающие энергетический коэффициент полезного действия. Изучение физического механизма этого явления, баланса протекающих токов и выработка рекомендаций для уменьшения тока на ускоряющий электрод выполнены в работе [2] при активном участии инженера группы В.К. Шинина. Составлен баланс токов на ускоряющем электроде, относительная величина которого от общего тока эмиссии равна

$$\bar{J}_{y,э} = \frac{J_{y,э}}{J_0} = \varepsilon(1+k_1^-) + n\sigma_{эф}\Delta x(1+k_2^-) + \xi k^+(1+k_3^-) + \bar{J}_{э,я}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon$  — коэффициент расфокусировки первичного пучка;  $n$  — концентрация нейтральных частиц в пучке;  $\sigma_{эф}$  — сечение перезарядки;  $\Delta x$  — длина пути первичных частиц;  $\xi$  — коэффициент захвата первичных частиц сеткой мишени;  $k^+$  и  $k^-$  — коэффициенты вторичной эмиссии;  $J_0$  — начальный ток пучка;  $\bar{J}_{э,я}$  — относительный ток утечки электроизоляции ячейки.

Фокусировка первичного пучка зависит от формы эмиттера, распределения электрического поля по его поверхности и массового расхода рабочего тела. Результаты моделирования электрического поля единичной эмиссионной ячейки, которые выполнены по опубликованной методике работы [3], представлены на рис. 3. Наибольший ток пучка достигается при эмиссии частиц с острия кромки, т.е. с зоны наибольшей напряженности поля. Управлять положением зоны эмиссии можно, изменяя массовый расход. По экспериментальным данным при удельном объемном расходе рабочего тела на кромке единичного распылителя, превыша-

ющим  $(1 \div 2) \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$ , большая часть пучка сосредоточена в конусе с половиной угла при вершине  $35^\circ$  [4]. Ток вторичных положительных ионов из объема пучка зависит от концентрации нейтральной компоненты в пучке, сечения перезарядки и размеров зоны образования вторичных ионов. Траектории вторичных положительных ионов показаны пунктирными линиями. Частицы, образовавшиеся во внешней области пучка (траектории 1, 2, 3) и во внутренней области (траектории 6, 7, 8), не попадают на вытягивающий электрод, так как отражаются полем распыливающего электрода во внешнее пространство. На вытягивающий электрод попадают только частицы, образовавшиеся во внутренней области отрицательного потенциального барьера (траектории 4, 5).

Узел мишени является источником загрязнения вакуумной камеры и модуля вторичными нейтральными и заряженными частицами. Согласно данным, приведенным в работах [5, 6], коэффициент вторичной эмиссии положительных частиц достигает 1, а отрицательных, в зависимости от энергии, в пределах 2,5—11,5. Наиболее эффективным средством уменьшения влияния мишени на работу модуля является применение сотовой конструкции коллектора, двух сеток и максимально возможное их удаление от исследуемой конструкции источника [7]. По результатам измерения фоновый ток в радиальном зазоре и ток утечки по изолятору без подачи рабочего тела при напряжении в зазоре 22 кВ сначала достигает 3 мкА, а затем после «тренировки» поверхности снижается до 0,5 мкА. Относительный ток утечки по изоляции ячейки не превышает 0,01, поэтому в расчетах им можно пренебречь.

Образующаяся на вытягивающем электроде тонкая пленка рабочего тела при бомбардировке первичными частицами и вторичными положительными

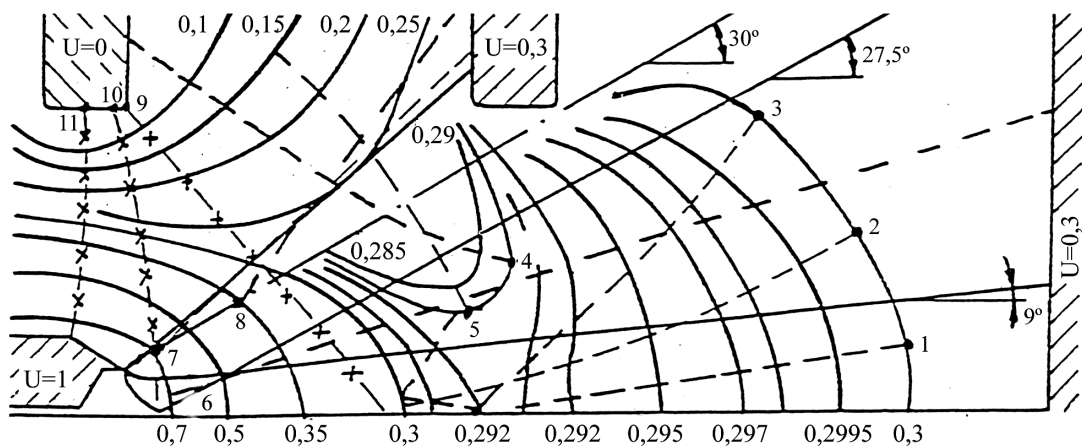


Рис. 3. Распределение потенциала электрического поля и траектории частиц в межэлектродном пространстве единичной ячейки двигателя

ми ионами является заметным источником вторичных отрицательных ионов, что приводит к повышению энергетических потерь в рабочем цикле двигателя. Наличие загрязняющей пленки на вытягивающем электроде определяется также способом запуска источника. Различают два вида запуска: «мокрый запуск» — когда сначала подается рабочее тело, а затем включается высоковольтный источник; «сухой запуск» — сначала напряжение, а затем рабочее тело. В первом случае крупные капли при включении высоковольтного источника попадают на поверхность вытягивающего электрода и загрязняют его, а во втором случае пучок всегда сфокусирован и поверхность электрода остается сухой и чистой. Влияние способа запуска на относительную величину тока на вытягивающем электроде модульного источника, состоящего из 18 эмиссионных ячеек, показано на рис. 4. В зависимости от тока эмиссии относительная доля тока на вытягивающем электроде имеет минимальное значение. В исследуемом диапазоне эмиссионного тока (100—800 мкА) наименьшие значения тока на электроде составляют 1—3%, а наибольшие достигают 8%.

Рассматривается схема двигателя, состоящая из униполярного пучка заряженных частиц с электронной системой нейтрализации. Энергетический коэффициент полезного действия двигателя представляет отношение энергии выходящего пучка  $W_{\text{п}}$  к подводимой электрической энергии от блока преобразования  $W_{\text{пр}}$  и равен

$$\eta_0 = \frac{W_{\text{п}}}{W_{\text{пр}}} = \frac{W_{\text{п}}}{W_{\text{п}} + W_{\text{и}} + W_{\text{у}} + W_{\text{н}}}, \quad (4)$$

где  $W_{\text{и}}$  — затраты энергии на ионизацию;  $W_{\text{у}}$  — потери энергии в системе ускорения;  $W_{\text{н}}$  — затраты энергии на нейтрализацию.

Энергетический баланс составлен для наиболее типичной трехэлектродной одноступенчатой схемы ускорения коллоидного движителя. К распыливающему электроду приложено высокое напряжение положительной полярности, а к вытягивающему электроду — отрицательной полярности для создания потенциального барьера и предотвращения перехода электронов из области нейтрализации на распыливающий электрод, а экранирующий электрод, который экранирует рабочий тракт от внешних воздействий, соединяется с общей массой установки. Электрическая компенсация положительно заряженного пучка частиц осуществляется эмиссией электронов из нейтрализатора. Небольшая часть заряженных частиц попадает на ускоряющий и экранирующий электроды.

С учетом всех затрат и потерь энергии в этой схеме двигателя энергетический коэффициент полезного действия записывается в виде

$$\eta_0 = \frac{(J_1 - J_2 - J_3) \left( U_1 - \frac{W_{\text{и}}}{J_1} \right)}{J_1 U_1 + J_2 U_2 + (J_1 - J_2 - J_3) \frac{W_{\text{н}}}{J_1}} =$$

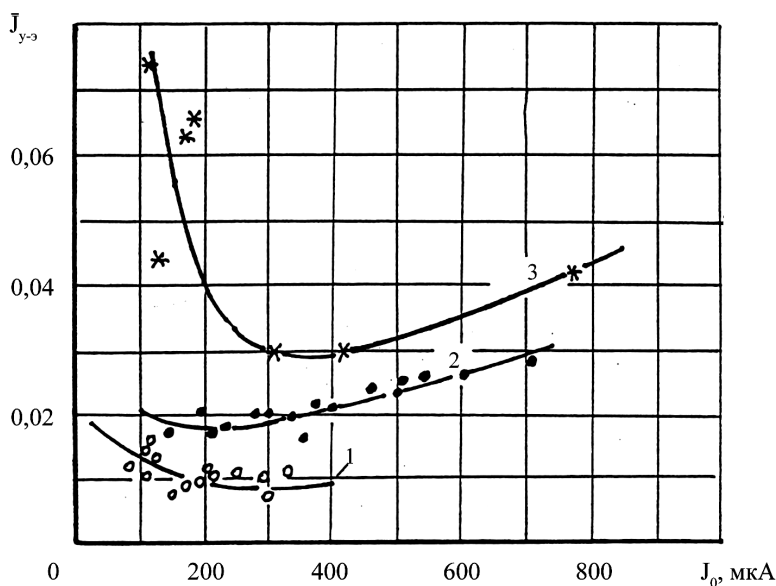


Рис. 4. Зависимость относительной доли тока на вытягивающем электроде от условий запуска модуля коллоидного двигателя:

- $n = 18$  ячеек  $\circ \circ \circ$  — «сухой» запуск (эксперимент №223);
- $d_{\text{кр}} = 2$  мм  $\bullet \bullet \bullet$  — «мокрый» запуск (эксперимент №215);
- $d_{\text{др}} = 0,17$  мм  $* * *$  — «мокрый» запуск с экраном (эксперимент №229)

$$= \frac{\left(1 - \frac{J_2}{J_1} - \frac{J_3}{J_1}\right) \cdot \left(U_1 - \frac{W_{и}}{J_1}\right)}{U_1 + \frac{J_2}{J_1} U_2 + \left(1 - \frac{J_2}{J_1} - \frac{J_3}{J_1}\right) \frac{W_{н}}{J_{п}}}. \quad (5)$$

Результаты расчета по этой формуле, выполненные при  $U_2 = -2$  кВ;  $J_2/J_1 = 0,03$ ;  $J_3/J_1 = 0,02$ ;  $W_{и}/J_1 = 1000$  В и  $W_{н}/J_1 = 1000$  В, представлены на рис. 5. При ускоряющем напряжении от 3 до 10 кВ энергетический коэффициент полезного действия составляет 0,47—0,78, затем он возрастает и в современном рабочем диапазоне ускоряющих напряжений от 10 до 30 кВ достигает 0,78—0,88, а при увеличении напряжения до 100 кВ увеличивается до 0,95. Относительные составляющие энергетического баланса двигателя в зависимости от напряжения в рабочем цикле двигателя также приведены на этом рисунке. Видно, что при напряжениях до 3 кВ доля

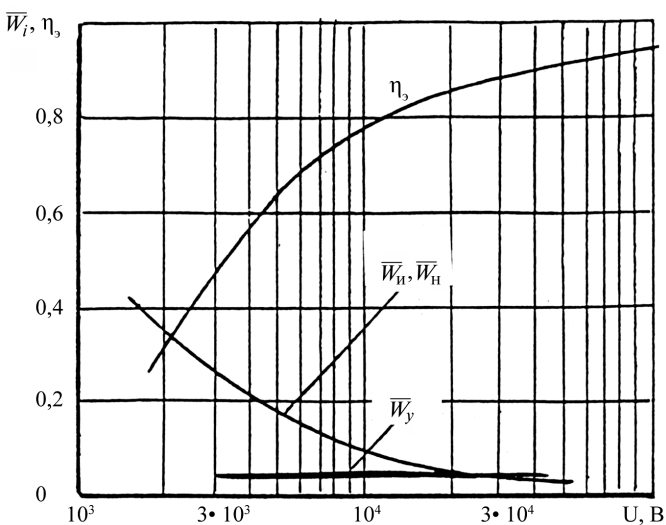


Рис. 5. Энергетический коэффициент полезного действия двигателя и относительные составляющие потерь

энергетических потерь на осуществление процессов ионизации и нейтрализации снижает эффективность двигателя до очень низких и практически неприемлемых значений. При использовании напряжений более 100 кВ доля потерь в системе ускорения будет увеличиваться, что приведет к снижению энергетического коэффициента полезного действия двигателя.

## Выводы

1. Коллоидный электроракетный двигатель является высоковольтным техническим устройством, в котором потенциальная энергия электростатического поля канала ускорения определяет скорость

истечения рабочего тела и энергетическую эффективность двигателя.

2. При использовании наноразмерных частиц с удельным зарядом  $10^3$ — $10^4$  Кл/кг, полученных электрическим распылением жидкостей с ионной проводимостью, и ускоряющего напряжения 10—100 кВ возможно ускорение рабочего тела двигателя в пределах 3—30 км/с.

3. В диапазоне ускоряющих напряжений 10—30 кВ эффективность коллоидного двигателя, оцениваемая энергетическим коэффициентом полезного действия, достигает высоких значений и находится в пределах 0,8—0,9.

## Библиографический список

1. Штырлин А.Ф. Формирование униполярного электрического заряда в электростатическом источнике жидких частиц коллоидного электроракетного двигателя // Вестник Московского авиационного института. 2008. Т. 15. №4. С. 126—138.
2. Штырлин А.Ф., Шинин В.К. Исследование токов на ускоряющем электроде модульного источника тяжелых заряженных частиц // Тематический сборник научных трудов МАИ. 1986. №208-288-9. С. 67—71.
3. Чуян Р.К. Аналоговое моделирование физических полей и систем в двигателях летательных аппаратов — М.: МАИ, 1982.
4. Штырлин А.Ф. Фокусирующие свойства единичной эмиссионной ячейки коллоидного электроракетного двигателя // Вестник Московского авиационного института. 2008. Т. 15. №5. С. 95—100.
5. Штырлин А.Ф., Шинин В.К. Вторичная эмиссия при бомбардировке поверхности мишени жидкими заряженными частицами // Тематический сборник научных трудов МАИ. 1985. №208-288-46. С. 47—51.
6. Штырлин А.Ф. Взаимодействие ускоренных жидких заряженных макрочастиц с поверхностью мишени // XV Международная конференция «ВИП-2001». 27—1 августа 2001. Звенигород. Т. 2. С. 96—100.
7. Cox J.E., Kidd P.W. Effects of long term operation of advanced colloid engine performance // 11th Electric propulsion conference: March 19 — 21, 1975, New-Orleans. AIAA Paper. 1975. №393. 12 p.

Московский авиационный институт  
Статья поступила в редакцию 01.06.2009