

УДК 533.9.07

**ПОВЫШЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ИМПУЛЬСА ИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ  
ЗОННОЙ ИНЖЕНЕРИЕЙ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ПОЛЕВОГО КАТОДА****Н.И. Петров<sup>1,2</sup>, Т.Л. Антонова<sup>2</sup>**<sup>1</sup> *Мытищинский филиал Национального исследовательского Московского государственного строительного университета*<sup>2</sup> *Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева*

С быстрым развитием космической техники масштабы освоения космоса человечеством значительно расширяются. Тем не менее растущие потребности в полетах в дальний космос не могут быть удовлетворены с помощью обычных химических двигателей. Таким образом, ясной становится потребность в новых механизмах обеспечения реактивной тяги, включая электрические двигатели. Технология электрического движения имеет значительные преимущества перед традиционными химическими двигателями в полете в глубоком космосе благодаря своим характеристикам, таким как высокий удельный импульс, малые размеры, длительный срок службы. Негативной особенностью электрических двигателей можно назвать малую тягу, однако, во-первых, в открытом космосе это несущественно и во-вторых, тягу электрических двигателей можно существенно увеличить, и для этого существуют резервы, доступные на современном уровне развития техники. Пути повышения тяги электрических ионных двигателей будут детально изложены и обсуждены в настоящей работе. Рост мощности ионных двигателей ограничивается в значительной мере эрозией управляющих сеток, поток ионов поражает поверхность твердого материала управляющего сеточного электрода энергичными ионами и постепенно приводит к выходу из строя этого электрода. В данной работе показано, что использование полевой эмиссии как источника ионизирующих рабочее тело пучков электронов, способно решить проблему эрозии управляющих электродов, за счет чего можно будет существенно поднять напряженности рабочих полей для ионных двигателей, что в свою очередь, позволит увеличить удельный импульс, эффективность, скорость истечения и мощность ионного двигателя в целом.

*Ключевые слова:* электрические двигатели, повышение тяги, спутники длительных миссий, нанотехнологии, полевой эмиссионный катод, космические аппараты.

DOI: 10.17212/1727-2769-2020-4-41-50

**Введение**

В последние месяцы 2020 года на Землю вернулась спускаемая капсула японского зонда Хаябуса-2, эта миссия знаменует собой уже ставший почти рутинным забор образцов грунта с астероидов. Такая миссия стала возможной из-за превосходных рабочих характеристик ионных двигателей, как иллюстрацию этого тезиса можно привести дальнейшую судьбу зонда Хаябуса-2 – он отправился в следующую миссию, его ресурс не израсходован полностью. Ионные двигатели – это будущее космонавтики за пределами земной орбиты. Россия тут на переднем крае уровня техники с разрабатываемым проектом транспортно-энергетического модуля «Ядерным Буксиром». Двигателем для нового слова в космической технике будет ионный привод ИД-500 [1].

За последние десятилетия по всему миру было разработано и используется в космических полетах множество типов электрических двигателей [2]. Электрические двигательные установки в основном можно разделить на три класса: электротермические, электростатические и электромагнитные. Среди них ионные

двигатели Холла и решетчатые ионные двигатели являются наиболее передовыми и зрелыми технологиями. Обычно для этих двигателей малой тяги требуются источники электронов, катоды для подачи первичных электронов в разрядную камеру ионного двигателя малой тяги, нейтрализаторы радиочастотного (ВЧ)/микроволнового разряда для подачи свободных электронов для нейтрализации ионов в шлейфе. Кроме того, все большее внимание привлекают небольшие космические аппараты и спутники длительных миссий, которым необходим длительный ресурс маневрирования (например, Хаябуса [3] и Хаябуса-2 [4]).

Небольшие космические аппараты или спутники очень эффективны для выполнения дистанционного зондирования Земли, точного земледелия, мониторинга эрозии и загрязнения моря, точного прогнозирования погоды и так далее. Кроме того, небольшие космические корабли или спутники также могут быть эффективно использованы для исследования нашей Солнечной системы и за ее пределами. С другой стороны, растущий рынок малых космических аппаратов определяет даже более строгие требования к источникам электронов с малым весом и низким энергопотреблением. Большинство предыдущих источников электронов — это термоэлектронные и полые катоды, обеспечивающие более высокий электронный ток [5–7]. Однако для генерации свободных электронов в таких катодах необходимо нагревательное устройство, что приводит к повышенному энергопотреблению и тепловой нагрузке. Кроме того, потребность в дополнительных энергопомощностях также приводит к повышенной массе и сложной системе поддержки космического аппарата, что создает дополнительную нагрузку в космических полетах.

Автоэмиссионные катоды, или катоды с полевой эмиссией (FEC), представляют собой многообещающую альтернативу из-за следующих преимуществ: в FEC не расходуется топливо и можно увеличить импульс, характерный для всей системы; снижение требований к мощности двигательной установки. В частности, FEC на основе углеродных нанотрубок (УНТ) стали популярными в последние десятилетия и продемонстрировали множество возможностей применения [8] в инструментах рентгеновской визуализации [9], компактной масс-спектрометрии [10], вакуумных ламп [11].

Нанотехнологии очень полезны для будущих перспективных, адаптивных космических аппаратов. В этой статье наша цель — не расширять круг предыдущих обсуждений, а сосредоточить внимание на прогрессе в области применения CNT-FEC, в частности в космических электрических двигательных системах для использования в качестве нейтрализатора космического аппарата или источника электронов для ионизации рабочего тела.

## 1. Особенности теории полевой эмиссии

Чтобы высвободить электроны, захваченные внутри твердого материала (например, полупроводника или металла), можно использовать два метода: один добавляет энергию захваченным электронам, а другой уменьшает высоту и ширину потенциального барьера на границе твердое тело/вакуум. В прошлом часто в приложениях, требующих эмиссии электронов, прибегали к термоэмиссии. При термоэлектронной эмиссии твердый материал нагревается до высокой температуры ( $>1000^{\circ}\text{C}$ ), электроны в этом твердом теле приобретают большую кинетическую энергию, поэтому захваченные электроны могут иметь достаточную энергию для преодоления потенциального барьера материала. При полевой эмиссии внешнее электрическое поле повышается до таких значений, что потенциальный барьер твердое тело/вакуум истончается, теряет свою высоту, при этом электроны из твердого тела могут туннелировать сквозь этот барьер непосредственно в вакуум.

Квантовомеханическое явление туннелирования электронов в вакуум при автоэлектронной или полевой эмиссии, по мнению многих исследователей, для применений в ионных двигателях космических аппаратов может иметь качественное преимущество перед катодами на термоэмиссии, преимущество, обусловленное невозмущенным спектром носителей заряда, эмитируемых в вакуум. Если в случае термоэмиссии носители будут иметь распределение по энергиям, описываемое приближением максвеллова распределения, независимо от природы твердого тела, служащего материалом катода, то в случае полевой эмиссии спектр распределения носителей будет в значительной степени определяться спектром носителей в твердом теле [12].

Упрощенно можно сказать, что спектр эмитированных носителей будет представлять собой спектр энергораспределения носителей в твердом теле после воздействия на него оператора туннельной прозрачности (вероятности туннелирования через треугольный барьер на границе твердое тело/вакуум). Это явление даже можно использовать для экспериментальной фиксации особенностей спектра носителей в твердом теле по виду вольт-амперных характеристик полевой эмиссии. Также это явление имеет полезное в рамках обсуждаемого подхода следствие: манипулируя видом спектра носителей заряда твердого тела, можно изменять спектр эмитированных электронов [13].

## 2. Характеристики полевой эмиссии на основе углеродных нанотрубок

Используя вышеупомянутые описания, мы отмечаем, что для запуска процесса полевой эмиссии требуются высокие напряженности электрического поля. В последние десятилетия обычным способом получения сильного электрического поля было использование очень острого катода с диаметром острия в несколько сотен нанометров с использованием разработок в области микро- и нанотехнологий. Таким образом, сильное усиление поля может быть получено на острие электрода и, следовательно, внешнее электрическое напряжение запуска и извлечения может быть уменьшено до нескольких сотен вольт или даже меньше.

С 1960-х годов Spindt-катоды стали наиболее популярными и успешными катодами для автоэлектронной эмиссии, что во многом объясняется их интегрированностью в хорошо развитые микроэлектронные технологии (такие как фотолитография и пр.). Обычно для изготовления наконечников эмиттеров использовались молибден или вольфрам из-за их высокой температуры плавления. Но с развитием микроэлектроники в технологии изготовления преобладали эмиттеры с кремниевым наконечником, и во всем мире все больше и больше использовались массивы полевых катодов Spindt-типа [14]. До сих пор максимальный ток эмиссии от одного наконечника мог достигать 1 мА, а максимальная плотность тока превышала 2000 А/см<sup>2</sup> для FEC типа Spindt [15]. Однако с увеличением количества применений катодов типа Spindt в вакуумных электронных устройствах внутренние слабые места этого типа эмиттеров постепенно стали очевидными и привели к сбоям в эмиссии электронов, в частности в сложных плазменных средах. К этим недостаткам относятся следующие: эффективность излучения сильно зависит от качества самого острого наконечника и со временем уменьшается, равномерность эмиссии электронов становится низкой, а частые катастрофические дуги вызывают локальное и сильное повышение температуры, которое может повредить все устройство [16].

Многослойная УНТ состоит из нескольких однослойных УНТ, вложенных друг в друга. Один атом углерода связан с тремя другими атомами углерода. Таким образом, энергия активации для поверхностной миграции атомов эмиттера очень велика и может выдерживать интенсивное внешнее электрическое поле,

необходимое для автоэлектронной эмиссии [17]. Электроны извлекаются из наконечников УНТ, кривизна наконечников может быть намного меньше, чем у обычных острых металлических наконечников. По сравнению с другими типами полевых эмиттеров УНТ обладает следующими свойствами [18]:

- отличная проводимость и рассеивание тепла;
- чрезвычайно большой модуль Юнга и максимальная прочность на разрыв ( $\sim 200$  ГПа);
- низкий коэффициент испарения, что очень полезно в качестве источника электронов, на который могут приходиться бомбардировки разных частиц;
- химически инертный материал, с которым затруднены химические реакции, за исключением экстремальных условий или высокой температуры;
- наноразмерное высокое соотношение сторон (может достигать  $10^5$ ), что приводит к сильному усилению поля на концах для облегчения полевой эмиссии.

Как правило, для синтеза УНТ часто используются химическое осаждение из паровой фазы (CVD) и метод дугового разряда. В частности, метод дугового разряда способствует получению УНТ с низким уровнем дефекта, улучшая характеристики автоэмиссии. Обратите внимание, что теория Фаулера–Нордхейма может частично описывать процесс полевой эмиссии из полевого эмиттера УНТ в определенном диапазоне тока, но не может объяснить, что порог эмиссии УНТ ниже, чем у обычных металлических эмиттеров, таким образом, полная теория полевой эмиссии из углеродных нанотрубок все еще исследуется.

### 3. Последние достижения CNT-FEC в космических двигателях

В 1995 г. было сообщено о характеристиках полевой эмиссии CNT. С тех пор во всем мире были предприняты многочисленные попытки применения CNTFEC. Интерес к использованию CFN-FEC в космических двигательных установках был заявлен в публикациях в начале двухтысячных годов [19]. В этом разделе мы конкретно резюмируем разработку двух типичных приложений: нейтрализатора или источника электронов потенциальных электрических двигательных систем.

CNT-FEC служит нейтрализатором космических силовых установок. В 2001 году Маррез–Ридинг и др. [20] из JPL продемонстрировали нейтрализацию заряда автоэмиссионного электрического двигателя (FEED) малой тяги с тремя источниками электронов: термоэлектронным катодом из смешанных металлов, CNT-FEC и катодом с полевой эмиссией из молибдена типа Spindt. Эксперименты показали, что CNTFEC может значительно снизить соотношение мощности к силе тяги на 50 % в условиях их испытаний, что в то время было очень вдохновляющим. FEC был выращен на кремниевой основе с помощью процесса CVD, который продемонстрировал 160 мкА при приложенном напряжении 380 В на электроде затвора с током 1,3 мА. Эффективность CNT-FEC лучше, чем у термоэмиссионного катода, нормированного на уровень тока, но во время испытаний он показал нестабильную работу, поскольку более чувствителен к условиям окружающей среды из-за процесса ионного распыления, возникающего вблизи наконечников.

В 2007 году Такао и др. [21] провели эксперимент по проверке возможности использования CNT-FEC в качестве нейтрализатора для малогабаритного ионного двигателя с микроволновым разрядом. Они изготовили два типа CNT-FEC: первый тип – это однослойные УНТ, медная пластина с цилиндрическим отверстием, заполненным однослойными УНТ (диаметром 2 мм и глубиной 0,5 мм); второй тип – графитовый диск диаметром 2 мм, погруженный в медную пластину. Эксперименты показали, что ток электронов 0,56 мА может быть достигнут с помощью

однослойных УНТ при приложенном напряжении 380 В и расстоянии между электродами 0,5 мм. Обратите внимание, что межэлектродный интервал сильно влияет на ток извлекаемых электронов во время испытаний, указывая на то, что однослойный катод из УНТ очень подходит для нейтрализатора для малогабаритного ионного двигателя микроволнового разряда, но приложенное напряжение может быть уменьшено из-за потери энергии. Кроме того, катод из графитового диска требует гораздо большего приложенного напряжения, чем однослойные УНТ, которое превышает 1500 В. Это связано с тем, что графитовый диск не обрабатывался дуговым разрядом.

Веласкес–Гарсия и Акинванде [22] из Массачусетского технологического института сообщили об испытании нейтрализатора на основе MEMS CNT для микродвигательных установок в 2007 году. CNT-FEC изготавливается с помощью технологии химического осаждения из паровой фазы, усиленной плазмой, которая позволяет им устанавливать небольшой и однородный интервал между эмиттером и сеткой, тем самым снижая необходимое напряжение для электронной эмиссии. ВАХ эмиттера были получены с использованием триодной конфигурации, максимальный ток затвора 2,1 мА был измерен при приложенном напряжении 375 В. Их эксперименты также подтвердили, что теория Фаулера–Нордхейма может в основном описывать электронную эмиссию из подложки УНТ.

В 2019 году Ямамото и др. [23] дополнительно исследовали демонстрацию CNT-FEC в качестве нейтрализатора для микроволнового ионного двигателя малой тяги. Размер FEC составляет  $88 \times 88 \text{ мм}^2$ , а максимальный ток эмиссии составляет 20 мА при разности потенциалов 500 В между сеткой затвора и эмиттером. CNT-FEC был установлен на расстоянии 20 см от ионного двигателя малой тяги. Он подтвердил, что эмиссионный ток от FEC хорошо сбалансирован с током ионного пучка из камеры двигателя. Слабым местом является очень высокая стоимость эмиссии электронов, которая достигает 360 Вт/А, что намного выше, чем у обычного полого катода ( $\leq 30 \text{ Вт/А}$ ). Однако общий удельный импульс системы в 1,25 раза выше, чем у обычной системы ионного двигателя малой тяги с собственными нейтрализаторами микроволнового разряда, кроме того, для CNT-FEC снижен расход рабочего тела, что является очень конкурентоспособным.

Как правило, причиной выбора CNT-FEC являются низкое напряжение извлечения, высокая эффективность извлечения электронов и долговечность. Эксперимент показал, что снижение плотности тока эмиссии помогает продлить срок службы FEC в течение 50 часов испытаний, а в течение 1500 часов работы не наблюдалось серьезных пробоев и коротких замыканий. К тому же срок службы FEC может быть даже больше, чем 1500 часов на реальной орбите из-за более низкой плотности газа. В 2017 году JAXA проводит на орбите демонстрацию CNT-FEC EDT на транспортном средстве H-II 6 (HIV-6) в Японии, миссия называется Kounotori Integrated Tether Experiment.

Стоит отметить, что HTV-6 был запущен в декабре 2016 года, а KITE – в январе 2017 года, после того как HTV-6 покинул Международную космическую станцию МКС. Рабочая орбита во время полета составляла около 370 км. Для подачи электрического тока через трос с начала 2013 года было разработано восемь CNT-FEC, которые были построены весной 2016 года. Устойчивость CNT-FEC к атомарному кислороду (АО) очень низкая. Поверхность эмиттера электронов летной модели устанавливалась параллельно оси орбитального движения, чтобы избежать прямого воздействия потока АО. Эксперимент JAXA показал, что все восемь CNT-FEC очень хорошо работают на орбите; общее время работы составляет 50 часов при общем времени воздействия 130 часов. Измеренные максимальные

ток эмиттера (эмиттер электронного тока из эмиттеров УНТ) и ток эмиссии (ток электронов, выводимый наружу) составляют 10 и 6 мА соответственно [24]. Кроме того, были записаны ВАХ одиночного FEC, полученные на различных этапах. Было обнаружено, что почти не изменились характеристики после 10 и 60 часов воздействия, что указывает на то, что CNT-FEC, по крайней мере, может работать в условиях облучения и плазмы  $1019 \text{ ат/см}^2$ . Отметим, что текущий эксперимент проводился на высоте 370 км, где плотность остаточного нейтрального газа намного выше нормальной орбиты спутников (около 600...1400 км).

#### 4. Выводы

CNT-FEC как многообещающий источник электронов хорошо зарекомендовал себя как идеальный кандидат в нейтрализатор космического аппарата и/или источник электронов для ионизации рабочего тела в космических электрических двигательных установках. Несмотря на то что было предпринято множество теорий, моделирования и экспериментов, многие аспекты все еще не полностью поняты, и необходимы дальнейшие усилия, прежде чем использовать CNT-FEC в качестве общего источника электронов в космической двигательной установке.

Мы обозначим некоторые существующие проблемы и возможные решения, а также прогнозируем дальнейшее потенциальное развитие технологии CNT в космических полетах. Теоретическая проблема: мы проиллюстрировали, что хорошо известная теория Фауллера–Нордхейма обычно используется для описания автоэмиссионного процесса. Фактически, многие предположения использовались для теории Фауллера–Нордхейма, так как электроны подчиняются распределению Ферми–Дирака, поверхность металла достаточно гладкая без учета шероховатости, потенциальный барьер создается поляризацией. Размер УНТ находится в наномасштабе, электроны в основном испускаются из их острых концов, поэтому предположение теории Фауллера–Нордхейма о плоской и гладкой эмиссионной поверхности больше не является справедливым в строгом смысле для эмиттеров УНТ. Новая теория требует дальнейшего изучения, чтобы лучше выразить процесс автоэлектронной эмиссии УНТ. Хотя теорию Фауллера–Нордхейма можно использовать в качестве инструмента проверки экспериментальных испытаний в определенном диапазоне токов с введением поправочного коэффициента, учитывающего кривизну острия эмиттера.

Из-за ограниченности технологий изготовление одной УНТ очень сложно, вместо этого изготавливается связка УНТ, что приводит к так называемому пределу пространственного заряда. В одной и той же среде длина двух соседних УНТ может быть разной, поэтому только несколько самых длинных УНТ будут излучать электроны после приложения внешнего сильного электрического поля, что влияет на эффективность и однородность излучения. Эта проблема должна быть решена еще на стадии изготовления. В прошлом для изготовления УНТ использовалось множество подходов, таких как узорчатый рост пучков УНТ с помощью химического осаждения из паровой фазы на полупроводниковых или металлических подложках и узорное электрофоретическое осаждение красок на основе УНТ. Или некоторые недавние подходы, такие как трафаретная печать и так далее. Помимо эффективности выбросов, высокая эффективность извлечения также направлена на дальнейшее снижение мощности, потребление и подавление тепловой нагрузки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Development of ion thruster IT-500 / A.S. Koroteev, A.S. Lovtsov, V.A. Muravlev, M.Y. Selivanov, A.A. Shagayda // *The European Physical Journal D*. – 2017. – Vol. 71. – P. 120. – DOI: 10.1140/epjd/e2017-70644-6.
2. Review of multimode space propulsion / J.L. Rovey, C.T. Lyne, A.J. Mundahl, N. Rasmont, M.S. Glascock, M.J. Wainwright, S.P. Berg // *Progress in Aerospace Sciences*. – 2020. – Vol. 118. – P. 100627.
3. Special issue “Science of solar system materials examined from Hayabusa and future missions (II)” / T. Okada, R.P. Binzel, H.C. Connolly, T. Yada, K. Ohtsuki // *Earth, Planets and Space*. – 2017. – Vol. 69. – P. 31. – DOI: 10.1186/s40623-017-0617-3.
4. Sarli B.V., Yuichi T. Hayabusa 2 extension plan: Asteroid selection and trajectory design // *Acta Astronautica*. – 2017. – Vol. 138. – P. 225–232.
5. Cherkun O., Demet U. Cesium hollow cathode with internal discharge and gas feed for electric propulsion applications // *The 35th International Electric Propulsion Conference*. – USA: Georgia Institute of Technology, 2017.
6. The Rafael Power Processing Unit (PPU) for electric propulsion systems / B. Shoor, A. Davidson, D. Lev, L. Appel, O. Epstein, J. Herscovitz // *International Electric Propulsion Conference*. – Austria: University of Vienna, 2019.
7. REGULUS: A propulsion platform to boost small satellite missions / M. Manente, F. Trezzolani, M. Magarotto, E. Fantino, A. Selmo, N. Bellomo, E. Toson, D. Pavarin // *Acta Astronautica*. – 2019. – Vol. 157. – P. 241–249.
8. Multiwall carbon nanotubes: Synthesis and application / R. Andrews, D. Jacques, D. Qian, T. Rantell // *Accounts of Chemical Research*. – 2002. – Vol. 35 (12). – P. 1008–1017.
9. Stationary intraoral digital tomosynthesis using carbon nanotubes field emission x-ray technology: Clinical prototype / E. Platin, A. Tucker, O. Zhou, J. Lu // *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology and Oral Radiology*. – 2020. – Vol. 130 (2). – P. e66.
10. Carbon nanotubes as assisted matrix for laser desorption/ionization time-of-flight mass spectrometry / S. Xu, Y. Li, H. Zou, J. Qiu, Z. Guo, B. Guo // *Analytical Chemistry*. – 2003. – Vol. 75 (22). – P. 6191–6195.
11. Performances improvement of vacuum tubes using carbon nanotubes embedded cathodes / Tsai, J.T.H., Peng, J., Chu, K., Chen, J.S. // *Vacuum*. – 2017. – Vol. 145. – P. 1–3.
12. Influence of the emitted electron energy distribution from nanocathodes upon the current-voltage characteristics / Evtukh, A., Grygoriev, A., Litovchenko, V.G., Pylypova, O. // *Journal of Vacuum Science and Technology B*. – 2014. – Vol. 32 (2). – P. 02B104–02B104-4.
13. Litovchenko V., Evtukh A., Grygoriev A. Characterization of GaN nanostructures by electron field and photo-field emission // *Opto-Electronics Review*. – 2017. – Vol. 25 (3). – P. 251–262.
14. Forman R. Evaluation of the emission capabilities of Spindt-type field emitting cathodes // *Applications of Surface Science*. – 1983. – Vol. 16 (1–2). – P. 277–291.
15. Nanodiamond thin film field emitter cartridge for miniature high-gradient radio frequency X-band electron injector / J. Qiu, S.S. Baturin, K.K. Kovi, O. Chubenko, G. Chen, R. Konecny, S. Antipov, A.V. Sumant, C. Jing, S.V. Baryshev // *IEEE Transactions on Electron Devices*. – 2018. – Vol. 65 (3). – P. 1132–1138.
16. Thermal runaway of metal nano-tips during intense electron emission / A. Kyritsakis, M. Veske, K. Eimre, V. Zadin, F. Djurabekova // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2018. – Vol. 51 (22). – P. 225203.
17. Egorov N.V., Sheshin E.P. On the current state of field-emission electronics // *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. – 2017. – Vol. 11 (2). – P. 285–294.
18. Èidelman E.D., Arkhipov A.V. Field emission from carbon nanostructures: Models and experiment // *Physics-Uspekhi*. – 2020. – Vol. 63 (7). – P. 648.
19. Marrese C.M. A review of field emission cathode technologies for electric propulsion systems and instruments // *2000 IEEE Aerospace Conference. Proceedings*. – 2000. – Vol. 4. – P. 85–98.
20. In-FEEP thruster ion beam neutralization with thermionic and field emission cathodes / C. Marrese-Reading, J. Polk, J. Mueller, A. Owens // *27th International Electric Propulsion Conference*. – Pasadena, 2001.

21. Development of neutralizer with carbon nanotube cathode for small scale ion engine / Y. Takao, A. Kugimiya, S. Nagai, N. Yamamoto, H. Nakashima // 30th International Electric Propulsion Conference. – Florence, Italy, 2007.
22. Velásquez-García L.F., Akinwande A.I. A MEMS CNT-based neutralizer for micro-propulsion applications // 30th International Electric Propulsion Conference. – Florence, Italy, 2007.
23. Ion thruster operation with carbon nanotube field emission cathode / N. Yamamoto, T. Morita, Y. Ohkawa, M. Nakano, I. Funaki // Journal of Propulsion and Power. – 2019. – Vol. 35 (2). – P. 490–493.
24. Review of KITE–Electrodynamic tether experiment on the H-II Transfer Vehicle / Y. Ohkawa, S. Kawamoto, T. Okumura, K. Iki, H. Okamoto, K. Inoue, T. Uchiyama, D. Tsujita // Acta Astronautica. – 2020. – Vol. 177. – P. 750–758.

## INCREASING THE SPECIFIC IMPULSE OF THE ION ENGINE BY ZONE ENGINEERING OF THE SOLID-STATE FIELD CATHODE

Petrov N.I.<sup>1,2</sup>, Antonova T.L.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Mytishchi Branch of the Moscow State University of Civil Engineering  
(National Research University), Mytishchi, Russia*

<sup>2</sup> *D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia*

With the rapid development of space technology, the scale of human space exploration is expanding significantly. However, the growing demand for deep space travel cannot be met with conventional chemical engines. Thus, the need for new mechanisms for providing jet thrust, including electric motors, becomes clear. Electric propulsion technology has significant advantages over traditional chemical engines in deep space flight due to its characteristics such as high specific impulse, small size, long service life. A negative feature of electric motors can be called low thrust, however, firstly, in open space this is insignificant and, secondly, the thrust of electric motors can be significantly increased, and for this, there are reserves available at the current level of technology development. Ways to increase the thrust of electric ion thrusters will be detailed and discussed in this work. The increase in the power of ion engines is limited to a large extent by the erosion of the control grids, the ion flow hits the surface of the solid material of the control grid electrode with energetic ions and gradually leads to the failure of this electrode. In this work, the authors will show that the use of field emission as a source of electron beams ionizing the working medium can solve the problem of erosion of control electrodes, due to which it will be possible to significantly increase the strength of the working fields for ion engines, which in turn will increase the specific impulse, efficiency, flow rate and power of the ion engine as a whole.

*Keywords:* electric motors, thrust enhancement, satellites for long-term missions, nanotechnology, field emission cathode, spacecraft.

DOI: 10.17212/1727-2769-2020-4-41-50

## REFERENCES

1. Koroteev A.S., Lovtsov A.S., Muravlev V.A., Selivanov M.Y., Shagayda A.A. Development of ion thruster IT-500. *The European Physical Journal D*, 2017, vol. 71, p. 120. DOI: 10.1140/epjd/e2017-70644-6.
2. Rovey J.L., Lyne C.T., Mundahl A.J., Rasmont N., Glascock M.S., Wainwright M.J., Berg S.P. Review of multimode space propulsion. *Progress in Aerospace Sciences*, 2020, vol. 118, p. 100627.
3. Okada T., Binzel R.P., Connolly H.C., Yada T., Ohtsuki K. Special issue “Science of solar system materials examined from Hayabusa and future missions (II)”. *Earth, Planets and Space*, 2017, vol. 69, p. 31. DOI: 10.1186/s40623-017-0617-3.
4. Sarli B.V., Yuichi T. Hayabusa 2 extension plan: Asteroid selection and trajectory design. *Acta Astronautica*, 2017, vol. 138, pp. 225–232.



5. Cherkun O., Demet U. Cesium hollow cathode with internal discharge and gas feed for electric propulsion applications. *The 35th International Electric Propulsion Conference*, Georgia Institute of Technology, 2017.
6. Shoor B., Davidson A., Lev D., Appel L., Epstein O., Herscovitz J. The Rafael Power Processing Unit (PPU) for electric propulsion systems. *International Electric Propulsion Conference*, Austria, University of Vienna, 2019.
7. Manente M., Trezzolani F., Magarotto M., Fantino E., Selmo A., Bellomo N., Toson E., Pavarin D. REGULUS: A propulsion platform to boost small satellite missions. *Acta Astronautica*, 2019, vol. 157, pp. 241–249.
8. Andrews R., Jacques D., Qian D., Rantell T. Multiwall carbon nanotubes: Synthesis and application. *Accounts of Chemical Research*, 2002, vol. 35 (12), pp. 1008–1017.
9. Platin E., Tucker A., Zhou O., Lu J. Stationary intraoral digital tomosynthesis using carbon nanotubes field emission x-ray technology: Clinical prototype. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology and Oral Radiology*, 2020, vol. 130 (2), p. e66.
10. Xu S., Li Y., Zou H., Qiu J., Guo Z., Guo B. Carbon nanotubes as assisted matrix for laser desorption/ionization time-of-flight mass spectrometry. *Analytical Chemistry*, 2003, vol. 75 (22), pp. 6191–6195.
11. Tsai J.T.H., Peng J., Chu K., Chen J.S. Performances improvement of vacuum tubes using carbon nanotubes embedded cathodes. *Vacuum*, 2017, vol. 145, pp. 1–3.
12. Evtukh A., Grygoriev A., Litovchenko V.G., Pylypova O. Influence of the emitted electron energy distribution from nanocathodes upon the current-voltage characteristics. *Journal of Vacuum Science and Technology B*, 2014, vol. 32 (2), pp. 02B104–02B104-4.
13. Litovchenko V., Evtukh A., Grygoriev A. Characterization of GaN nanostructures by electron field and photo-field emission. *Opto-Electronics Review*, 2017, vol. 25 (3), pp. 251–262.
14. Forman R. Evaluation of the emission capabilities of Spindt-type field emitting cathodes. *Applications of Surface Science*, 1983, vol. 16 (1–2), pp. 277–291.
15. Qiu J., Baturin S.S., Kovi K.K., Chubenko O., Chen G., Konecny R., Antipov S., Sumant A.V., Jing C., Baryshev S.V. Nanodiamond thin film field emitter cartridge for miniature high-gradient radio frequency X-band electron injector. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2018, vol. 65 (3), pp. 1132–1138.
16. Kyritsakis A., Veske M., Eimre K., Zadin V., Djurabekova F. Thermal runaway of metal nano-tips during intense electron emission. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2018, vol. 51 (22), p. 225203.
17. Egorov N.V., Sheshin E.P. On the current state of field-emission electronics. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2017, vol. 11 (2), pp. 285–294.
18. Èidelman E.D., Arkhipov A.V. Field emission from carbon nanostructures: Models and experiment. *Physics-Uspekhi*, 2020, vol. 63 (7), p. 648.
19. Marrese C.M. A review of field emission cathode technologies for electric propulsion systems and instruments. *2000 IEEE Aerospace Conference. Proceedings*, 2000, vol. 4, pp. 85–98.
20. Marrese-Reading C., Polk J., Mueller J., Owens A. In-FEEP thruster ion beam neutralization with thermionic and field emission cathodes. *27th International Electric Propulsion Conference*, Pasadena, 2001.
21. Takao Y., Kugimiya A., Nagai S., Yamamoto N., Nakashima H. Development of neutralizer with carbon nanotube cathode for small scale ion engine. *30th International Electric Propulsion Conference*, Florence, Italy, 2007.
22. Velásquez-García L.F., Akinwande A.I. A MEMS CNT-based neutralizer for micro-propulsion applications. *30th International Electric Propulsion Conference*, Florence, Italy, 2007.
23. Yamamoto N., Morita T., Ohkawa Y., Nakano M., Funaki I. Ion thruster operation with carbon nanotube field emission cathode. *Journal of Propulsion and Power*, 2019, vol. 35 (2), pp. 490–493.
24. Ohkawa Y., Kawamoto S., Okumura T., Iki K., Okamoto H., Inoue K., Uchiyama T., Tsujita D. Review of KITE–Electrodynamic tether experiment on the H-II Transfer Vehicle. *Acta Astronautica*, 2020, vol. 177, pp. 750–758.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



**Петров Николай Иванович** – родился в 1967 году, канд. физ.-мат. наук, доцент, кафедра прикладной механики и математики, Мытищинский филиал Национального исследовательского Московского государственного строительного университета; кафедра физики, Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева. Область научных интересов: физика конденсированного состояния, теоретическая физика. Опубликовано 14 научных работ. (Адрес: 141006, Россия, Мытищи, Олимпийский пр., 50. E-mail: petrov6414@unesp.co.uk).

**Petrov Nikolay Ivanovich** (b. 1967) – Candidate of Sciences (Phys & Math.), Associate Professor, Department of Applied Mechanics and Mathematics, Mytishchi Branch of the Moscow State University of Civil Engineering (National Research University); Department of Physics, D. Mendelev University of Chemical Technology of Russia. His research interests are currently focused on condensed matter physics, theoretical physics. He is author of 14 scientific papers. (Address: 50 Olimpiyskiy Av., Mytishchi, 141006, Russia. E-mail: petrov6414@unesp.co.uk).



**Антонова Тамара Леонидовна** – родилась в 1949 году, канд. хим. наук, доцент, кафедра физики, Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева. Область научных интересов: физическая химия. Опубликовано 10 научных работ. (Адрес: 125047, Россия, Москва, Миусская пл., 9. E-mail: antonova6414@national-university.info).

**Antonova Tamara Leonidovna** (b. 1949) – PhD in Chemistry, Associate Professor, Department of Physical Chemistry, D. Mendelev University of Chemical Technology of Russia. Her research interests are currently focused on physical chemistry. She is author of 10 scientific papers. (Address: 9 Mjusskaja Sq., Moscow, 125047, Russia. E-mail: antonova6414@national-university.info).

Статья поступила 10 декабря, 2020  
Received December 10, 2020

## To Reference:

Petrov N.I., Antonova T.L. Povyshenie udel'nogo impul'sa ionnogo dvigatelya zonnai inzheneriei tverdotel'nogo polevogo katoda [Increasing the specific impulse of the ion engine by zone engineering of the solid-state field cathode]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii* = *Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2020, no. 4 (49), pp. 41–50. DOI: 10.17212/1727-2769-2020-4-41-50.