

УДК 629.78; 551.510.535

А. Ф. Сорокин¹, А. М. Цюх¹, В. Н. Нестерук¹,
В. П. Власенко¹, Р. Н. Залужный¹, А. А. Сорокин²,
М. Я. Захарова³, И. Н. Арсентьев⁴, И. С. Тарасов⁴

¹Центр контролю космічного простору Національного центру керування та випробувань космічних засобів Національного космічного агентства України, Євпаторія

²Таврійський національний університет, Сімферополь

³Науково-виробниче підприємство ТІАМАС, Євпаторія

⁴Фізико-технічний інститут ім. А. Ф. Йоффе Російської академії наук, Санкт-Петербург

Научно-технологический модуль инъекции плазмы для микроспутника

Надійшла до редакції 10.12.04

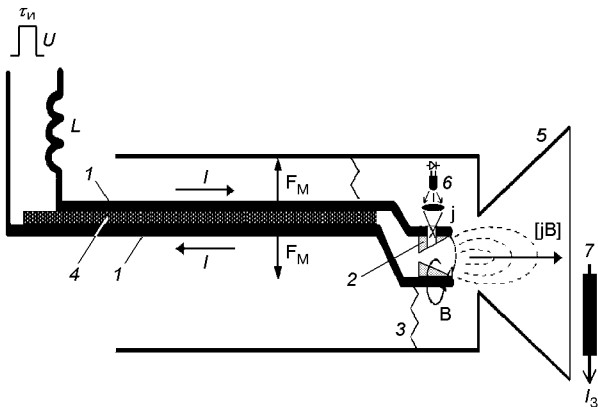
Розглядається можливість розташування на микроспутнику багатофункціонального модуля, що складається з плазмового інжектора і гетеролазера. Наводяться основні характеристики інжектора, створеного на основі саморозімкнуваної дуги. Передбачається, що такий модуль дозволить провадити не лише корекцію орбіти та орієнтацію микроспутника, але й може використовуватися в активних космічних експериментах.

Ориентация Национальной космической программы Украины на запуск микро- и наноспутников вызывает необходимость поиска новых подходов к разработке исследовательской и служебной бортовой аппаратуры. В частности, отдельные блоки и весь прибор в целом должны быть многофункциональными и допускать возможность решения многоцелевых задач. В наибольшей степени это относится к системам движителей для ориентации и перемещения спутников, которые находятся в рабочем состоянии непродолжительное время.

Малая полезная нагрузка рассматриваемого микроспутника ($M < 15$ кг) не позволяет разместить обычные (газовые, химические и ионные) двигатели даже в предельно миниатюризованном варианте, а ограничение мощности питания (~ 3 Вт) требует создания системы предварительного накопления энергии и импульсного режима работы движителя. Анализ оптимальных схем коррекции [5] показал, что наиболее

приемлемыми являются электрореактивные двигатели с магнитогидродинамическим ускорением плазмы. Для уменьшения весовых нагрузок предпочтительно использовать эрозионные методы получения рабочего тела. Перечисленным требованиям отвечает торцовый импульсный малогабаритный ускоритель рельсотрон «Тимур» [1, 6—9].

Малые энергоемкость и напряжение питания (~ 100 В), отсутствие этапа подготовки разряда и сложной аппаратуры управления делает такой инжектор незаменимым в качестве двигателя при проведении микрокоррекций орбит космических аппаратов [10], где требуются ускорения порядка 10^{-5} м/с² [5]. Экспериментально подтверждена эффективность работы отдельного модуля, состоящего из сопла Лавалья и инжектора, размещаемого в его критическом сечении. Создаваемый импульс при длине токоподводов 7 см и активной области 0.7 см измерялся на крутильных весах. Минимально достигнутая



Инжектор плазмы: 1 — электроды, 2 — испаряемая вставка, 3 — пружина, 4 — изоляция, 5 — сопло Лавалья, 6 — лазер, 7 — лэнгмюровский зонд

масса такого модуля составляет около 80 г. Такие ускорители нашли широкое применение в лабораторной и промышленной практике, и в данной работе обращено внимание на возможность их применения в космических условиях.

Схема устройства представлена на рисунке. В нерабочем состоянии электроды 1 с испаряемыми вставками 2 сжимаются пружиной 3. После подачи импульса напряжения U с длительностью τ_n электроды расталкиваются силами взаимодействия антипараллельных токов. При достаточной инерции электродов в месте их точечного контакта происходит испарение и ионизация материала вставок, где в облаке пара образуется дуговой канал. По окончании импульса напряжения электроды схлопываются и устройство готово к очередному импульсу. Для исключения залипания электродов при соприкосновении собственное время колебаний системы токоподводов $\tau_c = \sqrt{mk}$ (m — приведенная масса токоподводов, k — коэффициент жесткости пружины) должно быть больше времени охлаждения электродов τ_m до температур меньших температуры плавления материала вставок T_0 : $\tau_c > \tau_T = l^2 \xi^{-1}$, $l = (IU\tau_n)^{1/3} (c\rho T_0)^{-1/3}$, где ξ — коэффициент температуропроводности, c , ρ — удельная теплоемкость и плотность материала электродов соответственно, l — характерный размер электродных вставок.

В одном импульсе испаряется слой вещества с толщиной порядка теплового скин-слоя, если

выполняется условие $IU\tau_n \geq (\pi c \rho d^2 l_0 T_n + d^2 l_0 \rho \nu)$, где d — диаметр катодного пятна, T_n — температура испарения материала вставки, ν — удельная теплота испарения.

По заданным этим условиям величинам тока и действующим моментам сил упругости и Ампера выбирают минимальную длину токоподводов a согласно закону Ампера:

$$\frac{\mu_0 I^2 a^2}{4\pi b} \geq f \Delta\varphi,$$

где μ_0 — магнитная проницаемость; b — расстояние между токоподводами ($b \ll a$), минимизируемое при заданном напряжении по пробойной толщине изоляции 4, f — модуль сдвига материала токоподвода (для пружин — эквивалентная величина), $\Delta\varphi$ — угол расхождения токоподводов.

При горении дуги условие равновесия сил магнитных и упругости обеспечивает самостабилизацию дуги. Вследствие малого расстояния между электродными вставками газокINETическое давление $nk_B T$ оказывается меньшим, чем сила магнитного давления $\mu_0 H^2/2$, действующая на дуговой канал, что приводит к его МГД-ускорению без применения добавочных внешних магнитных полей.

Для упрощения конструкции инжектора в пробных экспериментах токоподводы изготавливались из упругой фольги (бериллиевая бронза БРХ) толщиной 0.1—0.4 мм.

Изготовленное устройство имело длину 0.12 м и максимальный поперечный размер 0.008 м, что позволило использовать его, например, для восстановления покрытий на внутренней поверхности разъемов в заводских условиях.

В силу квадратичной зависимости силы взаимодействия между токоподводами от величины тока, линейной зависимости количества распыляемого материала от нее и слабого изменения $\rho c \sim (0.5—1)$ Кал/(см³г) для различных материалов, оказалось достаточным изменение a и внешних параметров цепи при перестройке системы от алюминия к таким радикально отличающимся материалам, как углерод и вольфрам (индуктивность L изменялась в пределах от 20 до 60 мкГн, напряжение $20 < U < 300$ В, длительность импульса (формировался тиристорным ключом) $5 \cdot 10^{-4} < \tau_n < 10^{-3}$ с. Эксперименты

показали, что оптимальная (по максимуму распыляемого материала) величина тока составляет 0.3—0.4 кА при длине электродов $L = 10$ см, $b = 0.01$ см (изолятор — лавсан). При больших токах наблюдается недопустимая эрозия электродов с образованием питтингов, что объясняется пинчеванием разряда.

Для измерения некоторых параметров плазмы устройство размещалось внутри отрезка волновода 3-см диапазона, возбуждаемого штыревой антенной и являющегося резонатором [4]. При расширении облака дуговой плазмы происходит перестройка эффективной длины резонатора (при электронной плотности $n_e \geq 10^{13}$ см), и на измерительной антенне наблюдается максимум сигнала при прохождении плазмой пучности стоячей волны. Измерения показали, что при оптимальной величине тока разряда максимальная скорость сгустка слабо зависит от вида рабочего тела и составляет $V \approx 2 \cdot 10^4$ м/с, полное число частиц в сгустке $N \sim 10^{19}$, отношение продольной составляющей к поперечной (расходимость) ~ 0.05 , длительность импульса инжекции плазмы ~ 10 мс.

В описанных экспериментах основное внимание уделялось параметрам покрытий, получаемых с помощью инжектора. Для поставленной задачи — использования инжектора в качестве движителя микроспутника, необходимо провести лабораторные исследования по оптимизации материала вставки (параметры ρ , ν , c), максимизации импульса, передаваемого спутнику

$$M \cdot u = N_1 \sqrt{3kT_1 m_A} + N_A \sqrt{3kT_A m_A} S/S_k,$$

где M , u — масса и приращение скорости микроспутника, N_1 , T_1 — полное число и температура ионов в инжектируемом плазменном сгустке, N_A , T_A — полное число и температура атомов, получающихся в результате перезарядки и рекомбинации ионов (до 30 % по уравнению Саха), S/S_k — отношение сечений сопла Лавалю, формирующего поток быстрых атомов, m_A — атомная масса материала рабочего тела.

Предварительные лабораторные эксперименты показали, что начало зажигания определяется законом Пашена по атомам остаточного газа. Тепловая и автоионизация атомов микроострий поверхности эрозии являются существенно более медленными процессами, что снижает эффек-

тивность процесса ускорения плазмы. Для оптимизации параметров разряда в условиях космического вакуума ($\sim 10^{-12}$ мм. рт. ст. для предполагаемых высот полета микроспутника) необходимо предварительное испарение рабочего тела (эвтектические сплавы, амальгамы) с целью создания локального давления $\sim 10^{-3}$ мм. рт. ст. в области контакта токопроводов. Для этого необходимо устройство, обеспечивающее большой удельный вклад энергии. В качестве испарителя предполагается использовать недавно разработанные на основе нанотехнологий миниатюрные инжекционные гетеролазеры 6 [11]. Эти одномодовые лазеры (стационарная мощность 15 Вт) — базовые элементы фазированной линейки для систем передачи мощных потоков излучения — имеют габариты порядка 0.1—5 мм. Так как расходимость лазерного луча достаточно велика (при ширине полоска 100—200 мкм: 1—1.5° параллельно n - p -переходу и 18° в перпендикулярном направлении), луч фокусируется на поверхность рабочего тела через отверстие в одном из токопроводов в пятно диаметром 10 мкм, что приводит к локальному импульсному перегреву поверхности рабочего тела. Мощности лазера достаточно для испарения 10^{-5} г вещества за импульс длительностью 10^{-6} с и создания локального давления, достаточного для пробоя в соответствии с кривой Пашена — Бака.

Фиксация срабатывания инжектора в нужном режиме производится по двум параметрам: напряжению питания и сигналу ленгмюровского зонда 7, расположенного на срезе сопла Лавалю 5. Очевидно, что этот же зонд можно использовать и для измерения параметров орбитальной плазмы (n_1 , T_e).

Описанное устройство является идеальным источником быстрой плазмы для проведения активных экспериментов по исследованию магнитосферы и ионосферы Земли. Спектр задач, решаемых в таких экспериментах, весьма широк — от изучения структуры электрических и магнитных полей, инициации высыпаний электронов до генерации излучений различного вида, регистрируемых наземными средствами. Такие эксперименты не требуют установки дополнительной бортовой аппаратуры, но актуальность и разнообразие решаемых задач [2, 3] может служить серьезным обоснованием для запуска специализированного микроспутника.

1. А. с. СССР, МКИ F03H1/00. Электрореактивный двигатель рельсотронного типа // А. Ф. Сорокин, Т. А. Сорокин, № 1626769; Заявл. 06.10.88; Опубл. 08.03.90, Бюл. № 15.
2. Власенко В. П., Крижановский Е. А., Сорокин О. Ф., Цюх О. М. Система мониторингу навколосемного космічного простору // Наука і оборона.—2003.—№ 4.—С. 50—52.
3. Козлов С. И., Смирнова Н. В. Методы и средства создания искусственных образований в околоземной среде и оценка характеристик возникающих возмущений // Космич. исслед.—1992.—30, вып. 4.—С. 629—678.
4. Осипов Н. А., Сорокин А. Ф. Локальная диагностика плазмы // Программа и аннотации докладов совещания по диагностике высокотемпературной плазмы. — Сухуми: СГУ, 1970.—Кн. 5.—С. 62.
5. Салмин В. В. Оптимизация космических перелетов с малой тягой. — М.: Машиностроение, 1987.—136 с.
6. Сорокин А. Ф. Микроканальные пластины расширенного динамического диапазона // Тез. докл. конф. «Визуализация рентгенодифракционных изображений дефектов в кристаллах». — Ереван, 1983.—С. 5.
7. Сорокин А. Ф. Дуговой источник частиц // Приборы и техника эксперимента.—1985.—№ 5.—С. 141—142.
8. Сорокин А. Ф., Ан В. Б. Способ локализации коррозионных повреждений // Защита от коррозии в химических отраслях промышленности: Тез. докл. — Черкассы, 1985.—С. 115—120.
9. Сорокин А. Ф., Захарова М. Я., Арутюнян К. А. Плазмодинамическое устройство для нанесения локализованных покрытий // Машиноведение.—1987.—№ 5.—С. 117—118.
10. Сорокин А. Ф., Цюх А. М., Маслов В. И., Власенко В. П. Плазменный инжектор для космических технологий // Космічна наука і технологія. Додаток.—2002.—8, № 2.—С. 369—374.
11. Pikhitin N. A., Tarasov I. S., Alferov Zh. I., et al. Properties of wide mesa stripe InGaAsP/InP heterolasers // Semiconductors.—2000.—34 (7).—P. 886.

SCIENTIFIC TECHNOLOGICAL MODULE OF PLASMA INJECTION FOR MICROSATELLITE

A. F. Sorokin, A. M. Tsyukh, V. N. Nesteruk,
V. P. Vlasenko, R. N. Zaluzhnyj, A. A. Sorokin,
M. Y. Zakharova, I. N. Arsentiev, I. S. Tarasov

The possibility to accommodate aboard a microsatellite a multi-functional module consisting of a plasma injector and heterolaser is considered. It is shown that a module of this kind allows one not only to make orbit correction and microsatellite orientation but also may be used in active space experiments.