

РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЯ ПРОТОТИПОВ ИМПУЛЬСНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ВНЕШНИМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ФЕМТО-КЛАССА НА БАЗЕ КОНЦЕПЦИИ КИНЕТИЧЕСКИХ РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ВОЗМОЖНОСТЬЮ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА

Д. А. Новосельцев

ООО «Д-Старт», г. Омск, Россия

Аннотация. Предлагается создание двигателей с внешними источниками энергии для одноимпульсных межорбитальных маневров сверхмалых космических аппаратов фемто-класса и семейства смежных технических решений. Планируется освоение возможности экономически эффективного использования в двигателях космического мусора и отходов технологических процессов. Разработано и изготовлено экспериментальное оборудование. Выбраны материалы с высокой скоростью газификации для активных мишеней двигателей. Подтверждена работоспособность выбранных технических решений в условиях, идентичных условиям открытого космоса. Осуществляется серия наземных испытаний на реальных режимах и планируется серия летных испытаний в 2021 г.

Ключевые слова: КА фемто-класса, кинетический двигатель, одноимпульсный маневр, отражатель, мишень, ударник.

I. ВВЕДЕНИЕ

Освоение проектирования и производства нижней части линейки сверхмалых космических аппаратов (КА) [1] единичной массой от 100 г и менее – пико- и фемто-классов, в т.ч. бескорпусных КА «на плате» (типа ChipSat) [2], при стоимости изготовления КА и его запуска, пропорциональной его массе, открывает возможности значительно более экономически эффективного решения большинства задач исследования, освоения и использования космоса, чем использование традиционных средств, и перспективы решения новых задач.

Крайне низкая стоимость подобных сверхмалых КА (от нескольких тысяч рублей за единичный КА и от нескольких десятков тысяч рублей за запуск, или от десятков до сотен долларов США) открывает возможность участия в космической деятельности новых участников с ограниченным бюджетом – юридических и физических лиц.

Основной проблемой, ограничивающей область применения таких КА, является отсутствие двигательных установок, позволяющих им осуществлять самостоятельные маневры. В настоящее время осуществляется пакетный запуск современных КА формата ChipSat в количестве 100-200 в пусковом контейнере формата CubeSat 3U [2], масса которого может превышать массу всей группы фемтоспутников, а сбор и передача данных такими КА после вывода из контейнера осуществляется из небольшой области около контейнера. В настоящее время для фемтоспутников предлагаются [3] электродинамические двигательные установки с использованием силы Лоренца [4 и др.] и солнечные паруса, интегрированные в конструкцию фемтоспутника [5 и др.], а также лазерные паруса. Они преимущественно относятся к двигателям постоянной микротяги для поддержания постоянной высоты фемтоспутника на низкой околоземной орбите.

В то же время, существует проблема космического мусора, актуальность которой возрастает с ростом числа КА в целом, в т.ч. сверхмалых КА. Известные проекты утилизации мусора в двигателях КА [6 и др.] находятся на стадии НИР. Стоимость этих двигателей на единицу тяги или массы КА не определена, но значительно выше, чем для двигателей традиционных конструкций. Их конструкция и технология исключает возможность их миниатюризации для применения на фемто-КА и использования мелкого космического мусора. Можно отметить, что другие известные проекты активного удаления космического мусора, не предполагающие его использование в двигателях, нерентабельны и экономически неэффективны, и никак не связаны с решением проблемы маневрирования сверхмалых КА.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В этой связи была поставлена задача создания достаточно простых и эффективных двигателей для КА фемто-класса с внешними источниками энергии, обеспечивающих в перспективе возможность использования космического мусора в качестве источника энергии, а также иных внешних источников энергии. Предлагается

семейство технических решений на базе технологии и конструктивных элементов ракетных двигателей с внешними источниками энергии для одноимпульсных маневров КА.

Используются варианты основных элементов конструкции гипотетических импульсных двигателей большой мощности – в т.ч. так называемых кинетических реактивных двигателей (КРД) в варианте «кинетического паруса», ядерного импульсного ракетного двигателя большой мощности «Медуза» (Medusa) Дж. Солема [7] и солнечного паруса большой тяги Г. Мэтлоффа [8] – адаптированные к конструктивно и технологически простым малоразмерным конструкциям.

В качестве базового технического решения рассматриваются КРД с использованием космического мусора в качестве источника энергии. Концепция впервые представлена автором в ИКИ РАН в 2019 г. [9]. Для моделирования и отработки рабочего процесса и конструкции двигателей в реальных условиях, в 2020 г. автором было организовано малое научно-техническое инновационное предприятие ООО «Д-Старт», выполняющее ряд работ по созданию упомянутых двигателей – в т.ч. подготовку и реализацию серии наземных экспериментов «Импакт» (включая НИОКР № АААА-А20-120081290005-8 «Разработка и испытания прототипов кинетического реактивного двигателя (КРД) с рабочим процессом за счет утилизации кинетической энергии космического мусора. Разработка и испытания экспериментального образца мишени прототипа двигателя», выполняемую за счет гранта Фонда содействия инновациям»), и серии летных экспериментов на МКС – «Импульс-0», «Оригами», «Фейерверк» в 2020–2021 гг.

III. ТЕОРИЯ

Теория рабочего процесса КРД при встречном столкновении с кинетическим ударником изложена автором в докладе в ИКИ РАН 2019 г. [9] и заявке на изобретение «Способ действия кинетического реактивного двигателя» [12].

Как отмечено [9], использование кинетической энергии космического мусора (как ударников) при характерных скоростях столкновения около 10 км/с [11] требует высокой скорости газификации мишени, для обеспечения завершения рабочего процесса в пределах рабочего объема отражателя двигателя. В этой связи в качестве модельных материалов активных мишеней прототипов двигателей для отработки рабочего процесса были выбраны материалы типа «Транелит», применяемые в составе элементов детонационной автоматики КА, со скоростью детонационного горения более 7 км/с [10]. В этом случае, рабочий процесс двигателя при одноимпульсном маневре обеспечивается химико-кинетическим взрывом мишени при встречном столкновении с ударником.

При ряде допущений (в т.ч. при допущении о полной газификации мишени и полном отсутствии газификации ударника), приращение скорости ΔV , м/с КА массой M , кг составляет:

$$\Delta V = \frac{25}{24 M} \sqrt{\frac{2}{5} m_t (E_i + E_t)}$$

где индексы i и t относятся к ударнику и мишени соответственно.

E_i и E_t , Дж – соответственно кинетическая энергия ударника массой m_i , кг и химическая энергия мишени массой m_t , кг:

$$E_i = \frac{m_i V_i^2}{2}$$

$$E_t = m_t H_t$$

где H_t , Дж/кг – низшая удельная теплота сгорания (теплота взрыва) материала мишени.

При характерной скорости столкновения ударника с мишенью порядка 10...13 км/с [11], удельная кинетическая энергия столкновения E_i / m_i составит $(5,0...8,5) \times 10^8$ Дж/кг, что значительно превышает удельную теплоту сгорания традиционных химических ракетных топлив порядка 10^7 Дж/кг.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Поскольку процессы в рассматриваемых двигателях являются высокоэнергетическими и быстротекущими (10^{-6} - 10^{-5} с), их моделирование представляет достаточно сложную задачу. По ТЗ ООО «Д-Старт» ООО «Кросс-Автоматика» разработан и изготовлен мобильный стенд испытания двигателей МСИД в составе

термобарокамеры, опционального стендового низкоскоростного метательного устройства и системы управления и регистрации и обработки измерений (СУРОИ). В феврале 2021 г. стенд принят в эксплуатацию, выполнены экспериментальные исследования конструктивных элементов прототипа двигателя для серии экспериментов «Импакт», а также действующих моделей конструктивных элементов для летных экспериментов «Фейерверк», «Оригами», «Импульс-0» в условиях, имитирующих околоземное космическое пространство (вакуум, лучистый нагрев тепловым излучением в пределах солнечной постоянной $1,37 \text{ кВт/м}^2$). При испытаниях подтверждена работоспособность элементов при разрежении до 2 Па (абс.) и температуре до $150 \text{ }^\circ\text{C}$, возможности скоростной видеорегистрации и приборной регистрации.



*Рис. 1. Эксперимент на стенде МСИД
(испытания модельного отражателя и подвески мишени,
моделей «Фейерверк», «Оригами», «Импульс-0»)*

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Имеющиеся оборудование и методическая база ООО «Д-Старт» позволяют осуществлять исследования рабочего процесса двигателей (КРД), а также элементов, закрепляемых на отражателе и подвеске мишени, в условиях, близких к реальным условиям эксплуатации.

В середине 2021 г. планируется проведение серии экспериментов «Импакт» («Импакт-ГПМ») в соответствии с программой и методикой и ТЗ ООО «Д-Старт» на базе АО «ЦНИИмаш» с использованием метательной установки ГПМ, с метанием ударников из алюминиевых сплавов, имитирующих мелкие фрагменты космического мусора, в мишень из материала типа «Транелит», со скоростью до $4...7 \text{ км/с}$.

Для отработки развертывания компактных элементов конструкции двигателя (отражателя, подвески) в экспериментах «Фейерверк», «Оригами», и действующей модели кинетического двигателя без использования мишени из высокоэнергетических материалов - сублимационного двигателя малой тяги «Импульс» для фемтоспутника ChipSat (с возможностью последующего деорбитинга) на массо-габаритном макете фемтоспутника в эксперименте «Импульс-0» – ведется согласование проведения данных экспериментов летом 2021 г. на МКС в ходе внекорабельной деятельности экипажа.

При удовлетворительных результатах летных экспериментов, в конце 2021 г. планируются летные испытания двигателя «Импульс» на собственном фемтоспутнике ООО «Д-Старт» AmbaSat-1 производства AmbaSat Ltd для изменения параметров его орбиты относительно группы аналогичных фемтоспутников при их контейнерном запуске.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты подтверждают возможность разработки и производства в ближайшем будущем семейства простейших двигателей для одноимпульсных маневров КА фемто-класса массовой доступности, а в более отдаленном будущем – освоения рациональной утилизации в них космического мусора как энергоносителя.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФГБУ «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (Фонд содействия инновациям), грант по программе «Старт-1», Договор (Соглашение) № 3626ГС1/60541 от 24.07.2020 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hein A., Burkhardt Z., Eubanks T. M. AttoSats: ChipSats, other Gram-Scale Spacecraft, and Beyond. 2019. URL: <https://arxiv.org/abs/1910.12559>.
2. Manchester Z., Peck M., Filo A. KickSat: A Crowd-Funded Mission To Demonstrate The World's Smallest Spacecraft // Small Satellite Constellations : Proceedings of the 27th AIAA/USU Conference, Logan, Utah, USA, Aug. 10-15, 2013, Pp. SSC13-IX-5.
3. ChipSats: New Opportunities. Final Report. International Space University. MSS Program 2020. P. 16.
4. Perez T. R., Subbarao K. A Survey of Current Femtosatellite Designs, Technologies, and Mission Concepts // Journal of Small Satellites. 2016. Vol. 5, no. 3. Pp. 467–482.
5. Atchison J., Peck M. A passive, sunpointing, millimeter-scale solar sail // Acta Astronautica. 2010. Vol. 67, no. 1. Pp. 108–121.
6. Lan L., Li J., Baoyin H. Debris Engine: A Potential Thruster for Space Debris Removal. 2015. URL: <https://arxiv.org/abs/1511.07246>.
7. Solem J. C. Some New Ideas for Nuclear Explosive Spacecraft Propulsion. LA-12189-MS, October 1991.
8. Matloff G. L., Mallove E. Solar Sail Starships: the Clipper Ships of the Galaxy // Journal of the British Interplanetary Society. 1981. Vol. 34. Pp. 371–380.
9. Новосельцев Д. А. О возможности рациональной утилизации фрагментов околоземного космического мусора // Космический мусор: фундаментальные и практические аспекты угрозы. Сер. Механика, управление и информатика: сб. тр. Всеросс. науч. конф. М.: ИКИ РАН, 2019. С. 217–229.
10. Котомин А. А., Душенок С. А., Ефанов В. В. Новое поколение систем детонационной автоматики космических аппаратов на основе высокоэнергетических эластичных материалов // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2010. № 9 (35). С. 69–74.
11. Назаренко А. И. Моделирование космического мусора. М.: ИКИ РАН, 2013. 216 с.
12. Заявка на из. 2019112219 Российская Федерация, МПК F02 K7/00. Способ действия кинетического реактивного двигателя. Заявл. 22.04.2019; Оpubл. 22.10.2020, Бюл. № 30.

УДК 629.76

К ВОПРОСУ О ПРОВЕДЕНИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ИСПАРЕНИЮ ВОДЫ ИЗ ПОРИСТЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУР

В. А. Севоян, И. Ю. Лесняк

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация. При производстве ракет-носителей одним из этапов технологического процесса является осушка внутренних поверхностей топливных баков и элементов его конструкции. Для выполнения задач по испарению воды из пористых металлических структур и их осушке, был проведен обзор существующей литературы по данной тематике и в качестве внешнего воздействия на процесс испарения, выбрано лазерное излучение (ЛИ). Разработана программа проведения установочных (предварительных) экспериментов по определению рабочих мощностей лазерной установки и максимальной глубине под водой, на которой ЛИ сохраняет достаточную мощность для испарения воды. Разработаны рекомендации к экспериментальному стенду.

Ключевые слова: лазерное излучение, испарение воды, пористая металлическая структура.

1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема осушки конструктивных элементов при производстве ракетно-космической техники вызвана наличием жидкости (воды) в микротрещинах материала конструктивных элементов топливных баков (ТБ) и магистралей, в результате чего возникает коррозия, и снижаются прочностные характеристики. Существуют