

doi: <https://doi.org/10.15407/knit2018.02.043>

УДК 533.9

В. А. Шувалов, Ю. П. Кучугурный

Институт технической механики Национальной академии наук Украины
и Государственного космического агентства Украины, Днепро, Украина

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОНЦЕПЦИИ ИСКУССТВЕННОЙ МИНИ-МАГНИТОСФЕРЫ КАК СРЕДСТВА УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ В ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Представлено краткое описание проекта космического эксперимента «Мини-магнитосфера КА». Предложена концепция эксперимента для обоснования эффективности использования искусственной мини-магнитосферы, создаваемой у поверхности КА, как средства управления его движением в ионосфере Земли благодаря силе Лоренца, возникающей при взаимодействии в системе «магнитное поле КА — ионосферная плазма». Система с мини-магнитосферой может быть использована для увода объектов космического мусора на более низкие орбиты, в дальнейшем они будут сгорать в плотных слоях атмосферы.

Ключевые слова: ионосферная плазма, магнитное поле, мини-магнитосфера, сила Лоренца, управление движением космического аппарата, физическое моделирование.

С появлением технологий создания компактных источников сильных магнитных полей стало реальным осуществление идеи применения магнитогидродинамических (МГД) систем для управления движением перспективных летательных аппаратов разного класса и назначения. К настоящему времени сформировались два направления работ, связанных с исследованием взаимодействия высокоскоростных потоков разреженной плазмы с твердыми телами, имеющими сильное собственное магнитное поле («намагниченными» телами). Первое направление исследований связано со спускаемыми аппаратами (СА). За ударной волной у затупленной поверхности СА образуется плазма, взаимодействующая с собственным магнитным полем аппарата. Такое взаимодействие характеризуется

двумя эффектами: уменьшением конвективного теплового потока к поверхности аппарата, увеличением отхода ударной волны от поверхности СА и силы лобового сопротивления. Второе направление связано с концепцией использования магнитных полей у поверхности «намагниченных» космических аппаратов (КА) для управления их движением при обтекании гиперзвуковым потоком разреженной плазмы в ионосфере Земли и в межпланетном пространстве. При обтекании «намагниченного» КА высокоскоростным потоком разреженной плазмы у его поверхности возникает неоднородное плазменное образование — мини-магнитосфера, подобная структуре магнитосфер планет. При наличии мини-магнитосферы у поверхности «намагниченного» тела на него действуют силы — производные от силы Лоренца, — превосходящие силу аэродинамического торможения для «ненамаг-

© В. А. ШУВАЛОВ, Ю. П. КУЧУГУРНЫЙ, 2018

ниченного» тела. Эффективность торможения КА при движении в ионосферной плазме существенно повышается. Исследования по проблеме актуальны, ведутся во многих аэрокосмических странах мира. Применение МГД-систем в ракетно-космической технике может стать альтернативой традиционным методам и средствам решения комплекса задач, связанных с эксплуатацией космических аппаратов в околоземном и в межпланетном пространстве.

В проекте [1] «Искусственная мини-магнитосфера как способ управления движением космического аппарата в ионосфере Земли» предлагается проведение натурального эксперимента в околоземном космическом пространстве на платформе микроспутников класса «CubeSat» или МС-2-8 (Украина). Целью эксперимента является определение эффективности управления полетом КА в ионосфере Земли с помощью собственного магнитного поля.

Обоснованием проекта являются:

- численное моделирование (решение задачи взаимодействия «намагниченного» КА с гиперзвуковым потоком разреженной плазмы [4]);
- физическое моделирование (экспериментальные исследования на плазмoeлектродинамическом стенде ИТМ НАН Украины и ГКА Украины [5–7], выполненных в рамках Целевой комплексной программы НАН Украины по научным космическим исследованиям на 2012–2016 гг.).

Условия на стенде ИТМ моделируют режимы взаимодействия «намагниченных» КА с ионосферной разреженной плазмой на высотах 200...800 км. Экспериментально получены зависимости аэродинамических коэффициентов силы лобового сопротивления и подъемной силы, действующих на «намагниченные» модели КА, от вектора индукции магнитного поля, вектора дипольного магнитного момента источника поля и вектора скорости плазменного потока [5–7]. Показано, что мини-магнитосфера у поверхности КА является новым силовым фактором, пригодным для управления движением КА (торможение, ускорение, изменение направления вектора тяги), и позволяет при определенных условиях реализовать режим полета с ненулевым аэродинамическим качеством.

Для реализации предлагаемого космического эксперимента предполагается использовать источник постоянного магнитного поля, помещенный в магнитный экран, с системой управления ориентацией вектора магнитного момента относительно вектора скорости полета КА. Предполагается использование базовой комплектации для платформы «CubeSat» или МС-2-8 с системой регистрации положения, ускорения (торможения) спутника на орбите и передачи телеметрической информации. Космический эксперимент предлагается провести на специализированном КА с минимальной комплектацией или на платформе базового КА.

Постоянный магнит внутри многослойного магнитного экрана («спящий» магнит) может быть расположен на платформе КА или вынесен на штанге. Может быть использован дисковый магнит из материала «неодим-железо-бор» (класс осевой намагниченности и тип исполнения 38EN – 42EN) диаметром 70 мм и толщиной 60 мм; масса магнита 1.7 кг. Индукция магнитного поля на полюсной поверхности такого магнита 420...500 мТл; дипольный магнитный момент составляет около $250 \text{ А} \cdot \text{м}^2$. Такой источник магнитного поля может создать в ионосфере на высоте 800 км при концентрации заряженных частиц 10^{11} м^{-3} мини-магнитосферу с характерным размером порядка 6 м. Как вариант конструктивного решения может быть использована сборка из кольцевых постоянных магнитов с полюсными наконечниками. «Спящий магнит» помещен в многослойный магнитный экран (из магнитомягкого материала с низкой остаточной намагниченностью). Экран обеспечивает допустимый остаточный магнитный момент, а также используется для управления взаимодействием в системе «магнитное поле — плазма». Для проведения активной фазы эксперимента по управлению движением КА экран удаляется. Независимой переменной в эксперименте является взаимная ориентация вектора скорости полета КА и вектора магнитного момента. Для управления ориентацией вектора магнитного момента относительно осей спутника предполагается использовать механизм вращения магнитной системы (например, с шаговым двигателем).

Диапазон высот для проведения эксперимента 250...1000 км в ионосфере Земли. Мини-магнитосфера возникает при удалении магнитного экрана. Контроль торможения (или ускорения) КА осуществляется с помощью акселерометров.

По завершению эксперимента в ионосфере может быть проведена вторая фаза эксперимента — исследование торможения при спуске аппарата в атмосфере Земли.

Результаты эксперимента могут быть использованы для решения проблемы очистки околоземного космического пространства от объектов космического мусора (ОКМ) — отработавших ресурс изделий ракетно-космической техники, аппаратов исчерпавших срок активной эксплуатации.

В проблеме увода ОКМ на промежуточную низкую орбиту, с дальнейшим сгоранием в плотных слоях атмосферы, можно выделить проект LEOSWEEP [2] и аналогичный проект [3], в которых предполагается создание специального КА с несколькими ионными двигателями. Космический аппарат «пастьух» сопровождает ОКМ в течение достаточно длительного времени перехода на низкую орбиту, воздействуя на него плазменной струей с расстояния 7...20 м. Реактивная струя двигателя передает ОКМ дополнительный тормозящий импульс.

В контексте результатов предлагаемого эксперимента с мини-магнитосферой может быть реализован вариант пассивного увода ОКМ на низкую орбиту за счет эффекта электродинамического торможения тела с собственным магнитным полем в ионосфере Земли. Для реализации такого решения изделия ракетно-космической техники — потенциальные объекты космического мусора — оснащаются «спящим магнитом». По истечении срока эксплуатации КА экран удаляется. Взаимодействие магнитного поля с потоком ионосферной плазмы приводит к торможению ОКМ и уводу его на более низкую орбиту. Для уже находящихся в околоземном пространстве ОКМ торможение может быть реализовано с помощью «гарпуна» с вмонтированной магнитной системой.

По результатам численного и физического моделирования показано, что электромагнитное давление на ОКМ при индукции магнитного поля на его поверхности 0.6...0.8 Тл на орбите

высотой 250...800 км сравнимо с давлением реактивной струи ионного двигателя в проектах [2, 3, 5] и значительно (на три порядка) превосходит силу аэродинамического торможения «ненамагниченного» КА. Увод ОКМ с источником магнитного поля на низкую орбиту осуществляется за счет увеличения силы аэродинамического торможения в автономном режиме, без сопровождения ОКМ специальным КА.

На этапе подготовки предлагаемого эксперимента может быть выполнено физическое моделирование реального явления в потоке разреженной плазмы на стенде ИТМ в масштабе 1:1 или 1:2 с использованием платформы КА или его макета.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Токмак Н. А., Кучугурный Ю. П., Кочубей Г. С., Цокур А. Г.* Мини-магнитосфера как средство управления космическим аппаратом в ионосфере Земли // 17 Укр. конф. з комічних досліджень: тези доп. (21—25 серпня 2017 року, Одеса). — Київ: Академперіодика, 2017. — С. 223.
2. *Bombardelli C., Pelaez J.* Ion beam shepherd for contactless space debris removal // J. Guidance and Dynamics. — 2011. — **34**, N 3. — P. 916—920.
3. *Kitamura S., Hayakawa Y., Kawamoto S.* A reorbiter for large GEO debris objects using ion beam irradiation // Acta Astronaut. — 2014. — **94**, N 2. — P. 725—735.
4. *Nishida H., Funaki I.* Analysis of thrust characteristics of a magnetic sail in magnetized solar wind // J. Propulsion and Power. — 2012. — **28**, N 3. — P. 636—641.
5. *Shuvalov V. A., Gorev N. B., Tokmak N. A., Kochubei G. S.* Physical simulation of the long-term dynamic action of a plasma beam on a space debris object // Acta Astronaut. — 2017. — **132**. — P. 97—102.
6. *Shuvalov V. A., Priimak A. I., Bandel' K. A., Kochubei G. S., Tokmak N. A.* Heat exchange and deceleration of a magnetized body in a rarefied plasma flow // J. Appl. Mech. and Technical Phys. — 2011. — **52**, N 1. — P. 1—8.
7. *Shuvalov V. A., Tokmak N. A., Pis'mennyi N. I., Kochubei G. S.* Control of the dynamic interaction of a “magnetized” sphere with a hypersonic flow of rarefied plasma // High Temperature. — 2015. — **53**, N 4. — P. 463—469.

Стаття надійшла до редакції 12.12.17

REFERENCES

1. Tokmak N. A., Kuchugurnyi Yu. P., Kochubei, G. S., Tsokur A. G. (2017). Mini-magnetosphere as a means of controlling a space-

- craft motion in the Earth's ionosphere]. Abstracts from 17 *Ukrainska konferentsiya z kosmichnyh doslidzhen (21–25 serpnia 2017 roku, Odesa) – 17th Ukrainian conference on space research*. (p. 223). Kiev: Akadempriodyka NAS Ukraine [In Russian].
- Bombardelli C., Pelaez, J. (2011). Ion beam shepherd for contactless space debris removal. *J. Guidance and Dynamics*, **34** (3), 916–920.
 - Kitamura S., Hayakawa Y., Kawamoto S. (2014). A reorbiter for large GEO debris objects using ion beam irradiation. *Acta Astronautica*, **94** (2), 725–735.
 - Nishida H., Funaki I. (2012). Analysis of thrust characteristics of a magnetic sail in magnetized solar wind. *J. Propulsion and Power*, **28** (3), 636–641.
 - Shuvalov V. A., Gorev N. B., Tokmak N. A., Kochubei, G. S. (2017). Physical simulation of the long-term dynamic action of a plasma beam on a space debris object. *Acta Astronautica*, **132**, 97–102.
 - Shuvalov V. A., Priimak A. I., Bandel K. A., Kochubei G. S., Tokmak N. A. (2011). Heat exchange and deceleration of a magnetized body in a rarefied plasma flow. *J. Applied Mechanics and Technical Physics*, **52** (1), 1–8.
 - Shuvalov V. A., Tokmak N. A., Pismennyi N. I., Kochubei G. S. (2015). Control of the dynamic interaction of a “magnetized” sphere with a hypersonic flow of rarefied plasma. *High Temperature*, **53** (4), 463–469.

Received 12.12.17

В. А. Шувалов, Ю. П. Кучугурний

Інститут технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України, Дніпро, Україна

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОБГРУНТУВАННЯ КОНЦЕПЦІЇ ШТУЧНОЇ МІНІ-МАГНІТОСФЕРИ ЯК ЗАСОБУ КЕРУВАННЯ РУХОМ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ В ІОНОСФЕРІ ЗЕМЛІ

Подається короткий опис проекту космічного експерименту «Міні-магнітосфера КА». Запропоновано кон-

цепцію експерименту для обґрунтування ефективності використання штучної міні-магнітосфери біля поверхні КА як засобу керування його рухом в іоносфері Землі завдяки силі Лоренца, яка виникає при взаємодії в системі «магнітне поле КА – іоносферна плазма». Систему з міні-магнітосферою може бути використано для відведення об'єктів космічного сміття на більш низькі орбіти, де вони будуть згоряти у густих шарах атмосфери.

Ключові слова: іоносферна плазма, магнітне поле, міні-магнітосфера, сила Лоренца, керування рухом космічного апарата, фізичне моделювання.

V. A. Shuvalov, Yu. P. Kuchugurnyi

Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Science of Ukraine and the National Space Agency of Ukraine, Dnipro, Ukraine

EXPERIMENTAL SUBSTANTIATION OF CONCEPTION OF ARTIFICIAL MINI-MAGNETOSPHERE AS A MEANS OF SPACECRAFT MOTION CONTROLLING IN THE EARTH'S IONOSPHERE

We present briefly the project of space experiment “Spacecraft Mini-magnetosphere”. Concept of this experiment is proposed to substantiate the effectiveness of using an artificial mini-magnetosphere near the surface of a spacecraft as a means of controlling its motion in the Earth's ionosphere due to the Lorentz force arising in the interaction in “spacecraft magnetic field - ionospheric plasma” system. A scheme with mini-magnetosphere can be used in space debris removal procedure by lowering orbits of debris parts causing them to get burnt in dense layers of the Earth's atmosphere.

Keywords: ionospheric plasma, magnetic field, mini-magnetosphere, Lorentz force, spacecraft movement control, physical modeling.