УДК 533.9

Ю. П. КУЧУГУРНЫЙ, С. Н. КУЛАГИН, С. В. НОСИКОВ, А. Г. ЦОКУР

ИСКУССТВЕННАЯ МИНИ-МАГНИТОСФЕРА КАК СРЕДСТВО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА В ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Институт технической механики
Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины,
ул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Днепр, Украина; e-mail: yu.kuchugurnyi@gmail.com

Для обґрунтування можливості керування рухом космічних апаратів в іоносфері за допомогою пристрою типу «магнітний парус» проаналізовано результати серії експериментальних досліджень взаємодії моделей космічних апаратів з гіперзвуковим потоком розрідженої плазми. Запропоновано ідею експерименту на навколоземній орбіті з використанням мікросупутника CubeSat. Якщо на борту космічного апарата розташувати джерело сильного магнітного поля, то при обтіканні такого «намагніченого» апарата гіперзвуковим потоком розрідженої плазми утворюється неоднорідна плазмова структура, подібна до магнітосфер планет – штучна міні-магнітосфера. При цьому джерелу поля буде передаватися частина імпульсу плазмового потоку; з'являться додаткві сили, що діють на космічний апарат. Цей принцип полягає в основі «магнітного парусу» як нереактивного магнітогідродинамічного двигунового пристрою, що використовує кінетичну енергію «сонячного вітру». На плазмоелектродинамічному стенді проведено експериментальні дослідження взаємодії моделей космічних апаратів з потоком плазми. Визначено залежності сили опору та підйомної сили, що діють на моделі, від параметрів потоку і магнітного поля. Показано, що штучна міні-магнітосфера може бути ефективним засобом керування рухом космічного апарату в іоносфері Землі. Для проведення експерименту в навколоземному просторі на мікросупутнику встановлюється конструкція з постійних магнітів в оболонці, що екранує магнітне поле. Визначаються зміни орбіти супутника, які відбуваються після зняття екрану, в залежності від параметрів магнітного поля. Цей експеримент був би першою перевіркою концепції «магнітного парусу» як рушія для космічних апаратів. Керування рухом «намагніченого» тіла за рахунок довготермінової взаємодії магнітного поля з іоносферною плазмою може служити ключовим елементом принципово нової технології очистки іоносфери від об'єктів «космічного сміття».

Для обоснования возможности управления движением космических аппаратов в ионосфере с помощью устройства типа «магнитный парус» проанализированы результаты серии экспериментальных исследований взаимодействия моделей космических аппаратов с гиперзвуковым потоком разреженной плазмы. Предложена идея эксперимента на околоземной орбите с использованием микроспутника CubeSat. Если на борту космического аппарата поместить источник сильного магнитного поля, то при обтекании такого «намагниченного» аппарата гиперзвуковым потоком разреженной плазмы образуется неоднородная плазменная структура, подобная магнитосферам планет – искусственная мини-магнитосфера. При этом источнику поля будет передаваться часть импульса плазменного потока; появятся дополнительные силы, действующие на космический аппарат. Этот принцип лежит в основе «магнитного паруса» как нереактивного магнитогидродинамического двигательного устройства, использующего кинетическую энергию «солнечного ветра». На плазмоэлектродинамическом стенде проведены экспериментальные исследования взаимодействия моделей космических аппаратов с потоком плазмы. Определены зависимости силы сопротивления и подъемной силы, действующих на модели, от параметров потока и магнитного поля. Показано, что искусственная мини-магнитосфера может быть эффективным средством управления движением космического аппарата в ионосфере Земли. Для проведения эксперимента в околоземном пространстве на микроспутнике устанавливается конструкция из постоянных магнитов, помещенная в регулируемую оболочку, экранирующую магнитное поле. Определяются изменения орбиты спутника при снятии экрана в зависимости от параметров магнитного поля. Этот эксперимент был бы первой проверкой концепции «магнитного паруса» как движителя для космических аппаратов. Управление движением «намагниченного» тела за счет долговременного силового взаимодействия магнитного поля с ионосферной плазмой может служить ключевым элементом принципиально новой технологии очистки ионосферы от объектов «космического мусора».

Based on the results of a series of experimental studies of the interaction of spacecraft models with a hypersonic rarefied plasma flow, this paper demonstrates the possibility of controlling spacecraft motion in the ionosphere with the use of a device of the “magnetic sail” type and proposes an idea of an experiment onboard a CubeSat microsatellite in a near-Earth orbit. If a spacecraft is equipped with a source of a strong magnetic field, then in a hypersonic rarefied plasma flow a nonuniform plasma structure called an artificial mini-magnetosphere, which is similar to a planetary magnetosphere, will form in the vicinity of the spacecraft. In this case, part of the plasma flow momentum will be transferred to the magnetic field source, thus resulting in additional forces acting on the spacecraft. This principle forms the basis for the “magnetic sail” – a jetless magnetohydrodynamic propulsion unit that uses the kinetic energy of the solar wind. Experimental studies of the interaction of spacecraft models with a plasma beam were conducted on a plasmaelectrodynamic setup. The drag and lift acting on the models were determined as a function of the flow parameters and the magnetic field. It was shown that an artificial mini-magnetosphere may be an effective means of controlling spacecraft motion in the Earth ionosphere. The experiment to be conducted in near-Earth space envisages equipping a microsatellite with permanent magnets encased in a controllable enclosure that shields the magnetic field and determining the satellite orbit variations after removing the shield as a function of the magnetic field parameters. The experiment might be a first verification of the concept of the "magnetic sail" as a spacecraft propulsion unit. Controlling the motion of a "magnetized" body by using the long-term interaction of the body's magnetic field with the ionospheric plasma may be the key component of a radically new technology for space debris removal from the ionosphere.

Ключевые слова: *космический аппарат, кубсат, YuzhSat, ионосфера, мини-магнитосфера, плазма, магнитный парус, физическое моделирование, плазмоэлектродинамический стенд.*

Введение. Факт, что «сильный ветер водорода непрерывно дует в Солнечной системе» [1], не мог не привести к идеям использования кинетической энергии «солнечного ветра» – высокоскоростного потока испускаемых Солнцем заряженных частиц, в основном протонов[1] – для ускорения космических аппаратов (КА). В 1990-х – начале 2000-х годов были предложены концепции «магнитного паруса» (Р. Зубрин [3]), «магнито-плазменного паруса» (Р. Уингли [4]) и «электрического паруса» (П. Янхунен [5]). В этих устройствах на борту КА размещен (механически связан с ним) источник сильного магнитного или, соответственно, электрического поля. Импульс заряженных частиц плазмы «солнечного ветра», движущихся в этом поле, изменяется из-за действия силы Лоренца. По закону сохранения импульса противоположное по направлению изменение импульса получает источник поля. Поэтому на КА с источником поля в потоке плазмы, кроме аэродинамических сил, действуют силы электродинамической природы.

Нынешний уровень космических технологий недостаточен для создания и использования таких «протонных парусов». Но принципы их функционирования могут быть проверены в лабораторных условиях и в околоземном космическом пространстве, а некоторые устройства даже найти полезные применения.

Исследования «солнечного ветра» берут начало в опытах К. Биркеланда с моделью магнитного поля Земли «тterrеллой» ещё в начале двадцатого века; они позволили объяснить некоторые геофизические явления (северное сияние), повлияли на изучение солнечно-земных связей и развитие космической электродинамики. Аналогичные исследования продолжаются и в наши дни, принося новые, часто неожиданные, результаты (см. [6]). Взаимодействие солнечного ветра с магнитным полем планет происходит в режиме магнитогидродинамического (МГД) обтекания плазмой области с магнитным полем; образуется неоднородная пространственная структура – магнитосфера. В лабораторных условиях моделировать соответствующие астрофизические явления очень сложно из-за огромного различия пространственных масштабов и скоростей потоков; условия реализации МГД-течения плазмы выполняются лишь частично. Образующуюся качественно подобную планетной магнитосфере структуру, в которой существенными становятся кинетические эффек-

---

[1] Характерные параметры «солнечного ветра» [2]: полностью ионизированная плазма, состоящая в основном из протонов и небольшого количества ядер гелия (96 % и около 4 %), летящая со скоростью (300 – 1000) км/сек; в области земной орбиты концентрация ионов $(5 – 10)\cdot 10^6$ м$^{-3}$; динамическое давление потока $(1 – 6)\cdot 10^{-9}$ Н/м^2; интегральный поток «солнечного ветра» составляет порядка 10^6 тонн протонов в секунду.

ты, называют мини-магнитосферой [6, 7]. Режим обтекания с образованием мини-магнитосферы характерен и для взаимодействия плазмы солнечного ветра с магнитным парусом, а также для недавно открытых астрофизических объектов – магнитных аномалий на поверхности Луны (структура «Рейнер Гамма») и магнитосфер астероидов.

Идеи нереактивных магнитогидродинамических устройств для летательных аппаратов интенсивно развиваются в ведущих аэрокосмических странах мира. Предложены проекты экспериментальных космических аппаратов с магнитными и электрическими парусами для создания тяги, управления движением, коррекции и изменения параметров орбит; однако полетные испытания таких аппаратов ещё не проводились[2]. В будущем, возможно, использование энергии плазменных потоков в космосе станет эффективным средством при межпланетных и межзвездных полетах, позволяющим разогнать КА до скорости в десятки–сотни км/сек и затормозить, приблизившись к цели полета. Изменяя параметры магнитного поля, можно достигать эффектов ускорения, торможения, изменения направления движения аппарата; т. е. получить новый фактор управления КА, не требующий значительных энергетических затрат, а утилизирующий энергию окружающей среды. Ожидается, что в поле «магнитного паруса» будут иметь место эффекты, аналогичные образованию радиационных поясов около планет, что поможет уменьшить дозу корпускулярных космических излучений и защитить экипаж и приборы межпланетного КА от радиационных повреждений [8]. Аналогичное «магнитному парусу» устройство на спускаемом аппарате в атмосфере – «магнитный парашют» – взаимодействует с потоком плазмы за ударной волной около носовой части аппарата. При движении в плотных слоях атмосферы существенно увеличится тормозящая сила и снизится конвективный тепловой поток к корпусу аппарата (см. [9]).

Совершенно аналогичные процессы взаимодействия потока плазмы с источником сильного магнитного поля на борту КА следует ожидать и при движении в ионосфере; однако параметры плазмы в ионосфере [2] существенно отличаются от плазмы «солнечного ветра». Ионосферная плазма на высотах (400 – 1500) км в основном состоит из однократно ионизированных кислорода и азота, выше 1200 км начинают преобладать ионы водорода. Плотность плазмы значительно выше, чем в солнечном ветре; на этих высотах концентрации ионов и электронов $N_i = N_e = (10^{12} - 10^{9})$ м$^{-3}$, нейтральных атомов $N_n = (10^{13} - 10^{11})$ м$^{-3}$. Скорость потока плазмы относительно КА будет определяться его орбитальной скоростью, меньшей на два порядка, чем скорость солнечного ветра. Возможно только движение с торможением (т. е. режим «магнитного парашюта»), а также изменение направления движения аппарата без увеличения его кинетической энергии.

Целью настоящей работы является обоснование возможности управления движением космических аппаратов в ионосфере с помощью системы типа «магнитный парус».

Обоснование базируется на результатах исследований, проведенных на плазмоэлектродинамическом стенде Института технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства

---

[2] В 2013 году предпринимались попытки испытаний «электрического паруса» на спутнике ESTCube-1; эксперимент был неудачным: парус не раскрылся.

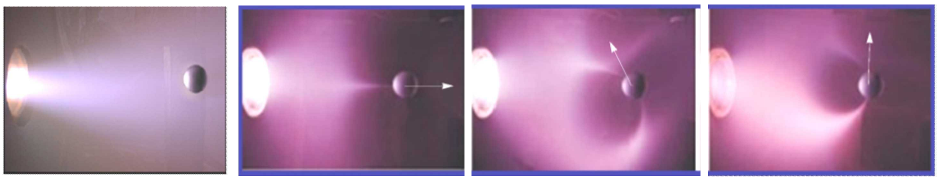
Украины (ИТМ НАНУ и ГКАУ) [9 – 12], в которых воспроизводились условия функционирования КА в ионосфере. Изучались процессы обтекания «намагниченных» (т. е. имеющих собственный источник магнитного поля) моделей КА гиперзвуковым потоком разреженной плазмы, при которых около модели формируется течение с неоднородной структурой и мини-магнитосфера. Были сделаны оценки дополнительных сил, действующих на КА с бортовыми источниками магнитного поля на высотах до 1000 км, и разработаны предложения по проведению эксперимента на околоземной орбите в ионосфере [13, 14].

Долговременное силовое воздействие, обусловленное взаимодействием магнитного поля с ионосферной плазмой, может быть использовано для изменения орбит космических тел как ключевой элемент принципиально новой технологии очистки околоземного космического пространства от крупных объектов «космического мусора» [15].

Результаты экспериментальных исследований. Поток разреженной плазмы создавался при помощи газоразрядного плазменного ускорителя. Использовались различные плазмообразующие газы: водород, кислород, азот; далее приведены данные для азота. Обеспечивались следующие параметры плазменного потока: газокинетическое давление в струе плазмы $4 \cdot 10^{-3}$ Н/м^2; степень диссоциации молекулярного азота $¶_n \approx 0{,}6$; степень ионизации атомов $0{,}01 \le ¸_i \le 0{,}1$; концентрация ионов (и равная ей концентрация электронов) $10^{15} \le N_i \le 10^{16}$ м$^{-3}$; направленные скорости ионов $7 \le U_i \le 28$ км/сек, нейтральных компонентов $U_n \approx 0{,}6$ км/сек; температуры электронов, ионов и нейтральных атомов 2,6 эВ, 0,52 эВ и 0,18 эВ, их тепловые скорости $1{,}2 \cdot 10^6$ м/сек, $3{,}3 \cdot 10^3$ м/сек и $1{,}9 \cdot 10^3$ м/сек соответственно. Моделями космических аппаратов служили сферы радиусом $r_W = (4 – 5)$ см из диэлектрического материала; внутри сфер размещались источники магнитного поля – постоянные магниты или соленоиды. Изменением силы тока в соленоиде магнитный момент M_d менялся в пределах от 2 А·м^2 до 450 А·м^2. Индукция магнитного поля вблизи поверхности сферы приближенно соответствует полю магнитного диполя, расположенному в центре сферы, с магнитным моментом $\mathbf{M} = \left\{0; 0; M_d\right\}$, направленным вдоль оси соленоида. В зависимости от расстояния от диполя R и угла ¯ от направления магнитного момента вектор индукции $\mathbf{B}_d = \left\{ B_x;\ B_y;\ B_z \right\} = \frac{«_0}{4®}\frac{M_d}{R^3}\left\{3\sin¯\,\cos¯;\ 0;\ 3\cos^2¯ - 1\right\}$, где $«_0 = 4® \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная, в фигурных скобках – декартовы компоненты вектора. Удобно характеризовать поле максимальным (измеренным) значением индукции магнитного поля на поверхности сферы B_W.

Безразмерный параметр, характеризующий течение P_{Bw}/P_d – отношение магнитного давления на поверхности сферы, $P_{Bw} = B_W^2/(2«_0)$, к динамическому давлению потока, $P_d = °_i U_i^2/2$, где $°_i = A_i m_p N_i$ – плотность вещества в потоке плазмы, движущегося со скоростью U_i, A_i – атомная масса иона, $m_p = 1{,}66 \cdot 10^{-27}$ кг – атомная единица массы. Из-за большого различия масс электронов и атомарных компонентов плазмы и скоростей ионов и атомов динамическое давление потока в основном определяется ионной компонентой и составляет $1{,}2 \cdot 10^{-3} \le P_d \le 1{,}1 \cdot 10^{-1}$ Н/м^2.

На рис. 1 приведены фотографии обтекания плазмой модели без магнитного поля (а)) и с магнитным полем (б), в), г)) при различных ориентациях вектора магнитного момента (обозначенного белой стрелкой).



а) б) в) г)

$U_i = 28{,}3$ км/с, $N_i = 9{,}6 \cdot 10^{15}$ м$^{-3}$, $r_W = 5{,}25$ см, $P_{Bw} / P_d = 4{,}8 \cdot 10^3$

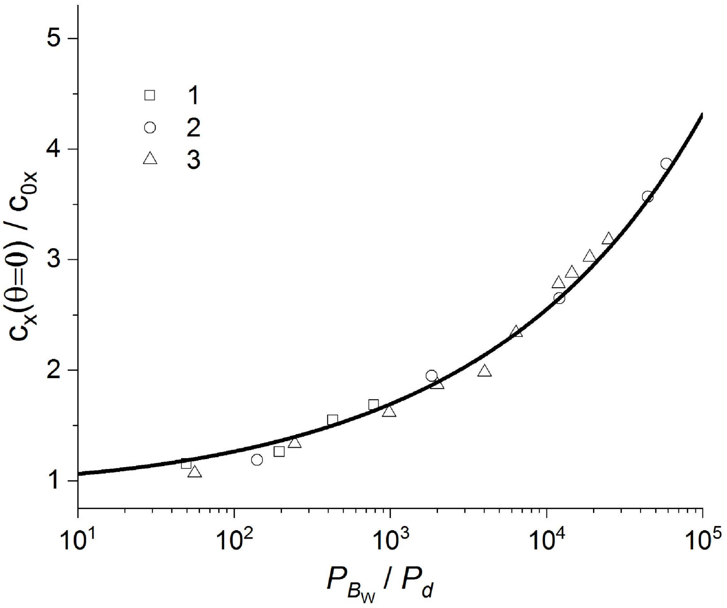
Расстояние между срезом плазменного ускорителя и моделью КА 60 см

Рис. 1

Магнитное поле качественно меняет картину течения. Наблюдаемое свечение в видимом спектре вызвано ударным возбуждением атомов газа при столкновениях с ионами плазменного потока, поэтому по интенсивности свечения можно судить о плотности ионов и темпе столкновений. На фотографиях (рис. 1,б),-г)) видна головная ударная волна, темные области – полости, куда не проникает плазма – и ярко светящиеся области, примыкающие к полюсам источника магнитного поля – каспы. Расположение каспов и полостей меняется при повороте вектора магнитного момента. Такая неоднородная структура, возникающая при включении магнитного поля и перестраивающаяся при его изменении, называется мини-магнитосферой.

На неподвижное сферически симметричное тело в осесимметричном потоке газа или плазмы (рис. 1,а)) действует аэродинамическая сила лобового сопротивления F_x.; при нарушении симметрии включением магнитного поля (рис. 1,б)-г)) появляется подъемная сила F_y. Эти силы, действующие на модель КА, измерялись с помощью аэродинамических весов; затем определялись аэродинамические коэффициенты, $c_a = F_a / (P_d S_g)$ (здесь индекс a принимает значения x или y, S_g – площадь поперечного сечения тела), в зависимости от параметров плазменного потока (скорости U_i и концентрации ионов N_i), индукции магнитного поля на поверхности модели B_W, угла ¯ между векторами магнитного момента $\mathbf{M}$ и скорости $\mathbf{U}_i$.

На рис. 2 и рис. 3 представлены полученные экспериментальные данные. На рис. 2 показана зависимость коэффициента лобового сопротивления c_x от параметра P_{Bw} / P_d – отношения максимального магнитного давления на поверхности модели к динамическому давлению плазменного потока. Ось ординат – отношение значений коэффициента лобового сопротивления при наличии магнитного поля и без него (равного 2 при бесстолкновительном обтекании сферы гиперзвуковым потоком). Коэффициенты для модели без магнитного поля обозначены индексом «0». На рис. 3 показаны зависимости коэффициентов лобового сопротивления и подъемной силы c_x, c_y для модели с магнитным полем от угла ¯ между векторами магнитного момента и скорости. Полученные значения коэффициента сопротивления хорошо согласуются с результатами расчетов из работы [16], где получены значения в пределах 3,4 – 3,7 для условий, соответствующих проведенным экспериментам.



1– $r_w = 4{,}35$ см, $U_i = 11{,}5$ км/с, $N_i = 4 \cdot 10^{15}$ м$^{-3}$

2– $r_w = 5{,}25$ см, $U_i = 15{,}6$ км/с, $N_i = 2 \cdot 10^{15}$ м$^{-3}$

3– $r_w = 5{,}25$ см, $U_i = 28{,}3$ км/с, $N_i = 9{,}6 \cdot 10^{15}$ м$^{-3}$

Рис. 2

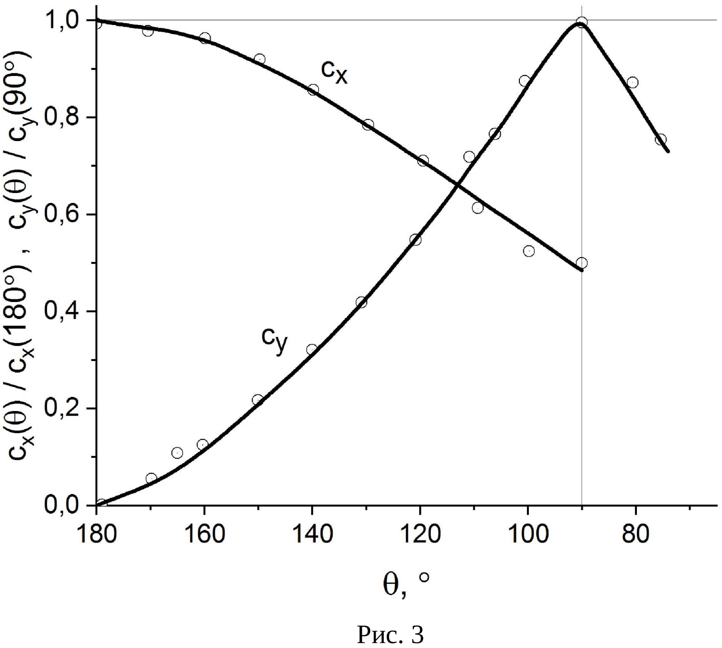


Рис. 3

При обтекании сферической ненамагниченной модели сила направлена по оси потока вдоль вектора скорости. С увеличением магнитного поля, соответственно и магнитного давления, коэффициент лобового сопротивления намагниченной модели быстро растет, т. е. происходит эффективное торможение модели в набегающем плазменном потоке. Обозначив безразмерные зависимости аэродинамических коэффициентов c_x, c_y, показанные на рис. 2 и рис. 3, от соответствующих аргументов как $f_{xP}(P_{Bw}/P_d)$, $f_{x\text{¯}}(\text{¯})$ и $f_{y\text{¯}}(\text{¯})$, силы, действующие на модель КА при движении в ионосфере, составят: $F_x = S_g P_d\, c_{0x}\, f_{xP}(P_{Bw}/P_d) f_{x\text{¯}}(\text{¯})$ – сила сопротивления, $F_y = S_g P_d\, c_{y\text{¯}}(\text{¯})$ – подъёмная сила. В зависимости от ориентации диполя появляются компоненты сил в перпендикулярном направлении; это дает возможность управлять движением тела. Таким образом, экспериментально обоснована возможность управления движением КА с искусственной мини-магнитосферой в потоке ионосферной плазмы.

Граница магнитосферы – магнитопауза – это (относительно) тонкий переходный слой, в котором устанавливается баланс динамического давления в потоке плазмы, $P_d = \text{°}_i U_i^2/2$, и давления магнитного поля, $P_M = B_{MP}^2/2\text{«}_0$, где B_{MP} – индукция магнитного поля на магнитопаузе. Толщина этого слоя может быть оценена как $\text{¢}_{MP} \approx c/\text{µ}_{pe}$ [17] (где $\text{µ}_{pe} = \sqrt{N_e q_e^2/m_e \text{£}_0}$ – электронная плазменная частота, c – скорость света, q_e, m_e – заряд и масса электрона, $\text{£}_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная) и составляет 5,4 см для параметров плазмы, указанных на рис. 1. Магнитное поле можно приближенно считать полем диполя с магнитным моментом $\mathbf{M} = \{0; 0; M_d\}$, индукция поля быстро убывает с расстоянием как R^{-3}. На магнитопаузе индукция магнитного поля удваивается [17, 18], $\mathbf{B}_{MP} = 2\text{~}\,\mathbf{B}_d(L_{MP})$; этот эффект имеет место для поля около неограниченной плоской идеально проводящей поверхности; чтобы учесть отличия от идеального случая, вводится коэффициент ~ (порядка единицы). Давление потока частиц на магнитопаузе будет равно $\text{°}_i U_i^2$; коэффициент   введен для учёта отличий условий передачи импульса от случая столкновения с идеально отражающей частицы плоской поверхностью, при котором $=1$, при неупругом столкновении $=0{,}5$. Из баланса давлений определяется характерный размер магнитосферы [17, 18] (радиус Чепмена – Ферраро) $L_{MP} = \left(\frac{\text{~}^2}{} \frac{\text{«}_0 M_d{}^2}{2\text{®}^2 (A_i m_p N_i) U_i^2} \right)^{1/6}$.

Для типичных условий эксперимента, соответствующих указанным на рис. 1 (магнитный момент 50 А·м^2, скорость потока 28,3 км/сек и концентрация ионов азота 9,6·10^{15} м$^{-3}$), около модели КА образуется мини-магнитосфера с радиусом 0,38 м. Это сравнимо с размером темной зоны на рис. 1. Магнитное поле на магнитопаузе в экваториальном сечении ($\text{¯} = \text{®}/2$) $B_{MP} = 2\text{~}\frac{\text{«}_0}{4\text{®}}\frac{2M}{L_{MP}^3} = 2\sqrt{\text{«}_0 \quad P_d} = \sqrt{2\text{«}_0 \quad \text{°}_i}\, U_i$. Поле в пределах магнитопаузы быстро убывает от B_{MP} до значений порядка фонового поля на бесконечном удалении от источника.

О возможности проведения эксперимента в космосе. Проведенные исследования свидетельствуют о возможности постановки соответствующих экспериментов в космосе на базе спутников класса CubeSat, например микроспутниковой платформы YuzhSat [19]. По результатам проведенных исследований были разработаны предложения[3], представленные в докладе [13]; рассмотрим эти вопросы более детально.

Цель эксперимента: проверить идею создания в ионосфере вокруг спутника магнитогидродинамической структуры – мини-магнитосферы, определить параметры сил, возникающих вследствие отклонения мини-магнитосферой заряженных частиц в потоке ионосферной плазмы, и показать возможность целенаправленного изменения орбиты спутника благодаря такому взаимодействию. Имеется прямая аналогия с «магнитным парусом», отличия состоят в параметрах плазменного потока в ионосфере и «солнечного ветра» в межпланетном пространстве, в размерах устройств и размерах создаваемой мини-магнитосферы.

Спутник в ионосфере на высотах до (1000 – 1200) км взаимодействует с потоком слабоионизированной плазмы, состоящей в основном из ионов азота и кислорода; концентрация ионов составляет (10^9 – 10^{11}) м$^{-3}$; скорость набегающего плазменного потока определяется орбитальной скоростью спутника.

В базовой конструкции спутника уже предусмотрены аппаратура для определения параметров орбиты и ориентации осей спутника и система передачи телеметрической информации. Дополнительно желательно установить акселерометры для измерения ускорений в ортогональных направлениях и комплекты зондов для измерения параметров плазмы около поверхности спутника (внутри мини-магнитосферы) и на некотором фиксированном расстоянии (в не возмущенном магнитным полем набегающем потоке плазмы), что позволит существенно расширить программу исследований.

На борту спутника размещается управляемый источник достаточно сильного магнитного поля в виде конструкции с постоянными магнитами из современных магнитных материалов (в минимальном варианте с одним магнитом). Система управления полем состоит из магнитного экрана, позволяющего включить и выключить магнитное поле, и поворотной системы для изменения направления вектора магнитного момента.

В качестве источника магнитного поля – в минимальном варианте – может быть выбран дисковый постоянный магнит из материала «неодим-железо-бор» (NdFeB); класс осевой намагниченности и тип исполнения 38EN – 42EN. Такой магнит работоспособен в жестких условиях эксплуатации – при повышенных температурах и сильных вибрациях. Изделие диаметром 70 мм и толщиной 60 мм имеет массу около 1,7 кг. Индукция магнитного поля на полюсной поверхности магнита (0,4 – 0,5) Тл. Дипольный магнитный момент составляет около 200 А·м^2. Как вариант конструктивного решения может рассматриваться сборка из кольцевых постоянных магнитов, обрамленных полюсными наконечниками.

Магниты помещаются внутри магнитного экрана из многослойного материала с низкой остаточной намагниченностью (магнито-мягкие металлы: пермаллой, мю-металл), в котором жестко крепятся диэлектрическим компаундом. Торцевые части экрана разъемные, состоящие из нескольких лепестков; для включения и выключения источника магнитного поля лепестки

---

[3] Предложения по эксперименту заняли третье место в конкурсе проектов полезной нагрузки платформы YuzhSat.

группой электромагнитов синхронно перемещаются и фиксируются в конечном положении или возвращаются в исходное положение. Масса двуслойной экранирующей оболочки такой конструкции составляет порядка 5 кг. Многослойный магнитный экран необходим для управления магнитным полем и для уменьшения действия поля на другие системы и приборы спутника. Отметим, что любой выбранный источник поля имеет магнитный момент, существенно превышающий предельные величины для чувствительной измерительной аппаратуры и других устройств: для их корректной работы обычно проводят процедуры снижения магнитных полей и размагничивания конструкций спутников до значений суммарного магнитного момента в единицы – десятки единиц мА·м^2 против требуемых для проведения эксперимента минимальных значений (100 – 200) А·м^2. Поэтому для проведения эксперимента желательно использовать специализированный микроспутник с минимальным комплектом дополнительного оборудования.

Независимыми переменными управления являются углы ориентации вектора магнитного момента относительно продольной оси спутника и, соответственно, относительно вектора скорости течения плазмы. Углы могут изменяться пассивно – из-за собственного вращения спутника – или задаваться специальным дополнительным механизмом поворота платформы с установленными магнитами на заданный угол (например, несколько дискретных положений). Снимаются данные об углах ориентации осей спутника и углах ориентации оси магнитной системы (диполя) относительно спутника в зависимости от времени.

Аппаратура требует дополнительного электрического питания только в импульсном режиме для включения электромагнитов, управляющих крышками магнитного экрана, и для устройства, меняющего углы ориентации (например, шагового электродвигателя).

Наземная часть эксперимента состоит в испытании натурного образца спутника YuzhSat с комплектом аппаратуры на плазмоэлектродинамическом стенде. Условия стенда позволяют моделировать практически все факторы космического пространства, существенные для проведения эксперимента.

Космическая часть эксперимента состоит из двух фаз: первая фаза проводится на стационарной орбите, вторая – при спуске и сгорании спутника в плотных слоях атмосферы.

Первая фаза эксперимента проводится на постоянной орбите высотой (600 – 1000) км в ионосфере Земли; детальные параметры орбиты должны быть известны, но несущественны. Мини-магнитосфера включается и выключается путем сдвига крышек магнитного экрана. Контролировать изменение орбиты предлагается по накоплению отклонения координат спутника за большой промежуток времени в сравнении с расчетными данными и данными за предыдущие такие же промежутки времени, но с выключенной мини-магнитосферой. Данные акселерометров позволяют учитывать мгновенные значения вариаций ускорения, вызванных рассеянием ионов мини-магнитосферой. В настоящее время обсуждаются идеи создания кластеров микроспутников на базе платформы YuzhSat. Разместив в кластере специализированный спутник с источником магнитного поля, можно было бы контролировать вариации орбиты по выходу спутника из группировки.

Вторая фаза эксперимента фактически состоит в уничтожении отработавшего спутника; она проводится после завершения всех других запланированных экспериментов на стадии спуска и сгорания в атмосфере: исследуется увод спутника на более низкую орбиту (порядка 300 км) и определяется дополнительное торможение в атмосфере. Определяется время перехода между орбитами; ожидается его уменьшение при включенном магнитном поле. Эта фаза эксперимента моделирует процедуру увода с орбиты объектов космического мусора [15].

При торможении в плотных слоях атмосферы набегающий поток газа гораздо более плотный, чем в ионосфере, его степень ионизации мала. Около спутника формируется ударная волна, в которой происходит ионизация газа. Магнитное поле спутника взаимодействует с дозвуковым потоком ионизованного газа за ударной волной, изменяя структуру течения. В этом случае также возникает дополнительная сила сопротивления, а также уменьшается тепловой поток к поверхности аппарата. Провести прямые измерения на этой стадии полета сложно, т. к. действуют многие неконтролируемые факторы.

Заключение. Искусственная мини-магнитосфера может быть эффективным средством управления движением КА в ионосфере за счет магнитогидродинамического взаимодействия в системе «плазма – магнитное поле». Этот вывод основан на результатах проведенных экспериментальных исследований, в которых были определены зависимости действующих на модели космических аппаратов силы сопротивления и подъемной силы от параметров источника магнитного поля и набегающего потока разреженной плазмы.

Для создания мини-магнитосферы на борту КА должен быть установлен источник сильного постоянного магнитного поля, например конструкция из постоянных магнитов, помещенная в оболочку, экранирующую магнитное поле. Работа такой системы не предполагает существенных дополнительных энергозатрат. Проблемным является вопрос электромагнитной совместимости источника магнитного поля и другой бортовой электронной аппаратуры.

Предложена идея эксперимента на околоземной орбите с использованием относительно дешевого и доступного микроспутника «кубсат». Анализ результатов исследований, проведенных на стенде, дает основание ожидать положительных результатов космического эксперимента.

Предлагаемый эксперимент был бы первой проверкой концепции «магнитного паруса» как движителя для космических аппаратов.

На существующем оборудовании – плазмоэлектродинамическом стенде ИТМ НАНУ и ГКАУ – возможно проведение комплексных испытаний микроспутников.

Управление движением КА за счет долговременного силового взаимодействия магнитного поля с ионосферной плазмой может рассматриваться как ключевой элемент принципиально новой технологии очистки околоземного космического пространства от объектов «космического мусора».

1. *Паркер Е.* Солнечный ветер. Успехи физических наук. 1964. Т. 84, № 1. С. 169–182.
2. Модель Космоса. В 2 т. Т. 1 Физические условия в космическом пространстве / *Ред. М. И. Панасюк, Л. С. Новиков.* – 8-е изд. – Москва: Книжн. Дом Университет, 2007. – 872 с.
3. *Zubrin R. M. Andrews D. G.* Magnetic Sails and Interplanetary Travel. Journal of Spacecraft and Rockets. 1991. V. 28, N. 2. P. 197–203.
4. *Winglee R. M., Slough J., Ziemba T., Goodson A.* Mini-Magnetospheric Plasma Propulsion: Tapping the energy of the solar wind for spacecraft propulsion. Journal of Geophysical Research. 2000. V. 105, N. A9. P. 21067–21077.
5. *Janhunen P.* Electric Sail for Spacecraft Propulsion. Journal of Propulsion and Power. 2004. V. 20, N. 4. P. 763–764.

6. *Антонов В. М. и др.* Лабораторные эксперименты с терреллой: влияние кинетических масштабов на физическое подобие планетарным магнитосферам // Современные достижения в плазменной гелиогеофизике / *Ред. Л. М. Зеленый, А. А. Петрукович , И. С. Веселовский*. Москва: Институт космических исследований РАН, 2016. 672 с. С. 383–406.
7. *Bamford R., Gibson K. J., Thornton A. J., Bradford J. et al.* The interaction of a flowing plasma with a dipole magnetic field: measurements and modelling of a diamagnetic cavity relevant to spacecraft protection. Plasma Phys. Control. Fusion. 2008. V. 50, N. 12. Art. 124025 (11pp).
8. *Битюрин В. А., Бочаров А. Н.* О наземных МГД-экспериментах в гиперзвуковых потоках. Теплофизика высоких температур. 2010. Т. 48, В. 6. С. 916–923.
9. *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. V. 53, N. 4. P. 463–469. Русск. перев.: *Шувалов В. А., Токмак Н. А., Письменный Н. И., Кочубей Г. С.* Управление динамическим взаимодействием "намагниченной" сферы с гиперзвуковым потоком разреженной плазмы. Теплофизика высоких температур. 2015. Т. 53, № 4. С. 487–493.
10. *Shuvalov V. A., Tokmak N. A., Pis'mennyi N. I., Kochubei G. S.* Dynamic interaction of a magnetized solid body with a rarefied plasma flow. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2016. V 57, N. 1. P. 145–152. Русск. перев.: *Шувалов В. А., Токмак Н. А., Письменный Н. И., Кочубей Г. С.* Динамическое взаимодействие твердого намагниченного тела с потоком разреженной плазмы. Прикладная механика и техническая физика. 2016. Т. 57, № 1. С. 167–175.
11. *Шувалов В. А., Кочубей Г. С., Лазученков Д. Н.* Взаимодействие космических аппаратов с потоками плазмы и электромагнитного излучения в атмосфере Земли. Техническая механика. 2015. № 4. С. 117–125.
12. *Шувалов В. А., Кулагин С. Н., Кочубей Г. С., Токмак А. А.* Физическое моделирование эффектов взаимодействия «намагниченных» тел с атмосферой Земли в гиперзвуковом потоке разряженной плазмы. Теплофизика высоких температур. 2012. Т. 50, № 3. С. 337–345.
13. *Токмак Н. А., Кучугурный Ю. П., Кочубей Г. С., Цокур А. Г.* Мини-магнитосфера как средство управления космическим аппаратом в ионосфере Земли. 17 Українська конференція з космічних досліджень, (Одеса, 21–25 серпня 2017 р.). Тези допов. Київ: ІКІ НАНУ і ДКАУ, 2017. 232 с. С. 223.
14. *Шувалов В. А., Кучугурный Ю. П.* Экспериментальное обоснование концепции искусственной мини-магнитосферы как средства управления движением космических аппаратов в ионосфере Земли. Космич. наука и технология. 2018. Т. 24, № 2. С. 43–46.
15. *Шувалов В. А., Горев Н. Б., Кулагин С. Н., Кучугурный Ю. П.* Торможение объекта «космического мусора» с помощью собственного магнитного поля в ионосфере земли. Физическое моделирование. Космические исследования. – (в печати).
16. *Fujita K.* Particle simulation of moderately-sized magnetic sail. Journal of Space Technology Science. 2004. V. 20, N. 2. P. 26–31.
17. *Нишида А.* Геомагнитный диагноз магнитосферы. Москва: Мир, 1980. 302 с.
18. *Акасофу С. И., Чепмен С.* Солнечно-земная физика. В 2 ч., Ч. 2. Москва: Мир, 1975. 512 с.
19. Технічні характеристики мікросупутникової платформи YuzhSat. Положення про порядок конкурсного відбору проектів корисного навантаження платформи YuzhSat. 2017. С. 3–5. URL: http://space-conf.ikd.kiev.ua/conference/info (Конкурс №2).

Получено 21.05.2018,
в окончательном варианте 19.06.2018