

УДК 629.7.064.56(03)

С. В. ГУБИН, А. С. ДОЛГОВ, Ю. Л. ЖАБЧИК

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ЭНЕРГОДВИГАТЕЛЬНЫЙ МОДУЛЬ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С ГРАФЕНОВЫМ НАКОПИТЕЛЕМ РАБОЧЕГО ТЕЛА

В работе проведен анализ возможности применения энергодвигательного модуля в стандартных микроспутниках серии CubeSat для придания им маневренности по коррекции орбиты с минимальными энергозатратами за счет использования графенового накопителя водорода, электронагревного двигателя с автономной подсистемой энергоснабжения на основе Li-ion аккумуляторов и дискретной логикой функционирования по накоплению энергии. В решении задачи выполнены требования по низкому давлению рабочего тела и проанализированы его возможные запасы в стандартных размерах микроспутников.

Ключевые слова: микроспутник, энергодвигательный модуль, электронагревный двигатель, водород, графен, накопитель.

Введение

Сегодня микроспутникостроение является перспективным, быстроразвивающимся направлением космической техники. Этому послужило уменьшение размеров и массы электронных компонентов, новые конструкционные материалы, и теперь на смену тяжелым аппаратам для большинства околоземных задач приходят космические аппараты (КА) весом в несколько килограмм. Но, несмотря на уменьшение размеров спутника, количество его задач возрастает. В настоящее время кроме задач связи, навигационных, создания спутниковых группировок и т.д., спутник может выводиться и для демонстрации новых технологий. Такая многофункциональность малого спутника приводит к необходимости его орбитального маневрирования. Для этого требуется двигательная установка, размеры которой соответствовали бы размерам малого космического аппарата, а количество рабочего тела было бы максимальным в заданных габаритах. Это возможно с применением электроракетных двигательных установок (ЭРДУ) различного типа, но имеющих малое энергопотребление. Для короткого времени активного существования микроспутников предполагается одновременная работа и двигателей, и бортовой аппаратуры, что сложно организовать при незначительной энерговооруженности аппарата. Кроме этого использование плазменных двигателей с ионизированным рабочим телом, где имеют место плазменные колебания с частотой, соответствующей радиодиапазону электромагнитных волн, создает ряд проблем и с электромагнитной совместимостью,

требующей сложных технических решений. Ввиду этого, в данной работе рассматривается электронагревательный двигатель (ЭНД) с нейтральной рабочей средой, не создающий помех для работы оборудования [1]. При этом применение ЭНД позволяет регулировать затраты энергии, а для создания тяги требуются электроэнергия с низким напряжением питания и мощностью, которые возможно реализовать в рамках малого аппарата. Предпочтительно в ЭНД в качестве рабочего тела (РТ) использовать водород, так как он имеет малую молекулярную массу, что способствуют повышению удельных характеристик. Но хранение водорода традиционными методами предполагает высокие давления, что, в свою очередь, ограничивает применение двигательной установки для космических аппаратов микро класса. Поэтому решение может состоять в применении новых методов хранения водорода и автономном электропитании двигательной установки.

Постановка задачи

Для решения задачи установки ЭНД на малый космический аппарат предлагается использовать альтернативный метод хранения водорода, а именно накопление его в наноструктуре. Нанотехнологии в создании микро КА, в частности хранения водорода в качестве РТ для электротермического двигателя, представляют определенную проблему. Объектом данного анализа является электроракетная двигательная установка, состоящая из 2-х модулей, обозначаемых как 2U, спутника CubeSat [2] и представляющая собой энергодвигательный модуль (ЭДМ) с

автономным электропитанием. Особенностью рассматриваемого энергодвигательного модуля является движитель, который имеет нагреватель двойного действия, работающий как на камеру, так и на нагрев бака, заполненного графаном, что приводит к генерированию рабочего тела. Таким образом, *цель данной работы* состоит в оценке технического решения электрореактивной двигательной установки на базе электронагревательного движителя для спутника стандарта CubeSat 3U, с такими ограничениями, чтобы масса не превышала 2,67 кг, габаритные размеры вписывались в 2U спутника, а предельное давление рабочего тела составляло не более 0,1 Паб.

Ожидаемые макрохарактеристики

Поскольку спутник CubeSat относится к стандартным наноспутникам, то соответственно этому масса аппарата состоящего из 3U (трех модулей – *unit*, рис. 1) не должна превышать 4 кг [3]. В решении принимается, что в 1U (с размерами 0,1×0,1 м) находится полезная нагрузка – КА, например спутник широкого назначения (ДЗЗ, метеорология, связь, демонстрация технологий) с массой модуля – 1,33 кг (согласно стандарту) [3]. Тогда масса энергодвигательного блока не должна превышать 2,67 кг. При этом непосредственно в ЭДМ должны содержаться система управления (СУ), его энергоустановка (ЭУ), система хранения и подачи рабочего тела (СХПРТ), а также электронагревательный двигатель (ЭНД), что ограничивает линейные размеры бака-накопителя водорода до 0,098×0,12 м.

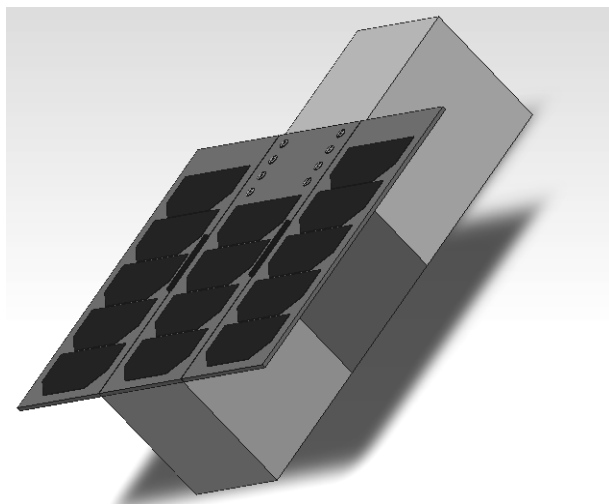


Рис. 1. Вариант спутника CubeSat 3U (1U+2U ЭДМ)

Для решения задачи предлагается хранение водорода в СХПРТ на основе графена, размещенного в цилиндрическом баке. Возможность существования

двумерной углеродной конфигурации – графена – стимулировала теоретическое и экспериментальное изучение различных свойств и особенностей этого объекта [4, 5]. Относительно новой, но растущей составляющей этого направления исследований является обращение к усложненным и дефектным структурам [6]. Установлено существование и изучаются свойства структуры, состоящей из гексагональной углеродной сетки и присоединенных атомов водорода – «графан» [7, 8]. Названный объект перспективен в качестве накопителя водорода, что может являться одной из составляющих разработки компактных накопителей водорода для космических аппаратов. В силу особенностей графена накопление водорода может быть реализовано при низких давлениях, а это способствует существенному снижению массы двигательной установки и уменьшению ее размеров.

Расчет параметров накопителя рабочего тела

В техническом решении предлагается применить бак для хранения рабочего тела (рис. 2), который представляет собой торообразный цилиндр, где располагается 4 объема 0,028×0,033×0,12 м заполненные графаном. Предполагается, что графан заполняет собой требуемые объемы, плотно уложенными листами, параллельными друг другу.

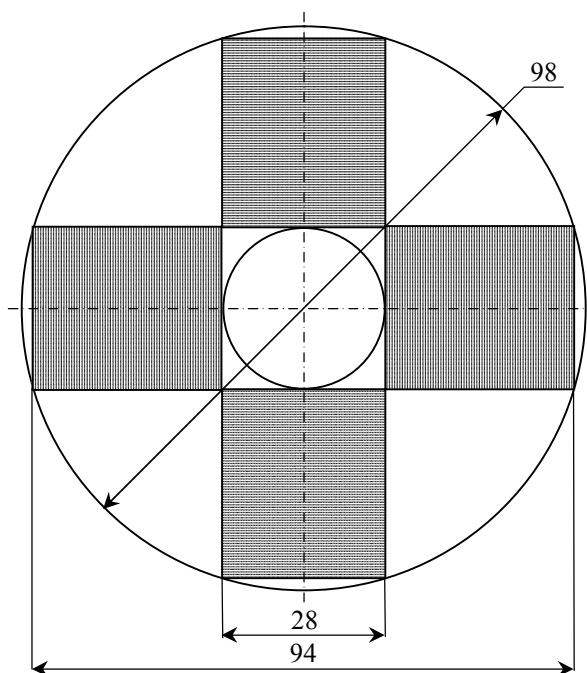


Рис. 2. Бак-накопитель водорода

Объем 4 частей, заполненных водородом, составляет $V_4 = 4 \cdot 28 \cdot 33 \cdot 120 = 4,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$, а полный

объем бака при этом около $8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$.

Так как графан является структурой с толщиной 1 атом углерода и 2 атома водорода [5], причем атомный радиус углерода $r_C = 77 \cdot 10^{-10} \text{ м}$, а аналогичная величина для водорода $r_H = 53 \cdot 10^{-10} \text{ м}$, то общая толщина графана составляет около $3,7 \cdot 10^{-10} \text{ м}$.

Количество слоев в каждом из обособленных объемов достигает $9 \cdot 10^7$.

Графен имеет сотовую структуру с ячейками в виде правильных шестиугольников [5].

Площадь одной ячейки $\approx 5 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2$. Таким образом, число гексагонов на одном листе графена будет:

$$n = \frac{S_{\text{слоя}}}{S} = \frac{120 \cdot 28}{5 \cdot 10^{-14}} = 6,7 \cdot 10^{16}.$$

Количество атомов углерода в одном слое графена в два раза больше, чем сотовых ячеек [9], следовательно, $n_C \approx 1,3 \cdot 10^{17}$.

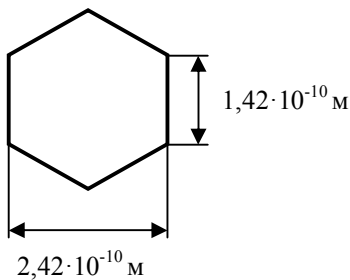


Рис. 3. Ячейка графена

Принимая во внимание, что количество атомов водорода и углерода в графене совпадает, находим общее число атомов в каждом из выделенных объемов $N_n = 1,3 \cdot 10^{17} \cdot 9^7 \approx 1,2 \cdot 10^{25}$. В пересчете на молекулярный водород, указанное количество соответствует десяти молям, что в свою очередь определяет объем водорода в нормальных условиях около $0,23 \text{ м}^3$. Общий объем водорода, который может быть запасен в четырехсекционном накопителе рассматриваемого вида около 1 м^3 .

Общая масса запасаемого водорода при этом приблизительно $80 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$. Масса углерода при этом 1 кг .

В результате расчета получено: объем бака $V_b = 8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$, масса водорода (рабочего тела), $m_H = 0,08 \text{ кг}$, графана. $m_C = 1,08 \text{ кг}$.

Заметим, что концентрация водорода в графене превышает 10^{29} 1/м^3 , что почти вдвое больше аналогичной характеристики гидрида лития и втрое гидрида натрия.

Конструкция

Основу предлагаемого ЭДМ составляет накопительно-двигательный блок (рис. 4), несущим элементом которого является бак, имеющий форму торообразного цилиндра, где располагается четыре объема, заполненные графаном. Бак окантовывается двумя днищами, приваренными к внешнему силовому кольцу. Для подачи рабочего тела из бака в камеру используется штуцер и трубопровод, через который рабочее тело поступает в дроссель и непосредственно в камеру. Электропитание нагревателя подводится на торцовые выводы. Фланец крепится к корпусу двигателя, а между фланцем и корпусом размещается уплотнительное кольцо. В торовой отверстии бака накопительно-двигательного блока установлен движитель с нагревателем двойного действия, работающим как на камеру, так и на нагрев рабочего тела за счет установки двигателя в отверстие торообразного бака.

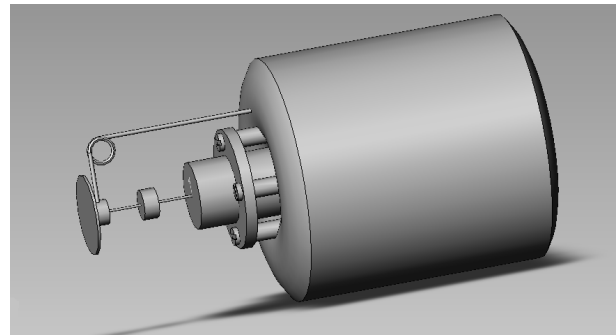


Рис. 4. Накопительно-двигательный блок

Конструкция модуля базируется на несущей панели (рис. 5), где размещены основные элементы. Для управления подачей РТ из бака в камеру используется электроклапан, газ с которого направляется через фильтр в камеру. Под баком закреплены четыре Li-ion цилиндрических аккумулятора системы электропитания.

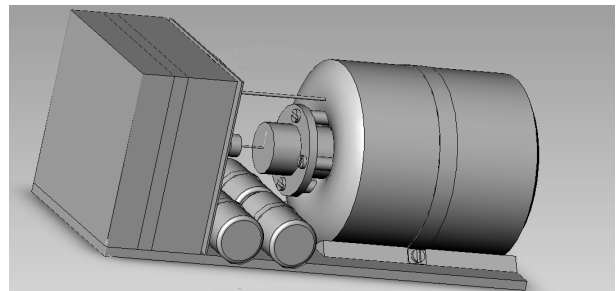


Рис. 5. Энергетическая и двигательная установки

Блок регулятора заряда аккумуляторов выполнен в виде отдельного элемента, включающего контроллер и стабилизатор тока. Фотоэлектрическая батарея системы энергоснабжения спутника выполнена как на развёртываемых модулях, установленных на углепластиковых основаниях, так и на стационарном – несущей поверхности платформы (см. рис. 1).

Расчет параметров двигательной установки

При работе на водороде максимально возможная величина удельного импульса ЭНД близка к значению: $I_S \approx 8500$ м/с. В нашем случае потребная величина тяги принимается минимальной для данного типа ускорителя [10] $F = 0,01$ Н, что с одной стороны ограничено энергоресурсом ЭДМ, а с другой является достаточным условием для придания маневренности КА. Тогда при принятой компоновке и количестве рабочего тела $M_{PT} \approx 0,08$ кг обеспечивается максимальный удельный импульс при характеристической скорости $V_{ch} = 178$ м/с с возможностью достижения высоты конечной орбиты $h_f = 618$ км от начальной $h_0 = 300$ км.

Для принятых значений характеристик ЭНД по тяге и удельному импульсу, секундный массовый расход будет составлять $\dot{m} = 1,17 \cdot 10^{-6}$ кг/с. Дальнейший анализ производился в соответствии с работой [10]. Рассчитанное значение заторможенной температуры газа с допущением, что газодинамический КПД $\eta_g = 1$, а показатель адиабаты для водорода $\gamma = 1,38$, составляет $T_K^0 = 2400$ К.

При этом температура, от которой из графана начинает высвобождаться водород и с которой он изначально поступает в двигатель – 723 К.

По известным отношениям [10] определяем скорость, температуру, плотность и давление в критическом сечении: $V_{cr} = 3400$ м/с, $T_{cr} = 2017$ К, $\rho_{cr} = 4,4 \cdot 10^{-4}$ кг/м³, $P_{cr} = 3680$ Па. Тогда заторможенные плотность и давление составят $\rho = 6,9 \cdot 10^{-4}$ кг/м³, $P = 68065$ Па.

Из технологических возможностей реализации ЭНД принимаем радиус критического сечения сопла $r_{cr} = 10^{-3}$ м (рис. 6). Таким образом, расчетные параметры, такие как диаметр камеры, внутренний диаметр внешнего канала и внешний диаметр внутреннего канала (см. рис. 6) составят $D = 0,0244$ м, $D_1 = 0,006$ м, $D_2 = 0,018$ м. При этом проходные сечения внутреннего и внешнего канала составят $S_1 = 0,28 \cdot 10^{-4}$ м², $S_2 = 2,13 \cdot 10^{-4}$ м². Расход во внутреннем и внешнем канале и скорость на выходе из каналов: $\dot{m}_1 = 0,1 \cdot 10^{-6}$ кг/с, $\dot{m}_2 = 1,06 \cdot 10^{-6}$ кг/с,

$V_c = 50$ м/с.

Температуру газа на входе в нагреватель принимаем $T_0^0 = 723$ К, так как именно при этой температуре начинает высвобождаться водород из графана. Определяем плотность и скорость водорода на входе в каналы: $\rho_0^0 = 23 \cdot 10^{-4}$ кг/м³, $V_k = 15$ м/с. Коэффициенты вязкости и теплопроводности водорода при $T = 723$ К составят $\mu_{723} = 1,5 \cdot 10^{-5}$ кг/м×с, $\kappa_{723} = 0,35$ Вт/м×К, относительно которых определяются коэффициенты вязкости и теплопроводности на входе и на выходе из каналов: $\mu_0 = 1,5 \cdot 10^{-5}$ кг/м×с, $\kappa_0 = 0,35$ Вт/м×К, $\mu_K = 2,622 \cdot 10^{-5}$ кг/м×с, $\kappa_K = 0,495$ Вт/м×К.

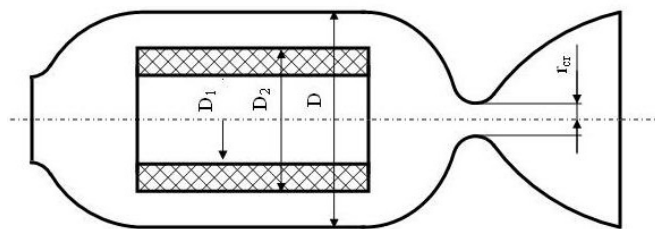


Рис. 6. Схема ЭНД

Учитывая эти данные и то, что удельная теплоемкость при постоянном давлении и температуре 723 К – $C_p = 14623$ Дж/К×кг, определяем числа Рейнольдса, Прандтля и Нуссельта на входе и выходе из каналов: $Re_{10} = 46$, $Re_{1K} = 2,3$, $Re_{20} = 138$, $Re_{2K} = 7$, $Pr_0 = 0,62$, $Pr_K = 0,719$. Так как $Re < 2 \cdot 10^3$, то: $Nu_{10} = 0,215$, $Nu_{1K} = 0,048$, $Nu_{20} = 0,372$, $Nu_{2K} = 0,083$. Тогда коэффициенты теплоотдачи на входе и выходе из каналов: $\alpha_{10} = 12,5$ Вт/К×м², $\alpha_{1K} = 5$ Вт/К×м², $\alpha_{20} = 7,24$ Вт/К×м², $\alpha_{2K} = 2,94$ Вт/К×м².

Из компоновки двигателя в баке-накопителе водорода принимаем длину каналов: $L = 0,11$ м и определяем поверхности теплообмена для внутреннего и внешнего канала, которые составят $f_1 = 0,0033$ м², $f_2 = 0,0097$ м², и температуру нагревателя на входе и выходе внутреннего и внешнего каналов: $T_{w10} = 784$ К, $T_{w20} = 1094$ К, $T_{w1K} = 2548$ К, $T_{w2K} = 3295$ К.

Для достижения таких температур в конструкции рационально применение омического нагревателя на керамической подложке (рис. 7). Вставка из керамики, на которую крепится нагреватель, является элементом ЭНД. Она работает длительное время в условиях высоких температур и температурных градиентов (максимальная температура на нагрева-

теле 3295 К). Поэтому материалом керамической вставки выбран карбид циркония с температурой плавления 3803 К. В данной работе в качестве нагревательного элемента в камере выбран вольфрамовый спиральный элемент, состоящий из 2 контуров нагрева (температура плавления вольфрама 3653 К).

Общая тепловая энергия, с учетом расхода РТ, которая требуется для его ускорения, составляет $Q = 28,7$ Вт (с учетом КПД). Так как температура камеры нагрева 2400 К, а для высвобождения водорода из графана требуется 723 К, то из соотношения температур получаем, что тепловая энергия, требующаяся для высвобождения водорода из графана, составляет $Q_B = 9,3$ Вт.

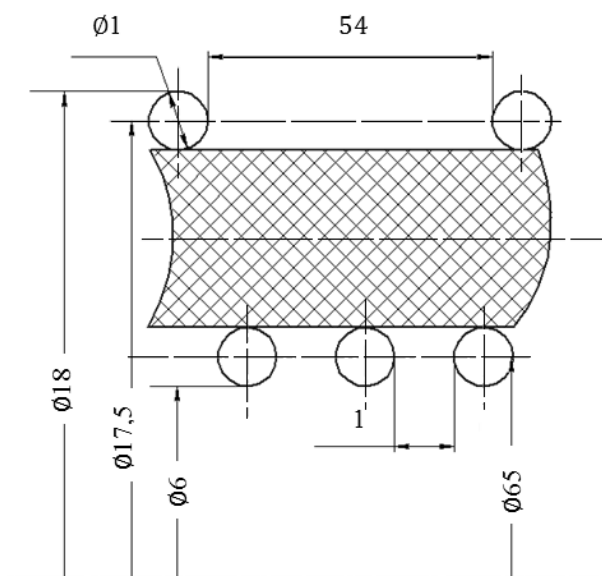


Рис. 7. Керамическая вставка, нагревательный элемент

Выводы

Особенность работы определяется теоретическим обоснованием графенового накопителя водорода [9, 11, 12] и построением двигательной и энергетической установок в едином модуле в рамках космического аппарата типа CubeSat, где модуль размещается в стандартном объеме, не превышая заданную массу. Но при этом модуль является абсолютно независимым от формы и конструкции КА, т.е. он является конструктивной единицей со своей системой энергоснабжения, отдельной от системы энергоснабжения КА. Это было достигнуто применением графена, минимизировавшего массу и габариты бака-накопителя. Космический аппарат с подобным модулем приобретает новое качество - маневренность, таким образом, энергетические возможности предложенного модуля позволяют кор-

ректировать орбиту аппаратов типа 1U CubeSat с постоянным подъемом с высоты от 300 км до более чем 600 км.

Литература

1. Нестеренко, С. Ю. Вибір параметрів космічних енергорушійних систем для маневрів з малою тягою [Текст] : навч. посібник до курс. і дипл. проектування / С. Ю. Нестеренко, Ю. О. Шенетов. – Х. : Нац. аерокосм. ун-т "Харк. авіац. ін-т", 2009. – 36 с.
2. CubeSat [Электронный ресурс] : материал из Википедии — свободной энциклопедии. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/CubeSat>. – 21.11.2014.
3. Храмов, Д. А. Миниатюрные спутники стандарта «CubeSat» [Текст] / Д. А. Храмов // Космічна наука і технологія. – 2009. – Т. 15, № 3. – С. 20–31.
4. Two-dimensional atomic crystals [Electronic resource] / K. S. Novoselov [et al] // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2005. – № 102. – P. 10451–10453. – Access mode: <http://www.pnas.org/content/102/30/10451.full>. – 06.04.2005.
5. Geim, A. K. The rise of graphene [Electronic resource] / A. K. Geim, K. S. Novoselov // Nature Material. – 2007. – № 6(3). – P. 183–191. – Access mode: <http://www.aquila.infn.it/ciuchi/didattica/DOTT/SistemiDisordinati/biblio/nmat1849.pdf>. – 20.03.2007.
6. Подвижность вакансий при деформации и их влияние на упругие свойства графена [Текст] / А. С. Федоров [и др.] // Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. – 2011. – Т. 112, № 5. – С. 938–942.
7. Boukhvalov, D. W. Hydrogen on graphene: Electronic structure, total energy, structural distortions and magnetism from first-principles calculations [Text] / D. W. Boukhvalov, M. I. Katsnelson, A. I. Lichtenstein // Physical Review B. – 2008. – № 77. – P. 035427–035434.
8. Control of Graphene's Properties by Reversible Hydrogenation: Evidence for Graphane [Electronic resource] / D. C. Elias [et al] // Science. – 2009. – V. 323, № 5914. – P. 610–613. Access mode: http://www.academia.edu/3587871/Control_of_Graphenes_Properties_by_Reversible_Hydrogenation_Evidence_for_Graphane. – 17.03.2009.
9. Долгов, А. С. Миграция примесей в структуре графена [Электронный ресурс] / А. С. Долгов, Ю. Л. Жабчик // Журнал нано- и электронной физики. – 2012. – Т. 4, № 3. – С. 03021–5. – Режим доступа: http://jnep.sumdu.edu.ua/download/numbers/2012/3/articles/jnep_2012_V4_03021.pdf. – 30.10.2012.
10. Гайдуков, В. Ф. Выбор параметров и расчет электронагревных двигателей [Текст] / В. Ф. Гайдуков, В. В. Ковалевский. – Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т "Харьк. авіац. ін-т", 1988. – 56 с.
11. Долгов, А. С. Миграция примесных атомов в структуре графена [Электронный ресурс] /

А. С. Долгов, Ю. Л. Жабчик // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии. – 2013. – Т. 11. № 2. – С. 281–293. – Режим доступа: http://www.impr.kiev.ua/nanosys/media/pdf/2013/2/nano_vol11_iss2_p0281p0293_2013.pdf. – 15.04.2013.

12. Долгов, А. С. К вопросу о миграции при-

месных атомов в графене [Электронный ресурс] / А. С. Долгов, Ю. Л. Жабчик // Журнал нано- и электронной физики. – 2013. – Т. 5, № 3. – С. 03039-4. – Режим доступа: http://jnep.sumdu.edu.ua/download/numbers/2013/3/articles/jnep_2013_V5_03039.pdf. – 17.10.2013.

Поступила в редакцию 3.03.2015, рассмотрена на редколлегии 15.05.2015

ЕНЕРГОРУХОВИЙ МОДУЛЬ МАЛОГО КОСМІЧНОГО АПАРАТУ З ГРАФЕНОВИМ НАКОПИЧУВАЧЕМ РОБОЧОГО ТІЛА

С. В. Губін, А. С. Долгов, Ю. Л. Жабчик

В роботі проведено аналіз можливості застосування енергорухового модуля у стандартних мікросупутниках серії CubeSat для надання їм маневреності по корекції орбіти з мінімальними енерговитратами за рахунок використання графенового накопичувача водню, електронагрівного двигуна з автономною підсистемою енергопостачання на основі Li-ion акумуляторів і дискретної логіки функціонування за накопиченням енергії. У вирішенні задачі виконано вимоги з низького тиску робочого тіла та проаналізовано його можливі запаси в стандартних розмірах мікросупутників.

Ключові слова: мікросупутник, енергоруховий модуль, електронагрівний двигун, водень, графен.

POWER AND PROPULSION UNIT OF SMALL SPACECRAFT WITH THE GRAPHENE STORAGE OF PROPELLANT

S. V Gubin, A. S. Dolgov, Yu. L. Zhabchik

The paper analyzes the possibility of use of power and propulsion unit in standard microsattellites of CubeSat series to give the maneuverability for orbit correction with minimal energy consumption through the use of graphene storage of hydrogen, electrothermal propulsion with autonomous power supply subsystem based on Li-ion batteries and discrete logic of operation of the energy accumulation. In problem solving the requirements of the low pressure of propellant are fulfilled and its feasible reserves in standard sizes of microsattellites are analyzed.

Key words: microsattelite, power and propulsion unit, electrothermal propulsion, hydrogen, graphene.

Губин Сергей Викторович – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедры Космической техники и нетрадиционных источников энергии факультета Ракетно-космической техники, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, e-mail: gubinsv@d4.khai.edu.

Долгов Анатолий Сергеевич – канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедры Космической техники и нетрадиционных источников энергии факультета Ракетно-космической техники, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

Жабчик Юлия Леонидовна – магистрант кафедры Космической техники и нетрадиционных источников энергии факультета Ракетно-космической техники, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, e-mail: zhabchik.julia@yandex.ua.