

Перспективы применения и отработка технологии беспроводной передачи электрической энергии между космическими аппаратами

© Р.А. Евдокимов, В.Ю. Тугаенко, Н.В. Щербенко

Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королёва,
г. Королёв, Московская обл., 141070, Россия

Рассмотрены состояние и возможные области применения технологии беспроводной передачи электрической энергии между космическими аппаратами в средне-срочной и дальней перспективе. Представлен космический эксперимент по передаче электрической энергии с борта Российского сегмента Международной космической станции на транспортный грузовой корабль «Прогресс» в лазерном канале. Предложена схема проведения эксперимента, обеспечивающая требуемую продолжительность сеансов, заданное расстояние передачи энергии, а также выполнение требований безопасности экипажа станции. Дано описание научной аппаратуры «Пеликан», разрабатываемой для реализации космического эксперимента, и особенностей ее функционирования. Приведены основные характеристики и компоновка блоков научной аппаратуры. Показаны пути повышения характеристик аппаратуры для обеспечения беспроводной передачи энергии в космосе.

Ключевые слова: беспроводная передача энергии, микроспутники, космические энергостанции, лазерное излучение, космический эксперимент, Российский сегмент Международной космической станции

Введение. Цель данной работы — представить результаты разработки в РКК «Энергия» технологии дистанционного энергоснабжения лазерным инфракрасным излучением с проведением демонстрационного эксперимента по беспроводной передаче электрической энергии между космическими аппаратами (КА) на Международной космической станции (МКС), а также дать краткий обзор перспектив применения этой технологии в космосе.

Первые идеи об использовании беспроводной передачи энергии в космическом пространстве высказывались еще в начале XX столетия пионерами космонавтики: К.Ю. Кондратьюком (передача солнечного излучения зеркалами с орбиты на Землю [1]) и К.Э. Циолковским (подвод энергии к космическому летательному аппарату сфокусированным электромагнитным излучением [2]). Новый импульс к развитию проблема использования сфокусированных пучков электромагнитного излучения для решения различных энергетических задач как в космосе, так и на Земле получила в конце 1960-х годов, после опубликования П. Глэзером работы с описанием проекта сооружения космической солнечной электростанции (КСЭС) [3].

Длительное время дистанционное энергоснабжение в космосе рассматривалось в основном в контексте КСЭС — как способ передачи энергии на Землю микроволновым или лазерным излучением. Однако значительное повышение КПД лазеров и приемников лазерного излучения, а также возрастание энерговооруженности космических аппаратов позволяют рассматривать применения технологии беспроводной передачи электрической энергии (БПЭЭ) между КА. Такое использование БПЭЭ дает возможность обеспечить централизованное энергоснабжение в космосе, основанное на применении одной или нескольких мощных энергетических станций для более эффективного и гибкого энергоснабжения КА по сравнению с существующими автономными бортовыми энергетическими установками. При этом могут быть увеличена энерговооруженность КА, обеспечены стабильность уровня энергопотребления и возможность глубокого регулирования циклограммы энергопотребления при существенном снижении габаритов и массы космического аппарата.

К числу очевидных недостатков дистанционного энергоснабжения КА относятся:

- сравнительно малый КПД канала БПЭЭ (от 5 до 20 % для существующего уровня технологий);
- высокая требуемая точность наведения излучателя и/или большая площадь приемника;
- проблема теплоотвода от лазерных излучателей при относительно низких значениях их рабочей температуры (до + 35 °С).

С учетом указанных недостатков в ближайшем будущем применение технологии БПЭЭ возможно только в тех случаях, когда не требуются большие дальность и мощность передаваемой энергии, а также несущественен сравнительно низкий КПД, (т. е. когда альтернативные способы энергоснабжения либо невозможны, либо негативно сказываются на выполнении КА своей задачи).

В частности, в относительно близкой перспективе технология БПЭЭ между КА может быть использована в следующих областях:

- энергоснабжение созвездий микроспутников (в том числе для поддержания их орбит с помощью электроракетных двигателей) с борта МКС либо специальных КА-энергостанций [4];
- дистанционное энергоснабжение КА для проведения микрогравитационных экспериментов и производства в космосе (КА типа «ОКА-Т») [5].

В отдаленной перспективе, после отработки технологии и повышения характеристик систем БПЭЭ, их могут применять:

- для энергоснабжения с борта орбитальных КА потребителей на поверхности Луны и других тел Солнечной системы (Марса, астероидов, спутников планет и т. п.), а также отделяемых от основных орбитальных КА модулей в ходе планетных исследований [6–8];

- энергоснабжения межорбитальных буксиров [9];
- передачи энергии на Землю с борта космических солнечных электростанций [10, 11].

Для целевого использования систем БПЭЭ на борту КА требуется отработка технологии в натуральных условиях.

Космический эксперимент по беспроводной передаче электрической энергии. В долгосрочную программу научных экспериментов на Российском сегменте (РС) МКС включен космический эксперимент «Пеликан» — «Исследование передачи электрической энергии лазерным излучением между КА». Цель космического эксперимента заключается в отработке технологии БПЭЭ для космических применений в натуральных условиях. Планируется поэтапное увеличение передаваемой электрической мощности с 50...100 Вт до 300...1000 Вт на дальности 1 км, а также демонстрация возможности передачи энергии на дальностях до 5 км. Проведение космического эксперимента по БПЭЭ между КА планируется впервые, характеристики создаваемой научной аппаратуры «Пеликан» отражают существующий уровень развития технологии. Цель проведения космического эксперимента состоит не только в демонстрации осуществимости БПЭЭ в космосе. Предполагается создание элементов технологии и прототипа системы, которые могут использоваться для различного практического применения. Источник лазерного излучения предлагается установить на РС МКС, а приемник — на корабле «Прогресс» (рис. 1).



Рис. 1. Схема размещения научной аппаратуры «Пеликан» для проведения космического эксперимента по БПЭЭ

Схема проведения эксперимента и научная аппаратура.

Предложена следующая схема проведения КЭ. На внешней поверхности одного из модулей РС МКС (основной вариант — многоцелевой лабораторный модуль, МЛМ), на двухосевой поворотной платформе (ДПП) размещается передающая часть системы БПЭЭ — блок «Пеликан-Н» (рис. 2 и 3). Представленный способ размещения блока «Пеликан-Н» обеспечивает безопасность экипажа станции и оборудования РС МКС, так как позволяет исключить попадание лазерного пучка на элементы конструкции РС МКС при проведении сеанса эксперимента.

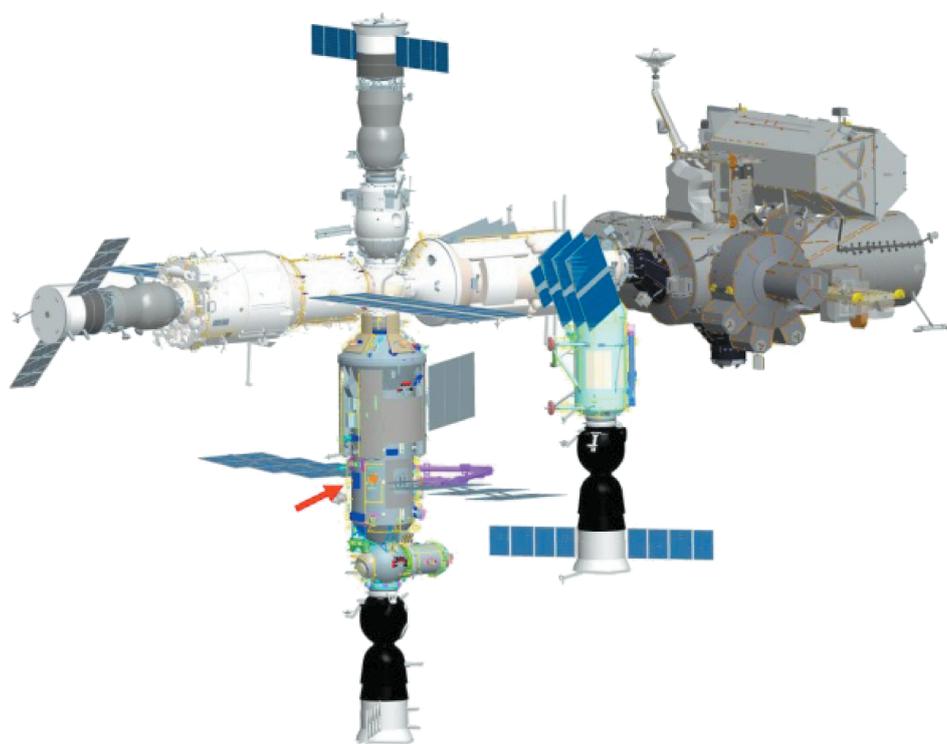


Рис. 2. Положение рабочего места (УРМ-Н5) на внешней поверхности многоцелевого лабораторного модуля Российского сегмента МКС, на котором устанавливается двухосевая поворотная платформа с блоком «Пеликан-Н»

Помимо системы генерации лазерного излучения (СГЛИ) блок «Пеликан-Н» (рис. 4) включает систему обнаружения, наведения и удержания приемника излучения (СОНУ), систему формирования и наведения пучка излучения (СФИН), а также системы питания и управления (СПУ) и обеспечения условий функционирования (СОУФ).

Блок фотоэлектрического приемника-преобразователя (блок «Пеликан-ФПП»), включающий приемник излучения и систему датчиков

позиционирования пучка (СДПП), устанавливают на транспортном грузовом корабле (ТГК) «Прогресс», размещая на блоке мишени со специальными призматическими отражателями, обеспечивающими обратную связь для СОНУ (рис. 5).

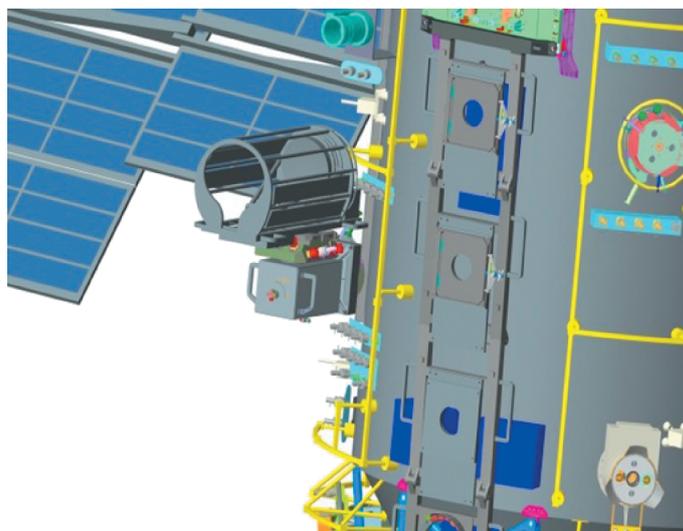


Рис. 3. Общий вид размещения блока «Пеликан-Н» на двухосевой поворотной платформе на МЛМ

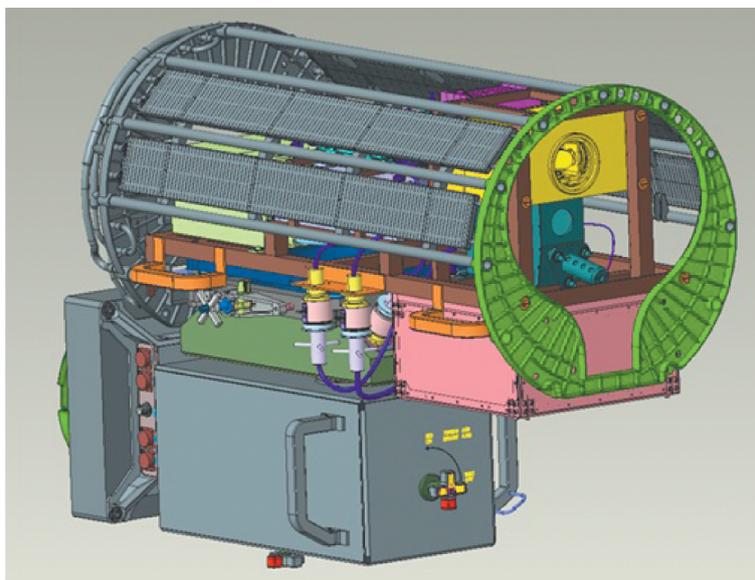
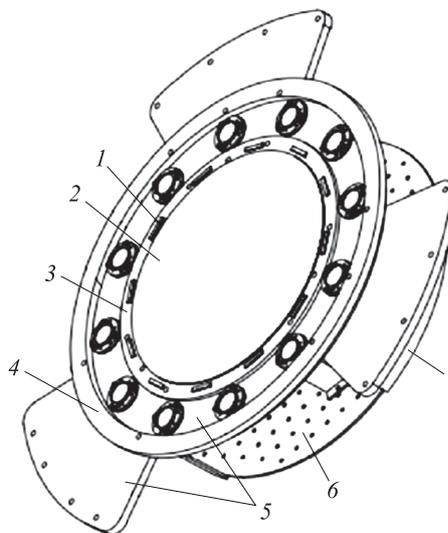


Рис. 4. Блок «Пеликан-Н» четвертого этапа космического эксперимента на двухосевой поворотной платформе

Рис. 5. Общий вид блока «Пеликан-ФПП», установленного на блоке мишени:

1 — система датчиков положения пучка;
2 — матрица фотоэлектрических преобразователей;
3 — система пассивного теплоотвода на основе теплового аккумулятора;
4 — антенный блок терминала системы обмена данными с блоком «Пеликан-Н»; 5 — блок мишени; 6 — крепежная площадка; 7 — фланец площадки крепления блока электроники



Эксперимент проводится после доставки ТГК «Прогресс» грузов на МКС. Перед отстыковкой на крышку люка корабля (после демонтажа стыковочного агрегата) устанавливается блок «Пеликан-ФПП» (на блоке мишени). После отхода корабля от станции на безопасное расстояние обеспечиваются его повторные сближения с МКС на расстоянии до 1000 м. В процессе сближения ТГК «Прогресс» движется по орбите, плоскость которой совпадает с плоскостью орбиты МКС, но имеет меньшую высоту. Корабль догоняет станцию, т. е. появляется в задней полусфере по отношению к ее вектору скорости, а затем проходит под ней. Процесс поиска приемника излучения, его захват и сопровождение с помощью системы СОНУ могут осуществляться на расстояниях от 800 до 5500 м, причем обнаружение приемника с вероятностью не менее 95 % выполняется за 30 с, а с вероятностью не менее 98 % — за 2 мин. Для успешного обнаружения приемника, а также проведения сеанса БПЭЭ требуется, чтобы выполнялась ориентация ТГК «Прогресс» продольной осью на блок «Пеликан-Н» с погрешностью не более $\pm 10^\circ$. Время нахождения ТГК «Прогресс» в рабочей зоне СОНУ для выбранной баллистической схемы составит около 50 мин. Таким образом, имеется значительный запас времени для проверки научной аппаратуры и выполнения процесса наведения блока «Пеликан-Н» на приемник. Длительность собственно сеанса БПЭЭ, т. е. продолжительность работы СГЛИ на максимальной мощности, составит от 1,5 до 5 мин на разных этапах космического эксперимента. Указанная продолжительность сеанса ограничивается возможностями СПУ и СОУФ по обеспечению электропитания и охлаждению СГЛИ. Число сеансов с одним ТГК «Прогресс» (на одном этапе космического эксперимента) — не менее пяти, интервал между сеансами — не менее суток, в течение которых подзаряжаются аккумуляторные батареи

СПУ и осуществляется сброс излучением тепловой энергии, накопленной тепловыми аккумуляторами СОУФ, а также обеспечиваются условия, требуемые для сближения ТГК «Прогресс» и станции в следующем сеансе. Упрощенная геометрическая схема проведения сеанса КЭ «Пеликан» представлена на рис. 6.

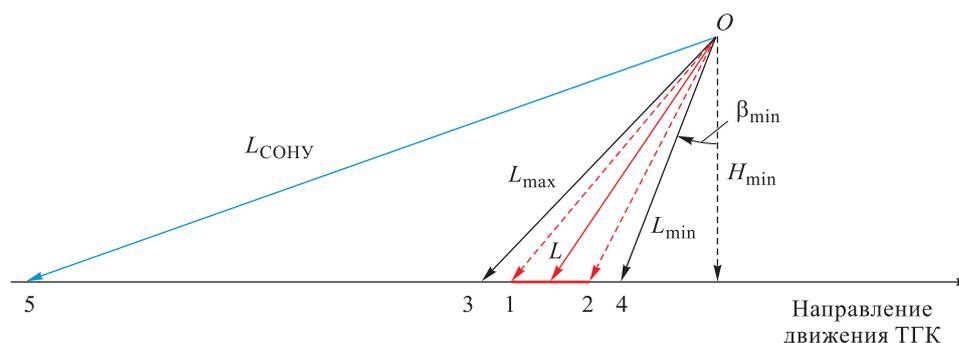


Рис. 6. Схема проведения сеанса КЭ «Пеликан» при осуществлении БПЭЭ на расстояние около 1000 м:

O — точка размещения блока «Пеликан-Н»; $\beta_{\min} \geq 20^\circ$ — угол между направлением в надир и границей области, где возможна БПЭЭ с РС МКС на ТГК «Прогресс» с максимальной эффективностью; 1, 2 — граница области, где выполняется БПЭЭ; 3, 4 — границы области, в которой возможна высокоэффективная БПЭЭ; 5 — граница рабочей зоны СОНУ; $L_{\min} = 800$ м, $L_{\max} = 1200$ м, $L_{COHY} = 5500$ м — расстояния между ТГК «Прогресс» и блоком «Пеликан-Н» в точках 3, 4 и 5; $L = 1000$ м — дальность в середине участка 1–2, на котором выполняется БПЭЭ

В начале сеанса КЭ блок «Пеликан-Н» наводится с помощью ДПП в область небесной сферы, где по баллистическим данным ожидается появление ТГК «Прогресс». Осуществляются поиск, захват и сопровождение блока «Пеликан-ФПП» с помощью СОНУ, которая сканирует лазерным лучом малой мощности (0,5 Вт) с длиной волны 0,665 мкм участок небесной сферы размерами $50^\circ \times 50^\circ$. Лазерное излучение, отраженное от блока мишени, формирует в приемном канале системы изображение. Его обработка позволяет вычислить координаты центра приемника с погрешностью не более 60 угловых секунд. По данным СОНУ с помощью ДПП происходит сопровождение приемника. Погрешность наведения ДПП по каждой из осей — не более 10 угловых минут (грубое наведение).

Перед включением СГЛИ на полную мощность выполняется прецизионное наведение с помощью СФИН и пучка лазерного излучения СГЛИ, функционирующей на минимальной мощности. СФИН является двухзеркальной оптической системой с внеосевым оптоволоконным вводом излучения, генерируемого СГЛИ, формирующей пучок излучения диаметром не более 0,3 м на расстоянии 1000 ± 200 м. СФИН обеспечивает также прецизионное наведение пучка излучения по двум осям в диапазоне ± 5 мрад ($\pm 17,5''$). После выполнения этапа грубого

наведения СФИН по специальному алгоритму осуществляет сканирование пучком излучения СГЛИ на минимальном уровне оптической мощности (50 Вт) участка небесной сферы размером ± 5 мрад по двум осям. При попадании лазерного излучения на приемник датчики СДПП позволяют определить плотность потока в местах их размещения, что дает возможность уточнить положение пучка относительно центра приемника.

На третьем этапе КЭ в составе СГЛИ используется диодный лазер с длиной волны 808 нм и максимальной оптической мощностью около 200 Вт. На четвертом и пятом этапах КЭ предлагается использовать оптоволоконные лазеры с длиной волны 1064 нм и максимальными оптическими мощностями 650 Вт и 1800 Вт соответственно. Требуемая апертура главного зеркала СФИН для третьего этапа КЭ составит около 300 мм, а для четвертого и пятого этапов — только около 40 мм вследствие более высокого качества излучения оптоволоконного лазера.

Электрическая мощность, получаемая блоком «Пеликан-Н» от РС МКС через интерфейсы платформы ДПП, не может превышать 400 Вт. Однако требуемая мощность электропитания данного блока, например в сеансе четвертого этапа космического эксперимента, составляет около 3000 Вт. Поэтому в состав блока «Пеликан-Н» включена СПУ с буферными литий-ионными аккумуляторными батареями.

На РС МКС отсутствуют средства, позволяющие отвести теплоту от СГЛИ блока «Пеликан-Н» в сеансе КЭ, поэтому блок оснащен собственной системой охлаждения СОУФ, отводящей выделяемую тепловую мощность с помощью жидкостного контура в блоки теплового аккумулятора (ТА), функционирующие за счет фазового перехода (плавления) гексадекана. Данное вещество было выбрано вследствие того, что его температура плавления соответствует рабочему диапазону температур лазерных модулей СГЛИ. Накопленная в сеансе тепловая энергия затем излучается с внешней поверхности модулей ТА.

Суммарная масса научной аппаратуры «Пеликан» не превышает 150 кг.

Способы повышения характеристик систем БПЭЭ. Применение технологии БПЭЭ на борту КА для решения конкретных задач даже в среднесрочной перспективе требует повышения характеристик по сравнению с характеристиками научной аппаратуры «Пеликан» (увеличение дальности передачи энергии до десятков и сотен километров, повышение КПД системы, снижение ее массы). С этой целью может быть реализовано следующее:

– повышение КПД источников лазерного излучения и приемников излучения (вплоть до 50...60 %, в частности при переходе к использованию лазеров с длиной волны около 900 нм);

- увеличение дальности передачи энергии за счет как роста апертуры главного зеркала СФИН, так и уменьшения диаметра оптического волокна лазера;

- снижение массы системы БПЭЭ в результате непосредственного электропитания источника лазерного излучения от бортовой энергоустановки КА, т. е. без использования аккумуляторных батарей (вынужденное решение на РС МКС для КЭ «Пеликан»);

- повышение КПД преобразователей мощности в системе питания лазеров;

- переход к системе охлаждения лазера на основе тепловых труб, отказ от жидкостного контура;

- отказ от тепловых аккумуляторов (для длительно работающих на одном уровне мощности систем БПЭЭ), переход на непосредственный сброс теплоты радиаторами системы обеспечения теплового режима.

Таким образом, принятие перечисленных мер поможет увеличить в среднесрочной перспективе КПД системы БПЭЭ между КА до 20...25 %, а также снизить на порядок ее удельную массу (кг/кВт).

Заключение. Представленная выше схема проведения космического эксперимента по отработке технологии БПЭЭ между КА в лазерном канале, облик и основные технические характеристики оборудования и рекомендации по их улучшению были получены в результате выполнения эскизного проектирования в рамках ОКР «Научная аппаратура «Пеликан». Проведение космического эксперимента «Пеликан» на РС МКС позволит отработать ключевые элементы технологии БПЭЭ между КА и подтвердить основные технические характеристики оборудования в натуральных условиях.

Относительно небольшие передаваемые в сеансах КЭ мощности, как и продолжительность сеансов в значительной степени обусловлены ограничениями по электропитанию и теплоотводу со стороны РС МКС. Тем не менее масштабирование отработанной в ходе эксперимента технологии позволит уже в обозримом будущем решать задачи по дистанционному энергоснабжению созвездий микроспутников, а также автономных технологических модулей с борта орбитальных станций либо специализированных космических энергостанций. Имеются также возможности значительного повышения характеристик перспективных систем БПЭЭ между КА за счет использования как более совершенной элементной базы, так и рациональных решений в системах их электроснабжения и теплоотвода.

Можно также использовать элементы создаваемой технологии в наземных средствах БПЭЭ, в частности, для энергоснабжения беспилотных летательных аппаратов.

Элементы представленной технологии могут найти применение и при создании систем лазерной связи с КА, исследованиях атмосферы

и поверхности Земли посредством лазерного зондирования, при разработке систем дистанционного энергоснабжения потребителей на поверхности Земли из космоса.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Пионеры ракетной техники. Кибальчич, Циолковский, Цандер, Кондратюк. Избранные труды.* Москва, Наука, 1961, 671 с.
- [2] Циолковский К.Э. *Исследование мировых пространств реактивными приборами.* Москва, Машиностроение, 1967, 375 с.
- [3] Glaser P.E. Power from the Sun: it's Future. *Science*, 1968, vol. 162, pp. 857–866.
- [4] Chertok B.E., Evdokimov R.A., Legostaev V.P., Lopota V.A., Sokolov B.A., Tugaenko V.Yu. Remote electric power transfer between spacecrafts by infrared beamed energy. *AIP Conference Proceedings*, 2011, vol. 1402 (1), pp. 489–496. DOI: 10.1063/1.3657057
- [5] Евдокимов Р.А., Корнилов В.А., Лобыкин А.А., Тугаенко В.Ю. Космическая технологическая система с дистанционным энергоснабжением по лазерному каналу. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, 2018, № 9, с. 82–92.
- [6] Евдокимов Р.А., Тугаенко В.Ю. Дистанционное энергоснабжение потребителей на поверхности Луны. *Известия РАН. Энергетика*, 2019, № 5, с. 3–19.
- [7] Takeda K., Tanaka M., Hashimoto K., Miura S. Laser power transmission for the energy supply to the rover exploring ice on the bottom of the crater in the lunar polar region. *Proc. SPIE*, 2002, vol. 4632, pp. 223–227. DOI: 10.1117/12.469770
- [8] Hyde L., Papadopoulos D.P., Murbach M.S. Combining laser communications and power beaming for use on planetary probes. *10th International Planetary Workshop*, 2013, 5 p.
- [9] Грибков А.С., Евдокимов Р.А., Синявский В.В., Соколов Б.А., Тугаенко В.Ю. Перспективы использования беспроводной передачи электрической энергии в космических транспортных системах. *Известия РАН. Энергетика*, 2009, № 10, с. 118–123.
- [10] Грилихес В.А. *Солнечная энергия и космические полеты.* Москва, Наука, 1984, 216 с.
- [11] Cougnet C., Sein E., Celeste A., Summerer L. Solar Power Satellites for Space Applications. *Proc. IAC-2004*, 2004, Paper 8.

Статья поступила в редакцию 24.05.2022

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Евдокимов Р.А., Тугаенко В.Ю., Щербенко Н.В. Перспективы применения и отработка технологии беспроводной передачи электрической энергии между космическими аппаратами. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2022, вып. 7. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-7-2196>

Евдокимов Роман Александрович — д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник ПАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королёва». Специалист в области проектирования и конструкции космических аппаратов, системного анализа. e-mail: evdokimovrom@yandex.ru; Roman.Evdokimov@rsce.ru

Тугаенко Вячеслав Юрьевич — д-р техн. наук, начальник отдела ПАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королёва». Специалист в области проектирования и конструкции космических аппаратов.

e-mail: Vjatcheslav.Tugaenko@rsce.ru

Щербенко Наталья Владимировна — инженер-конструктор 1-й категории ПАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королёва». Специалист в области проектирования и конструкции космических аппаратов.

e-mail: Natalya.shcherbenko@rsce.ru

Application and development prospects for spacecraft-to-spacecraft wireless transmission of electrical energy

© R.A. Evdokimov, V.Yu. Tugaenko, N.V. Scherbenko

S.P. Korolev RSC Energia, Korolyov, Moscow Region, 141070, Russia

The purpose of the study was to examine the state and possible fields of short-and-long term application of technology for spacecraft-to-spacecraft wireless transmission of electrical energy. The paper focuses on a space experiment on the transmission of electrical energy from the Russian Segment of the International Space Station to the Progress transport cargo ship in the laser channel and introduces an experiment scheme that provides the required duration of sessions, a given distance of energy transmission, as well as the fulfillment of the safety requirements for the station crew. The paper describes the scientific equipment “Pelican”, developed for the space experiment, specifies its features, gives its main characteristics and layout of blocks, and shows the ways to improve the equipment's performance to ensure wireless transmission of energy in space.

Keywords: wireless power transmission, microsatellites, space power stations, laser radiation, space experiment, Russian segment of the International Space Station

REFERENCES

- [1] *Pionery raketnoy tekhniki. Kibalchich, Tsiolkovskiy, Tsander, Kondratyuk. Izbrannye trudy* [Rocket Pioneers. Kibalchich, Tsiolkovsky, Zander, Kondratyuk. Selected works]. Moscow, Nauka Publ., 1961, 671 p.
- [2] Tsiolkovskiy K.E. *Issledovanie mirovykh prostranstv reaktivnymi priborami* [Research of world spaces by reactive devices]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1967, 375 p.
- [3] Glaser P.E. Power from the Sun: it's Future. *Science*, 1968, no. 162, pp. 857–866.
- [4] Chertok B.E., Evdokimov R.A., Legostaev V.P., Lopota V.A., Sokolov B.A., Tugaenko V.Yu. Remote electric power transfer between spacecraft by infrared beamed energy. *AIP Conference Proceedings*, 2011, vol. 1402 (1), pp. 489–496. DOI: 10.1063/1.3657057
- [5] Evdokimov R.A., Kornilov V.A., Lobykin A.A., Tugaenko V.Yu. *Poverkhnost. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neytronnye issledovaniya — Journal of Surface Investigation. X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2018, no. 9, pp. 82–92.
- [6] Evdokimov R.A., Tugaenko V.Yu. *Izvestiya RAN. Energetika — Thermal Engineering*, 2019, no. 5, pp. 3–19.
- [7] Takeda K., Tanaka M., Hashimoto K., Miura S. Laser power transmission for the energy supply to the rover exploring ice on the bottom of the crater in the lunar polar region. *Proc. SPIE*, 2002, 4632, pp. 223–227. DOI: 10.1117/12.469770
- [8] Hyde L., Papadopoulos D.P., Murbach M.S. Combining laser communications and power beaming for use on planetary probes. *10th International Planetary Workshop*, 2013, 5 p.
- [9] Gribkov A.S., Evdokimov R.A., Sinyavskiy V.V., Sokolov B.A., Tugaenko V.Yu. *Izvestiya RAN. Energetika — Thermal Engineering*, 2009, no. 10, pp. 118–23.
- [10] Grilikhes V.A. *Solnechnaya energiya i kosmicheskie polety* [Solar energy and space flights]. Moscow, Nauka Publ., 1984, 216 p.

- [11] Cougnet C., Sein E., Celeste A., Summerer L. Solar power satellites for space applications. *Proc. IAC*, 2004, 2004, p. 8.

Evdokimov R.A., Dr. Sc. (Eng.), Lead Research Fellow, S.P. Korolev RSC Energia; specializes in spacecraft design and construction, system analysis.
e-mail: evdokimovrom@yandex.ru; Roman.Evdokimov@rsce.ru

Tugaenko V.Yu., Dr. Sc. (Eng.), Head of the Department, S.P. Korolev RSC Energia; specializes in spacecraft design and construction. e-mail: Vjatcheslav.Tugaenko@rsce.ru

Scherbenko N.V., 1st category design engineer S.P. Korolev RSC Energia; specializes in spacecraft design and construction. e-mail: Natalya.shcherbenko@rsce.ru