

Условия проведения и баллистическая схема космического эксперимента по беспроводной передаче электрической энергии

© Р.А. Евдокимов, В.Ю. Тугаенко, А.В. Смирнов

Публичное акционерное общество «Ракетно-космическая корпорация «Энергия»
им. С.П. Королёва», г. Королев Московской обл., 141070, Россия

Приведены условия проведения сеансов космического эксперимента «Пеликан» по беспроводной передаче электрической энергии в лазерном канале между Российским сегментом Международной космической станции и транспортным грузовым кораблем «Прогресс». Кратко рассмотрены цели эксперимента, состав и размещение блоков научной аппаратуры «Пеликан» для его выполнения. Предложены баллистические схемы, отвечающие условиям проведения космического эксперимента, а также требованиям безопасности. Показана реализуемость сеансов эксперимента с точки зрения соответствия параметров относительного движения корабля «Прогресс» и станции возможностям элементов системы наведения излучателя. Приведены оценки затрат характеристической скорости на совершение маневров корабля «Прогресс», выполненных для организации повторных пролетов станции и подтверждающих возможность реализации не менее пяти сеансов космического эксперимента с этим кораблем.

Ключевые слова: беспроводная передача электрической энергии, космический эксперимент, лазерное излучение, баллистическая схема, Российский сегмент Международной космической станции

Введение. Цель космического эксперимента (КЭ) «Пеликан» («Исследование передачи электрической энергии лазерным излучением между космическими аппаратами») [1–3] — отработка технологии дистанционного энергоснабжения в космосе [4–10] в натуральных условиях. До сих пор КЭ по беспроводной передаче электрической энергии (БПЭЭ) еще не проводили, эксперимент предполагается выполнить впервые. Планируются поэтапное увеличение передаваемой электрической мощности с 50...100 Вт до 300...1000 Вт на дальности 1 км, а также демонстрация возможности передачи энергии на дальности до 5 км.

Предполагается размещение излучателя (блока «Пеликан-Н») на двухосевой поворотной платформе (ДПП) на внешней поверхности одного из модулей Российского сегмента (РС) Международной космической станции (МКС). В качестве основного варианта рассматривается многофункциональный лабораторный модуль (МЛМ-У) «Наука». Приемник излучения (блок «Пеликан-ФПП») должен быть размещен на транспортном грузовом корабле (ТГК) «Прогресс». Экипаж устанавливает блок «Пеликан-ФПП» перед отстыковкой

корабля от станции (после выполнения задач по доставке грузов на МКС) на крышку люка корабля вместо стыковочного агрегата.

Состав научной аппаратуры для выполнения космического эксперимента «Пеликан» и схема ее размещения представлены на рис. 1. Система обнаружения, наведения и удержания (СОНУ) приемника излучения используется для поиска и относительно грубого (с погрешностью не более 1 угловой минуты) определения текущих координат центра блока «Пеликан-ФПП». Обратную связь данной системе, сканирующей пространство лазерным лучом малой мощности, обеспечивает блок мишени с отражателями, через который блок «Пеликан-ФПП» размещается на крышке люка стыковочного агрегата корабля «Прогресс».



Рис. 1. Схема размещения научной аппаратуры для проведения космического эксперимента «Пеликан» (дальность передачи энергии 1...5 км; передаваемая мощность 50...1000 Вт; продолжительность одного сеанса 1,5...5,0 мин)

Для грубого (с погрешностью не более 10 угловых минут) наведения излучателя (блока «Пеликан-Н») на блок «Пеликан-ФПП», по данным СОНУ, используется ДПП. Система генерации лазерного излучения (СГЛИ) выдает пучок большой мощности, с помощью которого и осуществляется передача энергии. Он фокусируется с использованием системы формирования и наведения пучка (СФИН), которая не только создает пучок с заданной расходимостью, но и

выполняет его точное наведение на центр приемника [11]. Система питания и управления (СПУ) обеспечивает электропитание СГЛИ большой мощности, а система обеспечения условий функционирования (СОУФ) — охлаждение СГЛИ в процессе БПЭЭ.

Место, где может быть размещен на РС МКС блок «Пеликан-Н», показано на рис. 2. Красная стрелка указывает на универсальное рабочее место (УРМ) УРМ-Н5 на внешней поверхности модуля МЛМ-У. При размещении блока «Пеликан-Н» на двухосной поворотной платформе на данном рабочем месте обеспечивается безопасность проведения эксперимента — пучок излучения будет направлен в заднюю полусферу относительно направления движения МКС, что исключает его попадание на элементы конструкции станции.

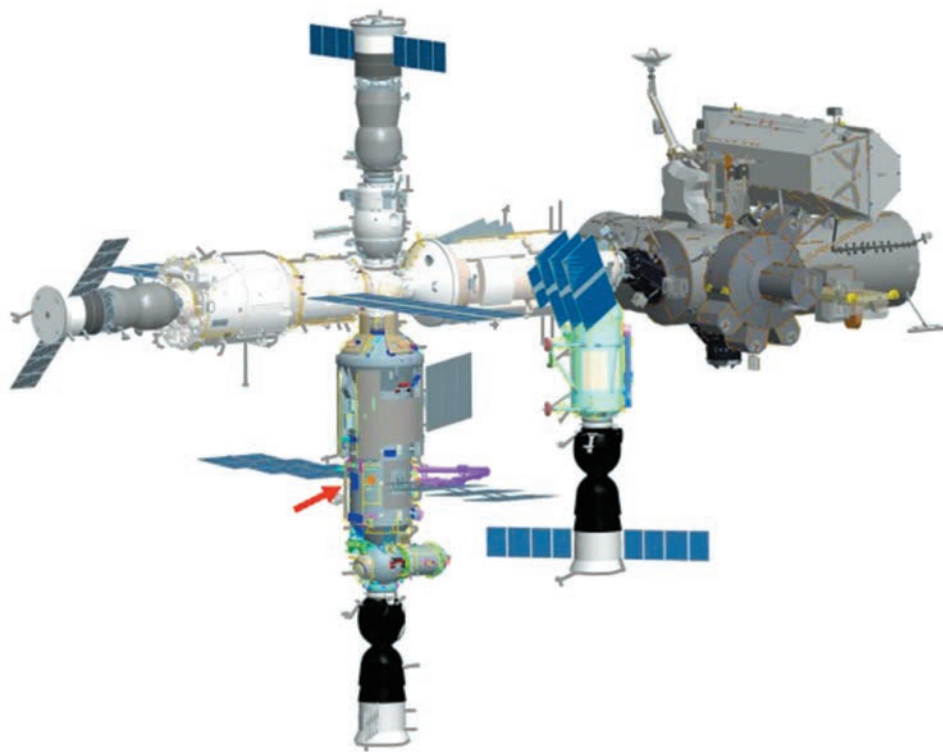


Рис. 2. Российский сегмент МКС с модулем МЛМ-У и возможное место размещения блока «Пеликан-Н» (рабочее место УРМ-Н5)

Условия проведения эксперимента. В соответствии с требованиями безопасности сеансы КЭ «Пеликан» могут быть организованы только при повторных сближениях ТК «Прогресс» с РС МКС после расстыковки (без зависания относительно станции). Поскольку МКС ориентирована в орбитальной системе координат (ОСК), а пучок излучения должен быть направлен в заднюю полусферу, при сближении

ТГК «Прогресс» со станцией и движении с ней в одной плоскости должен проходить под станцией. Минимальное расстояние между кораблем и станцией соответствует положению в надир по отношению к РС МКС. Из соображений безопасности (исключения попадания лазерного излучения на элементы конструкции МКС) принимается, что минимальное значение угла β между оптической осью блока «Пеликан-Н» и направлением в надир составляет не менее 20° . Данному значению угла β соответствует ближайшая к точке размещения блока «Пеликан-Н» граница области, в которой возможно выполнение БПЭЭ (рис. 3, 4).

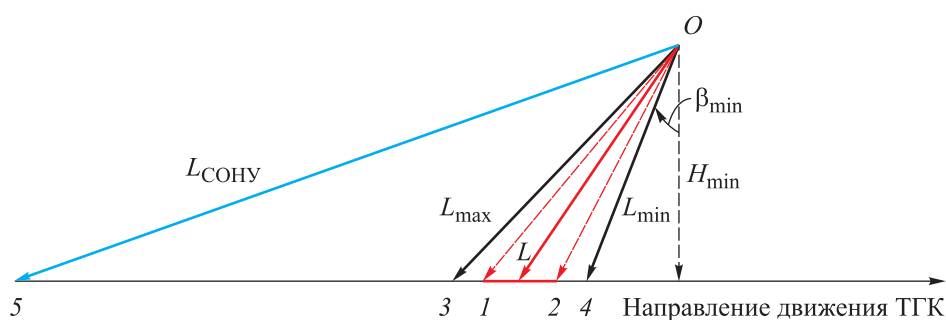


Рис. 3. Схема проведения сеанса КЭ «Пеликан» при осуществлении БПЭЭ на расстоянии 1000 м:

1, 2 — граница области, где выполняется БПЭЭ; 3, 4 — границы области, в которой возможна высокоэффективная БПЭЭ; 5 — граница рабочей зоны СОНУ; 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; $L_{\min} = 800$ м, $L_{\max} = 1200$ м, $L_{\text{СОНУ}} = 5500$ м — расстояния между ТГК «Прогресс» и блоком «Пеликан-Н» в точках 4, 3 и 5; $L = 1000$ м — дальность в середине участка 1–2, на котором выполняется БПЭЭ; H_{\min} — минимальное расстояние до станции

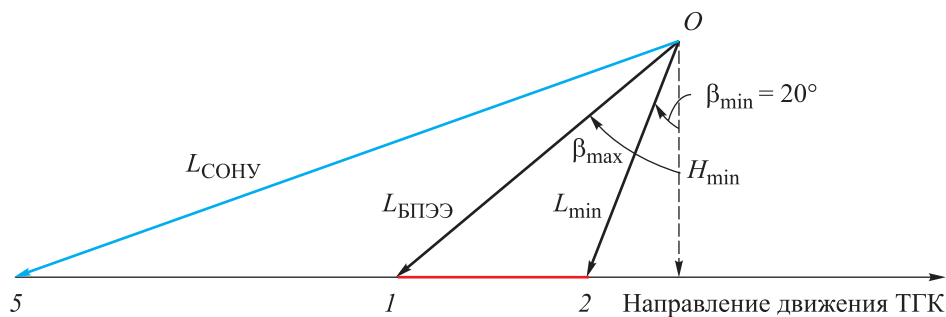


Рис. 4. Схема проведения сеанса КЭ «Пеликан» при осуществлении БПЭЭ на дистанциях 3000 м и 5000 м:

1, 2 — граница области, где должен быть проведен сеанс БПЭЭ; 5 — граница рабочей зоны СОНУ; O — точка размещения блока «Пеликан-Н»; $L_{\text{СОНУ}} = 5500$ м — максимальная дальность, на которой функционирует СОНУ; $L_{\text{БПЭЭ}}$ — дистанция, на которой начинается БПЭЭ (3000 м либо 5000 м); β_{\max} — угол поворота оптической оси блока «Пеликан-Н» относительно надира, соответствующий $L_{\text{БПЭЭ}}$; $L_{\text{БПЭЭ}}$ — минимальная дистанция, на которой осуществляется БПЭЭ

Рассмотрим две схемы проведения сеанса КЭ: первая — для реализации БПЭЭ с максимальной эффективностью на расстояние около 1000 м, вторая — для демонстрации принципиальной возможности выполнения БПЭЭ на расстояние до 3000 м и до 5000 м. В случае организации сеанса КЭ по первой схеме (см. рис. 3) БПЭЭ выполняется с соблюдением жестких ограничений по дальности. Допустимое значение минимального расстояния L_{\min} обусловлено не только требованиями безопасности, но и рабочими зонами СОНУ и СФИН. Для СОНУ диапазон рабочей зоны составляет от 800 до 5500 м. Для обеспечения с помощью СФИН заданного диаметра пучка излучения на приемнике (0,3 м) расстояние между блоком «Пеликан-Н» и приемником должно быть равно 1000 ± 200 м. Таким образом, рабочей зоне научной аппаратуры «Пеликан», в которой БПЭЭ с РС МКС на ТГК «Прогресс» может осуществляться с максимальной эффективностью, соответствуют расстояния между точкой размещения блока «Пеликан-Н» и кораблем от 800 до 1200 м (см. рис. 3).

Траектория пролета ТГК «Прогресс» относительно станции (включая расстояние H_{\min}) должна быть выбрана таким образом, чтобы корабль находился в этой зоне не менее 300 с (отрезок 3–4 на рис. 3), что соответствует максимальной продолжительности БПЭЭ на этапе эксперимента, когда должна быть обеспечена передача электрической мощности от 50 до 100 Вт. При больших передаваемых мощностях планируются менее продолжительные сеансы — 180 с и 90 с. Если время нахождения в зоне, определяемой отрезком 3–4 на рис. 3, превышает требуемое время передачи энергии, то БПЭЭ будет осуществлена при прохождении кораблем части рабочей зоны вблизи той точки, которой соответствует расстояние 1000 м (отрезок 1–2 на рис. 3).

Должно быть также обеспечено необходимое время на поиск, захват и сопровождение СОНУ блока «Пеликан-ФПП». Для этого ТГК «Прогресс» должен находиться не менее 2 мин в зоне, соответствующей расстояниям до точки размещения блока «Пеликан-Н», от 5500 до 1200 м (отрезок 5–3 на рис. 3).

Требуется также соблюдение ограничения на угловую скорость движения ТГК «Прогресс» относительно точки установки блока «Пеликан-Н» в зоне, где возможна БПЭЭ: $1,0 \text{ } ^\circ/\text{с} \leq \omega_{\text{ТГК}} \leq 3,0 \text{ } \text{град}/\text{с}$. Это ограничение обусловлено возможностями платформы ДПП.

При проведении эксперимента по второй схеме предполагается, что процесс БПЭЭ начинается при заданном расстоянии $L_{\text{БПЭЭ}}$ ТГК «Прогресс» от блока «Пеликан-Н» и заканчивается по истечении заданного времени передачи $t_{\text{БПЭЭ}}$, при этом $\beta_{\min} = 20^\circ$ (см. рис. 4).

Подобная схема позволит обеспечить максимально возможные угловые скорости, так как для больших дальностей (до 5000 м) и β_{\min} , существенно большего 20° , величина угловой скорости может быть

неприемлемо мала с точки зрения ограничения для ДПП, представленного выше.

Для дальности 3000 м рассматриваются сеансы БПЭЭ длительностью 300 с и 180 с, а для дальности 5000 м — 180 с.

Для второй схемы, как и для первой схемы, должны быть обеспечены время, необходимое для поиска, захвата и сопровождения СОНУ блока «Пеликан-ФПП», а также соблюдение ограничения на угловую скорость движения ТГК «Прогресс» относительно станции в процессе БПЭЭ.

Между двумя сеансами КЭ (последовательными сближениями ТГК «Прогресс» со станцией) должно проходить не менее суток для обеспечения подзарядки аккумуляторных батарей в составе системы питания и управления блока «Пеликан-Н», а также охлаждения тепловых аккумуляторов СОУФ. На каждом этапе должно быть выполнено не менее пяти сеансов КЭ (пять повторных сближений). С точки зрения условий функционирования СОНУ, а также обеспечения теплового режима блока «Пеликан-Н» предпочтительно выполнение сеанса эксперимента на теневом участке орбиты МКС (но данное условие не является необходимым).

Возможные баллистические схемы выполнения сеанса КЭ. После отстыковки от МКС корабль «Прогресс» выполняет переход на орбиту проведения КЭ. Величина и последовательность импульсов зависят от выбранной схемы расстыковки.

С учетом условий проведения космического эксперимента ТГК «Прогресс» перед началом сеанса эксперимента должен находиться на коэллиптической орбите ниже орбиты МКС, в задней полусфере относительно станции. Благодаря более высокой угловой скорости движения по орбите ТГК «Прогресс» сокращает расстояние до МКС, проходит на заданном расстоянии под станцией и уходит вперед по направлению полета. Для подготовки к следующему сеансу КЭ необходимо поднять орбиту ТГК выше орбиты МКС и при более низкой угловой скорости на более высокой орбите корабль отстает от МКС. Затем он переходит на коэллиптическую орбиту ниже орбиты МКС, сзади от станции, и приступает к выполнению следующего сеанса КЭ «Пеликан». Затраты характеристической скорости на проведение каждого сеанса КЭ (без учета затрат на движение вокруг центра масс корабля) зависят от разности высот орбит ТГК и МКС.

Расчетная траектория движения ТГК «Прогресс» относительно МКС для случая пролета на расстоянии около 1000 м (минимальное расстояние ≈ 900 м) представлена на рис. 5. Начало координат соответствует центру масс МКС, а положение осей — орбитальной системе координат (ось $Y_{ОСК}$ направлена по радиус-вектору МКС, $X_{ОСК}$ — по трансверсали к орбите).

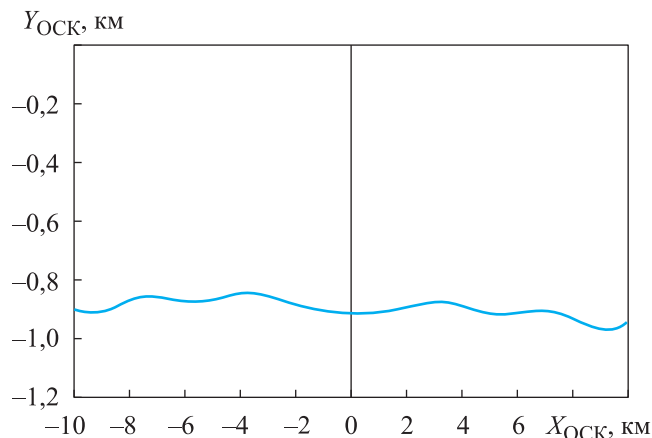


Рис. 5. Траектория пролета ТГК «Прогресс» относительно МКС на минимальном расстоянии около 900 м

Зависимость относительного расстояния между кораблем и станцией от времени (кривая красного цвета), а также угла между направлением в надир и на ТГК «Прогресс» (кривая синего цвета) показана на рис. 6. За нулевой момент времени принят момент пересечения кораблем местной вертикали МКС.

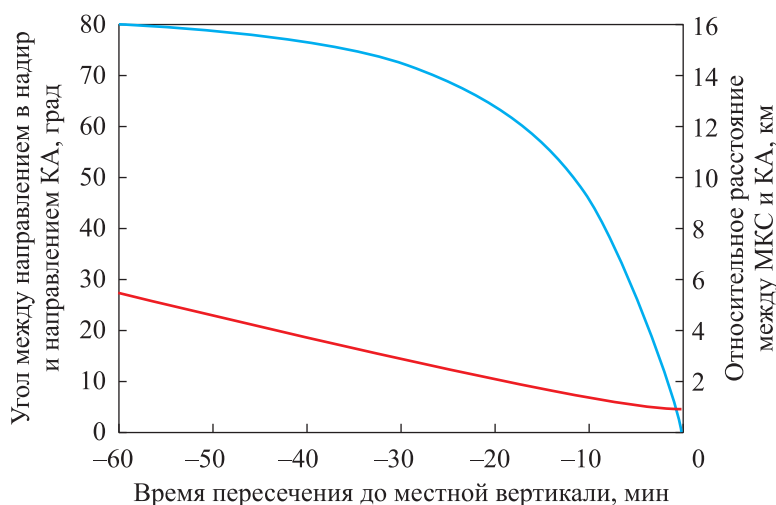


Рис. 6. Графики изменения угла визирования блока «Пеликан-Н» на ТГК «Прогресс» (—) и относительного расстояния между кораблем и станцией (—) при пролете на минимальном расстоянии около 900 м

При организации сеанса КЭ с пролетом ТГК «Прогресс» ниже МКС на расстоянии около 900 м корабль попадает в рабочую зону СОНУ за 60 мин до пересечения ТГК местной вертикали МКС (на расстоянии около 5500 м). Таким образом, имеется большой запас

времени для поиска блока «Пеликан-ФПП» с помощью СОНУ и наведения на него блока «Пеликан-Н». Рабочая зона СФИН и, соответственно, та же зона, где возможна высокоэффективная БПЭЭ, начинается за 8,5 мин до пересечения местной вертикали, на расстоянии 1200 м от станции. Когда угол между линией визирования блока «Пеликан-Н» на ТГК и направлением в надир становится меньше 20° , корабль выходит из зоны БПЭЭ. Это происходит за 3,5 мин до пересечения местной вертикали на расстоянии 970 м. Таким образом, ТГК «Прогресс» находится в зоне, где возможна БПЭЭ, в течение 5 мин, что отвечает установленным требованиям. Угловая скорость движения ТГК «Прогресс» относительно блока «Пеликан-Н» изменяется от 0,0026 град/с в начале рабочей зоны СОНУ до 0,0834 град/с в конце зоны БПЭЭ. Непосредственно в зоне БПЭЭ она находится в диапазоне от 0,0597 до 0,0834 град/с (от 3,58 до 5,0 '/с), что соответствует возможностям ДПП.

Для повторного проведения сеанса КЭ с пролетом на расстоянии около 1000 м необходимо выполнить последовательно два маневра изменения высоты орбиты ТГК — повысить среднюю высоту орбиты на 2 км, а затем понизить на 2 км. Суммарные затраты характеристической скорости для организации повторного сеанса КЭ составят 2,4 м/с. Данные затраты незначительны, что позволяет выполнить не менее пяти сеансов КЭ с одним кораблем «Прогресс».

Вторая баллистическая схема предполагает пролеты ТГК «Прогресс» на минимальном расстоянии 2 км и 3 км от МКС. Как и для первой схемы, зона БПЭЭ заканчивается за 3,5 мин до пересечения ТГК местной вертикали МКС. Рабочая зона СОНУ начинается за 25,5 мин до пересечения ТГК местной вертикали МКС при пролете на расстоянии 2000 м и за 15,5 мин при пролете на расстоянии 3000 м соответственно. Угловая скорость движения ТГК «Прогресс» относительно блока «Пеликан-Н» изменяется в диапазоне 0,0157...0,0826 град/с в первом случае и 0,0339...0,0836 град/с — во втором.

В первом случае корабль подходит к станции на расстояние 5000 м за 22,8 мин до пересечения вертикали МКС, а на расстояние 3000 м — за 11,2 мин. Данный вариант удобен для проведения сеанса КЭ с демонстрацией БПЭЭ на расстоянии до 3000 м, так как обеспечиваются длительное время работы СОНУ и достаточно высокая угловая скорость движения ТГК относительно станции в процессе БПЭЭ (около 2,6 '/с). Однако этот вариант не оптимален для демонстрации БПЭЭ на расстоянии 5000 м, потому что угловая скорость движения (около 1 '/с) оказывается близка к минимально допустимому для ДПП значению.

Для демонстрации БПЭЭ на расстояние до 5000 м в большей степени подходит вариант пролета на минимальном расстоянии 3000 м,

так как угловая скорость движения ТГК «Прогресс» относительно станции будет составлять около 2 '/с. В этом случае расстояние между кораблем и станцией, равное 5000 м, достигается за 13 мин до пересечения местной вертикали. Остается около 2,5 мин для поиска блока «Пеликан-ФПП» с помощью СОНУ и наведения на него блока «Пеликан-Н».

Суммарные затраты характеристической скорости для организации повторного сеанса КЭ при пролете на расстоянии 2000 м составят 4,7 м/с, а на расстоянии 3000 м — 7,1 м/с.

Заключение. Предложены баллистические схемы проведения сеансов космического эксперимента «Пеликан» по отработке технологии беспроводной передачи электрической энергии в космосе. Сеансы эксперимента должны проводиться при специально организованных повторных пролетах ТГК «Прогресс» на заданном расстоянии относительно МКС.

Рассмотренные баллистические схемы позволяют удовлетворить все условия проведения эксперимента. Обеспечиваются заданные времена пребывания ТГК «Прогресс» с приемником лазерного излучения в рабочих зонах системы наведения, обнаружения и удержания приемника, а также системы формирования и наведения пучка излучения блока «Пеликан-Н». Угловая скорость движения корабля относительно МКС находится в диапазоне, соответствующем техническим характеристикам двухосевой поворотной платформы, где размещается излучатель — блок «Пеликан-Н».

Выполненные оценки затрат характеристической скорости на маневры корабля «Прогресс», обеспечивающие заданные параметры пролетной траектории, показывают, что не менее пяти сеансов КЭ может быть проведено с одним ТГК «Прогресс». Для реализации дополнительных условий (в частности, выполнения сеанса на теневом участке орбиты МКС) необходимо выбирать конкретные моменты выдачи импульсов при выполнении маневров корабля.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Kapranov V.A., Evdokimov R. A., Matsak I.S., Tugaenko V.Yu. Demonstration of ISS based IR WPT system and capabilities of atmospheric researches. In: *Proceedings of the 64th International Astronautical Congress*. Beijing, China, 2013, vol. 9, pp. 6661–6663.
- [2] 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. <https://doi.org/10.1063/1.3657057>
- [3] 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.

- [4] Евдокимов Р.А., Тугаенко В.Ю. Дистанционное энергоснабжение потребителей на поверхности Луны. *Известия РАН. Энергетика*, 2019, № 5, с. 3–19.
- [5] 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. In: *Proc. SPIE*, 2002, vol. 4632, pp. 223–227. <https://doi.org/10.1117/12.469770>
- [6] Hyde L., Papadopoulos D.P., Murbach M.S. Combining Laser Communications and Power Beaming for use on Planetary Probes. In: *10th International Planetary Workshop*, 2013, 5 p.
- [7] 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.
- [8] Cougnet C., Sein E., Celeste A., Summerer L. Solar power satellites for space applications. In: *Proc. IAC–2004*. 2004, p. 8.
- [9] Summerer L., Purcell O. Concepts for wireless energy transmission via laser. In: *Proc. ICSOS 2009*. ICSOS, 2009, p. 10.
- [10] Goto D., Yoshida H., Suzuki H., Katsuto K., Ohashi K. Overview of JAXA laser energy transmission R&D activities and the orbital experiments concept on ISS—JEM. In: *Proc. ICSOS 2014, S5-2*. Kobe, Japan, 2014.
- [11] Matsak I.S., Kapranov V.A., Tugaenko V.Yu., Suhareva N.A. Super narrow beam shaping system for remote power supply at long atmospheric path. In: *Proc. SPIE*, 2017, p. 100900U. <https://doi.org/10.1117/12.2250752>.

Статья поступила в редакцию 28.10.2022

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Евдокимов Р.А., Тугаенко В.Ю., Смирнов А.В. Условия проведения и баллистическая схема космического эксперимента по беспроводной передаче электрической энергии. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, вып. 1.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-1-2246>

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, ведущий, 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

Смирнов Алексей Викторович — ведущий инженер-математик ПАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королёва». Специалист в области космической баллистики. e-mail: Alexey.Smirnov@rsce.ru

Conditions and ballistic scheme of a space experiment on wireless transmission of electrical energy

© R.A. Evdokimov, V.Yu. Tugaenko, A.V. Smirnov

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

The paper discusses conditions for conducting sessions of the Pelican space experiment on wireless transmission of electrical energy in the laser channel between the Russian Segment of the International Space Station and the Progress transport cargo spacecraft. Experiment objectives, composition and installation of the Pelican scientific equipment for its implementation are briefly considered. Ballistic schemes that meet requirements for conducting the space experiment, as well as the safety requirements, are proposed. Feasibility of the experiment sessions is shown from the point of view of compliance between parameters of the Progress spacecraft and the Station relative motion and capabilities of the emitter guidance system elements. Characteristic speed expenditures were evaluated with the Progress spacecraft maneuvering to perform repeated passages of the station. The estimates obtained confirm possibility of at least five sessions of the space experiment with one Progress spacecraft.

Keywords: electrical energy wireless transmission, space experiment, laser radiation, ballistic scheme, Russian segment of the International Space Station

REFERENCES

- [1] Kapranov V.A., Evdokimov R.A., Matsak I.S., Tugaenko V.Yu. Demonstration of ISS based IR WPT system and capabilities of atmospheric researches. In: *Proceedings of the 64th International Astronautical Congress*. Beijing, China, 2013, vol. 9, pp. 6661–6663.
- [2] 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. <https://doi.org/10.1063/1.3657057>
- [3] Evdokimov R.A., Kornilov V.A., Lobykin A.A., Tugaenko V.Yu. Kosmicheskaya tekhnologicheskaya sistema s distantsionnym energosnabzheniem po lazernomu kanalu [Space technological system with remote energy supply via a wireless laser channel]. *Poverkhnost. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neitronnye issledovaniya — Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2018, no. 9, pp. 82–92.
- [4] Evdokimov R.A., Tugaenko V.Yu. Distantsionnoe energosnabzhenie potrebitel'nykh na poverkhnosti Luny [Remote power supply of consumers on the Moon surface]. *Izvestiya RAN. Energetika — Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*, 2019, no. 5, pp. 3–19.
- [5] 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. <https://doi.org/10.1117/12.469770>
- [6] Hyde L., Papadopoulos D.P., Murbach M.S. Combining laser communications and power beaming for use on planetary probes. In: *10th International Planetary Workshop*, 2013, 5 p.

- [7] Gribkov A.S., Evdokimov R.A., Sinyavskiy V.V., Sokolov B.A., Tugaenko V.Yu. Perspektivy ispolzovaniya besprovodnoy peredachi elektricheskoy energii v kosmicheskikh transportnykh sistemakh [Prospects of use of electric energy wireless transfer in space transport systems]. *Izvestiya RAN. Energetika — Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*, 2009, no. 10, pp. 118–123.
- [8] Cougnet C., Sein E., Celeste A., Summerer L. Solar power satellites for space applications. In: *Proc. IAC-2004*. 2004, p. 8.
- [9] Summerer L., Purcell O. Concepts for wireless energy transmission via laser. In: *Proc. ICSOS 2009*. ICSOS, 2009, p.10.
- [10] Goto D., Yoshida H., Suzuki H., Katsuto K., Ohashi K. Overview of JAXA laser energy transmission R&D activities and the orbital experiments concept on ISS-JEM. In: *Proc. ICSOS 2014, S5-2*. Kobe, Japan, 2014.
- [11] Matsak I.S., Kapranov V.A., Tugaenko V.Yu., Suhareva N.A. Super narrow beam shaping system for remote power supply at long atmospheric path. In: *Proc. SPIE*, 2017, p. 100900U. <https://doi.org/10.1117/12.2250752>

Evdokimov R.A., Dr. Sc. (Eng.), Leading Researcher, S.P. Korolev RSC Energia. Specialist in spacecraft design and construction, system analysis.

e-mail: evdokimovrom@yandex.ru; Roman.Evdokimov@rsce.ru

Tugaenko V.Yu., Dr. Sc. (Eng.), Leading Researcher, Department Head, S.P. Korolev RSC Energia. Specialist in spacecraft design and construction.

e-mail: Vjatcheslav.Tugaenko@rsce.ru

Smirnov A.V., Leading Engineer-Mathematician, S.P. Korolev RSC Energia. Specialist in space ballistics. e-mail: Alexey.Smirnov@rsce.ru