

УДК 629.78

## Оптимальный межпланетный перелет Земля – Меркурий космического аппарата с солнечным парусом с предельным сочетанием проектных параметров

Понимасов Юрий Сергеевич<sup>1(\*)</sup>

ponimasovurij@gmail.com

Николичев Илья Андреевич<sup>2</sup>

ianikolichhev@gmail.com

SPIN-код: 8314-7881

<sup>1</sup> Московский авиационный институт, Москва, Россия<sup>2</sup> НИИ ПМЭ Московского авиационного института, Москва, Россия

**Аннотация.** Рассмотрена задача оптимального межпланетного перелета Земля – Меркурий космического аппарата с солнечным парусом с предельным сочетанием проектных параметров. Критерием оптимальности являлась длительность перелета, которая минимизировалась. В результате проведения численного моделирования перелета в пределах широкого диапазона дат старта были выявлены его особенности и динамические характеристики и сделаны выводы о перспективах применения солнечного паруса в составе КА, предназначенных для исследования Меркурия.

**Ключевые слова:** космический аппарат, солнечный парус, предельное сочетание проектных параметров, оптимальный перелет, Меркурий, минимальная длительность перелета

**Введение.** Меркурий, являясь ближайшей к Солнцу планетой, обладает уникальными характеристиками, связанными с его орбитальным движением, магнитным полем, внутренним строением. Проведение комплексного исследования данного небесного тела является актуальной задачей для космонавтики и планетологии.

На основании работ [1–3] можно сделать вывод, что использование солнечного паруса (СП) в составе КА в качестве основного инструмента влияния на орбитальное движение может существенно повысить эффективность космических миссий, направленных на изучение Меркурия, относительно массы конструкции КА и длительности перелета (полет КА к Меркурию в среднем занимает семь лет, что подтверждается КА MESSENGER [4] и BepiColombo [5]).

Таким образом, изучение структуры решений задачи оптимального межпланетного перелета Земля – Меркурий космического аппарата с солнечным парусом (КАСП) является актуальным направлением механики космического полета. Данное изучение целесообразно начать с выявления основных динамических характеристик и особенностей перелета КАСП с предельным сочетанием проектных параметров — максимальной парусностью (отношение площади СП к массе всего КАСП [1]). Критерием оптимальности является длительность перелета  $T_n$ , которая минимизируется.

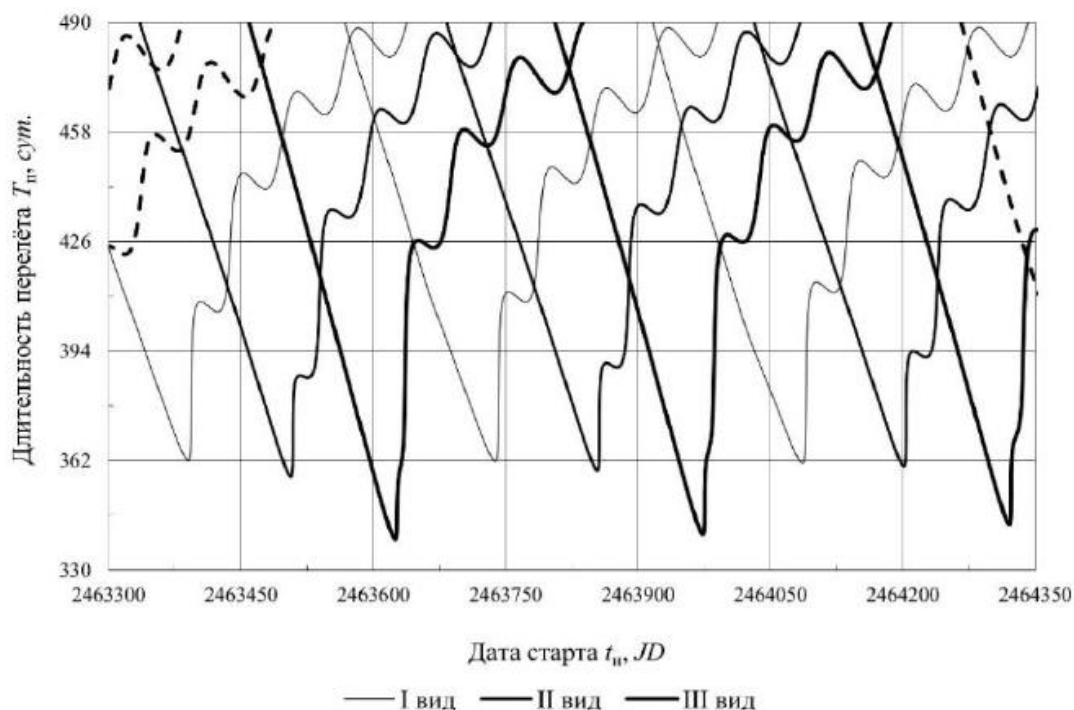
**Методы и материалы.** Решение задачи оптимального перелета подразумевало создание соответствующей математической модели, которая опира-

лась на использование эфемеридной модели [6], минимизацию  $T_n$  согласно формализму принципа максимума Понтрягина [7], идеальный СП.

Область поиска решений соответствующей задачи характеризовалась: диапазоном юлианских дат старта (в шкале TDB)  $t_n \in [2463300, 2464350]$  JD; максимальной парусностью, принятой на основании [1, 3, 8] равной  $88 \text{ м}^2/\text{кг}$ .

На базе математической модели было создано вспомогательное программное обеспечение (ВПО), которое обеспечивало моделирование оптимального перелета КАСП к Меркурию.

**Результаты.** С помощью ВПО была выявлена совокупность зависимостей  $T_n(t_n)$  (I-III виды) оптимального перелета КАСП к Меркурию (см. рисунок). Пунктиром выделены зависимости, чей абсолютный минимум лежит вне диапазона  $t_n$ .



$T_n(t_n)$  оптимального межпланетного перелета Земля – Меркурий КАСП

**Заключение.** Результаты проведенного исследования наглядно продемонстрировали предельные динамические возможности КАСП, предназначенного для функционирования на меркурианской орбите. Обоснованно можно сделать вывод о способности СП существенно сократить длительность перелета КА к Меркурию относительно КА с типовыми двигательными установками [4, 5] и, соответственно, дать прогноз, что при уменьшении величины парусности в достаточно широком диапазоне КАСП сохранит преимущество в более быстрой доставке полезной нагрузки.

*Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 25-79-30009.*

**Список источников**

- [1] Поляхова Е.Н. *Космический полет с солнечным парусом*. Москва, Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2011, 320 с.
- [2] Circi Ch. Mars and Mercury Missions Using Solar Sails and Solar Electric Propulsion. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2004, vol. 27, no. 3, pp. 496–498. <https://doi.org/10.2514/1.5425>
- [3] Dachwald B. Optimization of Interplanetary Solar Sailcraft Trajectories Using Evolutionary Neurocontrol. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2004, vol. 27, no. 1, pp. 66–72. <https://doi.org/10.2514/1.9286>
- [4] *MESSENGER. NASA Science*. URL: <https://science.nasa.gov/mission/messenger/> (accessed 12.11.2025).
- [5] *BepiColombo. NASA Science*. URL: <https://science.nasa.gov/mission/bepicolombo/> (accessed 12.11.2025).
- [6] Pitjeva E.V. Updated IAA RAS planetary ephemerides-EPM2011 and their use in scientific research. *Sol. Syst. Res.*, 2013, vol. 47, pp. 386–402. <https://doi.org/10.1134/S0038094613040059>
- [7] Иванов В.А., Фалдин Н.В. *Теория оптимальных систем автоматического управления*. Москва, Наука, 1981, 336 с.
- [8] *Kapton Summary of Properties*. URL: <https://www.qnityelectronics.com/kapton-mt.html> (accessed 12.11.2025).