

ПРОБЛЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ТРЕБОВАНИЙ ПО МИКРОУСКОРЕНИЯМ НА БОРТУ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

А. В. Седельников, Е. В. Еськина, А. С. Танеева,
Е. С. Хнырева, Е. С. Матвеева

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева,
Россия, 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34

В работе дан обзор способов снижения микроускорений во внутренней среде малого космического аппарата и приведены количественные оценки уровня микроускорений. Формируется проектный облик малого космического аппарата технологического назначения. Рассматриваются вопросы обеспечения качества полученных результатов гравитационно-чувствительных процессов путем контроля уровня микроускорений на борту малых космических аппаратов. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и эксплуатации малых космических аппаратов технологического назначения.

Ключевые слова: микроускорения, гравитационно-чувствительные процессы, малый космический аппарат.

Введение

Проведение гравитационно-чувствительных процессов на борту малого космического аппарата требует соблюдения требований по микроускорениям [1–3]. Именно эти требования являются важнейшими при разработке проектного облика малого космического аппарата технологического назначения. Многие исследователи отмечают перспективность применения малых космических аппаратов в области космических технологий [4–7]. Несомненными преимуществами малых космических аппаратов являются:

- невысокая стоимость разработки, изготовления и запуска малого космического аппарата;
- короткие сроки реализации проекта;
- максимальный учёт требований реализуемого процесса при создании малого космического аппарата для проведения конкретного гравитационно-чувствительного процесса.

Первое преимущество делает общедоступным проведение экспериментов в реальных условиях околоземного космического пространства [8, 9]. При этом запуск малого космического аппарата в качестве попутной нагрузки позволяет более эффективно использовать возможности ракет-носителей, не увеличивая число запусков [10, 11].

Короткие сроки реализации проектов дают возможность комплексной экспериментальной отработки гравитационно-чувствительных процессов, корректировки требований их проведения с учётом накапливаемого опыта, выявление новых факторов, влияющих на протекание процесса и его результаты [12, 13]. Это является предпосылкой для совершения прорывов, как в научном, так и технологическом аспектах.

Наконец, малый космический аппарат технологического назначения можно создать специально для реализации какого-то конкретного гравитационно-чувствительного процесса. При этом его кон-

струкция и компоновка будут в максимально возможной мере учитывать особенности реализуемого процесса, чего нельзя себе представить для космических аппаратов других классов, на которых реализуется большое количество процессов и решается целый спектр целевых задач.

Все эти преимущества в будущем обеспечат важную роль в развитии космического материаловедения за счёт использования малых космических аппаратов технологического назначения.

В настоящее время нет ни одного полноценно реализованного технологического проекта с использованием малых космических аппаратов. Есть отдельные попытки проверки возможностей тех или иных платформ малых космических аппаратов для использования их в качестве технологических малых космических аппаратов. В этой связи следует классифицировать требования к микроускорениям для различного типа процессов, подразделив их на три категории:

- категория А предполагает требования по микроускорениям до 1 мкм/с²;
- категория В предполагает требования по микроускорениям 1...10 мкм/с²;
- категория С предполагает требования по микроускорениям 10...100 мкм/с²;
- категория D не предполагает в явном виде выдвижение требований по микроускорениям, однако они могут влиять на выполнение целевых задач.

Первая и вторая категории требований относятся к разработанным и перспективным технологическим гравитационно-чувствительным процессам, относящимся, например, к технологиям направленной кристаллизации [14, 15], получению сверхчистых материалов [16, 17], исследованию поведения жидкости и процессов горения [18, 19]. С точки зрения реализуемости этих требований, на современном этапе развития можно констатировать практическую достижимость требований

категории В на специализированных космических аппаратах технологического назначения при условии применения дополнительных средств виброзащиты [20, 21]. Что касается категории А, то на данный момент не созданы технические средства и космическая техника, способная удовлетворить эти требования. Однако это направление является необходимым для достижения прогресса в космических технологиях.

Категория С соответствует требованиям биомедицинских экспериментов [22, 23]. При этом надо учитывать, что живые организмы в процессе жизнедеятельности могут создавать дополнительные микроускорения [24, 25]. Именно по этой причине чаще всего требования по микроускорениям для биомедицинских экспериментов являются более мягкими, чем для технологических.

Категория D предполагает решение целевых задач, не связанных напрямую с гравитационной чувствительностью. Однако неконтролируемые значения микроускорений при этом также нежелательны. Примером таких задач является дистанционное зондирование Земли. Здесь важны ограничения на точность наведения и значения угловой скорости при съёмке целевого объекта [26, 27]. Однако ограничение по угловой скорости является косвенным ограничением на микроускорения.

С другой стороны, например, собственные колебания больших упругих элементов могут вызывать «размывание» целевого объекта съёмки. При этом эти колебания являются одним из главных источников микроускорений [28, 29]. Поэтому связь между микроускорениями и качеством решения целевых задач в этом случае просматривается.

Постановка задачи

Этот подход даёт возможность максимального использования всего внутреннего объёма космического аппарата. Однако при этом предъявляются самые высокие требования по микроускорениям. Поскольку в каждой точке внутренней среды, где располагается аппаратура для реализации гравитационно-чувствительных процессов, должны выполняться требования по микроускорениям. Причём эти требования должны выполняться за счёт работы исполнительных органов системы управления движением.

Рассмотрим отдельно поступательную и вращательную части движения космического аппарата. Для поступательной части применим теорему о движении центра масс:

$$m_0 \vec{w}_C + \sum_{i=1}^n \int_0^{m_i} \vec{w}_i dm_i = \vec{F}^e + \vec{F}_{con}, \quad (1)$$

где m_0 — масса космического аппарата, включая массу упругих элементов; \vec{w}_C — ускорение центра масс корпуса космического аппарата; m_i — масса i -го упругого элемента; \vec{w}_i — относительные ускорения точек i -го упругого элемента; \vec{F}^e — главный вектор внешних сил, действующих на космический аппарат; \vec{F}_{con} — главный вектор сил исполнительных органов системы управления движением космического аппарата; n — число больших упругих элементов.

Для вращательной части запишем теорему об изменении кинетического момента в главной связанной системе координат:

$$\hat{I}_0 \cdot \dot{\vec{\omega}} + \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{I_i} \int_{a_i}^{l_i} \vec{w}_i x_i dx_i + \vec{\omega} \left(\hat{I}_0 \cdot \vec{\omega} + \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{I_i} \int_{a_i}^{l_i} \vec{v}_i x_i dx_i \right) = \vec{M}^e + \vec{M}_{con}, \quad (2)$$

где I_0 — момент инерции космического аппарата с упругими элементами в главной связанной системе координат;

$\vec{\omega}$ — угловая скорость вращения космического аппарата;

l_i — расстояние от точек крайнего сечения i -го упругого элемента до центра масс космического аппарата;

a_i — расстояние от точки крепления i -го упругого элемента до центра масс космического аппарата;

\vec{v}_i — относительные скорости точек i -го упругого элемента;

\vec{M}^e — главный момент внешних сил, действующих на космический аппарат;

\vec{M}_{con} — главный момент исполнительных органов системы управления движением космического аппарата.

Исходя из (1) и (2), можно составить ограничения на модуль микроускорений:

$$|\vec{w}_C + \dot{\vec{\omega}} \times \vec{R} + \vec{\omega} \times \vec{\omega} \times \vec{R}| \leq |\vec{w}_{max}|, \quad (3)$$

где \vec{R} — радиус-вектор максимально удалённой от центра масс точки внутренней среды космического аппарата, в которой размещается оборудование для проведения гравитационно-чувствительных процессов.

Для случая, когда $|\vec{\omega}|$, $|\dot{\vec{\omega}}|$ и $|\vec{v}_i|$ — малые величины одного порядка малости, ограничение (3) можно упростить:

$$\left| \frac{\vec{F}^e + \vec{F}_{con} - \sum_{i=1}^n \int_0^{m_i} \vec{w}_i dm_i}{m_0} + \hat{I}_0^{-1} \left(\vec{M}^e + \vec{M}_{con} - \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{I_i} \int_{a_i}^{l_i} \vec{w}_i x_i dx_i \right) \cdot \vec{R} \right| \leq |\vec{w}_{max}|, \quad (4)$$

Решение уравнения (3) или (4) относительно \vec{F}_{con} и \vec{M}_{con} приводит к формированию требуемых законов управления исполнительными органами системы управления движением космического аппарата. Однако сложность этих уравнений ставит актуальным вопрос о реализуемости разработанных законов управления. С учётом ошибок моделирования внешних возмущений [30, 31] и реальных разбросов характеристик исполнительных органов [32, 33] задача реализации законов управления многократно усложняется.

Следует отметить, что при эксплуатации в неориентированном полёте уровень микроускорений во внутренней среде космического аппарата может как возрастать (раскрутка за счёт внешних возмущений, например, космические аппараты серии «Фотон» [34, 35]), так и убывать (стабилизация за счёт внешних возмущений, например, опытный образец малого космического аппарата «Аист» [26, 36]). Это зависит от класса космического аппарата, параметров орбиты, состава и режимов работы научной аппаратуры и т.д.

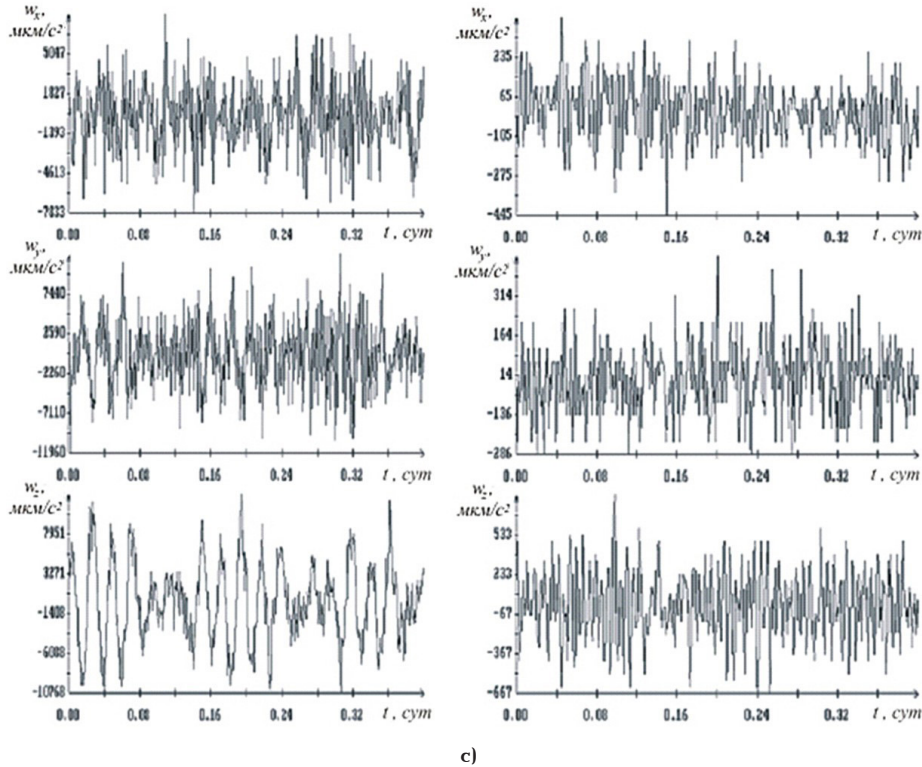
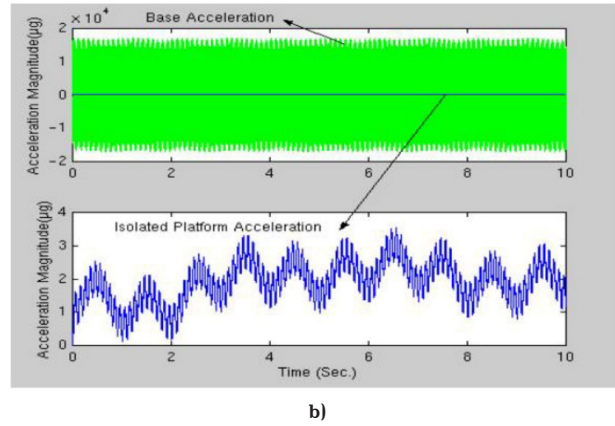
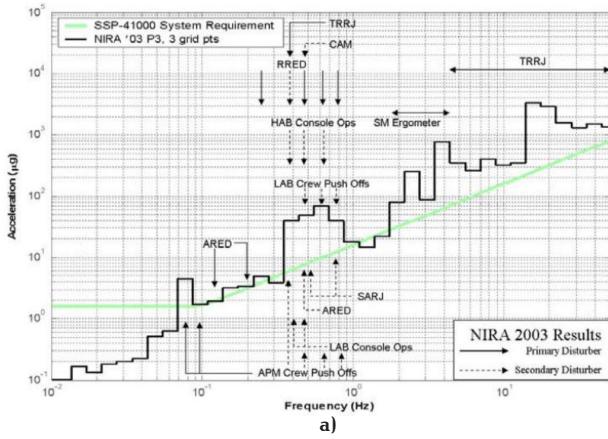


Рис. 1. Уровни микроускорений внутри защищённой зоны различных виброизолирующих устройств:
 а) ExPA Payload (процитировано по [44]); б) g-LIMIT (процитировано по [43]);
 в) VZP-1K (процитировано по [39])
 Fig. 1. Microacceleration levels inside the protected area of various vibration isolating devices:
 а) ExPA Payload (quoted by [44]); б) g-LIMIT (quoted by [43]);
 в) VZP-1K (quoted by [39])

Таким образом, можно констатировать, что на современном этапе развития космической техники такой подход носит больше теоретический характер из-за сложности реализации оптимальных, с точки зрения минимума микроускорений законов управления.

Методика исследования

Этот подход заключается в обеспечении благоприятных условий для реализации гравитационно-чувствительных процессов не во всей внутренней среде космического аппарата, а внутри специального виброзащитного устройства. В этом случае задача обеспечения требований по микроускорениям перекадывается с исполнительных органов системы управления движением на виброзащитное

устройство. Причём решение этой задачи существенно упрощается за счёт выбора соответствующих характеристик виброзащитного устройства. Именно поэтому такой подход широко применяется в настоящее время. Разработан ряд эффективных виброзащитных устройств, основанных на различных принципах действия:

- механические (например, MGIM [37], MGVIS [38], VZP [39]);
- поворотные (например, «Флюгер» [40], SPmgLab [41]);
- магнитные (MAVI [42], g-LIMIT [43]);
- внешние (Payload [29], ExPA Payload [44]).

Их применение на сегодняшний день связано с орбитальными космическими станциями. Так, на орбитальном комплексе «Мир» использовались MGIM, ВЗП, на международной косми-

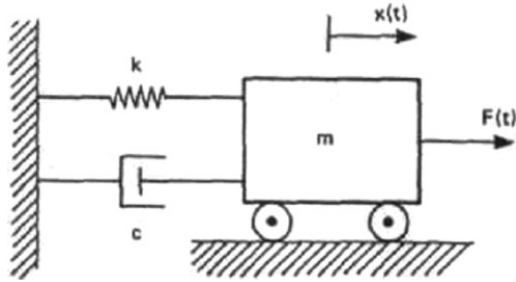


Рис. 2. Схема виброзащитной платформы с одной степенью свободы

Источник: Гордеев Б. А., Филатов Л. В., Айнбиндер Р. М. Математические модели виброзащитных систем. Нижний Новгород: Изд-во ННГАСУ, 2018. 165 с.

Fig. 2. The scheme of a vibration-proof platform with one degree of freedom

Reference: Gordeev B. A., Filatov L. V., Ainbinder R. M. Mathematical models of vibration protection systems. Nizhny Novgorod: Publishing House of NNGASU, 2018. 165 p.

ческой станции — MGVIS, g-LIMIT и «Флюгер», на «Tiangong-2» — MAVI. Собраны экспериментальные данные, которые демонстрируют эффективность использования виброзащитных устройств с точки зрения снижения микроускорений. На рис. 1 представлены экспериментальные измерения вибраций и микроускорений внутри защищённых зон устройств MGIM, g-LIMIT, VZP.

Однако при этом требования по микроускорениям удовлетворяются только в существенно ограниченной защищённой зоне, и внутренняя среда космического аппарата используется неэффективно. Для малых космических аппаратов важную роль играет появление дополнительного виброзащитного устройства, установка которого снижает массу целевой аппаратуры. Именно поэтому штатная эксплуатация виброзащитных устройств в настоящее время связана с орбитальными космическими станциями.

Результаты и обсуждение

Для повышения эффективности процесса создания благоприятных условий необходимо использовать преимущества обоих подходов. Прежде всего, речь идёт о том, что для многих виброзащитных средств уровень микроускорений внутри защищённой зоны зависит от микроускорений во внутренней среде космического аппарата.

Рассмотрим возможности обеспечения условий по микроускорениям с применением исполнительных органов системы управления движением и без их применения для виброзащитной платформы типа ВЗП. Выберем в качестве возмущения внутреннюю продольную силу, возникающую от температурного удара больших упругих элементов космического аппарата и описанную в работах [4, 7, 45]. Аппроксимируем виброзащитную платформу в виде демпфирующей системы с одной степенью свободы (рис. 2), поскольку внутренняя продольная сила действует только вдоль одной оси [4, 7, 45].

Тогда уравнение вынужденных колебаний такой платформы будет иметь вид [46]:

$$\ddot{x} + 2\xi\dot{x} + \omega_0^2 x = \omega_0^2 \frac{N(t)}{k} e^{i\omega t}, \quad (5)$$

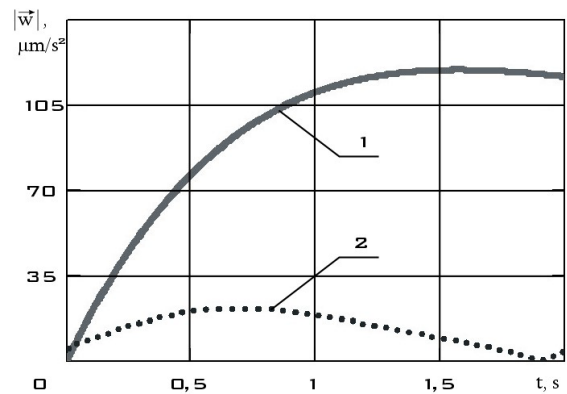


Рис. 3. Уровень микроускорений от температурного удара больших упругих элементов космического аппарата типа «Возврат-МКА» в случае без управления вне защищённой зоны виброзащитной платформы (кривая 1, процитировано по [7]), и в защищённой зоне (кривая 2)

Fig. 3. Microacceleration level due to thermal impact of large elastic elements of the spacecraft as «Vozvrat-MKA» in the case without control outside the protected zone of the vibration shield platform (line 1 — quoted by [7]) and in a protected area (line 2)

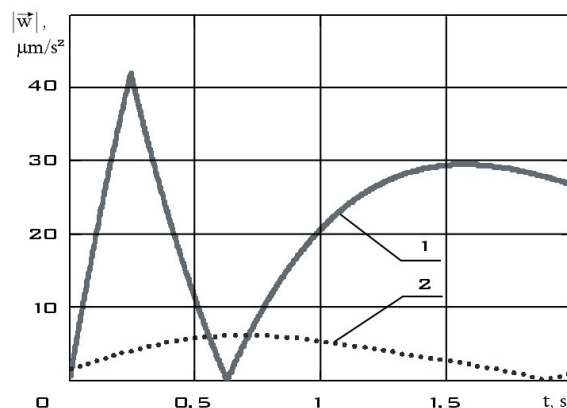


Рис. 4. Уровень микроускорений от температурного удара больших упругих элементов космического аппарата типа «Возврат-МКА» в случае с управлением вне защищённой зоны виброзащитной платформы (кривая 1, процитировано по [7]), и в защищённой зоне (кривая 2)

Fig. 4. Microacceleration level due to thermal impact of large elastic elements of the spacecraft as «Vozvrat-MKA» in the case with control outside the protected zone of the vibration shield platform (line 1 — quoted by [7]) and in a protected area (line 2)

где $\xi = \frac{c}{2m}$ — коэффициент демпфирования; c — коэффициент вязкого демпфирования; m — масса виброзащитной платформы; ω_0 и ω — соответственно частота собственных колебаний и частота возбуждающей силы; $N(t)$ — внутренняя продольная сила [4, 7, 45]; k — жёсткость пружины.

На рис. 3 показаны микроускорения, вызываемые внутренней продольной силой от температурного удара больших упругих элементов, вне защищённой зоны виброзащитной платформы и в защищённой зоне.

Кривая 2 получена путём интегрирования дифференциального уравнения (5). При этом были использованы данные космического аппарата типа «Возврат-МКА» [7]. Рассмотрим далее управление, направленное на снижение микроускорений от температурного удара и рассмотренное в рабо-

те [7]. На рис. 4 показан уровень микроускорений для этого случая.

Выводы и заключение

Из представленных рис. 3, 4 видно, что при максимальном уровне микроускорений, приблизительно в 116 мкм/с^2 [7], виброзащитная платформа способна обеспечить микроускорения не более 20 мкм/с^2 (рис. 3), а при максимальном уровне приблизительно в 42 мкм/с^2 [7] — не более 7 мкм/с^2 . Что и подтверждает эффективность комбинированного подхода для малых космических аппаратов технологического назначения.

Список литературы

1. Lyubimova T., Zubova N., Shevtsova V. Effects of Non-Uniform Temperature of the Walls on the Soret Experiment // *Microgravity Science and Technology*. 2019 Vol. 31, № 1. P. 1–11. DOI: 10.1007/S12217-018-9666-X.

2. Земсков В. С., Раухман М. Р., Шалимов В. П. [и др.]. Влияние расположения ростовых установок на борту космического аппарата на микрогравитационные условия проведения экспериментов (на примере БЗП INSB:TE на ИСЗ Фотон-3) // *Космические исследования*. 2004. Т. 42, № 2. С. 144–154.

3. Белоусов А. И., Седельников А. В. Вероятностная оценка выполнения благоприятных условий реализации гравитационно-чувствительных процессов на борту космической лаборатории // *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*. 2013. № 3. С. 62–65.

4. Orlov D. I. Modeling the Temperature Shock Impact on the Movement of a Small Technological Spacecraft // *AIP Conference Proceedings*. 2021. Vol. 2340. 050001. DOI: 10.1063/5.0047296.

5. Taneeva A. S., Lukiyanichik V. V., Khnyryova E. S. Modeling the Dependence of the Specific Impulse on the Temperature of the Heater of an Electrothermal Micro-Motor Based on the Results of Its Tests // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 2096. 012059. DOI: 10.1088/1742-6596/2096/1/012059.

6. Agasid E., Burton R., Carlino R., Defouw G. [et al.]. Small Spacecraft Technology State of the Art // *NASA/TP–2015–216648/REV1*. 2015. P. 1–173.

7. Sedelnikov A. V., Orlov D. I. Development of control algorithms for the orbital motion of a small technological spacecraft with a shadow portion of the orbit // *Microgravity Science and Technology*. 2020. Vol. 32, № 5. P. 941–951.

8. Belousova D. A., Serdakova V. V. Modeling the temperature shock of elastic elements using a one-dimensional model of thermal conductivity // *International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing*. 2020. Vol. 11, № 6. 2050060. DOI: 10.1142/s1793962320500609.

9. Snell E. H., Helliwell J. R. Macromolecular crystallization in microgravity // *Reports on progress in physics*. 2005. Vol. 68. P. 799–853. DOI:10.1088/0034-4885/68/4/R02.

10. Абрашкин В. И., Воронов К. Е., Пияков А. В. [и др.]. Неправильное вращательное движение опытного образца малого космического аппарата «АИСТ» // *Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша*. 2015. № 48. С. 1–36.

11. Salmin V. V., Chetverikov A. S. Methods of selecting guidance laws transfer vehicle with electric propulsion system during the flight into geostationary orbit *Advances // Astronautical Sciences*. 2017. Vol 161. P. 455–466.

12. Земсков В. С., Раухман М. Р., Шалимов В. П. Гравитационная чувствительность растворов-расплавов при кристаллизации двухфазных сплавов InSb-InBi в космических условиях // *Cosmic Research*. 2001. Т. 39, № 4. С. 359.

13. Huang B., Li D.-G., Liu H. Y. C-T 2018 Effects of spaceflight and simulated microgravity on microbial growth and secondary metabolism // *Military Medical Research*. 2018. Vol. 5. DOI: 10.1186/s40779-018-0162-9.

14. Lan C.-W., Lyubimov D. V., Lyubimova T. P. [et al.]. Influence of high-frequency vibration on the morphological instability in the directional crystallization of binary melts // *Fluid Dynamics*. 2008. Vol. 43. P. 514–523. DOI: 10.1134/S0015462808040030.

15. McPherson A., DeLucas L. J. Microgravity protein crystallization // *npj Microgravity*. 2015. Vol. 1. 15010. P. 1. DOI: 10.1038/npjmggrav.2015.10.

16. Седельников А. В., Серпухова А. А. Моделирование движения упругого космического аппарата в целях оценки микроускорений // *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*. 2009. № 4. С. 71–72.

17. Li X., Anken R., Liu L. [et al.]. Effects of Simulated Microgravity on Otolith Growth of Larval Zebrafish using a Rotating-Wall Vessel: Appropriate Rotation Speed and Fish Developmental Stage // *Microgravity Science and Technology*. 2017. Vol. 29, № 1-2. P. 1–8. DOI: 10.1007/S12217-016-9518-5.

18. Ruff G. A. Microgravity research in spacecraft fire safety // *Ilalun Options Technical Working Conference*. 2001. P. 13–22.

19. Li J.-C., Guo B., Zhao J.-F. On the Space Thermal Destratification in a Partially Filled Hydrogen Propellant Tank by Jet Injection // *Microgravity Science and Technology*. 2022. Vol. 34, № 1. P. 6. DOI: 10.1007/s12217-021-09923-2.

20. Wu Q., Liu B., Cui N. [et al.]. Tracking Control of a Maglev Vibration Isolation System Based on a High-Precision Relative Position and Attitude Model // *Sensors*. 2019. Vol. 19 (15). 3375. DOI: 10.3390/s19153375.

21. Liu W., Gao Y., Dong W. [et al.]. Flight Test Results of the Microgravity Active Vibration Isolation System in China's Tianzhou-1 Mission // *Microgravity Science and Technology*. 2018. Vol. 30, № 6. P. 995–1009. DOI: 10.1007/S12217-018-9659-9.

22. Hu W. R., Zhao J. F., Long M. [et al.]. Space Program SJ-10 of Microgravity Research // *Microgravity Science and Technology*. 2014. Vol. 26, № 3. P. 159–169. DOI: 10.1007/S12217-014-9390-0.

23. Sedelnikov A. V., Potienko K. I. Analysis of reduction of controllability of spacecraft during conducting of active control over microaccelerations // *International Review of Aerospace Engineering*. 2017. Vol. 10, № 3. P. 160–166. DOI: 10.15866/IREASE.V10I3.12342.

24. Абрашкин В. И., Воронов К. Е., Пияков И. В. [и др.]. Определение вращательного движения спутника БИОН М-1 средствами аппаратуры ГРАВИТОН // *Космические исследования*. 2015. Т. 53, № 4. С. 306.

25. Sedelnikov A. V. Classification of microaccelerations according to methods of their control // *Microgravity Science and Technology*. 2015. Vol. 27, № 3. P. 245–251. DOI: 10.1007/S12217-015-9442-0.

26. Абрашкин В. И., Воронов К. Е., Дорофеев А. С. [и др.]. Определение вращательного движения малого космического аппарата АИСТ-2Д по данным магнитных измерений // *Космические исследования*. 2019. Т. 57, № 1. С. 61–73. DOI: 10.1134/S0023420619010011.

27. Li Y., Wang C., Wang L. [et al.]. A Laser Interferometer Prototype with Pico-Meter Measurement Precision for Taiji Space Gravitational Wave Detection Mission in China // *Microgravity Science and Technology*. 2020. Vol. 32, № 3. P. 331–338. DOI: 10.1007/s12217-019-09769-9.

28. Sedelnikov A. V. Modeling of microaccelerations caused by running of attitude-control engines of spacecraft with elastic structural elements // *Microgravity Science and Technology*. 2016. Vol. 28, № 5. P. 491–498. DOI: 10.1007/S12217-016-9507-8.

29. Yang H., Liu L., Liu Y. [et al.]. Modeling and Microvibration Control of Flexible Cable for Disturbance-Free Payload Spacecraft // *Microgravity Science and Technology*. 2021. Vol. 33, № 4. P. 46. DOI: 10.1007/S12217-021-09897-1.

30. Myung H.-S., Bang H. Nonlinear Predictive Attitude Control of Spacecraft Under External Disturbances // *Journal of Spacecraft and Rockets*. 2003. Vol. 40, № 5. P. 696–699. DOI: 10.2514/2.6896.

31. Ulrich S. Nonlinear Passivity-Based Adaptive Control of Spacecraft Formation Flying // American Control Conference Boston. 2016. P. 7432–7437. DOI: 10.1109/ACC.2016.7526846.
32. Blinov V. N., Vavilov I. S., Kositsin V. V., Lukyanchik A. I., Ruban V. I., Shalay V. V. Study of power-to-weight ratio of the electrothermal propulsion system of nanosatellite maneuvering satellite platform // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 944. 012020. DOI: 10.1109/ACC.2016.7526846.
33. Bedingfield K. L., Leach R. D., Alexander M. B. Spacecraft System Failures and Anomalies Attributed to the Natural Space Environment // NASA Reference Publication. 1996. Vol. 1390. P. 51. DOI: 10.2514/6.1995-3564.
34. Sedelnikov A. V. Accuracy assessment of microaccelerations simulation on the spacecraft «Foton-M» no. 2 according to magnetic measuring instruments data // Microgravity Science and Technology. 2020. Vol. 32, № 3. P. 259–264. DOI: 10.1007/s12217-019-09766-y.
35. Абрашкин В. И., Богоявленский Н. Л., Воронов К. Е. [и др.]. Неуправляемое движение спутника ФОТОН М-2 и квазистатические микроускорения на его борту // Космические исследования. 2007. Т. 45, № 5. С. 450–470. EDN: IAQPJV.
36. Sedelnikov A. V., Taneeva A. S., Khnyryova E. S., Kamaletdinova M. V., Martynova E. D. Investigation of the rotational motion stability of the AIST small spacecraft prototype according to the measurements of the Earth's magnetic field // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1901. 012022. DOI: 10.1088/1742-6596/1901/1/012022.
37. Owen R. G., Jones D. I., Owens A. R. [et al.]. Integration of a microgravity isolation mount within a Columbus single rack // Acta Astronautica. 1990. Vol. 22. P. 127–135. DOI: 10.1016/0094-5765(90)90013-B.
38. Labib M., Piontek D., Valsecchi N. [et al.]. The Fluid Science Laboratory's Microgravity Vibration Isolation Subsystem. 2010. P. 1–10. DOI: 10.2514/6.2010-2007.
39. Иванов А. И., Левтов В. Л., Романов В. В. [и др.]. Результаты летно-космических испытаний виброзащитной платформы ВЗП-1К // Космические исследования. 2001. Т. 39, № 2. С. 137–149.
40. Акуленко Л. Д., Болотник Н. Н., Борисов А. Е. [и др.]. Управление ориентацией объекта на вращающемся основании с помощью двухступенчатого электропривода // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2019. № 6. С. 3–17. DOI: 10.1134/S0002338819060027.
41. Amselem S. Remote Controlled Autonomous Microgravity Lab Platforms for Drug Research in Space // Pharmaceutical Research. 2019. Vol. 36. P. 183. DOI: 10.1007/s11095-019-2703-7.
42. Dong W., Duan W. [et al.]. Microgravity disturbance analysis on Chinese space laboratory // npj Microgravity. 2019. Vol. 5. P. 18. DOI: 10.1038/s41526-019-0078-z.
43. Whorton M. S. Microgravity vibration isolation for the International Space Station // AIP Conference Proceedings. 2000. Vol. 504. P. 605. DOI: 10.1063/1.1302547.
44. Primm L., Krupacs E., Jules K. External payloads proposer's guide to the International Space Station // NASA Report GSFC. 2015. 420-01-09. P. 168.
45. Sedelnikov A. V., Orlov D. I. Analysis of the significance of the influence of various components of the disturbance from a temperature shock on the level of microaccelerations in the internal environment of a small spacecraft // Microgravity Science and Technology. 2021. Vol. 33, № 2. P. 22. DOI: 10.1007/S12217-020-09867-Z.
46. Гордеев, Б. А., Филатов Л. В., Айнбиндер Р. М. Математические модели виброзащитных систем: моногр. Нижний Новгород: Изд-во ННГАСУ, 2018. 165 с. ISBN 978-5-528-00324-5.
- СЕДЕЛЬНИКОВ Андрей Валерьевич**, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры космического машиностроения Самарского национального исследовательского университета имени академика С. П. Королева (Самарский университет), г. Самара.
SPIN-код: 3987-6997
AuthorID (SCOPUS): 23013232300
ORCID: 0000-0003-2698-1348
ResearcherID: G-4444-2017
- ЕСЬКИНА Елена Владимировна**, кандидат технических наук, доцент кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении, начальник отдела аспирантуры и докторантуры Самарского университета, г. Самара.
AuthorID (SCOPUS): 57148123100
- ТАНЕЕВА Анастасия Сергеевна**, аспирант кафедры космического машиностроения, лаборант НИЛ-35 (Научно-исследовательской лаборатории автоматизированных систем научных исследований), лаборант кафедры космического машиностроения Самарского университета, г. Самара.
SPIN-код: 8816-1930
AuthorID (SCOPUS): 57205365815
ORCID: 0000-0002-8531-760X
- ХНЫРЕВА Екатерина Сергеевна**, старший преподаватель кафедры высшей математики Самарского университета, г. Самара.
AuthorID (SCOPUS): 57191342938
- МАТВЕЕВА Елена Сергеевна**, магистрант гр. 1235-010403D Института авиационной и ракетно-космической техники Самарского университета, г. Самара.

Для цитирования

Седелников А. В., Еськина Е. В., Танеева А. С., Хнырева Е. С., Матвеева Е. С. Проблема обеспечения и контроля требований по микроускорениям на борту малого космического аппарата технологического назначения // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2022. Т. 6, № 2. С. 90–98. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-2-90-98.

Статья поступила в редакцию 20.04.2022 г.

© А. В. Седелников, Е. В. Еськина, А. С. Танеева,
Е. С. Хнырева, Е. С. Матвеева

THE PROBLEM OF ENSURING REQUIREMENTS FOR MICROACCELERATIONS ON BOARD OF SMALL SPACECRAFT

A. V. Sedelnikov, E. V. Eskina, A. S. Taneeva, E. S. Khnyryova, E. S. Matveeva

Samara National Research University,
Russia, Samara, Moskovskoye sh., 34, 443086

The paper provides an overview of ways to reduce micro-accelerations in the internal environment of a small spacecraft and provides quantitative estimates of the level micro-accelerations. The design image of a small technological spacecraft is being formed. The issues of ensuring the quality of the obtained results of gravity-sensitive processes by monitoring the level of micro-accelerations on board small spacecraft are considered. The results obtained can be used in the design and operation of small spacecraft for technological purposes.

Keywords: micro-accelerations, gravity-sensitive processes, small spacecraft.

References

1. Lyubimova T., Zubova N., Shevtsova V. Effects of Non-Uniform Temperature of the Walls on the Soret Experiment // *Microgravity Science and Technology*. 2019. Vol. 31, no. 1. P. 1–11. DOI: 10.1007/S12217-018-9666-X. (In Engl.).
2. Zemskov V. S., Rauhman M. R., Shalimov V. P. [et al.]. Vliyaniye raspolozheniya rostovykh ustanovok na bortu kosmicheskogo apparata na mikrogravitatsionnyye usloviya provedeniya eksperimentov (na primere BZP INSB:TE na ISZ Foton-3) [The influence of arrangement of growth setups onboard a spacecraft on microgravity conditions of experiments: an example of floating zone melting of INSB:TE onboard the FOTON-3 satellite] // *Kosmicheskiye issledovaniya. Cosmic Research*. 2004. Vol. 42, no. 2. P. 144–154. (In Russ.).
3. Belousov A. I., Sedel'nikov A. V. Veroyatnostnaya otsenka vypolneniya blagopriyatnykh usloviy realizatsii gravitatsionno-chuvstvitel'nykh protsessov na bortu kosmicheskoy laboratorii [Probabilistic estimation of fulfilling favorable conditions to realize the gravity-sensitive processes aboard a space laboratory] // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Aviatsionnaya tekhnika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Aviatsionnaya Tekhnika*. 2013. No. 3. P. 62–65. (In Russ.).
4. Orlov D. I. Modeling the Temperature Shock Impact on the Movement of a Small Technological Spacecraft // *AIP Conference Proceedings*. 2021. Vol. 2340. 050001. DOI: 10.1063/5.0047296. (In Engl.).
5. Taneeva A. S., Lukyanchik V. V., Khnyryova E. S. Modeling the Dependence of the Specific Impulse on the Temperature of the Heater of an Electrothermal Micro-Motor Based on the Results of Its Tests // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 2096. 012059. DOI:10.1088/1742-6596/2096/1/012059. (In Engl.).
6. Agasid E., Burton R., Carlino R., Defouw G. [et al.]. Small Spacecraft Technology State of the Art // *NASA/TP–2015–216648/REV1*. 2015. P. 1–173. (In Engl.).
7. Sedelnikov A. V., Orlov D. I. Development of control algorithms for the orbital motion of a small technological spacecraft with a shadow portion of the orbit // *Microgravity Science and Technology*. 2020. Vol. 32, no. 5. P. 941–951. (In Engl.).
8. Belousova D. A., Serdakova V. V. Modeling the temperature shock of elastic elements using a one-dimensional model of thermal conductivity // *International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing*. 2020. Vol. 11, no. 6. 2050060. DOI: 10.1142/s1793962320500609. (In Engl.).
9. Snell E. H., Helliwell J. R. Macromolecular crystallization in microgravity // *Reports on progress in physics*. 2005. Vol. 68. P. 799–853. DOI:10.1088/0034-4885/68/4/R02. (In Engl.).
10. Abrashkin V. I., Voronov K. E., Piyakov A. V. [et al.]. Neupravlyayemoye vrashchatel'noye dvizheniye opytного obraztsa malogo kosmicheskogo apparata «AIST» [Uncontrolled attitude motion of the prototype of the small spacecraft AIST] // *Preprinty IPM im. M. V. Keldysha. Keldysh Institute PREPRINTS*. 2015. No. 48. P. 1–36. (In Russ.).
11. Salmin V. V., Chetverikov A. S. Methods of selecting guidance laws transfer vehicle with electric propulsion system during the flight into geostationary orbit *Advances // Astronautical Sciences*. 2017. Vol. 161. P. 455–466. (In Engl.).
12. Zemskov V. S., Rauhman M. R., Shalimov V. P. Gravitatsionnaya chuvstvitel'nost' rastvorov-raspлавov pri kristallizatsii dvukhfaznykh splavov insb-inbi v kosmicheskikh usloviyakh [Gravitational Sensitivity of Solutions–Melts at the Crystallization of Two-Phase InSb–InBi Alloys under Space Conditions] // *Cosmic Research. Cosmic Research*. 2001. Vol. 39, no. 4. P. 359. (In Russ.).
13. Huang B., Li D.-G., Liu H. Y. C-T 2018 Effects of spaceflight and simulated microgravity on microbial growth and secondary metabolism // *Military Medical Research*. 2018. Vol. 5. DOI: 10.1186/s40779-018-0162-9. (In Engl.).
14. Lan C.-W., Lyubimov D. V., Lyubimova T. P. [et al.]. Influence of high-frequency vibration on the morphological instability in the directional crystallization of binary melts // *Fluid Dynamics*. 2008. Vol. 43. P. 514–523. DOI: 10.1134/S0015462808040030. (In Engl.).
15. McPherson A., DeLucas L. J. Microgravity protein crystallization // *npj Microgravity*. 2015. Vol. 1. 15010. P. 1. DOI: 10.1038/npjmggrav.2015.10. (In Engl.).
16. Sedel'nikov A. V., Serpukhova A. A. Modelirovaniye dvizheniya uprugogo kosmicheskogo apparata v tselyakh otsenki mikroskoreniiy [Simulation of a flexible spacecraft motion to evaluate microaccelerations] // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Aviatsionnaya tekhnika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Aviatsionnaya Tekhnika*. 2009. No. 4. P. 71–72. (In Russ.).
17. Li X., Anken R., Liu L. [et al.]. Effects of Simulated Microgravity on Otolith Growth of Larval Zebrafish using a Rotating-Wall Vessel: Appropriate Rotation Speed and Fish Developmental Stage // *Microgravity Science and Technology*.

2017. Vol. 29, no. 1-2. P. 1–8. DOI: 10.1007/S12217-016-9518-5. (In Engl.).
18. Ruff G. A. Microgravity research in spacecraft fire safety // *Ilaon Options Technical Working Conference*. 2001. P. 13–22. (In Engl.).
19. Li J.-C., Guo B., Zhao J.-F. On the Space Thermal Destratification in a Partially Filled Hydrogen Propellant Tank by Jet Injection // *Microgravity Science and Technology*. 2022. Vol. 34, no. 1. P. 6. DOI: 10.1007/s12217-021-09923-2. (In Engl.).
20. Wu Q., Liu B., Cui N. [et al.]. Tracking Control of a Maglev Vibration Isolation System Based on a High-Precision Relative Position and Attitude Model // *Sensors*. 2019. Vol. 19 (15). 3375. DOI: 10.3390/s19153375. (In Engl.).
21. Liu W., Gao Y., Dong W. [et al.]. Flight Test Results of the Microgravity Active Vibration Isolation System in China's Tianzhou-1 Mission // *Microgravity Science and Technology*. 2018. Vol. 30, no. 6. P. 995–1009. DOI: 10.1007/S12217-018-9659-9. (In Engl.).
22. Hu W. R., Zhao J. F., Long M. [et al.]. Space Program SJ-10 of Microgravity Research // *Microgravity Science and Technology*. 2014. Vol. 26, no. 3. P. 159–169. DOI: 10.1007/S12217-014-9390-0. (In Engl.).
23. Sedelnikov A. V., Potienko K. I. Analysis of reduction of controllability of spacecraft during conducting of active control over microaccelerations // *International Review of Aerospace Engineering*. 2017. Vol. 10, no. 3. P. 160–166. DOI: 10.15866/IREASE.V10I3.12342. (In Engl.).
24. Abrashkin V. I., Voronov K. E., Piyakov I. V. [et al.]. Opredeleniye vrashchatel'nogo dvizheniya sputnika BION M-1 sredstvami apparatury GRAVITON [Determining the rotational motion of the bion m-1 satellite with the Graviton instrument] // *Kosmicheskiye issledovaniya. Cosmic Research*. 2015. Vol. 53, no. 4. P. 306. (In Russ.).
25. Sedelnikov A. V. Classification of microaccelerations according to methods of their control // *Microgravity Science and Technology*. 2015. Vol. 27, no. 3. P. 245–251. DOI: 10.1007/S12217-015-9442-0. (In Engl.).
26. Abrashkin V. I., Voronov K. E., Dorofeyev A. S. [et al.]. Opredeleniye vrashchatel'nogo dvizheniya malogo kosmicheskogo apparata AIST-2D po dannym magnitnykh izmereniy [Detection of the rotational motion of the aist-2d small spacecraft by magnetic measurements] // *Kosmicheskiye issledovaniya. Cosmic Research*. 2019. Vol. 57, no. 1. P. 61–73. DOI: 10.1134/S0023420619010011. (In Russ.).
27. Li Y., Wang C., Wang L. [et al.]. A Laser Interferometer Prototype with Pico-Meter Measurement Precision for Taiji Space Gravitational Wave Detection Mission in China // *Microgravity Science and Technology*. 2020. Vol. 32, no. 3. P. 331–338. DOI: 10.1007/s12217-019-09769-9. (In Engl.).
28. Sedelnikov A. V. Modeling of microaccelerations caused by running of attitude-control engines of spacecraft with elastic structural elements // *Microgravity Science and Technology*. 2016. Vol. 28, no. 5. P. 491–498. DOI: 10.1007/S12217-016-9507-8. (In Engl.).
29. Yang H., Liu L., Liu Y. [et al.]. Modeling and Microvibration Control of Flexible Cable for Disturbance-Free Payload Spacecraft // *Microgravity Science and Technology*. 2021. Vol. 33, no. 4. P. 46. DOI: 10.1007/S12217-021-09897-1. (In Engl.).
30. Myung H.-S., Bang H. Nonlinear Predictive Attitude Control of Spacecraft Under External Disturbances // *Journal of Spacecraft and Rockets*. 2003. Vol. 40, no. 5. P. 696–699. DOI: 10.2514/2.6896. (In Engl.).
31. Ulrich S. Nonlinear Passivity-Based Adaptive Control of Spacecraft Formation Flying // *American Control Conference Boston*. 2016. P. 7432–7437. DOI: 10.1109/ACC.2016.7526846. (In Engl.).
32. Blinov V. N., Vavilov I. S., Kositsin V. V., Lukyanchik A. I., Ruban V. I., Shalay V. V. Study of power-to-weight ratio of the electrothermal propulsion system of nanosatellite maneuvering satellite platform // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. Vol. 944. 012020. DOI: 10.1109/ACC.2016.7526846. (In Engl.).
33. Bedingfield K. L., Leach R. D., Alexander M. B. Spacecraft System Failures and Anomalies Attributed to the Natural Space Environment // *NASA Reference Publication*. 1996. Vol. 1390. P. 51. DOI: 10.2514/6.1995-3564. (In Engl.).
34. Sedelnikov A. V. Accuracy assessment of microaccelerations simulation on the spacecraft «Foton-M» no. 2 according to magnetic measuring instruments data // *Microgravity Science and Technology*. 2020. Vol. 32, no. 3. P. 259–264. DOI: 10.1007/s12217-019-09766-y. (In Engl.).
35. Abrashkin V. I., Bogoyavlenskiy N. L., Voronov K. E. [et al.]. Nepravlyayemoye dvizheniye sputnika FOTON M-2 i kvazistaticheskiye mikrouskoreniya na ego bortu [UNCONTROLLED motion of the FOTON M-2 satellite and quasistatic microaccelerations on its board] // *Kosmicheskiye issledovaniya. Cosmic Research*. 2007. Vol. 45, no. 5. P. 450–470. EDN: IAQPJV. (In Russ.).
36. Sedelnikov A. V., Taneeva A. S., Khnyryova E. S., Kamaletdinova M. V., Martynova E. D. Investigation of the rotational motion stability of the AIST small spacecraft prototype according to the measurements of the Earth's magnetic field // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1901. 012022. DOI: 10.1088/1742-6596/1901/1/012022. (In Engl.).
37. Owen R. G., Jones D. I., Owens A. R. [et al.]. Integration of a microgravity isolation mount within a Columbus single rack // *Acta Astronautica*. 1990. Vol. 22. P. 127–135. DOI: 10.1016/0094-5765(90)90013-B. (In Engl.).
38. Labib M., Piontek D., Valsecchi N. [et al.]. The Fluid Science Laboratory's Microgravity Vibration Isolation Subsystem. 2010. P. 1–10. DOI: 10.2514/6.2010-2007. (In Engl.).
39. Ivanov A. I., Levto V. L., Romanov V. V. [et al.]. Rezul'taty letno-kosmicheskikh ispytaniy vibrozashchitnoy platformy VZP-1K [The Results of Space Flight Tests of the Passive Vibration Protective Platform VZP-1K on Board the Station Mir] // *Kosmicheskiye issledovaniya. Cosmic Research*. 2001. Vol. 39, no. 2. P. 137–149. (In Russ.).
40. Akulenko L. D., Bolotnik N. N., Borisov A. E. [et al.]. Upravleniye oriyentatsiyey ob'yekta na vrashchayushchemsya osnovanii s pomoshch'yu dvukhstupenchatogo elektroprivoda [Orientation control of an object on a rotating base by using a two-stage electric drive] // *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya. Izvestiya RAS. Theory and Control Systems*. 2019. No. 6. P. 3–17. DOI: 10.1134/S0002338819060027. (In Russ.).
41. Amselem S. Remote Controlled Autonomous Microgravity Lab Platforms for Drug Research in Space // *Pharmaceutical Research*. 2019. Vol. 36. P. 183. DOI: 10.1007/s11095-019-2703-7. (In Engl.).
42. Dong W., Duan W. [et al.]. Microgravity disturbance analysis on Chinese space laboratory // *npj Microgravity*. 2019. Vol. 5. P. 18. DOI: 10.1038/s41526-019-0078-z. (In Engl.).
43. Whorton M. S. Microgravity vibration isolation for the International Space Station // *AIP Conference Proceedings*. 2000. Vol. 504. P. 605. DOI: 10.1063/1.1302547. (In Engl.).
44. Primm L., Krupacs E., Jules K. External payloads proposer's guide to the International Space Station // *NASA Report GSFC*. 2015. 420-01-09. P. 168. (In Engl.).
45. Sedelnikov A. V., Orlov D. I. Analysis of the significance of the influence of various components of the disturbance from a temperature shock on the level of microaccelerations in the internal environment of a small spacecraft // *Microgravity Science and Technology*. 2021. Vol. 33, no. 2. P. 22. DOI: 10.1007/S12217-020-09867-Z. (In Engl.).

46. Gordeyev B. A., Filatov L. V., Aynbinder R. M. *Matematicheskiye modeli vibrozashchitnykh sistem* [Mathematical models of vibration protection systems]. Nizhny Novgorod, 2018. 165 p. ISBN 978-5-528-00324-5. (In Russ.).

SEDELNIKOV Andrey Valeryevich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Space Engineering Department, Samara National Research University (Samara University), Samara.

SPIN-code: 3987-6997

AuthorID (SCOPUS): 23013232300

ORCID: 0000-0003-2698-1348

ResearcherID: G-4444-2017

ESKINA Elena Vladimirovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Aircraft Production and Quality Control in Mechanical Engineering Department, Head of Postgraduate and Doctoral Studies Department, Samara University, Samara.

AuthorID (SCOPUS): 57148123100

TANEEVA Anastasiya Sergeevna, Graduate Student of Space Engineering Department, Laboratory Assistant of Research Laboratory of Automated Research Systems (NIL-35), Laboratory Assistant of Space Engineering Department, Samara University, Samara.

SPIN-code: 8816-1930

AuthorID (SCOPUS): 57205365815

ORCID: 0000-0002-8531-760X

Correspondence address: anaa.smith@yandex.ru

KHNYRYOVA Ekaterina Sergeevna, Senior Lecturer of Further Mathematics Department, Samara University, Samara.

AuthorID (SCOPUS): 57191342938

MATVEEVA Elena Sergeevna, Undergraduate gr. 1235-010403D of Aeronautical Engineering Institute, Samara University, Samara.

For citations

Sedelnikov A. V., Eskina E. V., Taneeva A. S., Khnyryova E. S., Matveeva E. S. The problem of ensuring requirements for microaccelerations on board of small spacecraft // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2022. Vol. 6, no. 2. P. 90–98. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-2-90-98.

Received April 20, 2022.

© A. V. Sedelnikov, E. V. Eskina, A. S. Taneeva,

E. S. Khnyryova, E. S. Matveeva