

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОСАЖДЕНИЯ ТОПЛИВА В БАКАХ ДВИГАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК РАЗГОННЫХ БЛОКОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ МАЛОЙ ПЕРЕГРУЗКИ

А.В. Корольков^{1✉}, В.Б. Сапожников²

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5

an_korolkov@mail.ru

Сформулированы проблемы, возникающие при подаче жидкого топлива в двигательную установку разгонных блоков в условиях невесомости. Определены процессы осаждения топлива и сепарации газовых включений под действием предпусковой перегрузки как ключевые. Проведен анализ существующих работ по определению параметров этих процессов. Представлена методика экспериментальных исследований и новый подход к расчетной оценке времени осаждения топлива под действием предпусковой перегрузки.

Ключевые слова: топливный бак, жидкое топливо, сплошность потока, предпусковая перегрузка, время осаждения, сепарация газа, методика эксперимента, теоретическая оценка

Ссылка для цитирования: Корольков А.В., Сапожников В.Б. Моделирование процессов осаждения топлива в баках двигательных установок разгонных блоков под действием малой перегрузки // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2022. Т. 26. № 3. С. 131–136. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-3-131-136

Поведение жидкого топлива и газа наддува в топливных баках летательных аппаратов в условиях свободного (невозмущенного) орбитального (суборбитального) полета определяет нормальное функционирование жидкостных ракетных двигателей (ЖРД). Для летательных аппаратов, находящихся в условиях свободного орбитального (суборбитального) полета, основным условием нормального функционирования ЖРД становится непрерывность подачи компонентов жидкого ракетного топлива в расходные магистрали топливных баков без нарушения сплошности потока. Одним из способов, обеспечивающих такую непрерывность, является осаждение топлива к заборному устройству (расходной магистрали) бака и сепарация газовых включений под действием предпускового ускорения (предпусковой перегрузки), создаваемого вспомогательными ракетными двигателями малой тяги непосредственно перед заполнением расходных магистралей для запуска маршевого двигателя.

Исходя из этого, рассмотрение вопросов о динамике жидкого топлива и газа наддува в топливных баках двигательной установки (ДУ) при переходе от невесомости к перегрузке и решение связанных с ними задач представляют несомненный практический интерес. Трудности теоретического исследования, которое к тому же не всегда гарантирует получение желаемых и достоверных результатов, связаны с процессами осаждения топлива и сепарации газовых включений под действием предпусковой перегрузки.

Нами разработана методика экспериментальных исследований и предложен новый подход к расчетной оценке времени осаждения топлива и сепарации газовых включений под действием предпусковой перегрузки с помощью выполненного ранее численного решения краевой задачи Дирихле [1] и имеющихся теоретических результатов, представленных в работе [2].

До настоящего времени отсутствуют общепринятые методы оценки оптимальной продолжительности действия и величины предпускового ускорения, необходимого для осаждения топлива и сепарации газовых включений из газожидкостных смесей, образующихся в процессе осаждения. Обычно для этой цели используют приближенные соотношения, основанные на оценке продолжительности двух стадий процесса осаждения: 1) стадии прилива жидкого топлива к заборному устройству (входу в расходную магистраль) бака; 2) стадии очищения жидкости от образующихся при этом свободных газовых включений. При использовании такого подхода продолжительность первой стадии оценивают на основании закона свободного падения [3], второй — по эмпирической формуле движения в жидкости твердой сферы некоторого осредненного радиуса под действием архимедовой силы. Проведенные исследования показали, что данная методика оценки может приводить как к завышенным на 50...100 %, так и к заниженным на 30...50 % результатам в зависимости от структуры газожидкостной смеси, коэффициента заполнения бака и величины предпускового ускорения. Недостаточно эффективным является и метод,

изложенный в работе [4], поскольку в основе его также лежит ориентация на некоторый осредненный размер свободного газового включения.

Одной из первых попыток теоретического решения этой задачи следует, по-видимому, считать публикацию [5]. Позднее в работе [6] сообщалось о создании программы для математического моделирования процессов осаждения топлива с использованием метода «метка-ячейка» (МАС). В работе [6] приведена исходная система уравнений и основные приемы ее конечно-разностной аппроксимации, показано, что результаты расчета удовлетворительно совпадают с кинограммами внутрибаковых процессов при экспериментальных исследованиях. Вместе с тем, в ней отмечается, что при пересчете результатов моделирования с маломасштабных моделей на полноразмерные баки наблюдается существенное различие между расчетными и экспериментальными данными, которое объясняется невозможностью точного воспроизведения начальных условий на поверхности раздела фаз. Кроме того, повторение расчетов по методике работы [6] для баков другой формы и при других начальных условиях практически невозможно из-за отсутствия в этой работе необходимой информации.

Учет времен осаждения топлива и сепарации газовых включений под действием предпусковой перегрузки имеют важное значение в разработке внутрибаковых устройств, основанных на капиллярных свойствах пористо-сетчатых материалов [7–20]. В связи с этим в ходе решения практических задач возникает необходимость получения экспериментальных данных по основным закономерностям процесса осаждения топлива.

Цель работы

Цель работы — разработка методики экспериментальных исследований и нового подхода к расчетной оценке времени осаждения топлива и сепарации газовых включений под действием предпусковой перегрузки.

Постановка методики проведения экспериментов

В задаче о динамике процесса осаждения жидкого топлива и сепарации свободных газовых включений из газожидкостных смесей, образующихся в процессе осаждения, при заданной постоянной интенсивности поля массовых сил ng_0 , где $g_0 = 9,8 \text{ м/с}^2$ и n — величина перегрузки, нас интересует время t , в течение которого жидкий компонент топлива будет локализован в районе заборного устройства и очищен от свободных газовых включений. Очевидно, что при заданной степени заполнения (коэффициенте заполнения

бака φ) величина t будет определяться интенсивностью поля массовых сил ng_0 , физическими свойствами жидкости (вязкостью ν , поверхностным натяжением σ и плотностью ρ), и геометрией бака (в виде некоторого характерного размера l). Таким образом, по-видимому, все независимые переменные будут учтены, если записать, что

$$t = f(ng_0, \nu, \sigma, \rho, l). \quad (1)$$

Выражение (1) представляет собой некую функциональную зависимость между шестью размерными величинами. Если размерности этих величин будут выражены в системе СИ, то применяя π -теорему теории подобия [21] к задаче (1), заключаем, что в соответствии с π -теоремой в данном случае $n = 6$, $k = 3$. Тогда функцию (1) можно представить как зависимость трех безразмерных комплексов. Согласно анализу размерностей [3], имеем

$$[t] = [ng_0]^a [\nu]^\beta [\sigma]^\gamma [\rho]^\delta [l]^\epsilon,$$

или

$$[c] = [m/c^2]^a [m^2/c]^\beta [кг/c^2]^\gamma [кг/м^3]^\delta [м]^\epsilon. \quad (2)$$

Из выражения (2) следует, что $\delta = -\gamma$, т. е. число переменных в интересующей нас задаче может быть уменьшено на единицу и тогда

$$t = f_1 \left(\frac{ng_0, \nu, \sigma}{\rho, l} \right). \quad (3)$$

Перепишем уравнение (3) в виде

$$[c] = [m/c^2]^a [m^2/c]^b [m^3/c^3]^c [m]^d. \quad (4)$$

Приравнявая показатели степеней при одноименных размерностях левой и правой частей уравнения (4), можно установить, что искомая зависимость должна иметь вид

$$t \sqrt{\frac{ng_0}{l}} = A(\varphi) \cdot (Bo)^m \cdot (Ga)^n. \quad (5)$$

Здесь $A(\varphi)$ — экспериментально определяемая константа, зависящая от коэффициента заполнения бака φ ; a , m и n — также экспериментально определяемые показатели степеней при числах Бонда

$$Bo = \frac{\rho ng_0 r^2}{\sigma}$$

и Галилея

$$Ga = \frac{ng_0}{\nu^2} r^3.$$

В качестве характерного размера r в числах Бонда и Галилея следует, по-видимому, принимать некий эквивалентный размер (например, радиус) газовой подушки в модели бака перед началом очередного эксперимента.

Теоретическая оценка времени осаждения жидкого топлива

Наихудшая в момент запуска ДУ (с точки зрения обеспечения сплошности потока жидкости на входе в расходную магистраль) ситуация — нахождение жидкости в верхней (относительно главной оси OX) части емкости. При возникновении положительного ускорения основной объем жидкости должен выйти из положения неустойчивого равновесия и занять рабочее положение (войти в контакт с фазоразделительным устройством — ФРУ). На это потребуется определенное время — время осаждения. Оно должно быть много меньше времени работы двигателя на объеме V^* топлива, удерживаемого капиллярными силами в зазоре между стенкой бака и ФРУ. Если отсутствует начальное отклонение поверхности контакта основного объема жидкости от состояния неустойчивого равновесия (а это наиболее неблагоприятное обстоятельство, увеличивающее время осаждения), для оценки времени осаждения можно воспользоваться критерием неустойчивости Рэлея — Тейлора [22]. Критическое волновое число K , ответственное за возникновение движения жидкости после запуска двигателя, зависит от сил плавучести, определяемых возникшим положительным ускорением, и от сил поверхностного натяжения:

$$K^2 = (\rho_1 - \rho_2) \frac{g}{\sigma},$$

здесь ρ_1 — плотность жидкости; ρ_2 — плотность газа.

Плотностью газа можно пренебречь по сравнению с плотностью жидкости (считаем, что число

Атвуда $A = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} \approx 1$), поэтому

$$K = \sqrt{\rho_1 \frac{g}{\sigma}}.$$

Если характерный размер (диаметр) поверхности раздела меньше критической длины волны $l = 2 \frac{\pi}{K}$, то жидкость останется неподвижной.

Если в диаметре поверхности укладывается несколько критических длин волны, то возникает ускоренное движение жидкости в сторону ФРУ, сопровождающееся вытеснением газа.

Ускоренному движению центра масс объема жидкости препятствуют капиллярные силы, действующие в вертикальном направлении на искривленной поверхности образующихся «пальцев». Ускорение центра масс жидкости может быть получено из уравнения движения:

$$a = g - \frac{F_s}{M},$$

где F_s — суммарная капиллярная сила;

M — масса жидкости.

Радиусы «пальцев» составляют четверть критической длины волны:

$$r = \frac{\pi}{2K}.$$

Если S — площадь поверхности раздела сред, то количество «пальцев» можно оценить как $K_s = \frac{S}{\pi r^2}$. На каждом «пальце» действует капиллярная сила $F = 2\pi r \sigma$.

Таким образом, уравнение движения приобретает вид

$$a = g \left(1 - \frac{4S}{V\pi} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho g}} \right) = g \left(1 - \frac{4S}{V\pi} \cdot \frac{1}{K} \right),$$

где V — объем жидкости.

Для оценки времени осаждения можно взять время t_r :

$$t_r = \sqrt{\frac{4R_b}{a}}.$$

где t_r — время прохождения центра масс жидкости расстояния $2R_b$

Выводы

Разработана методика экспериментальных исследований и предложен новый подход к расчетной оценке времени осаждения топлива и сепарации газовых включений под действием предпусковой перегрузки.

Список литературы

- [1] Корольков А.В., Сапожников В.Б. Имитационная модель изменения формы газового пузыря в жидкости в условиях реального космического полета // Вестник МГУЛ – Лесной вестник, 2005. № 4. С. 51–52.
- [2] Sapozhnikov V.B., Korolkov A.V. Mathematical modeling of a spacecrafts' fuel tank empty in-gin the orbital flight conditions // International Scientific Conference «Physical and Mathematical Problems of Advanced Technology Development», Moscow, Bauman MSTU, 17–19 November 2014). Moscow: Bauman MSTU Publ., 2014, pp. 80–81.
- [3] Burge G.W., Blackmon J.B., Madsen R.A. Analytical approaches for the design of orbital refueling system // AIAA Paper, 1969, no. 69–567, p. 53.
- [4] Калинин Э.К., Невровский В.А. К оценке времени осаждения жидкости в баке под действием малой перегрузки // Инженерно-физический журнал, 1986. Т. 50. № 6. С. 930–934.
- [5] Математическое моделирование процесса осаждения топлива на дно бака при малых перегрузках / ГОНТИ-4, пер. № СГ-30/76, 1977. 65 с.
- [6] Aydelott J.C., Mjolsness R.S., Torrey M.D., Hochstein J.I. Numerical modeling of in orbit propellant motion resulting from an impulsive acceleration // AIAA/SAE/ASHE/ASEE: 23 Joint Propulsion conf. 29 June – 2 July 1987, San-Diego, Calif., USA. New-York, 1987, 22 p.

- [7] Андреев А.Н., Калязин Э.Л. Расчет проектных параметров внутрибаковых устройств и элементов топливopодающих магистралей ЛА. М.: Изд-во МАИ, 1999. 36 с.
- [8] Александров А.А., Графодатский О.С., Крылов В.И., Лемешевский С.А. Создание научно-производственного центра перспективных изделий из пористых сетчатых материалов для объектов космической отрасли и общепромышленного назначения на базе кооперации ФГУП «НПО имени С.А. Лавочкина» и МГТУ им. Н.Э. Баумана (история, современное состояние и перспективы) // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина, 2017. № 2. С. 17–23.
- [9] Багров В.В., Курпатенков А.В., Поляев В.М. Капиллярные системы отбора жидкости из баков космических летательных аппаратов / под ред. В.М. Поляева. М.: УНПЦ «Энергомаш», 1997. 328 с.
- [10] Сапожников В.Б., Крылов В.И., Новиков Ю.М., Ягодников Д.А. Развитие идей профессора В.М. Поляева по применению пористо-сетчатых материалов для внутрибаковых устройств, обеспечивающих многократный запуск жидкостных ракетных двигателей // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение, 2006. № 2. С. 78–88.
- [11] Новиков Ю.М., Александров Л.Г., Богданов А.А., Большаков В.А. Проницаемые структуры на основе комбинированного пористого сетчатого металла и сварочная технология производства изделий из них для двигательных установок космических летательных аппаратов // Вестник НПО имени С.А. Лавочкина, 2021. № 1. С. 44–51.
- [12] Новиков Ю.М., Белов С.В., Большаков В.А., Колесников А.Г. Комбинированный пористый материал. Патент РФ № 1632464. МПК4 В 23 К 20/00.; патентообладатель НИИ энергетического машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана; заявл. 04.03.88; регистр. 16.04.94.
- [13] Топливный бак и его заборное устройство. Патент РФ № 2657137. дата приоритета 19.09.2016 г.; дата опубл. 26.03.2018.
- [14] Сапожников В.Б., Полянский А.Р., Корольков А.В., Константинов С.Б., Александров Л.Г. Экспериментальная оценка невырабатываемых остатков топлива в баках с внутрибаковыми устройствами капиллярного типа для двигательных установок космических аппаратов // Инженерный журнал: наука и инновации, 2019. Вып. 12. URL: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-12-1941> (дата обращения 01.10.2021).
- [15] Ушаков В.В., Щербаков А.М. Регулируемый наддув ракетного бака // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина, 2020. № 1. С. 57–61.
- [16] Полуин Д.А., Миркин Н.Н., Орещенко В.М., Усов Г.Л. Пневмогидравлические системы двигательных установок с жидкостными ракетными двигателями / под ред. Челомея В.Н. М.: Машиностроение, 1978. 240 с.
- [17] Ягодников Д.А., Шацкий О.Е., Лоханов И.В., Карчаев Х.Ж. К 70-летию кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана (устойчивое развитие и преемственность исторических традиций) // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина, 2018. № 3. С. 76–80.
- [18] Александров Л.Г., Константинов С.Б., Корольков А.В., Сапожников В.Б. Топливный бак с капиллярным внутрибаковым устройством космической двигательной установки // Вестник НПО имени С.А. Лавочкина, 2021. № 4 (54). С. 15–21.
- [19] Сапожников В.Б., Полянский А.Р., Корольков А.В., Расчет минимального запаса топлива, находящегося в контакте с внутрибаковым устройством, для обеспечения работы жидкостного ракетного двигателя в условиях невесомости // Инженерный журнал: наука и инновации. 2021. № 3 (111). Статья 4.
- [20] Sapozhnikov V.B., Korolkov A.V., Malashin A.A., Sobolev A.V., Usachyov M.S. Experimental evaluation of rational pre-launch acceleration parameters to provide liquid-propellant rocket sustainer engine launch in microgravity // AIP Conference Proceedings. XLIII Academic Space Conference: Dedicated to the Memory of Academician S.P. Korolev and Other Outstanding Russian Scientists — Pioneers of Space Exploration, 2019, p. 130008.
- [21] Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1977. 440 с.
- [22] Лабунцов Д.А., Ягов В.В. Механика двухфазных систем. М.: Изд-во МЭИ, 2000. С. 143–146.

Сведения об авторах

Корольков Анатолий Владимирович [✉] — д-р физ.-мат. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), an_korolkov@mail.ru

Сапожников Владимир Борисович — д-р техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана, sapozhnikov47@mail.ru

Поступила в редакцию 22.12.2021.

Одобрено после рецензирования 28.01.2022.

Принята к публикации 04.04.2022.

MODELING OF PROPELLANT SETTLING PROCESSES IN UPPER STAGES PROPULSION SYSTEMS TANKS UNDER LOW OVERLOAD

A.V. Korol'kov^{1✉}, V.B. Sapozhnikov²

¹BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

²BMSTU, 5, 2nd Baumanskaya st., 105005, Moscow, Russia

an_korolkov@mail.ru

The problems arising when liquid fuel is supplied to the propulsion system of upper stages in zero gravity are formulated. The key processes are the deposition of fuel and separation of gas inclusions under the action of pre-start overload. The analysis of existing works on determining the parameters of these processes is carried out. The method of experimental studies and a new approach to the estimated time of fuel deposition under the action of pre-start overload are presented.

Keywords: fuel tank, liquid fuel, flow continuity, pre-start overload, deposition time, gas separation, experimental methodology, theoretical evaluation

Suggested citation: Korol'kov A.V., Sapozhnikov V.B. *Modelirovanie protsessov osazhdeniya topliva v bakakh dvigatel'nykh ustanovok razgonnykh blokov pod deystviem maloy peregruzki* [Modeling of propellant settling processes in upper stages propulsion systems tanks under low overload]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 3, pp. 131–136. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-3-131-136

References

- [1] Korol'kov A.V., Sapozhnikov V.B. *Imitatsionnaya model' izmeneniya formy gazovogo puzyrya v zhidkosti v usloviyakh real'nogo kosmicheskogo poleta* [Simulation model for changing the shape of a gas bubble in a liquid under conditions of a real space flight]. *Moscow State Forest University Bulletin – Lesnoy vestnik*, 2005, no. 4, pp. 51–52.
- [2] Sapozhnikov V.B., Korol'kov A.V. Mathematical modeling of a spacecrafts' fuel tank empty in-gin the orbital flight conditions. *International Scientific Conference «Physical and Mathematical Problems of Advanced Technology Development»*, Moscow, Bauman MSTU, 17–19 November 2014). Moscow: Bauman MSTU Publ., 2014, pp. 80–81.
- [3] Burge G.W., Blackmon J.B., Madsen R.A. Analytical approaches for the design of orbital refueling system. *AIAA Paper*, 1969, no. 69–567, p. 53.
- [4] Kalinin E.K., Nevrovskiy V.A. *K otsenke vremeni osazhdeniya zhidkosti v bace pod deystviem maloy peregruzki* [On the estimation of the liquid settling time in a tank under the action of a small overload]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal [Engineering and Physical Journal]*, 1986, v. 50, no. 6, pp. 930–934.
- [5] *Matematicheskoe modelirovanie protsessosa osazhdeniya topliva na dno baka pri malykh peregruzkakh* [Mathematical modeling of the process of fuel deposition on the bottom of the tank at low overloads]. *GONTI-4*, per. no. SG-30/76, 1977, 65 p.
- [6] Aydelott J.C., Mjolsness R.S., Torrey M.D., Hochstein J.I. Numerical modeling of in orbit propellant motion resulting from an impulsive acceleration. *A1AA/SAE/ASHE/ASEE: 23 Joint Propulsion conf.* 29 June – 2 July 1987, San-Diego, Calif., USA. New-York, 1987, 22 p.
- [7] Andreev A.N., Kalyazin E.L. *Raschet proektnykh parametrov vnutribakovykh ustroystv i elementov toplivopodayushchikh magistraley LA* [Calculation of design parameters of in-tank devices and elements of aircraft fuel supply lines]. Moscow: MAI Publishing House, 1999, 36 p.
- [8] Aleksandrov A.A., Grafodatskiy O.S., Krylov V.I., Lemeshevskiy S.A. *Sozдание nauchno-proizvodstvennogo tsentra perspektivnykh izdeliy iz poristykh setchatykh materialov dlya ob'ektov kosmicheskoy otrasli i obshchepromyshlennogo naznacheniya na baze kooperatsii FGUP «NPO imeni S.A. Lavochkina» i MGTU im. N.E. Baumana (istoriya, sovremennoe sostoyanie i perspektivy)* [Creation of a research and production center for promising products from porous mesh materials for space industry and general industrial purposes on the basis of cooperation of the Federal State Unitary Enterprise «NPO named after S.A. Lavochkin» and Moscow State Technical University. N.E. Bauman (history, current state and prospects)]. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*, 2017, no. 2, pp. 17–23.
- [9] Bagrov V.V., Kurpatenkov A.V., Polyayev V.M. *Kapillyarnye sistemy otbora zhidkosti iz bakov kosmicheskikh letatel'nykh apparatov* [Capillary Systems for Liquid Extraction from Spacecraft Tanks]. Ed. V.M. Polyayev. Moscow: UNPTS «Energomash», 1997, 328 p.
- [10] Sapozhnikov V.B., Krylov V.I., Novikov Yu.M., Yagodnikov D.A. *Razvitie idey professora V.M. Polyayeva po primeneniyu poristo-setchatykh materialov dlya vnutribakovykh ustroystv, obespechivayushchikh mnogokratnyy zapusk zhidkostnykh raketnykh dvigateley* [Development of the ideas of Professor V.M. Polyayev on the use of porous-mesh materials for intra-tank devices that provide multiple launch of liquid rocket engines]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie [Bulletin of MSTU im. N.E. Bauman. Ser. Engineering]*, 2006, no. 2, pp. 78–88.
- [11] Novikov Yu.M., Aleksandrov L.G., Bogdanov A.A., Bol'shakov V.A. *Pronitsaemye struktury na osnove kombinirovannogo poristogo setchatogo metalla i svarochnaya tekhnologiya proizvodstva izdeliy iz nikh dlya dvigatel'nykh ustanovok kosmicheskikh letatel'nykh apparatov* [Permeable structures based on a combined porous mesh metal and welding technology for the production of products from them for propulsion systems of space aircraft]. *Vestnik NPO imeni S.A. Lavochkina [Bulletin of NPO named after S.A. Lavochkina]*, 2021, no. 1, pp. 44–51.
- [12] Novikov Yu.M., Belov S.V., Bol'shakov V.A., Kolesnikov A.G. *Kombinirovannyi poristy material* [Combined porous material]. RF patent no. 1632464. МПК4 В 23 К 20/00. Patent holder of the Research Institute of Power Engineering MSTU N.E. Bauman; dec. 03/04/88; registered 04/16/94.

- [13] *Toplivnyy bak i ego zabornoe ustroystvo* [Fuel tank and its intake device]. Patent of the Russian Federation No. 2657137.; priority date 09.19.2016; date of publication 03.26.2018.
- [14] Sapozhnikov V.B., Polyanskiy A.R., Korol'kov A.V., Konstantinov S.B., Aleksandrov L.G. *Ekspperimental'naya otsenka nevyrabatyvaemykh ostatkov topliva v bakakh c vntribakovymi ustroystvami kapillyarnogo tipa dlya dvigatel'nykh ustanovok kosmicheskikh apparatov* [Experimental evaluation of unusable fuel residues in tanks with capillary-type intratank devices for spacecraft propulsion systems]. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovations], 2019, iss. 12. Available at: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-12-1941> (accessed 01.10.2021).
- [15] Ushakov V.V., Shcherbakov A.M. *Reguliruemyy nadduv raketnogo baka* [Adjustable pressurization of the rocket tank]. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*, 2020, no. 1, pp. 57–61.
- [16] Polunin D.A., Mirkin N.N., Oreshchenko V.M., Usov G.L. *Pnevmogidravlicheskie sistemy dvigatel'nykh ustanovok s zhidkostnymi raketnymi dvigatelyami* [Pneumohydraulic systems of propulsion systems with liquid rocket engines]. Ed. V.N. Chelomeya. Moscow: Mashinostroenie, 1978, 240 p.
- [17] Yagodnikov D.A., Shatskiy O.E., Lokhanov I.V., Karchaev Kh.Zh. *K 70-letiyu kafedry «Raketnye dvigateli» MGTU im. N.E. Baumana (ustoychivoe razvitiye i preemstvennost' istoricheskikh traditsiy)* [To the 70th anniversary of the department «Rocket engines» MSTU N.E. Bauman (sustainable development and continuity of historical traditions)]. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina* [Bulletin of NPO named after S.A. Lavochkina], 2018, no. 3, pp. 76–80.
- [18] Aleksandrov L.G., Konstantinov S.B., Korol'kov A.V., Sapozhnikov V.B. *Toplivnyy bak s kapillyarnym vntribakovym ustroystvom kosmicheskoy dvigatel'noy ustanovki* [Fuel tank with a capillary intra-tank device of a space propulsion system]. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina* [Bulletin of NPO named after S.A. Lavochkina], 2021, no. 4 (54), pp. 15–21.
- [19] Sapozhnikov V.B., Polyanskiy A.R., Korol'kov A.V. *Raschet minimal'nogo zapasa topliva, nakhodyashchegosya v kontakte s vntribakovym ustroystvom, dlya obespecheniya raboty zhidkostnogo raketnogo dvigatelya v usloviyakh nevesomosti* [Calculation of the minimum fuel supply in contact with an in-tank device to ensure the operation of a liquid-propellant rocket engine in weightless conditions]. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovations], 2021, no. 3 (111), Article 4.
- [20] Sapozhnikov V.B., Korolkov A.V., Malashin A.A., Sobolev A.V., Usachyov M.S. Experimental evaluation of rational pre-launch acceleration parameters to provide liquid-propellant rocket sustainer engine launch in microgravity. AIP Conference Proceedings. XLIII Academic Space Conference: Dedicated to the Memory of Academician S.P. Korolev and Other Outstanding Russian Scientists — Pioneers of Space Exploration, 2019, p. 130008.
- [21] Sedov L.I. *Metody podobiya i razmernosti v mekhanike* [Methods of similarity and dimension in mechanics]. Moscow: Nauka, 1977, 440 p.
- [22] Labuntsov D.A., Yagov V.V. *Mekhanika dvukhfaznykh sistem* [Mechanics of two-phase systems]. Moscow: MEI Publishing House, 2000, pp. 143–146.

Authors' information

Korol'kov Anatoliy Vladimirovich  — Dr. Sci. (Phis.-Math.), Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), an_korolkov@mail.ru

Sapozhnikov Vladimir Borisovich — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the BMSTU, sapojnikov47@mail.ru

Received 22.12.2021.

Approved after review 28.01.2022.

Accepted for publication 04.04.2022.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article
The authors declare that there is no conflict of interest