

**Расчет минимального запаса топлива, находящегося
в контакте с внутрибаковым устройством,
для обеспечения работы жидкостного
ракетного двигателя в условиях невесомости**

© В.Б. Сапожников¹, А.Р. Полянский¹, А.В. Корольков²

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

²МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Мытищи, 141005, Россия

Представлены результаты теоретических исследований процесса осаждения жидкого топлива в баках жидкостных ракетных двигательных установок в условиях свободного (невозмущенного) орбитального (суборбитального) полета под действием малой предпусковой перегрузки, создаваемой вспомогательными двигателями перед запуском маршевого жидкостного ракетного двигателя. Выполнены оценка времени релаксации свободного объема жидкости (для максимально неблагоприятного случая) и оценка минимального запаса связанного объема для гарантированного запуска и бесперебойной работы жидкостного ракетного двигателя в условиях невесомости. Исследована возможность управления временем релаксации при постепенном или ступенчатом выходе двигателя на режим. Применение предложенной формулы позволяет на этапе проектирования проводить оценку минимального запаса топлива, которое может находиться в контакте с внутрибаковым устройством перед запуском маршевого жидкостного ракетного двигателя в условиях невесомости, для того чтобы обеспечивать бесперебойную работу двигательной установки.

Ключевые слова: жидкостной ракетный двигатель, двигательная установка, топливный бак, невесомость, перегрузка, осаждение топлива

Введение. Процессы запуска и выхода на режим жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) изучают и теоретически, и экспериментально [1–3]. Поведение жидкого топлива и газа наддува в топливных баках летательных аппаратов (ЛА) в условиях свободного (невозмущенного) орбитального (суборбитального) полета определяет нормальное функционирование ЖРД. Для ЛА, 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.

Один из способов, обеспечивающих такую непрерывность, заключается в осаждении топлива к заборному устройству (расходной магистрали) бака и сепарации газовых включений под действием предпускового ускорения (предпусковой перегрузки), создаваемого вспомогательными ракетными двигателями малой тяги непосред-

ственно перед заполнением расходных магистралей для запуска маршевого двигателя [4–8].

Для того чтобы обеспечить бесперебойную подачу жидкого топлива в запущенную в условиях невесомости двигательную установку (ДУ) в начальный период ее работы, используют различные внутрибаковые устройства (ВБУ). Фазоразделительное устройство (ФУ) отделяет фазоразделительной сеткой часть объема бака на входе в расходную магистраль для предотвращения попадания в нее газовой фазы [9–14]. В основном объеме бака расположены транспортные желоба, секторные капиллярные элементы и другие приспособления, обеспечивающие непрерывный контакт определенного объема жидкости, связанного капиллярными силами с ФУ.

Под действием создаваемого двигателем ускорения свободный объем жидкости, в какой бы части бака он ни находился, перемещается в направлении ФУ и через определенное время (время релаксации) входит с ним в контакт. До этого момента сплошность потока жидкости в ДУ обеспечивается объемом жидкости, связанным внутрибаковыми капиллярными устройствами.

Ниже представлены оценка времени релаксации свободного объема жидкости (для максимально неблагоприятного случая) и оценка минимального запаса связанного объема для гарантированного запуска и работы двигателя в условиях невесомости. Рассматривается также возможность управления временем релаксации путем постепенного или ступенчатого выхода двигателя на режим.

Оценка времени релаксации. В условиях невесомости малые объемы свободной жидкости, т. е. не связанной с ВБУ, могут оказаться в момент запуска двигателя в неустойчивом равновесии, например в виде свободно плавающей во внутрибаковом пространстве шарообразной капли. Случайное (или вызванное включением двигателя) касание капли боковых стенок бака или какого-нибудь внутрибакового капиллярного устройства практически мгновенно приводит объем жидкости в рабочее состояние под действием капиллярных сил.

Наихудшая в момент запуска ДУ ситуация, с точки зрения обеспечения сплошности потока жидкости на входе в расходную магистраль, возникает тогда, когда жидкость находится в верхней (относительно оси OX) части емкости (рис. 1, *a*). При возникновении положительного ускорения основной объем жидкости должен выйти из положения неустойчивого равновесия и занять рабочее положение — войти в контакт с ФУ. На это потребуются определенное время — время релаксации, которое должно быть много меньше времени работы двигателя на объемах V^* окислителя и горючего, связанного с ФУ внутрибаковыми устройствами (см. рис. 1, *a*). Если отсутствует начальное отклонение поверхности контакта основного объема жидкости от со-

стояния неустойчивого равновесия (это наиболее неблагоприятное обстоятельство, увеличивающее время релаксации), для оценки времени релаксации можно использовать критерий неустойчивости Релея — Тейлора [15]. Критическое волновое число K , ответственное за возникновение движения жидкости после запуска двигателя, зависит от сил плавучести, определяемых возникшим положительным ускорением g и поверхностным натяжением:

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

Здесь ρ_1 — плотность жидкости; ρ_2 — плотность газа.

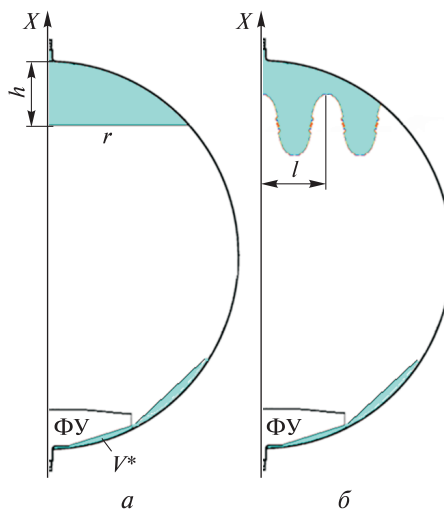


Рис. 1. Варианты расположения жидкого топлива в баке перед запуском маршевого двигателя:

a — «наихудшее» расположение свободного объема жидкости;
б — формирование характерной для неустойчивости Релея — Тейлора структуры жидкости

Плотностью газа, которая существенно меньше плотности жидкости, можно пренебречь. Считаем, что число Атвуда $A = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} \approx 1$, поэтому

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

Например, при использовании одного из компонентов топлива в двигательной установке со сферическим баком радиусом $R_b = 0,36$ м для космического аппарата (КА) при $g = 0,098$ м/с² критическое волновое число $K = 56$ м⁻¹.

Если характерный размер (диаметр) поверхности раздела меньше критической длины волны $l = 2\pi/K$, то жидкость останется неподвижной. Так, для упомянутого выше сферического бака $l = 0,11$ м. Однако если диаметр поверхности больше критической длины волны, то возникает ускоренное движение жидкости в сторону ФУ, сопровождающееся вытеснением газа с формированием характерной для неустойчивости Релея — Тейлора структуры (см. рис. 1, б).

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

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

где F_s — сила поверхностного натяжения, препятствующая движению жидкости; M — масса жидкости.

Радиусы «пальцев» составляют примерно четверть критической длины волны:

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

Если S — площадь поверхности раздела сред, то число пальцев можно оценить, как

$$K_s = \frac{S/2}{\pi r^2}.$$

На «пальцах» искривленной поверхности жидкости действует давление Лапласа $P = 2\sigma/r$, откуда $F_s = P\pi r^2 K_s = S\sigma/r$.

Выражение для ускорения приобретает вид

$$a = g - \frac{\sigma S}{V\rho r},$$

где S — начальная площадь раздела сред; V — свободный объем жидкости; значение $\frac{S}{V}$ зависит лишь от начальной толщины слоя h .

Для оценки времени релаксации в баке сферической формы можно использовать t_r — время прохождения центром масс жидкости расстояния, равного диаметру емкости. Для сферического бака ДУ космического аппарата (КА) «Интергелиозонд»

$$t_r = \sqrt{\frac{4R_b}{a}}. \quad (1)$$

Зависимость времени релаксации t_r от уровня h свободного объема жидкости в сферическом баке для двигателя КА при ускорении $g = 0,098 \text{ м/с}^2$ показана на рис. 2. Это минимальное значение ускорения при работающем двигателе (по циклограмме полета). Объемный расход жидкостей при работе двигателя составляет $0,000034 \text{ м}^3/\text{с}$ из каждого бака.

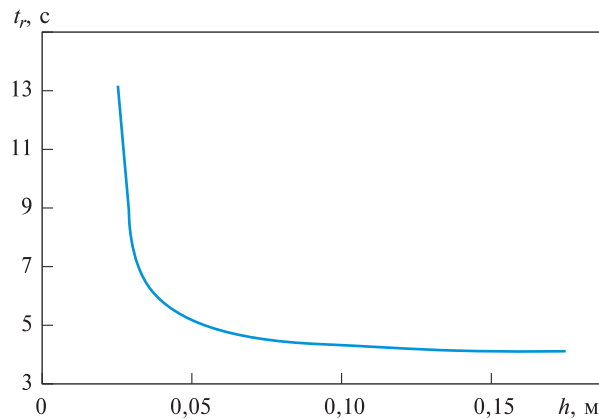


Рис. 2. Зависимость времени релаксации t_r от уровня h начального свободного объема жидкости в сферическом баке для двигательной установки КА при ускорении $0,098 \text{ м/с}^2$

Внутрибаковые капиллярные элементы аппарата «Интергелиозонд» удерживают в контакте с ФУ жидкость объемом $0,002745 \text{ м}^3$, что обеспечивает бесперебойную работу двигателя в течение более 20 с.

Формула (1) позволяет оценить минимальный объем запаса топлива, находящегося в контакте с ВБУ, для обеспечения работы ЖРД в условиях невесомости:

$$V_{\text{зап}} = qt_r.$$

Здесь q — объемный расход топлива, $\text{м}^3/\text{с}$.

Можно добиться экономии топлива, запасенного для обеспечения штатной работы двигателя в невесомости, путем изменения режима запуска двигателя. Создаваемое двигателем ускорение пропорционально расходу топлива:

$$g(t) = Dq(t).$$

Зависимость расстояния, пройденного свободным объемом жидкости, от времени определяется выражением

$$x(t) = \int_0^t \left(\int_0^u g(v) dv \right) du.$$

При этом расход топлива

$$Q(t) = D \int_0^t g(t) dt.$$

Для сравнения трех вариантов режима запуска двигателя на рис. 3 приведена зависимость создаваемого двигателем ускорения g от времени пуска.

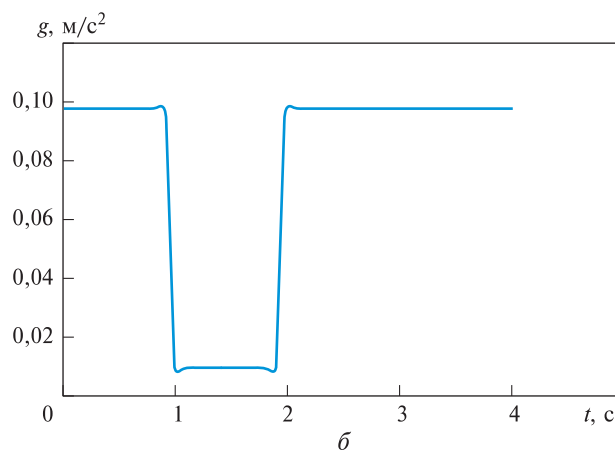
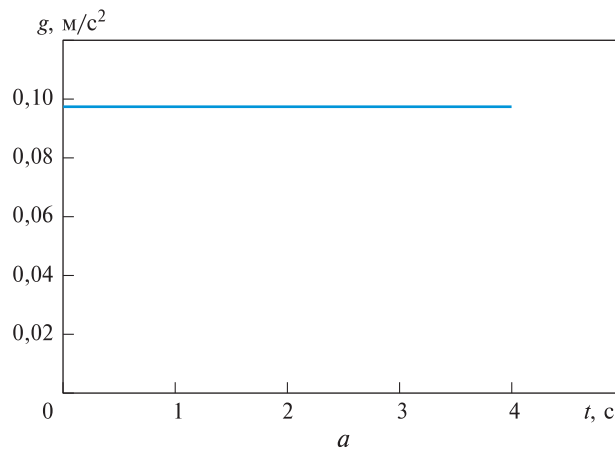


Рис. 3 (начало). Зависимость создаваемого двигателем ускорения g от времени пуска t при режиме 1 с постоянной тягой (а), при режиме 2 со снижением тяги на 1 с (б)

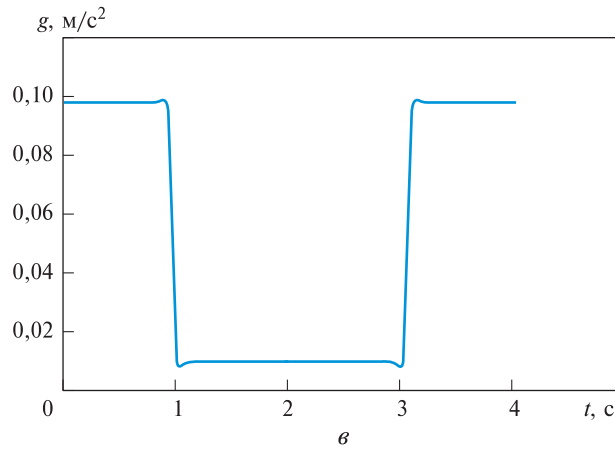


Рис. 3 (окончание). Зависимость создаваемого двигателем ускорения g от времени пуска t при режиме 3 со снижением тяги на 2 с (ϑ)

Кривые зависимости величины смещения свободного объема жидкости в сторону ФУ от расхода (в относительных величинах) при работе двигателя в течение 4 с при трех режимах запуска (см. рис. 3) показаны на рис. 4. На графике видно, что экватор сферического бака ($x = 0,36$ м — красная линия) достигнут при режиме 3 с наименьшей затратой топлива.

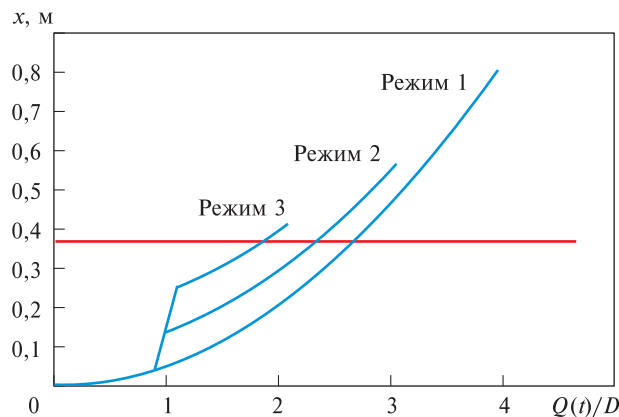


Рис. 4. Зависимость величины смещения свободного объема жидкости в сторону ФУ от расхода (в относительных величинах)

Заключение. В результате выполненного исследования предложена формула, позволяющая на этапе проектирования оценить минимальный запас топлива, которое должно находиться в контакте с внутрибаковыми устройствами перед запуском маршевого ЖРД в условиях невесомости для обеспечения бесперебойной работы двигателя.

Показано, каким образом можно добиться экономии запаса топлива, необходимого для обеспечения штатной работы двигателя в невесомости, путем изменения режимов работы маршевого ЖРД и двигателей предпусковой перегрузки.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Андреев Е.А., Новиков А.В., Шацкий О.Е. Расчетное и экспериментальное исследование надежности запуска и выхода на режим ракетного двигателя малой тяги на газообразных компонентах кислород + метан с электроискровым зажиганием. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 4. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-4-1606
- [2] Новиков А.В., Сухов А.В., Андреев Е.А. Экспериментальное исследование гидродинамических процессов в топливных баках с капиллярными системами отбора жидкости. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 1. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-1-1576
- [3] Новиков А.В., Ягодников Д.А., Лоханов И.В. и др. Материальное и методическое обеспечение исследования гидродинамических процессов в топливных баках с капиллярными системами отбора криогенных компонентов. *Вестник НПО имени С.А. Лавочкина*, 2017, № 35/1, с. 36–42.
- [4] Корольков А.В., Сапожников В.Б. Имитационная модель изменения формы газового пузыря в жидкости в условиях реального космического полета. *Вестник Московского государственного университета леса — Лесной вестник: Московский государственный университет леса (Мытищи)*, 2005, № 4, с. 51–52.
- [5] 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): Abstracts*. Moscow, BMSTU Publ., 2014, pp. 80–81.
- [6] 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.
- [7] Калинин Э.К., Невровский В.А. К оценке времени осаждения жидкости в баке под действием малой перегрузки. *Инж.-физ. журнал*, 1986, т. 50, № 6, с. 930–934.
- [8] Сапожников В.Б., Авраамов Н.И. Условия разрушения газовых полостей в жидкости при переходе от невесомости к кратковременному воздействию одиночных импульсов перегрузки. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 2, с. 1. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-2-1581
- [9] Александров А.А., Хартов В.В., Новиков Ю.М., Крылов В.И., Ягодников Д.А. Современное состояние и перспективы разработки капиллярных топливозаборных устройств из комбинированных пористо-сетчатых материалов для космических аппаратов с длительным сроком активного существования. *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2015, № 6 (105), с. 130–142.
- [10] Большаков В.А., Новиков Ю.М., Партола И.С. Средства обеспечения сплошности жидких компонентов топлива в системе питания РБ «Бриз-М» с дополнительным (сбрасываемым) топливным баком. *XXXIV Научные чтения, посвященные научному наследию и развитию идей К.Э. Циолковского. Сб. докл. РАН, Государственный музей истории космонавтики им. К.Э. Циолковского*. Калуга, 1999, с. 78–86.

- [11] Корольков А.В., Партола И.С., Сапожников В.Б. Теоретические основы разработки и экспериментальной отработки капиллярных заборных устройств с минимальными остатками топлива. *Научно-технические разработки ОКБ-23 — КБ «Салют»*. Москва, Воздушный транспорт, 2006, с. 313–319.
- [12] Корольков А.В., Меньшиков В.А., Партола И.С., Сапожников В.Б. Математическая модель капиллярного заборного устройства торового бака. *Вестник Московского государственного университета леса — Лесной вестник*, 2007, № 2, с. 35–39.
- [13] Новиков Ю.М., Большаков В.А. Инженерная школа МГТУ им. Н.Э. Баумана: Комбинированные пористые сетчатые металлы. *Эффективные, безопасные и экологичные изделия на их основе. Безопасность жизнедеятельности*, 2005, № 11, с. 53–56.
- [14] Новиков Ю.М., Большаков В.А. Первые итоги реализации концепции создания высоконадежных фильтров из КПСМ для объектов повышенной опасности и других объектов различных отраслей экономики РФ. *Безопасность жизнедеятельности*, 2002, № 12, с. 7–10.
- [15] Лабунцов Д.А., Ягов В.В. Механика двухфазных систем. Москва, Изд-во МЭИ, 2000, с. 143–146.

Статья поступила в редакцию 24.02.2021

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

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, вып. 3.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-3-2063>

Сапожников Владимир Борисович — д-р техн. наук, профессор кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: газогидродинамика при течении жидкостей в газах в структурно-сложных средах. Автор порядка 120 научных публикаций. e-mail: sapojnikov@bmstu.ru

Полянский Александр Ромилович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: гидрогазодинамика течений в энергетических установках. Автор около 90 научных публикаций. e-mail: polyanskiy@bmstu.ru

Корольков Анатолий Владимирович — д-р физ.-мат. наук, профессор Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: гидрогазодинамика при течении жидкостей и газов в структурно-сложных средах. Автор около 100 научных публикаций. e-mail: an_korolkov@mail.ru

Calculation of minimum supply of fuel in contact with the inert tank device to ensure the operation of a liquid-propellant rocket engine in zero gravity

© V.B. Sapozhnikov¹, A.R. Polyanskiy¹, A.V. Korolkov²

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

²Mytishchi branch of Bauman Moscow State Technical University,
Moscow, 105005, Russia

The paper introduces the results of theoretical studies of the process of liquid fuel deposition in liquid-propellant rocket engine tanks under conditions of free (undisturbed) orbital (suborbital) flight under the influence of a small pre-launch overload created by auxiliary engines before the liquid-propellant sustainer starting. In this work, we estimated the relaxation time of the free volume of liquid for the most unfavorable case, and the minimum supply of the covolume for the guaranteed starting and uninterrupted operation of the liquid-propellant rocket engine in zero gravity. Furthermore, we investigated the possibility of controlling the relaxation time with a gradual or stepwise starting operation. The proposed formula makes it possible at the design stage to assess the minimum supply of fuel, which can be in contact with the inert tank device before starting the liquid-propellant sustainer in zero gravity in order to ensure the uninterrupted operation of the propulsion system.

Keywords: liquid-propellant rocket engine, fuel tank, weightlessness, overload, fuel deposition

REFERENCES

- [1] Andreev E.A., Novikov A.V., Shatskiy O.E. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2017, iss. 4 (64). DOI: 10.18698/2308-6033-2017-4-1606
- [2] Novikov A.V., Sukhov A.V., Andreev E.A. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2017, iss. 1. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-1-1576
- [3] Novikov A.V., Yagodnikov D.A., Lokhanov I.V., et al. *Vestnik NPO imeni S.A. Lavochkina (Bulletin of Lavochkin Association)*, 2017, no. 35/1, pp. 36–42.
- [4] Korolkov A.V., Sapozhnikov V.B. *Lesnoy vestnik — Forestry Bulletin*, 2005, no. 4, pp. 51–52.
- [5] 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): abstracts*. Moscow, BMSTU Publ., 2014, pp. 80–81.
- [6] 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.
- [7] Kalinin E.K., Nevrovskiy V.A. *Inzhenerno-fizichesky zhurnal — Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1986, vol. 50, no. 6, pp. 930–934.
- [8] Sapozhnikov V.B., Avraamov N.I. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2017, no. 2 (62), p. 1. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-2-1581
- [9] Aleksandrov A.A., Khartov V.V., Novikov Yu.M., Krylov V.I., Yagodnikov D.A. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*

- im. N.E. Bauman. Ser. Mashinostroenie — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2015, 6 (105), pp. 130–142.
- [10] Bolshakov V.A., Novikov Yu.M., Partola I.S. Sredstva obespecheniya sploshnosti zhidkikh komponentov topliva v sisteme pitaniya RB «Briz-M» s dopolnitelnym (sbrasyvaemym) toplivnym bakom [Means to ensure the continuity of liquid fuel components in the power supply system of the RB “Breeze-M” with an additional (drop) fuel tank]. *XXXIV Nauchnye chteniya, posvyaschennye nauchnomu naslediyu i razvitiyu idey K.E. Tsiolkovskogo. Sb. dokl. RAN, Gosudarstvenny muzey istorii kosmonavтики im. K.E. Tsiolkovskogo* [XXXIV Scientific readings dedicated to the scientific heritage and the development of the ideas of K.E. Tsiolkovsky. Collection of reports of the Russian Academy of Sciences, State Museum of the History of Cosmonautics]. Kaluga, 1999, pp. 78–86.
- [11] Korolkov A.V., Partola I.S., Sapozhnikov V.B. Teoreticheskie osnovy razrabotki i eksperimentalnoy otrabotki kapilliarnykh zabornykh ustroystv s minimalnymi ostatkami topliva [Theoretical foundations for the development and experimental testing of capillary intake devices with minimal fuel residues]. *Nauchno-tekhnicheskie razrabotki OKB-23 – KB «Salyut»* [Scientific and technical developments of OKB-23 - Design Bureau “Salyut”]. Moscow, Vozdushny transport Publ., 2006, pp. 313–319.
- [12] Korolkov A.V., Menshikov V.A., Partola I.S., Sapozhnikov V.B. *Lesnoy vestnik — Forestry Bulletin*, 2007, no. 2, pp. 35–39.
- [13] Novikov Yu.M., Bolshakov V.A. *Bezopasnost zhiznedeyatelnosti — Life safety*, 2005, no. 11, pp. 53–56.
- [14] Novikov Yu.M., Bolshakov V.A. *Bezopasnost zhiznedeyatelnosti — Life safety*, 2002, no. 12, pp. 7–10.
- [15] Labuntsov D.A., Yagov V.V. *Mekhanika dvukhfaznykh system* [Mechanics of two-phase systems.]. Moscow, MPEI Publ., 2000, pp. 143–146.

Sapozhnikov V.B., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Rocket Engines, Bauman Moscow State Technical University. Research interests: gas hydrodynamics for the flow of liquids in gases in structurally complex media. Author of 120 research papers.
e-mail: sapojnikov@bmstu.ru

Polyansky A.R., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Rocket Engines, Bauman Moscow State Technical University. Research interests: fluid dynamics of flows in power plants; author of about 90 research papers. e-mail: polyanskiy@bmstu.ru

Korolkov A.V., Dr. Sc. (Phys.-Math.), Professor, Mytishi branch of Bauman Moscow State Technical University. Research interests: fluid dynamics in the flow of liquids and gases in structurally complex media; author of about 100 research papers.
e-mail: an_korolkov@mail.ru