

## ОЦЕНКА ОБЪЕМА ЖИДКОСТИ В ТЕЛЕСНЫХ УГЛАХ ТРАНСПОРТНЫХ ЖЕЛОБОВ ТОПЛИВНОГО БАКА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

А.В. Корольков<sup>1</sup>, Л.В. Королькова<sup>1</sup>, В.Б. Сапожников<sup>2</sup>, Маслов В.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 141005, Московская область, г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

<sup>2</sup>НТВЦ «ЭДУКОН», 107005, Москва, Лефортовская наб., д. 1

korolkov@mgul.ac.ru

Транспортный желоб как внутрибаковая конструкция предназначен для удержания и подвода жидкости к заборному устройству топливного бака двигательной установки космического аппарата. Транспортный желоб представляет собой телесный угол, удерживающий жидкость за счет капиллярных сил. Построена математическая модель работы транспортного желоба. Варьировались величина телесного угла и величина остаточного ускорения на борту космического аппарата. Сделана оценка объема жидкости, удерживаемого в телесном угле транспортного желоба. Полученная оценка позволяет убедиться в обоснованности выбранных инженерных решений при конструировании топливного бака. Внутрибаковая конструкция обеспечивает непрерывную подачу жидкого топлива в двигательную установку в самых напряженных режимах полета космического аппарата и подтверждает выводы о надежной работоспособности системы в целом.

**Ключевые слова:** внутрибаковая конструкция капиллярного типа, транспортный желоб, жидкое топливо, двигательная установка, запуск двигателя, условия невесомости, капиллярные силы, математическая модель, работоспособность системы подачи жидкого топлива в двигательную установку

**Ссылка для цитирования:** Корольков А.В., Королькова Л.В., Сапожников В.Б., Маслов В.А. Оценка объема жидкости в телесных углах транспортных желобов топливного бака космического аппарата // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2018. Т. 22. № 2. С. 120–124. DOI: 10.18698/2542-1468-2018-2-120-124

При проектировании сложных технических систем к решению современных инженерных задач предъявляются повышенные требования, такие как точность получаемых результатов, обоснованность принятых допущений и применяемых методов решения, простота и технологичность изготовления отдельных узлов и устройств. Инженерная работа стала значительно более наукоемкой. В связи с этим все чаще в технических заданиях на выполнение сложных инженерных работ отдельным пунктом указывается необходимость апробации полученных результатов. В настоящей работе представлены к обсуждению результаты оценки эффективности использования одной из внутрибаковых конструкций, обеспечивающих непрерывную подачу жидкого топлива в двигательную установку космического аппарата в условиях, близких к невесомости.

### Цель работы

При запуске двигательной установки космического аппарата в условиях, близких к невесомости, необходимо обеспечить непрерывность потока жидкого топлива в заборное устройство топливного бака [1]. Для решения этой задачи используют различные внутрибаковые устройства капиллярного типа [2]. Показателем эффективности таких устройств можно считать объем жидкого топлива, гарантированно доставляемый в заборное устройство [3, 4].

Транспортные желоба [5–7] представляют собой пластины, прикрепленные под некоторым углом  $\alpha$  к демпфирующим перегородкам (рис. 1). Они в условиях невесомости удерживают жидкость в образовавшемся телесном угле за счет капиллярных сил.

На рис. 2 показаны возможные положения жидкости в сечениях зазоров, образованных телесными углами транспортного желоба, демпфирующей перегородкой и стенкой бака.

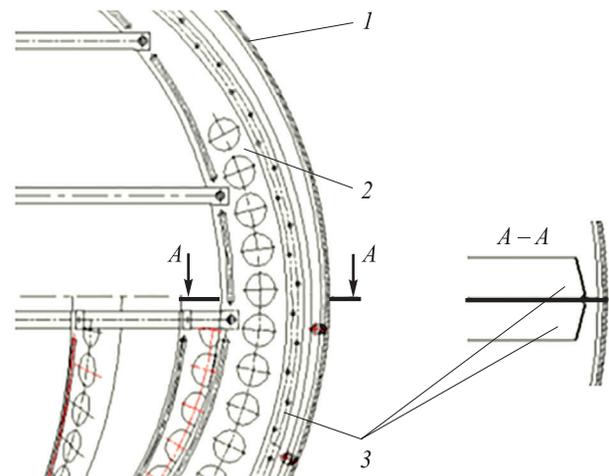


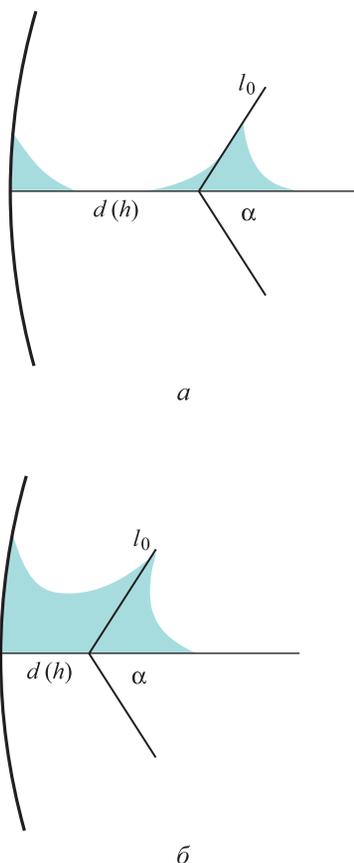
Рис. 1. Положение транспортных желобов в топливном баке: 1 — стенка бака, 2 — демпфирующая перегородка, 3 — транспортные желоба

Fig. 1. Position of the transport channels in the fuel tank: 1 — tank wall, 2 — dampening partition, 3 — transport chutes

### Материалы и методы

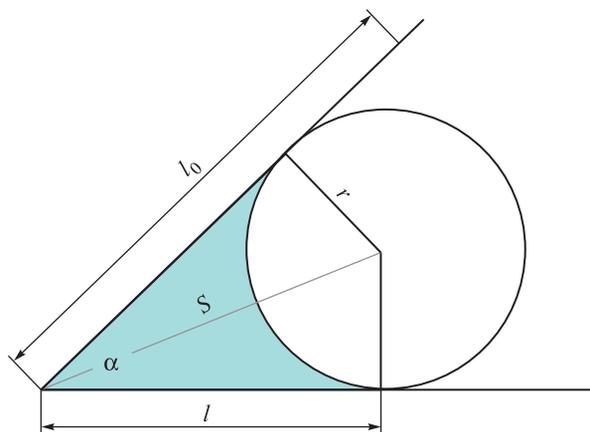
Считаем, что угол смачивания жидкостью материала, из которого изготовлены транспортные желоба, равен нулю (идеальное смачивание). В каждом горизонтальном сечении кривизна раздела сред между жидкостью и газом в верхней части бака определяется давлением столба жидкости (рис. 2, а). Чем ниже уровень сечения, тем заполнение углубления желоба и пространства между желобом и стенкой бака больше, и на уровне  $H_0$  углубление желоба заполнено полностью. В нижней части бака (при  $h < H_0$ ) жидкость заполняет углубление желоба и пространство между желобом и стенкой бака полностью, и площадь сечения столба жидкости в телесном угле определяется размерами желоба (рис. 2, б).

Рассмотрим сечение столба жидкости в верхней части бака в телесном угле транспортного желоба  $\alpha$  на высоте  $h$  над уровнем жидкости в баке при ускорении  $g$  (рис. 3).



**Рис. 2.** Возможное положение жидкости в телесных углах транспортного желоба и в пространстве между желобом и стенкой бака: в верхней части бака (а); в нижней части бака (б)

**Fig. 2.** Possible position of liquid in the solid corners of the transport chute and in the space between the chute and the tank wall: in the upper part of the tank (a); in the lower part of the tank (b)



**Рис. 3.** Горизонтальное сечение столба жидкости в вертикальном телесном угле  $\alpha$  транспортного желоба на высоте  $h$  над уровнем жидкости в баке при ускорении  $g$  (верхняя часть бака)

**Fig. 3.** The horizontal cross-section of the liquid column in the vertical solid angle  $\alpha$  of the transport chute at a height  $h$  above the liquid level in the tank at acceleration  $g$  (the upper part of the tank)

Радиус  $r$  поверхности жидкости определяет капиллярную силу, удерживающую жидкость на высоте  $h$ :

$$\rho gh = \frac{\sigma}{r(h)}.$$

Длина зоны смачивания

$$l(h) = \frac{r(h)}{\text{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)}.$$

Площадь сечения столба жидкости

$$S(h) = r(h)l(h) - \frac{(\pi - \alpha)r(h)^2}{2}.$$

Объем жидкости в столбе высотой  $H$

$$V = S(H_0)H_0 + \int_{H_0}^H S(h)dh.$$

$H_0$  определяется из условия

$$\rho g H_0 = \frac{\sigma}{\text{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)l_0}$$

(до высоты  $H_0$  заполнение телесного угла жидкостью постоянно и определяется глубиной  $l_0$  телесного угла).

После подстановки и выполнения интегрирования получаем формулу для определения объема жидкости, удерживаемого капиллярными силами в телесном угле высотой  $H$ :

$$V = S(H_0)H_0 + \left(\frac{1}{H_0} - \frac{1}{H}\right) \left(\frac{\sigma}{\rho g}\right)^2 \left(\frac{1}{\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)} - \frac{\pi - \alpha}{2}\right),$$

где

$$H_0 = \frac{\sigma}{\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) l_0 \rho g};$$

$$S(H_0) = l_0^2 \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) \left(1 - \frac{\pi - \alpha}{2} \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right).$$

### Результаты и обсуждение

Максимальная площадь  $S(H_0)$  сечения столба жидкости зависит от величины телесного угла  $\alpha$  (рис. 4). Максимальная площадь, а значит, и максимальный объем жидкости в зазоре достигается при угле примерно  $65^\circ$ .

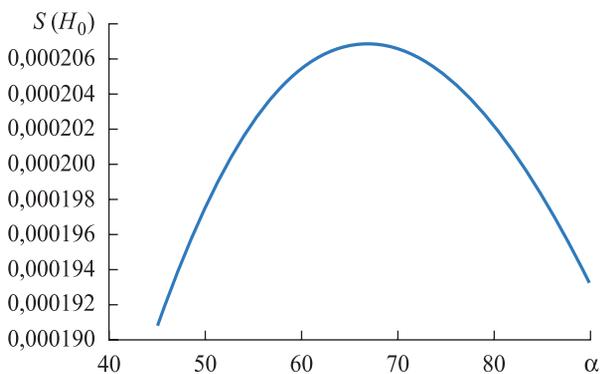


Рис. 4. Зависимость площади  $S(H_0)$  горизонтального сечения столба жидкости от величины телесного угла  $\alpha$   
 Fig. 4. Dependence of the area  $S(H_0)$  of the horizontal section of the liquid column on the value of the solid angle  $\alpha$

Столб жидкости в транспортном желобе непосредственно контактирует с фазоразделительным устройством (ФУ), что гарантирует непрерывное поступление объема  $V$  жидкости в заборное устройство при любой гравитационной обстановке. Наиболее напряженная ситуация возникает при отборе остатков топлива из бака, поэтому величину  $H$  можно считать равной расстоянию от верхней крышки ФУ до верхней стенки бака.

На рис. 5, 6 показана зависимость объема жидкости в канале транспортного желоба от величины остаточного ускорения при различных значениях угла  $\alpha$  ( $H = 0,65$ ;  $l_0 = 0,03$ ; жидкость — окислитель).

В полной невесомости транспортный желоб заполнен жидкостью полностью ( $H = H_0 = 0,65$ ):  $V = S(H_0)H_0$ .

На рис. 7 показана зависимость объема жидкости в телесном угле транспортного желоба от величины угла в условиях полной невесомости.

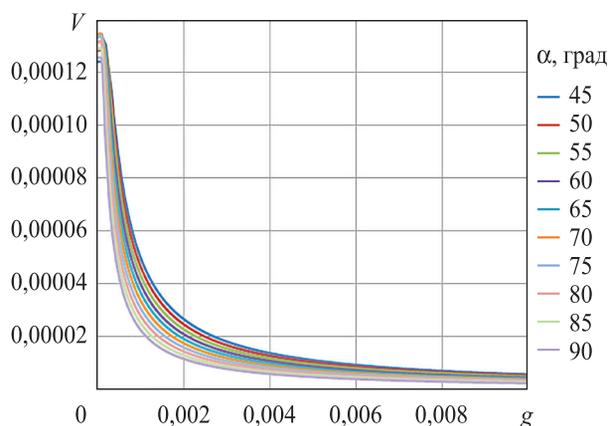


Рис. 5. Зависимость объема жидкости в одном канале транспортного желоба от ускорения при различных значениях угла  $\alpha$  ( $l_0 = 0,03$ ; жидкость — окислитель)  
 Fig. 5. Dependence of the fluid volume in one channel of the transport chute on acceleration for different values of the angle  $\alpha$  ( $l_0 = 0,03$ , liquid — oxidant)

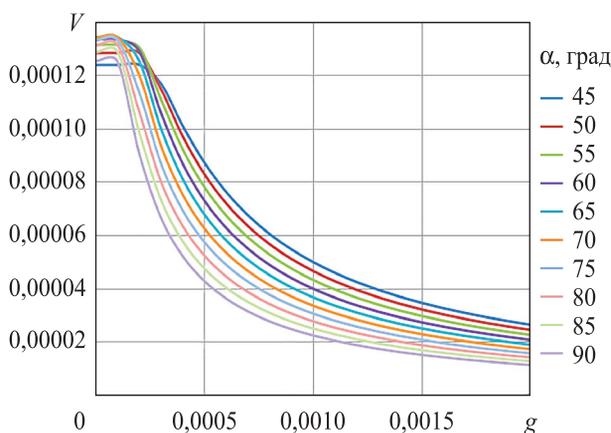


Рис. 6. Деталь рис. 5  
 Fig. 6. The detail of Fig. 5

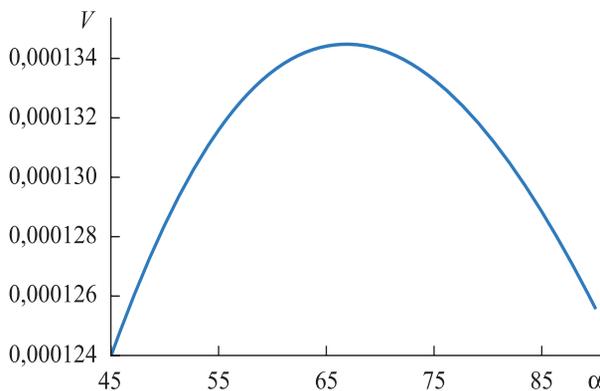


Рис. 7. Зависимость объема жидкости в телесном угле транспортного желоба от величины угла в условиях полной невесомости  
 Fig. 7. Dependence of the volume of liquid in the solid angle of the transport chute on the magnitude of the angle under conditions of total weightlessness

## Выводы

Сделанная оценка объема жидкости в транспортном желобе топливного бака космического аппарата позволяет убедиться в обоснованности выбранных инженерных решений, обеспечивающих непрерывную подачу жидкого топлива в двигательную установку в самых напряженных режимах полета космического аппарата и подтверждает выводы о надежной работоспособности системы в целом.

## Список литературы

- [1] 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 МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение, 2015. № 6 (105). С. 130–142.
- [2] 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 // Сб. докл. РАН: XXXIV Науч. чтения, посв. науч. наследию и развитию идей К.Э. Циолковского. Гос. музей истории космонавтики им. К.Э. Циолковского, 1999. URL: <http://readings.gmik.ru/>.
- [3] Корольков А.В., Партола И.С., Сапожников В.Б. Теоретические основы разработки и экспериментальной отработки капиллярных заборных устройств с минимальными остатками топлива // Науч.-техн. разработки ОКБ-23 — КБ «Салют» / под ред. Ю.О. Бахвалова. М.: Воздушный транспорт, 2006. С. 313–319.
- [4] Корольков А.В., Меньшиков В.А., Партола И.С., Сапожников В.Б. Математическая модель капиллярного заборного устройства торового бака // Вестник МГУЛ — Лесной вестник, 2007. № 2. С. 35–39.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Poleshuk.M., Komarov E.G. Multiple hybrid regression for fuzzy observed data // Annual Conference of the North American Fuzzy Information Processing Society – NAFIPS'2008 New York, May 19–22, 2008. New York: Rockefeller University. p. 4531224.

## Сведения об авторах

**Корольков Анатолий Владимирович** — д-р физ.-мат. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), [korolkov@mngul.ac.ru](mailto:korolkov@mngul.ac.ru)

**Королькова Любовь Варламовна** — старший преподаватель МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), [korolkov@mngul.ac.ru](mailto:korolkov@mngul.ac.ru)

**Сапожников Владимир Борисович** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана, генеральный директор ООО НТВЦ «ЭДУКОН», [edukon@yandex.ru](mailto:edukon@yandex.ru)

**Маслов Владимир Анатольевич** — канд. тех. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), [korolkov@mngul.ac.ru](mailto:korolkov@mngul.ac.ru)

Принята к публикации 18.12.2017.

Поступила в редакцию 22.02.2018.

## ESTIMATION OF THE VOLUME OF FLUID IN THE SOLID ANGLES OF THE TRANSPORT CHUTES OF THE FUEL TANK OF A SPACECRAFT

A.V. Korol'kov<sup>1</sup>, L.V. Korol'kova<sup>1</sup>, V.B. Sapozhnikov<sup>2</sup>, V.A. Maslov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>BMSTU (Mytishchi branch), 1st. Institutskaya st., Mytishchi, Moscow reg., 141005, Russia

<sup>2</sup>«EDUKON», 1, Lefortovskaya nab., Moscow, 107005, Russia

korolkov@mgul.ac.ru

Transport chute as intratank structure suitable for holding and supplying fluid to the intake device of the fuel tank of the propulsion system of the spacecraft. The transport chute is a solid angle that holds the liquid due to capillary forces. The mathematical model of the transport chute is constructed. The magnitude of the solid angle and the amount of residual accelerations on Board the spacecraft varies. The volume of liquid held in a solid angle of the transport chute is estimated. The resulting score helps to substantiate the selected engineering solutions in the construction of the fuel tank. The intratank structure provides a continuous supply of liquid fuel propulsion system in the most strenuous flight conditions of the spacecraft and confirms the conclusions about the reliable operability of the system as a whole.

**Keywords:** Intratank capillary type device, transport chute, liquid fuel, engine system, start the engine, the conditions of zero gravity, capillary forces, mathematical model, the performance of the system liquid fuel supply in the engine system

**Suggested citation:** Korol'kov A.V., Korol'kova L.V., Sapozhnikov V.B., Maslov V.A. *Otsenka ob'ema zhidkosti v telesnykh uglakh transportnykh zhelobov toplivnogo baka kosmicheskogo apparata* [Estimation of the volume of fluid in the solid angles of the transport chutes of the fuel tank of a spacecraft]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2018, vol. 22, no. 2, pp. 120–124. DOI: 10.18698/2542-1468-2018-2-120-124

### References

- [1] Aleksandrov A.A., Khartov V.V., Novikov Yu.M., Krylov V.I., Yagodnikov D.A. *Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razrabotki kapillyarnykh toplivozabornykh ustroystv iz kombinirovannykh poristo-setchatykh materialov dlya kosmicheskikh apparatov s dlitel'nyim srokom aktivnogo sushchestvovaniya* [Current state and prospects for the development of capillary fuel-collecting devices from combined porous-mesh materials for space vehicles with a long period of active existence]. Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building, 2015, no. 6 (105), pp. 130–142.
- [2] Bol'shakov V.A., Novikov Yu.M., Partola I.S. *Sredstva obespecheniya sploshnosti zhidkikh komponentov topliva v sisteme pitaniya RB «Briz-M» s dopolnitel'nyim (sbrasyvaemym) toplivnym bakom* [Means for ensuring the continuity of liquid fuel components in the power supply system of the Republic of Belarus «Briz-M» with an additional (resettable) fuel tank]. Collected Papers RAS: XXXIV Scientific readings devoted to the scientific heritage and development of ideas by K.E. Tsiolkovsky. Kaluga: State Museum of the History of Cosmonautics named after K.E. Tsiolkovsky, 1999. Available at: <http://readings.gmik.ru/>
- [3] Korol'kov A.V., Partola I.S., Sapozhnikov V.B. *Teoreticheskie osnovy razrabotki i eksperimental'noy otrabotki kapillyarnykh zabornykh ustroystv s minimal'nymi ostatkami topliva* [Theoretical bases of development and experimental development of capillary sampling devices with minimal fuel residues]. Scientific and technical developments OKB-23 – KB «Salyut». Ed. Yu.O. Bakhvalov. Moscow: Vozdushnyy transport [Air Transport Publ.], 2006, pp. 313–319.
- [4] Korol'kov A.V., Men'shikov V.A., Partola I.S., Sapozhnikov V.B. *Matematicheskaya model' kapillyarnogo zabornogo ustroystva torovogo baka* [Mathematical model of the capillary sampling device of the torus tank]. *Moscow State Forest University Bulletin* — *Lesnoy vestnik*, 2007, no. 2, pp. 35–39.
- [5] Novikov Yu.M., Bol'shakov V.A. *Inzhenernaya shkola MGTU im. N.E. Baumana: kombinirovannye poristye setchatye metally. Effektivnye, bezopasnye i ekologichnye izdeliya na ikh osnove* [Engineering School of BMSTU: Combined porous mesh metals. Effective, safe and eco-friendly products on their basis]. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* [Vital safety], 2005, no. 11, pp. 53–56.
- [6] Novikov Yu.M., Bol'shakov V.A. *Pervye itogi realizatsii kontseptsii sozdaniya vysokonadezhnykh fil'trov iz KPSM dlya ob'ektov povyshennoy opasnosti i drugikh ob'ektov razlichnykh otrasley ekonomiki RF* [The first results of the implementation of the concept of creating highly reliable filters from KPSM for high-risk facilities and other objects of various industries of the Russian Federation]. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* [Vital safety], 2005, no. 12, pp. 7–10.
- [7] Poleshuk M., Komarov E.G. Multiple hybrid regression for fuzzy observed data. Annual Conference of the North American Fuzzy Information Processing Society – NAFIPS'2008 New York, May 19–22, 2008. New York: Rockefeller University. p. 4531224.

### Authors' information

**Korol'kov Anatoliy Vladimirovich** — Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor of BMSTU (Mytishchi branch), korolkov@mgul.ac.ru

**Korol'kova Lyubov' Varlamovna** — Senior Lecturer of BMSTU (Mytishchi branch), korolkov@mgul.ac.ru

**Sapozhnikov Vladimir Borisovich** — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the Department «Missile Engines» of BMSTU, General Director of «EDUKON», edukon@yandex.ru

**Maslov Vladimir Anatol'evich** — Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Professor of BMSTU (Mytishchi branch), korolkov@mgul.ac.ru

Received 18.12.2017.

Accepted for publication 22.02.2018.