

Научная статья

УДК 629.78

URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=182572>

СТАБИЛИЗАЦИЯ АВТОКОЛЕБАНИЙ ЖИДКОСТИ В БАКЕ ОКИСЛИТЕЛЯ ПУТЕМ ИЗМЕНЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОЛЕБАНИЙ ЖИДКОСТИ В БАКЕ ГОРЮЧЕГО

Екатерина Валерьевна Афонина

Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва,
Королёв, Московская обл., Россия
Saranchenkova.ev@phystech.edu

Аннотация. Представление о движении ракеты с жидкостным ракетным двигателем на активном участке полета как о движении твердого тела является сильно упрощенным, поскольку наличие больших масс жидкого топлива со свободными поверхностями в топливных баках разгонного блока служит причиной возникновения дополнительных сил, оказывающих влияние на динамические свойства ракеты. Это влияние основывается на двух основных факторах: угловое движение ракеты влияет на возмущение жидкости в баках, а движение жидкости в баках вызывает дополнительные инерционные силы и моменты, действующие на ракету. Поэтому необходимо учитывать влияние жидких компонентов топлива в баках разгонного блока на движение ракеты для повышения устойчивости и управляемости ее движения.

Применение коэффициентного критерия фазовой стабилизации показало, что фазовая стабилизация разгонного блока при помощи автомата стабилизации не может быть обеспечена на всём активном участке полёта при выведении полезного груза небольшой массы. Особенно это касается колебаний жидкого наполнения бака окислителя. Математическое моделирование возмущенного движения разгонного блока на активном участке полета также демонстрирует, что при выведении разгонным блоком полезного груза малой массы в начале активного участка в баке окислителя возникают автоколебания жидкости с амплитудами, близкими к амплитуде разрушающей волны.

Предложен способ уменьшения амплитуды колебаний жидкости в баке окислителя при помощи изменения геометрического момента инерции свободной поверхности жидкости бака горючего таким образом, чтобы положение центра масс разгонного блока оказалось выше свободной поверхности жидкости в баке окислителя на максимально возможном участке полета. Такой метод позволяет расширить область применения фазовой стабилизации колебаний жидкости в баках разгонного блока. Применение результатов проведенного исследования позволит повысить точность выведения разгонного блока путем уменьшения влияния его поперечных колебаний, частота которых близка к частоте собственных колебаний жидкости в баках разгонного блока. Предложенный метод позволяет стабилизировать колебания жидкости в баках разгонного блока, не прибегая к изменению начального объема топлива в них.

Ключевые слова: фазовая стабилизация, геометрический момент инерции, гидродинамические параметры колебаний жидкости, свободная поверхность жидкости, зеркало свободной поверхности жидкости

Для цитирования: Афонина Е.В. Стабилизация автоколебаний жидкости в баке окислителя путем изменения гидродинамических параметров колебаний жидкости в баке горючего // Вестник Московского авиационного института. 2024. Т. 31. № 3. С. 178–187. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=182572>

Original article

LIQUID SELF-OSCILLATIONS STABILIZATION IN THE OXIDIZER TANK BY HYDRODYNAMIC PARAMETERS CHANGING OF THE LIQUID OSCILLATIONS IN THE FUEL TANK

Ekaterina V. Afonina

S.P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia,
Korolev, Moscow Region, Russia
Saranchenkova.ev@phystech.edu

Abstract

Movement analysis of a rocket with liquid rocket engine on the active flight segment in the interpretation that the liquid rocket is a solid body is extremely simplified, since the presence of vast masses of liquid fuel with free surfaces in the fuel tanks of the upper stage entails occurrence of the extra forces affecting the rocket dynamic properties. This effect is based on the two main factors, namely the rocket angular motion affects the liquid perturbation in the tanks, and the liquid movement in the tanks causes extra inertial forces and moments acting on the rocket. Thus, accounting for the impact of the liquid fuel components in the upper stage tanks on the rocket movement allows increasing the actuating elements effectiveness.

Application of the phase stabilization coefficient criterion revealed that the head unit phase stabilization by the automatic stabilization machine could not be ensured along the entire active the flight segment when launching a small mass payload. This is especially true for fluctuations in the oxidizer tank liquid filling. Mathematical modeling of the head unit perturbed motion at the active flight segment demonstrates as well that when the upper stage carries a small mass payload at the commence of the active segment self-oscillations of liquid with amplitudes commensurable with the wave-destroying amplitude emerge in the oxidation tank.

The presented article proposes a method for reducing the amplitude of liquid vibrations in the oxidizer tank by changing geometric moment of inertia of the liquid free surface of the fuel tank, so that the center of mass position of the orbital block appears higher than the free surface of the liquid in the oxidizer tank. This can be attained, for example, by the geometric size changing of the fuel tank, since the value in question, i.e. the geometric moment of inertia, depends on the geometry of the object in the first approximation. This method allows expanding the scope of the phase stabilization application of liquid vibrations in the tanks of the upper stage. Application of the results of the conducted study will improve the accuracy of the head unit positioning by reducing the effect of the head unit transverse vibrations with a frequency close to the natural vibrations frequency of the liquid in the tanks of the upper stage. The proposed method allows liquid fluctuations stabilizing in the upper stage tanks without resorting to the initial fuel volume changing in them.

Keywords: phase stabilization, geometric moment of inertia, of liquid oscillations hydrodynamic parameters, free surface of liquid, mirror of free surface of liquid

For citation: Afonina E.V. Liquid Self-Oscillations Stabilization in the Oxidizer Tank by Hydrodynamic Parameters Changing of the Liquid Oscillations in the Fuel Tank. *Aerospace MAI Journal*, 2024, vol. 31, no. 3, pp. 178-187. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=182572>

Введение

Одной из широких областей предназначения автоматического управления является стабилизация некоторой величины [1]. Если говорить об управлении полетом разгонного блока (РБ), задачи, решаемые системой управления, делятся на задачи управления на активных и задачи управления на пассивных участках [2]. В полете на пассивном участке малость возмущающих внешних моментов позволяет применять пассивные способы стабилизации. На активных участках к системам стабили-

зации предъявляются дополнительные требования, связанные с работой систем в условиях больших возмущающих моментов, вызванных тягой маршевого двигателя (МД) [3–5].

Во время работы МД разгонной блок представляется телом переменной массы [3, 4]. Поэтому для математического описания его движения прибегают к методу затвердевания. Таким образом, в произвольный момент времени РБ представляется твердым телом. Но наличие больших масс жидкого наполнения баков затрудняет угловую стабилиза-

цию РБ при движении на активном участке полета, так как возникающие поперечные колебания РБ, частота которых близка к частоте собственных колебаний жидкости, влекут за собой дополнительные нагрузки на корпус РБ. Поэтому проектирование автомата стабилизации в предположении, что РБ – твердое тело, нецелесообразно, и следует предъявлять к его устройству дополнительные требования, которые способствовали бы обеспечению управляемости и устойчивости движения РБ с учетом колебаний жидкого наполнения топливных баков разгонного блока (РБ). Эти колебания приводят к возникновению автоколебаний РБ, для подавления которых применяется амплитудная и фазовая стабилизация. Принцип амплитудной стабилизации основан на установке демпфирующих устройств внутри баков.

В данной статье рассматривается принцип фазовой стабилизации. Целью работы являлось исследование возможности применения фазовой стабилизации к каждому из баков и влияния гидродинамических параметров колебаний топлива в баке горючего на колебания топлива в баке окислителя.

Материалы и методы

Математическая модель движения РБ с учетом жидкого наполнения топливных баков РБ представляет собой систему уравнений возмущенного движения при малых отклонениях от значений, характеризующих систему как твердое тело. Используются следующие системы координат (СК), показанные на рис. 1 [3, 4, 6–8]:

$OXYZ$ – базовая СК РБ с началом в точке пересечения продольной оси РБ и плоскости, проходящей через нижнюю точку бака горючего, ось OX

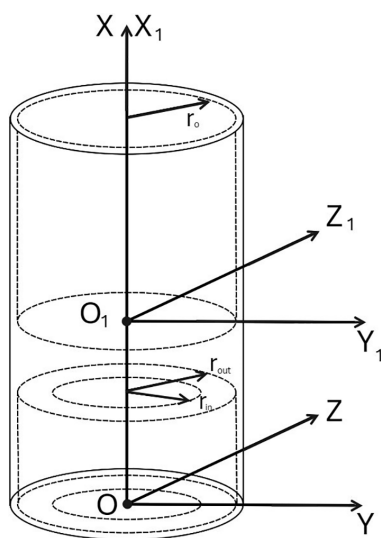


Рис. 1. Модель РБ и системы координат

направлена вдоль оси РБ в сторону полезного груза (ПГ), ось OY лежит в плоскости стрельбы ракеты-носителя, ось OZ дополняет систему до правой ортогональной СК;

$O_1X_1Y_1Z_1$ – связанная СК с началом в центре масс (ЦМ) РБ, оси которой параллельны осям базовой СК в невозмущенном состоянии.

Рассматривается модель РБ (рис. 1), представленная системой, состоящей из цилиндрического бака окислителя радиуса r_o и нижнего бака горючего в форме коаксиального цилиндра с внешним и внутренним радиусами r_{out} и r_{in} , размещенного на расстоянии h от бака окислителя. Длины баков окислителя и горючего в условиях данной задачи в начальный момент времени совпадают с уровнями заправок топлива в них. Координаты нижней теоретической вершины (НТВ) бака горючего в базовой СК считаем фиксированными. Особый интерес представляет выведение ПГ малой массы [21], поэтому в данной работе задача решается для случая выведения РБ полезного груза массой около 2000 кг.

Уравнения возмущенного движения РБ в плоскости тангажа с учетом колебаний жидкого наполнения топливных баков РБ имеют следующий вид [2]:

$$\begin{aligned} \ddot{y} + C_{y\theta}\theta + C_{y\delta}\delta + (-U_1\ddot{\beta}_{01} - U_2\ddot{\beta}_{02}) &= \bar{F}_y; \\ \ddot{\theta} + C_{\theta\delta}\delta + (T_1\ddot{\beta}_{01} + P_1\beta_{01}) + (T_2\ddot{\beta}_{02} + P_2\beta_{02}) &= \bar{M}_\theta; \\ \ddot{\beta}_{01} + \varepsilon_1\dot{\beta}_{01} + \eta_1\beta_{01} + t_1\ddot{\theta} + \eta_1\theta - u_1\ddot{y} &= 0; \\ \ddot{\beta}_{02} + \varepsilon_2\dot{\beta}_{02} + r_2\beta_{02} + t_2\ddot{\theta} + r_2\theta - u_2\ddot{y} &= 0; \\ \bar{T}_2\ddot{\delta}_0 + \bar{T}_1\dot{\delta}_0 + \delta_0 - k_1\dot{\theta} - k\theta &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где y – отклонение от программного значения проекции смещения ЦМ РБ на программное положение оси O_1Y_1 связанной СК, м;

θ – отклонение угла тангажа от программного значения, рад;

δ_0 – угловое отклонение камеры сгорания МД по каналу тангажа от положения, соответствующего нулевому отклонению рулевого привода, рад;

β_{0i} – угол отклонения свободной поверхности жидкости относительно нулевого положения (зеркало жидкости перпендикулярно продольной оси OX) по каналу тангажа, рад;

$C_{y\theta}, C_{\theta\delta}, C_{y\delta}$ – динамические коэффициенты, характеризующие ОБ как твердое тело [1, 2];

$t_i, u_i, r_i, U_i, P_i, T_i$ – коэффициенты, характеризующие жидкое наполнение баков;

ε_i – коэффициент вязкого демпфирования, где $i = 1, 2$ – индекс: 1 соответствует характеристикам бака окислителя, а 2 – бака горючего;

\bar{F}_y – возмущающее линейное ускорение, м/с²;

\bar{M}_θ – возмущающее угловое ускорение, м/с²;

\bar{T}_1 – постоянная времени рулевого привода, с;
 k, k_1 – коэффициенты усиления автомата стабилизации (АС).

Фазовую стабилизацию обеспечивает АС, который создает опережение по фазе на частотах колебаний. Для описания возможности выполнения фазовой стабилизации отдельного бака применяется коэффициентный критерий устойчивости [2], который выводится из системы уравнений, описывающих возмущенное движение РБ (1):

$$\Phi_{c,i} = (t_i - 1)(t_i \cdot C_{0\delta} + u_i \cdot C_{y\delta}) > 0. < \quad (2)$$

Коэффициенты t_i и u_i , характеризующие жидкое наполнение топливных баков, выражаются через параметры λ, μ, η , которые определяются при решении задачи о возмущенном движении жидкости. Задача сводится к определению потенциала $\varphi(t, x, y, z)$ скоростей частиц жидкости, удовлетворяющего уравнению Лапласа и краевым условиям. Колебания жидкости описываются рядом функций Бесселя.

Движение жидкости в баке описывается задачей Коши [7–15]:

$$\begin{cases} \Delta\varphi = 0, (x,y,z) \in O; \\ \left. \frac{\partial\varphi}{\partial n} \right|_S = 0, \left. \frac{\partial\varphi}{\partial x} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial t^2} \right|_\sigma = 0, < \end{cases} \quad (3)$$

где граничные условия поставлены на боковой смачиваемой поверхности S с нормалью n и на свободной поверхности σ объема O [2] (рис. 2).

Разделив время и пространственные координаты

$$\varphi(t, x, y, z) = \varphi_0(x, y, z) e^{j\omega t},$$

перейдем к задаче на собственные колебания жидкости в баке

$$\begin{cases} \Delta\varphi_0 = 0, (x,y,z) \in O; \\ \left. \frac{\partial\varphi_0}{\partial n} \right|_S = 0, \left. \frac{\partial\varphi_0}{\partial x} \right|_{x=0} = \lambda\varphi_0 \Big|_{x=0}, < \end{cases} \quad (4)$$

где λ – собственное значение задачи, а $\varphi_0 \neq 0$ – собственная функция, соответствующая этому собственному значению.

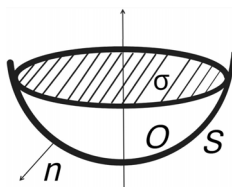


Рис. 2. Границы объема O с боковой смачиваемой поверхностью S , нормалью n и свободной поверхностью σ

В такой постановке задачи функция двух переменных на свободной поверхности жидкости, которая определяет форму свободной поверхности, принимаемую жидкостью при колебаниях для этой собственной функции и собственного значения [12, 16]

$$f(y, z) = \frac{\partial\varphi_0}{\partial x} \Big|_{x=0} = \lambda\varphi_0.$$

Зная $\varphi(x, y, z)$ с соответствующим ей собственным значением λ [12, 17–20], можно вычислить (в метрах) плечо приложения гидродинамических сил относительно НТВ бака в плоскости тангажа (h – текущий уровень топлива в баке относительно НТВ)

$$\eta_x = h + \frac{\iint_{S+\sigma} \varphi(x \cos(n, y) - y \cos(n, x)) dS}{\iint_{\sigma} y \frac{\partial\varphi}{\partial x} dS} \quad (5)$$

и геометрический момент инерции (в метрах в 4-й степени) свободной поверхности жидкости в баке относительно оси OZ

$$\mu = \frac{\left(\iint_{\sigma} y \frac{\partial\varphi}{\partial x} dS \right)^2}{\iint_{\sigma} \left(\frac{\partial\varphi}{\partial x} \right)^2 dS}. \quad (6)$$

Будем решать задачу (3) для случая цилиндрического бака окислителя и бака горючего формы коаксиального цилиндра.

Постановка задачи (3) для бака окислителя – бака цилиндрической формы:

$$\begin{cases} \Delta\varphi_0 = 0, -h < x < 0, y^2 + z^2 < r_0^2; \\ \left. \frac{\partial\varphi_0}{\partial n} \right|_{r=r_0, x=-h} = 0, \left. \frac{\partial\varphi_0}{\partial x} \right|_{x=0} = \lambda\varphi_0 \Big|_{x=0}, < \end{cases} \quad (7)$$

где $r = \sqrt{y^2 + z^2}$.

Собственную функцию найдем из решения уравнения Лапласа методом разделения переменных:

$$\lambda_{nl} = \frac{\zeta_{nl}}{r_0} \operatorname{th} \frac{\zeta_{nl} h}{r_0} - \text{собственное значение задачи.}$$

Здесь $\zeta_{nl}, n \in \mathbb{Z}_+, l \in \mathbb{N}$ – последовательные положительные корни уравнения $J'_n(\zeta) = 0$, где $J_n(\zeta)$ – функции Бесселя n -го порядка первого рода.

Соответствующая ему собственная функция:

$$\begin{aligned} \varphi_{nl}(x, y, z) = & \frac{\operatorname{ch} \left[\frac{\zeta_{nl}}{r_0} (x + h) \right]}{\operatorname{ch} \left(\frac{\zeta_{nl}}{r_0} h \right)} \times \\ & \times J_n \left(\frac{\zeta_{nl}}{r_0} r \right) (A \cos n\varphi + B \sin n\varphi), \end{aligned}$$

где A и B – произвольные постоянные.

Ортогональный базис в подпространстве собственных функций, соответствующих собственному значению λ_{nl} , составляют функции:

$$\frac{\text{ch}\left[\frac{\zeta_{nl}(x+h)}{r_0}\right]}{\text{ch}\left(\frac{\zeta_{nl}h}{r_0}\right)} J_n\left(\frac{\zeta_{nl}r}{r_0}\right) \cos n\varphi$$

и

$$\frac{\text{ch}\left[\frac{\zeta_{nl}(x+h)}{r_0}\right]}{\text{ch}\left(\frac{\zeta_{nl}h}{r_0}\right)} J_n\left(\frac{\zeta_{nl}r}{r_0}\right) \sin n\varphi.$$

В движении РБ в канале тангажа учитывается только собственная функция ($n = 1$)

$$\varphi_{1l}(x, y, z) = A \frac{\text{ch}\left[\frac{\zeta_{1l}(x+h)}{r_0}\right]}{\text{ch}\left(\frac{\zeta_{1l}h}{r_0}\right)} J_1\left(\frac{\zeta_{1l}r}{r_0}\right) \cos \varphi,$$

которая соответствует собственным значениям

$$\lambda_{1l} = \frac{\zeta_{1l}}{r_0} \text{th} \frac{\zeta_{1l}h}{r_0},$$

ζ – последовательные положительные корни уравнения $J'_n(\zeta) = 0$.

Этим собственным функциям соответствует форма свободной поверхности:

$$f_{1l}(y, z) = \frac{\partial \varphi_{1l}}{\partial x} \Big|_{x=0} = A \frac{\zeta_{1l}}{r_0} \text{th} \frac{\zeta_{1l}h}{r_0} J_1\left(\frac{\zeta_{1l}r}{r_0}\right) \cos \varphi.$$

Ее нормированный вид:

$$f_{1l}(y, z) = \frac{\partial \varphi_{1l}}{\partial x} \Big|_{x=0} = -\frac{2r_0 J_1\left(\frac{\zeta_{1l}r}{r_0}\right)}{(\zeta_{1l}^2 - 1) J_1(\zeta_{1l})} \cos \varphi.$$

Из вышеизложенного с учетом формул (5) и (6) находим гидродинамические параметры μ и η для бака цилиндрической формы:

– плечо приложения гидродинамических сил относительно НТВ бака

$$\eta_{x1l} = h + \frac{\iint_{S+\sigma} \varphi_{1l} [x \cos(n, y) - y \sin(n, x)] dx}{\iint_{\sigma} y \frac{\partial \varphi_{1l}}{\partial x} dS} = h - \frac{2r_0}{\zeta_{1l}} \text{th} \frac{\zeta_{1l}h}{2r_0}; \quad (8)$$

– геометрический момент инерции свободной поверхности жидкости в баке окислителя относительно продольной оси РБ [4]

$$\mu = \frac{2\pi r_0^4}{(\zeta_{1l}^2 - 1) \zeta_{1l}^2} \approx \frac{\pi r_0^4}{4}. \quad (9)$$

Для бака горючего, имеющего форму коаксиального цилиндра, краевая задача (3) имеет вид [17]

$$\begin{cases} \Delta \varphi_0 = 0 & -h < x < 0 & r_{in}^2 < y^2 + z^2 < r_{out}^2; \\ \frac{\partial \varphi_0}{\partial n} \Big|_{r=r_{out}, r=r_{in}, x=-h} = 0; & \frac{\partial \varphi_0}{\partial x} \Big|_{x=0} = \lambda \varphi_0 \Big|_{x=0} \end{cases} \quad (10)$$

и решается аналогично задаче для цилиндра. Получаем собственные функции для колебаний жидкости в коаксиальном цилиндре в канале тангажа

$$\varphi_{1l}(x, y, z) = A \frac{\text{ch}\left[\frac{\zeta_{1l}(x+h)}{r_{out}}\right]}{\text{ch}\left(\frac{\zeta_{1l}h}{r_{out}}\right)} \times \left[J_1\left(\frac{\zeta_{1l}r}{r_{out}}\right) + \gamma_{1l} Y_1\left(\frac{\zeta_{1l}r}{r_{out}}\right) \right] \cos \varphi,$$

где $Y_1(\zeta)$ – функции Бесселя 1-го порядка второго рода, $\zeta_{1l} = \zeta_{1l}(r_{out}/r_{in})$; $\gamma_{1l} = \gamma_{1l}(r_{out}/r_{in})$; A – произвольная постоянная.

$$f_{1l}(y, z) = A \frac{\zeta_{1l}}{r_{out}} \text{th} \frac{\zeta_{1l}h}{r_{out}} \times \left[J_1\left(\frac{\zeta_{1l}r}{r_{out}}\right) + \gamma_{1l} Y_1\left(\frac{\zeta_{1l}r}{r_{out}}\right) \right] \cos \varphi.$$

Собственные значения задачи по форме выражения совпадают с таковыми для задачи цилиндрического бака [17]:

$$\lambda_{1l} = \frac{\zeta_{1l}}{r_{out}} \text{th} \frac{\zeta_{1l}h}{r_{out}}, \text{ с учетом, } \zeta_{1l} = \zeta_{1l} \left(\frac{r_{out}}{r_{in}} \right).$$

Совпадет и выражение для определения плеча приложения гидродинамических сил относительно НТВ бака:

$$\eta_{x1l} = h - \frac{2r_{out}}{\zeta_{1l}} \text{th} \frac{\zeta_{1l}}{2r_{out}}, < \quad (11)$$

где $\zeta_{1l} = \zeta_{1l}(r_{out}/r_{in})$.

Геометрический момент инерции свободной поверхности жидкости в баке горючего относительно оси Z :

$$\mu = \frac{2\pi r_{out}^4 \left[1 - \frac{r_{out}}{r_{in}} R_{1l}(r_{in}) \right]^2}{\zeta_{1l}^2 \left\{ \zeta_{1l}^2 - 1 + \left[1 - \left(\frac{r_{out}}{r_{in}} \right)^2 \right] \zeta_{1l}^2 \right\} R_{1l}^2(r_{in})} \approx \frac{\pi (r_{out}^4 - r_{in}^4)}{4}. \quad (12)$$

Коэффициенты t и u , входящие в коэффициентный критерий (2), выражаются через найденные параметры λ и η :

$$t = \lambda (x_{\text{ЦМ}} - \eta) \quad (13)$$

– коэффициент, зависящий от плеча приложения гидродинамических сил относительно нижней теоретической вершины бака, где $x_{\text{ЦМ}}$ – положение центра масс РБ;

$u = \lambda$ – обратная величина длины эквивалентного математического маятника, м^{-1} .

Оставшиеся коэффициенты, входящие в критерий (2), характеризующие РБ как твердое тело:

$C_{y\delta} = -P/m$ – управляющее ускорение при поперечных перемещениях, $\text{м}/\text{с}^2$;

$C_{\theta\delta} = -\frac{(x_{\text{Б1}} - x_{\text{ЦМ}}) P}{I_z}$ – управляющее ускорение при угловых смещениях, с^{-2} , где P – тяга маршевого двигателя, $\text{кг} \cdot \text{м}/\text{с}^2$;

$x_{\text{Б1}}$ – координата точки приложения тяги МД, м ;

I_z – момент инерции РБ относительно оси OZ связанной СК, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$.

3. Результаты и обсуждение

Применение коэффициентного критерия (2) позволяет определить области активного участка полета РБ, на которых возможно применение фазовой стабилизации для конкретного бака. На рис. 3 представлена зависимость выполнения критерия фазовой стабилизации для каждого из баков от безразмерного параметра τ , определяющего долю израсходованного топлива от полного запаса топлива:

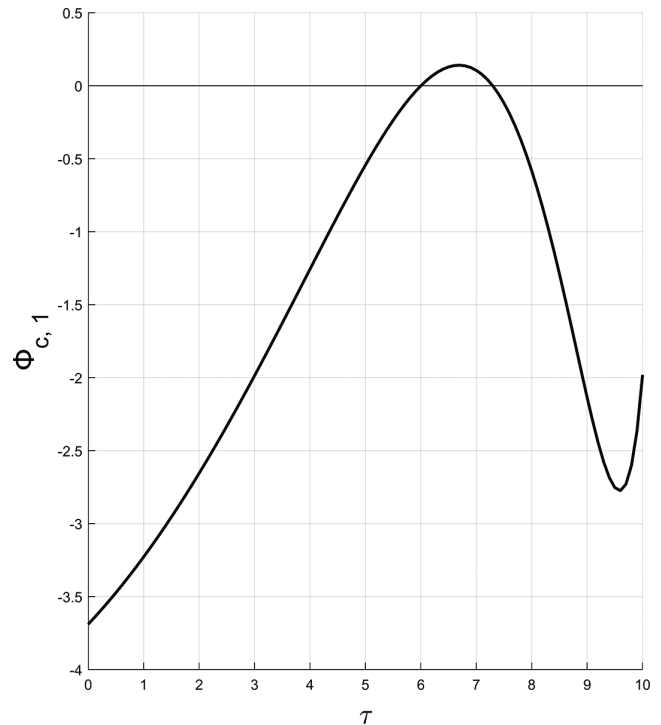
$$\tau = \frac{m_0 - m}{m_0 - m_k}$$

Здесь m_0 – стартовая масса РБ, кг ; m – его текущая масса, кг ; m_k – масса РБ в конце активного участка полета, кг .

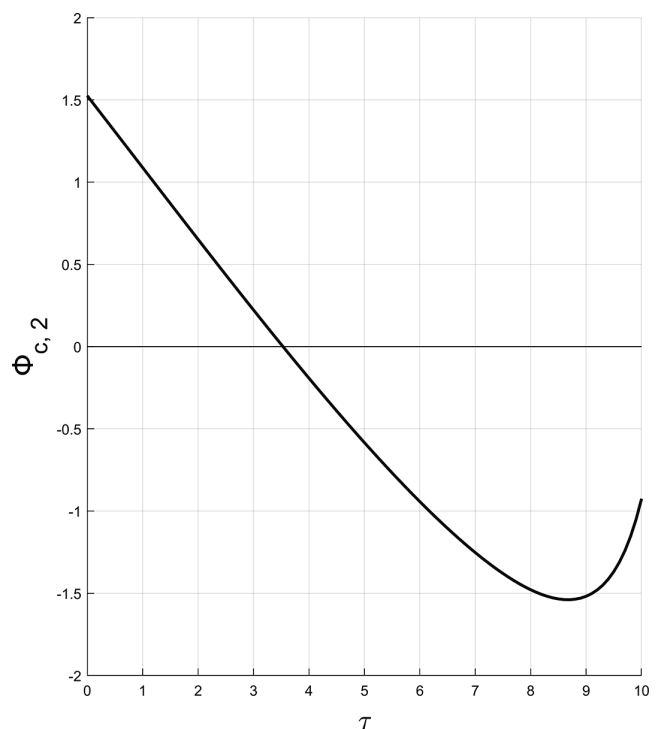
Анализ применения коэффициентного критерия (2) приводит к выводу, что фазовая стабилизация РБ выбранной конфигурации при помощи автомата стабилизации не может быть обеспечена на всем активном участке полета при выведении полезного груза малой массы. Особенно это касается бака окислителя, для которого фазовая стабилизация возможна только на сравнительно небольшом участке активного полета.

Для исследования управляемости РБ проинтегрируем систему уравнений движения (1) с учетом углового отклонения по каналу тангажа $\Delta\theta = 0,1$ рад в начальный момент. Результат интегрирования системы приведен на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что в начале активного участка в баке окислителя (рис. 4,а), вследствие невыпол-



а



б

Рис. 3. Выполнение критерия фазовой стабилизации для каждого из баков разгонного блока: а – окислителя; б – горючего

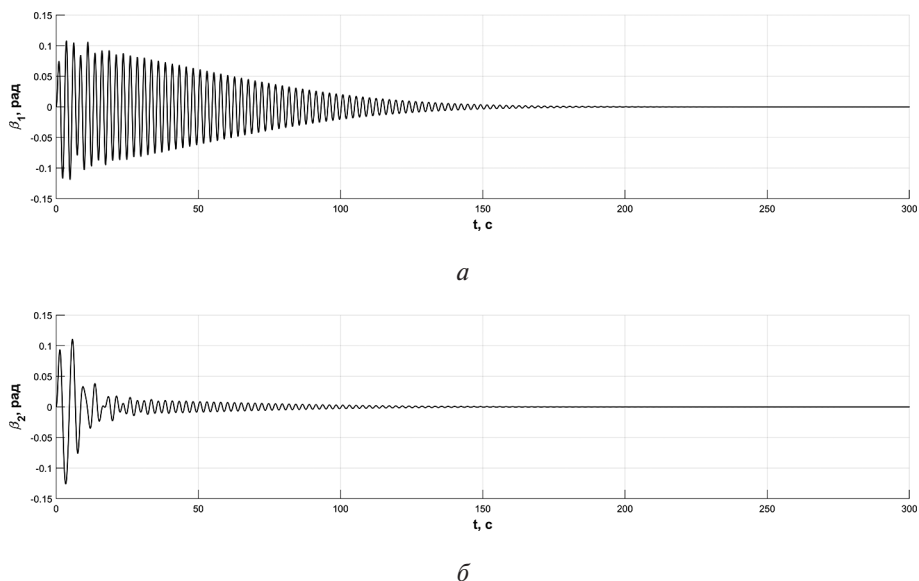


Рис. 4. Моделирование колебаний свободной поверхности жидкости в баках разгонного блока на активном участке в плоскости тангажа: *a* – окислителя; *б* – горючего

нения условия фазовой стабилизации, возникают автоколебания жидкости с амплитудами, близкими к амплитуде разрушения волны, которые сохраняются на протяжении длительного времени, в отличие от колебаний жидкости в баке горючего (рис. 4,*б*). В качестве решения данной проблемы предлагается способ стабилизации колебаний жидкости в баке окислителя при помощи изменения геометрического момента инерции свободной поверхности жидкости в баке горючего, зависящего от отношения r_{out}/r_{in} .

Повторим математическое моделирование движения РБ в плоскости тангажа, проинтегрировав систему уравнений движения (1) для различных значений параметра μ бака горючего с теми же начальными условиями. Результаты интегрирования приведены на рис. 5.

Анализируя приведенные результаты, можно сделать вывод, что амплитуда колебаний жидкости в баке окислителя становится меньше (рис. 5,*a*) при уменьшении геометрического момента инерции свободной поверхности жидкости в баке горючего,

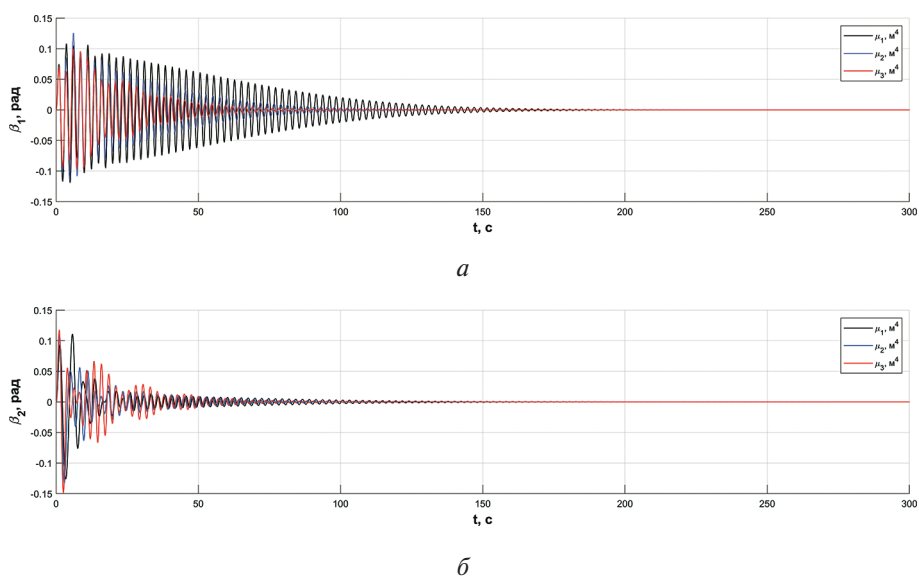


Рис. 5. Моделирование колебаний свободной поверхности жидкости в баках разгонного блока для разных значений геометрического момента инерции, $\mu_3 < \mu_2 < \mu_1$: *a* – окислителя; *б* – горючего

то есть при уменьшении внешнего радиуса коаксиального цилиндра и, как следствие, увеличении его длины. При этом изменение геометрического момента инерции свободной поверхности жидкости в баке горючего не оказывает существенного влияния на амплитуду колебаний жидкости в этом баке и на время стабилизации ее автоколебаний (рис. 5, б)). Также сокращается время стабилизации колебаний жидкости в баке окислителя, что наглядно видно из рис. 5, а). Более того, такой подход к решению задачи также позволяет добиться некоторого расширения области применимости фазовой стабилизации для каждого бака, не прибегая к изменению начального объема топлива в них (рис. 6).

Полученные результаты можно объяснить тем фактом, что фазовое опережение, реализуемое в автомате стабилизации в диапазоне частот собственных колебаний свободных поверхностей жидкостей, применимо для топливных баков, свободные поверхности жидкостей в которых лежат ниже центра масс РБ [2, 4]. Изменение геометрических размеров бака горючего влияет на положение центра масс РБ, смещая его вдоль продольной оси РБ. В рассматриваемой задаче при уменьшении геометрического момента инерции свободной поверхности жидкости в баке горючего центр масс РБ смещается вверх вдоль продольной оси, в связи с чем увеличивается гидродинамический коэффициент t (см. формулу (13)) для бака окислителя, геометрия которого не меняется в ходе данного исследования, а значит, неизменными остаются коэффициенты λ и η . В свою очередь, увеличение гидродинамического коэффициента t для бака окислителя, входящего в третье уравнение системы (1), приводит к уменьшению амплитуды автоколебаний, возникающих в этом баке. Таким образом, можно заключить, что при проектировании РБ полезно учитывать выведенную в статье зависимость геометрического момента инерции бака горючего от его геометрических характеристик, чтобы эффективно использовать ее для улучшения стабилизации колебаний жидкости в баке окислителя.

Выводы

Проведенное математическое моделирование показало, что выполнение коэффициентного критерия для бака окислителя на всем активном участке полета РБ неосуществимо. В данной статье предложено решение данной задачи через изменение геометрического момента инерции свободной поверхности жидкости бака горючего как способа уменьшения автоколебаний жидкости, возникающих в баке окислителя вследствие невыполнения условия фазовой стабилизации. Было показано, что изменять рассматриваемую гидродинамиче-

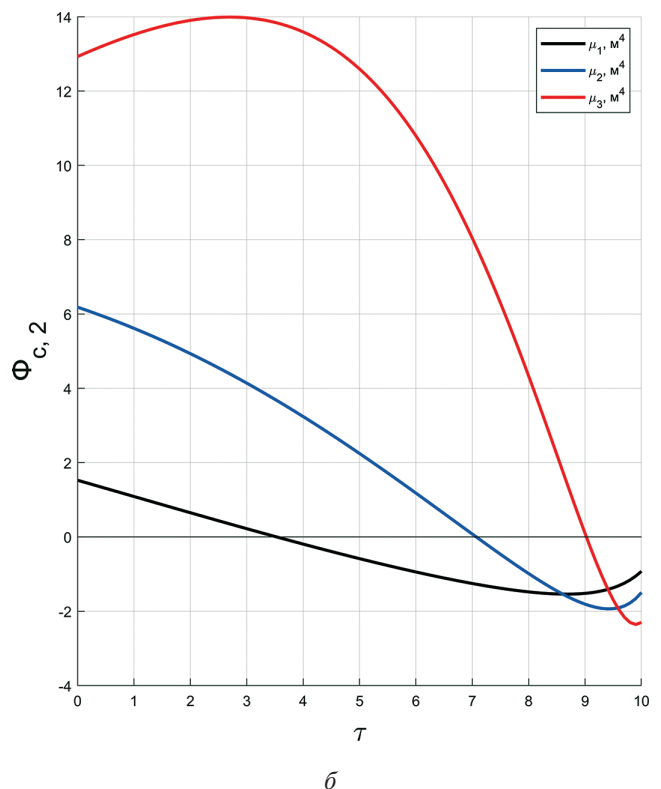
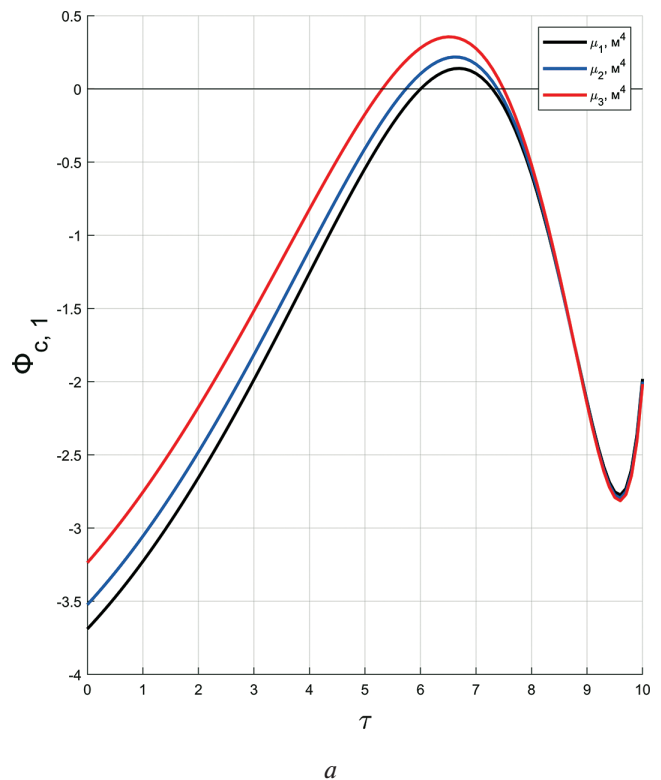


Рис. 6. Демонстрация расширения области выполнения критерия фазовой стабилизации для каждого из баков для разных значений геометрического момента инерции, $\mu_3 < \mu_2 < \mu_1$: а – окислителя; б – горючего

скую характеристику необходимо таким образом, чтобы центр масс РБ располагался выше свободной поверхности жидкости в баке окислителя на максимально возможном участке полета [21].

Применение результатов проведенного исследования могло бы позволить повысить точность выведения РБ рассмотренной конфигурации (РБ с топливными баками, содержащими большие массы жидкого наполнения) путем уменьшения влияния поперечных колебаний РБ, частота которых близка к частоте собственных колебаний жидкости в баках РБ. Предложенный метод позволяет стабилизировать колебания жидкости в баках РБ, не изменяя начальный объем топлива в них.

Список источников

1. Колесников К.С. Динамика ракет. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Машиностроение, 2003. – 519 с.
2. Абгарян К.А., Рапопорт И.М. Динамика ракет. – М.: Машиностроение, 1969. – 378 с.
3. Колесников К.С. Жидкостная ракета как объект регулирования. – М.: Машиностроение, 1969. – 298 с.
4. Абрамов И.П., Алдашкин И.В., Алексеев Э.В. и др. Машиностроение: Энциклопедия: В 40 т. – Т. IV-22. Ракетно-космическая техника. Кн. 2. Ч. 1. – М.: Машиностроение, 2014. – 563 с.
5. Пиунов В.Ю., Назаров В.П., Коломенцев А.И. Совершенствование энергетических характеристик кислородно-водородных жидкостных ракетных двигателей разгонных блоков методом оптимизации конструктивных схем // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 3. С. 23–33.
6. Чжаокай Ю., Темнов А.Н. Равновесие и колебания свободной поверхности жидкого топлива в коаксиально-цилиндрических сосудах в условиях микрогравитации // Инженерный журнал: наука и инновации. 2021. № 8(116). DOI: 10.18698/2308-6033-2021-8-2099
7. Jokar M., Salarieh H., Pishkenari H.N. Observer-based boundary feedback control for attitude tracking of rigid bodies with partially liquid-filled cavities // Aerospace Science and Technology. 2022. Vol. 132. No. 9: 108068. DOI: 10.1016/j.ast.2022.108068
8. Аунг К.М., Коломенцев А.И., Мартиросов Д.С. Математическое моделирование регулятора расхода жидкостного ракетного двигателя во временной и частотной областях // Вестник Московского авиационного института. 2021. Т. 28. № 1. С. 96–106. DOI: 10.34759/vst-2021-1-96-106
9. Павлюк Ю.С., Сакулин В.Д. Приближенный метод определения моментов инерции тел с жидким наполнением // Вестник ЮУрГУ. Серия Машиностроение. 2006. № 11(66). С. 21–23.
10. Takahara H., Kimula K. Frequency response of sloshing in an annular cylindrical tank subjected to pitching excitation // Journal of Sound and Vibration. 2012. Vol. 331. No. 13, pp. 3199–3212. DOI 10.1016/j.jsv.2012.02.023
11. Аверьянов А.П., Азаренко Л.Г., Вокин Г.Г., Кащеев Н.А. Введение в ракетно-космическую технику: Учебное пособие: В 2 томах. – 2-е изд. – М.: Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. – Т. 1. – 381 с.
12. Дьяченко М.И., Орлов В.В., Темнов А.Н. Колебания жидкого топлива в цилиндрических и конических емкостях // Наука и образование: Научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2013. № 11. С. 175–192.
13. Хунг Н.З., Темнов А.Н. Задачи динамики космических конструкций с жидким топливом, вытекающим из сферических емкостей // Инженерный журнал: наука и инновации. 2016. № 5(53). DOI: 10.18698/2308-6033-2016-5-1490
14. Колесников К.С., Пожалостин А.А., Шкапов П.М. Задачи динамики гидромеханических систем в трудах кафедры теоретической механики имени профессора Н.Е. Жуковского // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2012. № 7(7). С. 15–30.
15. Дьяченко М.И., Темнов А.Н. Проблемы динамики перераспределения топлива в крупногабаритных ракетно-космических объектах // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2012. № 8. С. 164–174.
16. Красильников П.С., Сторожкина Т.А. Исследование резонансных колебаний математического маятника переменной длины // Труды МАИ. 2011. № 46. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=26045>
17. Cheng X.D., Wang Z.L. The equation and the numerical analysis of static fluid surface in revolving symmetrical tank under low gravity // Chinese Journal of Computational Physics. 2000. Vol. 17. No. 3, pp. 273–279.
18. Пожалостин А.А., Гончаров Д.А. О параметрических осесимметричных колебаниях жидкости в цилиндрическом сосуде // Труды МАИ. 2017. № 95. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=84412>
19. Калиниченко В.А., Со А.Н. Экспериментальное исследование связанных колебаний сосуда с жидкостью // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия Естественные науки. 2015. № 1(58). С. 14–25.
20. Шаповалов А.В., Щеглов Г.А. Синтез рациональной компоновки малого разгонного блока на газообразных компонентах топлива // Вестник Московского авиационного института. 2023. Т. 30. № 2. С. 70–77. DOI: 10.34759/vst-2023-2-70-77
21. Евсеенко Е.А., Генералов Н.Н. Определение оптимального расположения топливных баков ракеты, спроектированной по схеме «тандем», из условия минимума стартовой массы // Инженерный журнал: наука и инновации. 2016. № 8(56). DOI: 10.18698/2308-6033-2016-8-1521

References

1. Kolesnikov K.S. *Dinamika raket* (Dynamics of rockets). 2nd ed. Moscow, Mashinostroenie, 2003, 519 p.
2. Abgaryan K.A., Rapoport I.M. *Dinamika raket* (Dynamics of rockets). Moscow, Mashinostroenie, 1969, 378 p.
3. Kolesnikov K.S. *Zhidkostnaya raketa kak ob»ekt regulirovaniya* (Liquid rocket as an object of regulation). Moscow, Mashinostroenie, 1969, 298 p.
4. Abramov I.P., Aldashkin I.V., Alekseev E.V. et al. *Mashinostroenie. Entsiklopediya v 40 t. T. IV-22. Raketno-kosmicheskaya tekhnika. T. IV-22. Kn. 2. Ch. 1* (Mechanical engineering. Encyclopedia in 40 vols. Vol. IV-22. Rocket and space technology. Book 2. Part 1), Moscow, Mashinostroenie, 2014, 563 p.
5. Piunov V.Y., Nazarov V.P., Kolomentsev A.I. The upper stage oxygen-hydrogen rocket engine energy characteristics improvement by structural scheme optimization method. *Aerospace MAI Journal*, 2017, vol. 24, no. 3, pp. 23–33.
6. Zhaokai Y., Temnov A.N. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii*, 2021, no. 8(116). DOI: 10.18698/2308-6033-2021-8-2099
7. Jokar M., Salarieh H., Pishkenari H. N. Observer-based boundary feedback control for attitude tracking of rigid bodies with partially liquid-filled cavities. *Aerospace Science and Technology*, 2022, vol. 132, no. 9: 108068. DOI: 10.1016/j.ast.2022.108068
8. Aung K.M., Kolomentsev A.I., Martirosov D.S. Mathematical modelling of liquid rocket engine flow regulator in frequency and time domains. *Aerospace MAI Journal*, 2021, vol. 28, no. 1, pp. 96–106. DOI: 10.34759/vst-2021-1-96-1
9. Pavlyuk Yu.S., Sakulin V.D. *Vestnik YuUrGU. Seriya Mashinostroenie*, 2006, no. 11(66), pp. 21–23.
10. Takahara H., Kimula K. Frequency response of sloshing in an annular cylindrical tank subjected to pitching excitation. *Journal of Sound and Vibration*, 2012, vol. 331, no. 13, pp. 3199–3212. DOI 10.1016/j.jsv.2012.02.023
11. Aver'yanov A.P., Azarenko L.G., Vokin G.G., Kashcheev N.A. *Vvedenie v raketno-kosmicheskuyu tekhniku. V 2 tomakh* (Introduction to rocket and space technology. In 2 vols). 2nd ed. Moscow, Infra-Inzheneriya, 2021, vol. 1, 381 p.
12. D'yachenko M.I., Orlov V.V., Temnov A.N. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana*, 2013, no. 11, pp. 175–192.
13. Nguyen D.H., Temnov A.N. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii*, 2016, no. 5(53). DOI: 10.18698/2308-6033-2016-5-1490
14. Kolesnikov K.S., Pozhalostin A.A., Shkapov P.M. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Estestvennye nauki*, 2012, no. 7(7), pp. 15–30.
15. D'yachenko M.I., Temnov A.N. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie*, 2012, no. 8, pp. 164–17.
16. Krasil'nikov P.S., Storozhkina T.A. *Trudy MAI*, 2011, no. 46. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=26045>
17. Cheng X.D., Wang Z.L. The equation and the numerical analysis of static fluid surface in revolving symmetrical tank under low gravity. *Chinese Journal of Computational Physics*, 2000, vol. 17, no. 3, pp. 273–279.
18. Pozhalostin A.A., Goncharov D.A. *Trudy MAI*, 2017, no. 95. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=84412>
19. Kalinichenko V.A., So A.N. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya: Estestvennye Nauki*, 2015, no. 1(58), pp. 14–25.
20. Shapovalov A.V., Shcheglov G.A. Rational layout synthesis of the upper stage running on gaseous components. *Aerospace MAI Journal*, 2023, vol. 30, no. 2, pp. 70–77. DOI: 10.34759/vst-2023-2-70-77
21. Evseenko E.A., Generalov N.N. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii*, 2016, no. 8(56). DOI: 10.18698/2308-6033-2016-8-1521

Статья поступила в редакцию 14.02.2024; одобрена после рецензирования 28.05.2024; принята к публикации 31.05.2024.
The article was submitted on 14.02.2024; approved after reviewing on 28.05.2024; accepted for publication on 31.05.2024.