

УДК 532.5.031

МАЛЫЕ КОЛЕБАНИЯ ДВУХСЛОЙНОЙ ЖИДКОСТИ
С УЧЕТОМ ПРОНИЦАЕМОСТИ РАЗДЕЛИТЕЛЯА.А. Пожалостин¹, Д.А. Гончаров², В.В. Кокушкин³

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
e-mail: a.pozhalostin@mail.ru; goncharov@bmsu.ru;
fn-3.bmsu.kokushkin@yandex.ru

Рассмотрены малые симметричные колебания идеальной жидкости в жестком цилиндрическом сосуде с проницаемой перегородкой. Получено приближенное аналитическое решение этой задачи. Основные допущения: движение жидкости полагается потенциальным с потенциалом скоростей $\Phi = \Phi(x, r, t)$, сопротивление разделителя — линейно-зависимым от скорости частиц жидкости с постоянным коэффициентом γ . Влияние проницаемой перегородки, разделяющей столб жидкости в баке на два слоя, учитывается как некоторое линейно-вязкое сопротивление с приведенным коэффициентом сопротивления γ , задаваемым в качестве параметра. В дальнейших исследованиях предложено величину γ определять на основе модельного эксперимента, возбуждая колебания жидкости в баке. Установлено, что в случае $\Phi = 0$ на свободной поверхности колебания отсутствуют при $\rho_1 = \rho_2 = \rho$ и возможны при $\rho_1 \neq \rho_2$. В случае учета ускорения свободного падения g на свободной поверхности жидкости, движения жидкости в баке представляют собой затухающие колебания с некоторым коэффициентом затухания n .

Ключевые слова: колебания, слой жидкости, разделитель, линейная вязкость, идеальная жидкость, потенциальное течение.

SMALL OSCILLATIONS OF TWO-LAYER LIQUID
IN VIEW PERMEABILITY OF SEPARATOR

A.A. Pozhalostin, D.A. Goncharov, V.V. Kokushkin

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
e-mail: a.pozhalostin@mail.ru; goncharov@bmsu.ru;
fn-3.bmsu.kokushkin@yandex.ru

The small symmetric oscillations of an ideal liquid in hard cylindrical vessel with permeable partition is considered. Approximate analytical solutions of this task is obtained. The principal assumptions: the fluid motion is relied as gravitational with the potential of velocities $\Phi = \Phi(x, r, t)$, resistance separator is defined linearly dependent on the particle velocity of the fluid with constant coefficient γ . The impact of the permeable partition separating the liquid column inside the tank into two layers have been taken into account as a linearly viscous drag with a given resistance coefficient γ specified as a parameter. In further researches it is suggested that value should be determined based on the model experiment using excited the liquid oscillations in the tank. It has been established that if $\gamma = 0$ on the free surface there are no oscillations at $\rho_1 = \rho_2 = \rho$ and these oscillations are possible at $\rho_1 \neq \rho_2$. In the case of accounting the gravitational acceleration g on the free liquid surface in the tank then the fluid motion are damped oscillations with some attenuation coefficient n .

Keywords: oscillations, liquid layer, separator, linear viscosity, ideal fluid, the potential flow.

Введение. В современных разгонных блоках обеспечение сплошности компонентов топлива обеспечивается за счет фазоразделяющих экранов [1]. В связи с этим определенным интересом представляет исследование малых движений жидкости, заполняющей цилиндрический сосуд, сквозь фазоразделяющие перегородки. В настоящей работе будем моделировать течение жидкости с линейным сопротивлением сквозь такой экран и обобщим результаты [2, 3] для случая движения двухслойной жидкости сквозь сопротивление. В работе [4] исследовано движение идеальной, несжимаемой и нестратифицированной жидкости совместно с упругим днищем, в статье [5] — вопросы устойчивости свободной поверхности жидкости в условиях малой гравитации. Свободные осесимметричные колебания двухслойной жидкости с непроницаемым разделителем исследованы в работе [6]. Схожая с постановкой задачи, приведенной в работе [4], постановка задачи с иным подходом к решению дифференциального уравнения движения пластины реализована в работе [7]. Работа [8] посвящена исследованию движений стратифицированной жидкости совместно с упругим днищем, рассматриваемым в виде пластины, работы [9, 10] — исследованию колебаний многослойных жидкостей и разделяющих мембран. В работе [11] задача о движении стратифицированной жидкости, разделенной мембраной, рассмотрена с применением операторных методов

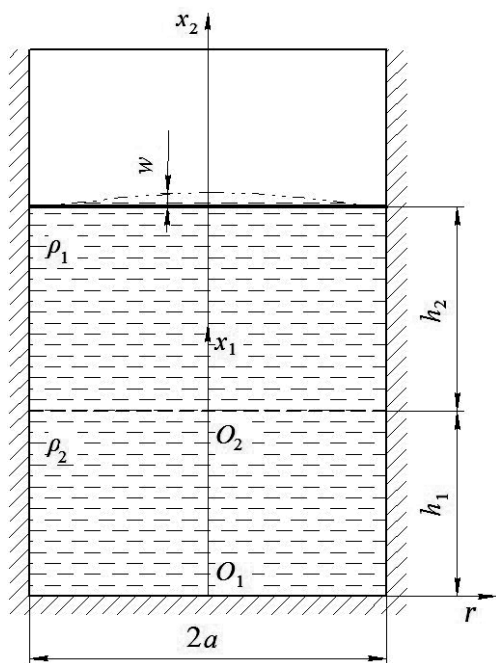


Рис. 1. Двухслойная жидкость, разделенная диафрагмой

и исследованием свойств спектра. В работе [12] были исследованы колебания оболочки при протекании жидкости сквозь проницаемую перегородку, в работе [13] — колебания упругой проницаемой перегородки, взаимодействующей с жидкостью. В работах [14–16] изложены аспекты экспериментальных исследований разделяющих экранов.

Постановка задачи. Рассмотрим малые движения идеальной несжимаемой двухслойной жидкости с плотностями ρ_1 и ρ_2 , разделенной проницаемой плоской диафрагмой. Введем цилиндрические системы координат с началами O_1 и O_2 соответственно (рис. 1). Движение жидкости

полагаем потенциальным с потенциалом скоростей Φ , удовлетворяющим уравнению Лапласа. Рассмотрим осесимметричные движения. Потенциал скоростей Φ_j для j -го слоя

$$\Delta\Phi_j = 0, j = 1, 2. \quad (1)$$

Сформулируем отдельно граничные условия для случая отсутствия сопротивления разделителя и случая, когда коэффициент сопротивления равен γ . Условие на свободной поверхности будет иметь вид в соответствии, например, с условием, приведенным в работе [2]:

$$-\omega^2\Phi_1 \Big|_{x_1=h_1} + g \frac{\partial\Phi_1}{\partial x_1} \Big|_{x_1=h_1} = 0, \quad (2)$$

где g — ускорение свободного падения; ω — собственная частота колебаний рассматриваемой механической системы.

Условия непротекания на стенках [2, 3]:

$$\frac{\partial\Phi_1}{\partial r} \Big|_{r=R} = 0, \quad \frac{\partial\Phi_2}{\partial r} \Big|_{r=R} = 0; \quad (3)$$

$$\frac{\partial\Phi_1}{\partial x_2} \Big|_{x_2=0} = 0. \quad (4)$$

При отсутствии сопротивления разделителя граничные условия для функций Φ_1 и Φ_2 будут иметь вид

$$\Phi_1 \Big|_{x_1=0} = \Phi_2 \Big|_{x_2=h_2}; \quad (5)$$

$$\frac{\partial\Phi_1}{\partial x_1} \Big|_{x_1=0} = \frac{\partial\Phi_2}{\partial x_2} \Big|_{x_2=h_2}. \quad (6)$$

Когда $\gamma \neq 0$, условие (5) согласно принятым допущениям запишется в виде

$$\rho_1 \frac{\partial\Phi_1}{\partial t} \Big|_{x_1=0} - \rho_2 \frac{\partial\Phi_2}{\partial t} \Big|_{x_2=h_2} = \gamma \frac{\partial\Phi_1}{\partial x_1} \Big|_{x_1=0}. \quad (7)$$

Решение краевой задачи. Рассмотрим сначала случай, когда $\gamma = 0$. Будем искать решение, представляя потенциал скоростей в комплексном виде:

$$\Phi_j = \sum_{n=1}^{\infty} e^{i\omega_n t} \tilde{\Phi}_j^{(n)}, \quad j = 1, 2. \quad (8)$$

Здесь $\tilde{\Phi}$ — действительная часть комплексного потенциала скоростей. Удовлетворяя соотношению (1), разделяя переменные и выполняя граничные условия (2)–(6), получаем выражения для $\tilde{\Phi}_j^{(n)}$:

$$\tilde{\Phi}_2^{(n)} = A_n \left[\left(\lambda_n \frac{x_2}{R} \right) J_0 \left(\lambda_n \frac{r}{R} \right) \right]; \quad (9)$$

$$\tilde{\Phi}_1^{(n)} = B_n \left[\left(\lambda_n \frac{h}{R} \right) \left(\lambda_n \frac{x_1}{R} \right) + \left(\lambda_n \frac{h}{R} \right) \left(\lambda_n \frac{x_1}{R} \right) \right] J_0 \left(\lambda_n \frac{r}{R} \right), \quad (10)$$

где J_0 — функция Бесселя первого рода нулевого порядка; λ_n — корень функции Бесселя первого рода первого порядка. Это корень получаем, удовлетворяя граничным условиям (3). Из условия (2) определяем значение квадрата собственной частоты n -го тона осесимметричных колебаний:

$$\omega_n^2 = g \frac{\lambda_k}{R} \left(\lambda_k \frac{h_1 + h_2}{R} \right).$$

Рассмотрим случай ненулевого значения коэффициента γ , когда $g = 0$ и $\Phi_1 = 0$ на свободной поверхности жидкости ($x_1 = h_1$). Полагаем ω_n комплексным числом и в дальнейшем будем обозначать как p_n . Потенциалы скоростей Φ_1, Φ_2 ищем в комплексной форме (8). Удовлетворяя условиям (3), (4) и (6), получаем соотношения, аналогичные соотношениям (9) и (10):

$$\Phi_1 = \sum_{k=1}^{\infty} B_k \left[\left(\lambda_k \frac{x_1}{R} \right) - \left(\lambda_k \frac{h_1}{R} \right) \left(\lambda_k \frac{x_1}{R} \right) \right] J_0 \left(\lambda_k \frac{r}{R} \right); \quad (11)$$

$$\Phi_2 = \sum_{k=1}^{\infty} A_k \left[\left(\lambda_k \frac{x_2}{R} \right) J_0 \left(\lambda_k \frac{r}{R} \right) \right]. \quad (12)$$

Подставляя (11) и (12) в (7), определяем

$$(ip_k) \left[\rho_1 B_k - \rho_2 A_k \left(\lambda_k \frac{h_2}{R} \right) \right] = -\gamma B_k \frac{\lambda_k}{R} \left(\lambda_k \frac{h_1}{R} \right),$$

или

$$(ip_k) \left[\rho_1 - \rho_2 \left(\lambda_k \frac{h_2}{R} \right) \frac{\left(\lambda_k \frac{h_1}{R} \right)}{\left(\lambda_k \frac{h_2}{R} \right)} \right] = -\gamma \frac{\lambda_k}{R} \left(\lambda_k \frac{h_1}{R} \right). \quad (13)$$

Представляя $p_k = \alpha_k + i\beta_k$, из (13) получаем, что $\alpha_k = 0$, следовательно колебания носят апериодический характер.

Рассмотрим случай $g \neq 0$ и используем условие на свободной поверхности (2), которое примет вид

$$-p_k^2 \left(\lambda_k \frac{h_1}{R} \right) \left(\lambda_k \frac{h_2}{R} \right) + g \frac{\lambda_k}{R} \left(\lambda_k \frac{h_1}{R} \right) \left(\lambda_k \frac{h_2}{R} \right) = 0. \quad (14)$$

Представляя $p_k = \alpha_k + i\beta_k$, из (13) и (14) определяем

$$U_k(\alpha_k, \beta_k) = 0;$$

$$V_k(\alpha_k, \beta_k) = 0.$$

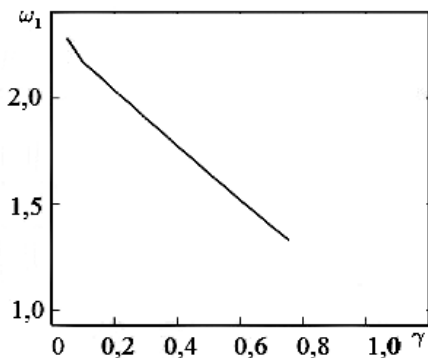


Рис. 2. Зависимость частоты первого тона свободных колебаний жидкости от коэффициента γ

Здесь

$$U_k = \varkappa_k (\alpha_k^2 - \beta_k^2) \frac{\rho_2}{\rho_1} \left(\lambda_k \frac{h_2}{R} \right) - \xi_k (\alpha_k^2 - \beta_k^2) \beta_k \lambda_k + \\ + 2\alpha_k^2 \beta_k \lambda_k + (\alpha_k^2 - \beta_k^2) \left(\lambda_k \frac{h_1}{R} \right) \left(\lambda_k \frac{h_2}{R} \right) - \\ - g \frac{\lambda_k}{R} \left(\lambda_k \frac{h_1}{R} \right) \left(\lambda_k \frac{h_2}{R} \right);$$

$$V_k = 2\alpha_k \beta_k \varkappa_k \frac{\rho_2}{\rho_1} \left(\lambda_k \frac{h_2}{R} \right) - \xi_k (\alpha_k^2 - \beta_k^2) \alpha_k \lambda_k - \\ - 2\alpha_k \beta_k^2 \lambda_k \xi_k + 2\alpha_k \beta_k \left(\lambda_k \frac{h_1}{R} \right) \left(\lambda_k \frac{h_2}{R} \right),$$

где

$$\xi_k = \gamma \frac{\left(\lambda_k \frac{h_1}{R} \right) \varkappa_k}{\rho_1 R (\alpha_k^2 + \beta_k^2)}; \quad \varkappa_k = \left(\lambda_k \frac{h_1}{R} \right) + g \frac{\lambda_k}{R} \left(\lambda_k \frac{h_2}{R} \right).$$

Результаты. Установлено, что при равенстве нулю потенциала скоростей на свободной поверхности жидкости (что может реализовываться при закрытии бака крышкой, плавающей на поверхности жидкости) колебания отсутствуют или имеют апериодический характер. Следует отметить, что при $\gamma = 0$ частота первого тона ω_1 равна частоте симметричных колебаний жидкости в баке, заполненном на высоту $H = h_1 + h_2$. Зависимость частоты первого тона свободных колебаний бака с жидкостью от коэффициента γ приведена на рис. 2.

ЛИТЕРАТУРА

1. Капиллярные системы отбора жидкости из баков космических летательных аппаратов / В.В. Багров, А.В. Курпатенков, В.М. Поляев, А.Л. Синцов, В.Ф. Сухоставец; под ред. В.М. Поляева. М.: УНЦ Энергомаш, 1997. 328 с.

2. Гончаров Д.А. Осесимметричные колебания двухплотностной жидкости в цилиндрическом баке // Электронное научно-техническое издание: Наука и образование. 2012. № 4. [Электронный ресурс] URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/362856.html> (дата обращения: 19.02.2014).
3. Гончаров Д.А. Динамика двухслойной жидкости, разделенной упругой перегородкой с учетом сил поверхностного натяжения // Электронное научно-техническое издание: Наука и образование. 2013. № 11. DOI:10.7463/1113.0619258 [Электронный ресурс] URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/619258.html> (дата обращения: 19.02.2014).
4. Пожалостин А.А. Свободные колебания жидкости в жестком круговом цилиндрическом сосуде с упругим плоским дном // Известия вузов. Сер. Авиационная техника. № 4. 1963. С. 25–32.
5. Шунгаров Э.Х., Гончаров Д.А. Об устойчивости малых колебаний свободной поверхности жидкости // Молодежный научно-технический вестник. 2013. № 4. 24 с. URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/566824.html> (дата обращения: 19.02.2014).
6. Пожалостин А.А., Гончаров Д.А. Свободные осесимметричные колебания двухслойной жидкости с упругим разделителем между слоями при наличии сил поверхностного натяжения // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. Вып. 12. [Электронный ресурс] URL: <http://engjournal.ru/catalog/eng/teormach/1147.html> (дата обращения: 19.02.2014).
7. Петренко М.П. Собственные колебания жидкости со свободной поверхностью и упругого днища цилиндрической полости // Прикладная механика. Т. V. Вып. 6. 1969. С. 44–50.
8. Андронов А.В. Колебания идеальной стратифицированной жидкости в контейнере с упругим днищем // Вопросы волновых движений жидкости: Сб. науч. тр. Краснодар: КубГУ, 1987.
9. Кононов Ю.Н., Татаренко Е.А. Свободные колебания упругих мембран, разделяющих многослойную жидкость в цилиндрическом сосуде с упругим дном // Динамические системы. 2006. Вып. 21. С. 7–13.
10. Кононов Ю.Н., Татаренко Е.А. Свободные колебания многослойной жидкости, разделенной упругими инерционными мембранами // Динамические системы. 2004. Вып. 18. С. 111–118.
11. Нго Зуи Кан. О движении не смешивающихся жидкостей в сосуде с плоским упругим днищем // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. 1979. № 5. С. 151–163.
12. Темнов А.Н., Тэйн У. Осесимметричные колебания оболочки, частично заполненной жидкостью, вытекающей через заборное устройство // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2008. № 1 (70). С. 46–59.
13. Тэйн У. Колебания упругого днища с протекающей жидкостью // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2008. № 2 (71). С. 121–124.
14. Findoyev F., Ghrist M., Best Fr. Development of a Passive Flow Coalescence Device for Two-Phase Phase Separation Under Microgravity // AIP Conference Proceedings. 2005. Vol. 746. P. 141–149. DOI: 10.1063/1.1867128 [Электронный ресурс] URL: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2005AIPC..746..141F> (дата обращения: 19.02.2014).
15. Elston L.J., Yerkes K.L., Thomas S.K., McQuillen J. Qualitative Evaluation of a Liquid-Vapor Separator Concept in Micro-Gravity Conditions // AIP Conference Proceedings. Vol. 1103. P. 3. 2009. DOI: 10/1063/1/3115546 [Электронный ресурс] URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3115546> (дата обращения: 19.02.2014).
16. Gaul L., Papas Z., Kurwitz C., Best Fr. Equilibrium Interface Position During Operation of a Fixed Cylinder Vortex Separator // AIP Conference Proceedings. 2010. Vol. 1208. P. 3. DOI: 10.1063/1.3326268 [Электронный ресурс] URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3326268> (дата обращения: 19.02.2014).

REFERENCES

- [1] Bagrov V.V., Kurpatenkov A.V., Poljaev V.M. (Ed.), Sincov A.L., Suhostavec V.F. Kapilljarnye sistemy otbora zhidkosti iz bakov kosmicheskikh letatel'nyh apparatov [The capillary system of selection of the liquid from the tanks of space vehicles]. Moscow, UNTs Energomash Publ., 1997. 328 p.
- [2] Goncharov D.A. Axisymmetric oscillations of dual-density liquid in the cylindrical tank. *Jelektr. Nauchno-Tehn. Izd. "Nauka i obrazovanie" MGTU im. N.E. Baumana* [El. Sc.-Tech. Publ. "Science and Education" of Bauman MSTU], 2012, no. 4 (in Russ.). Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/362856.html> (accessed 19 February 2014).
- [3] Goncharov D.A. Dynamics of two-layer liquid divided by an elastic dividing wall with an allowance for surface tension forces (with corrections). *Jelektr. Nauchno-Tehn. Izd. "Nauka i obrazovanie" MGTU im. N.E. Baumana* [El. Sc.-Tech. Publ. "Science and Education" of Bauman MSTU], 2013, no. 11 (in Russ.). Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/619258.html> (accessed 19 February 2014). DOI:10.7463/1113.0619258
- [4] Pozhalostin A.A. Free oscillations of liquid in a rigid circular cylindrical vessel with an elastic flat-bottomed. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved., Aviats. Tekh.* [Proc. Univ., Aeronaut.], 1963, no. 4, pp. 25–32 (in Russ.).
- [5] Shungarov E.H., Goncharov D.A. On the stability of small oscillations of the free surface of the liquid. *Jelektr. Nauchno-Tehn. Izd. "Molodezhnyj nauchno-tehnicheskij vestnik" MGTU im. N.E. Baumana* [El. Sc.-Tech. Publ. "Youth Science and Technology Herald" of Bauman MSTU], 2013, no. 4, 24 p. (in Russ.). Available at: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/566824.html> (accessed 19 February 2014).
- [6] Pozhalostin A.A., Goncharov D.A. Free axisymmetric oscillations of a two-layer fluid with an elastic separator between the layers in the presence of surface tension forces. *Jelektr. Nauchno-Tehn. Izd. "Inzhenernyj zhurnal: nauka i innovacii" MGTU im. Baumana* [El. Sc.-Techn. Publ. "Eng. J. "Science and Innovation" of Bauman MSTU], 2013, iss. 12 (in Russ.). Available at: <http://engjournal.ru/catalog/eng/teormach/1147.html> (accessed 19 February 2014).
- [7] Petrenko M.P. Natural oscillations of a fluid with free surface and an elastic bottom of the cylindrical cavity. *Prikl. Mekh.* [Appl. Mech.], 1969, vol. 5, iss. 6, pp. 44–50 (in Russ.).
- [8] Andronov A.V. Kolebanija ideal'noj stratificirovannoj zhidkosti v kontejnere s uprugim dnishhem [Oscillations of an ideal stratified fluid in a container with an elastic bottom]. Sb. nauch. tr. KUB GU "Voprosy volnovyh dvizhenij zhidkosti" [Collect. Pap. of the Kuban State University "Questions of wave motions of fluid"]. Krasnodar, KubGU Publ., 1987.
- [9] Kononov Yu.N., Tatarenko E.A. Free oscillations of elastic membrane separating multilayer liquid in a cylindrical vessel with elastic bottom. *Dinamicheskie sistemy. Mezhvedomstvennyj nauchnyj sbornik* [Dynamical systems. Interdepartmental scientific collection], 2006, iss. 21, pp. 7–13 (in Russ.).
- [10] Kononov Yu.N., Tatarenko E.A. Free oscillations of a multilayer fluid divided by inertial elastic membranes. *Mezhvedomstvennyj nauchnyj sbornik "Dinamicheskie sistemy"* [Interdepartmental sci. collect. papers "Dynamical systems"], 2004, iss. 18, pp. 111–118 (in Russ.).
- [11] Ngo Zuj Kan. On the motion of immiscible liquids in a vessel with a flat elastic bottom. *Izv. Akad. Nauk, Mekh. Tverd. Tela* [Mech. Solids], 1979, no. 5, pp. 151–163 (in Russ.).
- [12] Temnov A.N., Tane U. Axisymmetric oscillations of a shell partially filled with water flowing through the intake device. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2008, no. 1 (70), pp. 46–59 (in Russ.).

- [13] Tane U. Oscillations of elastic bottoms with flowing liquid. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2008, no. 2 (71), pp. 121–124 (in Russ.).
- [14] Finodeyev F., Ghrist M., Best Fr. Development of a passive flow coalescence device for two-phase phase separation under microgravity. *Proc. Conf. "AIP"*, 2005, vol. 746. pp. 141–149. Available at: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2005AIPC..746..141F> (accessed 19 February 2014). DOI: 10.1063/1.1867128
- [15] Elston L.J., Yerkes K.L., Thomas S.K., McQuillen J. Qualitative evaluation of a liquid-vapor separator concept in micro-gravity conditions. *Proc. Conf. "AIP"*, 2009, vol. 1103, no. 3. Available at: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3115546> (accessed 19 February 2014). DOI: 10/1063/1/3115546
- [16] Gaul L., Papas Z., Kurwitz C., Best Fr. Equilibrium interface position during operation of a fixed cylinder vortex separator. *Proc. Conf. "AIP"*, 2010, vol. 1208, p. 3. Available at: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3326268> (accessed 19 February 2014). DOI: 10.1063/1.3326268

Статья поступила в редакцию 24.02.2014

Алексей Алексеевич Пожалостин — д-р техн. наук, профессор кафедры “Теоретическая механика им. профессора Н.Е. Жуковского” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 150 научных работ в области гидроупругости.

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

A.A. Pozhalostin — Dr. Sci. (Eng.), professor of “Theoretical Mechanics n.a. Professor N.E. Zhukovskiy” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 150 publications in the field of hydroelastic.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Дмитрий Александрович Гончаров — аспирант кафедры “Теоретическая механика им. профессора Н.Е. Жуковского” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специализируется в области гидродинамики и динамики космических аппаратов.

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

D.A. Goncharov — post-graduate of “Theoretical Mechanics n.a. Professor N.E. Zhukovsky” department of the Bauman Moscow State Technical University. Specialist in the field of fluid dynamics and spacecraft dynamics.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Вячеслав Вячеславович Кокушкин — д-р техн. наук, профессор кафедры “Теоретическая механика им. профессора Н.Е. Жуковского” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 научных работ в области прикладной механики.

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

V.V. Kokushkin — Dr. Sci. (Eng.), professor of “Theoretical Mechanics n.a. Professor N.E. Zhukovskiy” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 100 publications in the field of applied mechanics.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.