

УДК 532.5.031

Экспериментально-аналитический метод определения коэффициента сопротивления разделителя слоев жидкости в баке

Пожалостин А. А.¹, Гончаров Д. А.^{1,*},
Кокушкин В. В.^{1,2}

* goncharov@bmstu.ru

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

²РКК «Энергия» им. С.П. Королева, Королев, Россия

Рассматривается задача о малых осесимметричных колебаниях двухслойной жидкости с разделителем, выполненным на основе пеноматериала. Разделитель полагается жестким и недеформируемым, течение жидкости сквозь разделитель моделируется как течение с некоторым линейно-вязким сопротивлением. Жидкость полагается идеальной и несжимаемой, ее течение — потенциальным. Изложен экспериментально-аналитический метод нахождения такого коэффициента сопротивления. Рассматриваемая модель может служить для анализа динамического взаимодействия жидкости и фазоразделителя разгонного блока или старших ступеней ракет-носителей.

Ключевые слова: жидкость; фазоразделитель; осесимметричные колебания; разделитель; коэффициент сопротивления

Введение

В работе [1] рассматривалась задача о колебаниях двухслойной жидкости, разделенной недеформируемым проницаемым разделителем, где для учета взаимодействия жидкости с разделителем вводится приведенный коэффициент, который предполагается определять экспериментально, и, таким образом, обобщались результаты [4, 5] на случай движения двухслойной жидкости сквозь сопротивление. В настоящей работе рассмотрим экспериментально-аналитический метод определения коэффициента сопротивления. В работе [6] исследовалось движение идеальной, несжимаемой и нестратифицированной жидкости совместно с упругим днищем. В статье [7] исследовались вопросы устойчивости свободной поверхности жидкости в условиях малой гравитации. Свободные осесимметричные колебания двухслойной жидкости с непроницаемым разделителем исследовались в работе [8]. Схожая с [6] постановка задачи с иным подходом к разрешению дифференциального уравнения движения пластины реализовывалась в работе [9]. Работа [10] посвящена исследованию движений стратифицированной жидкости совместно с упругим днищем, рассматриваемым

в виде пластины. Работы [11, 12] посвящены исследованию колебаний многослойных жидкостей и разделяющих мембран. В работе [13] задача о движении стратифицированной жидкости, разделенной мембраной, рассматривалась с применением операторных методов и исследованием свойств спектра. В работе [2] исследовались колебания оболочки при протекании жидкости сквозь проницаемую перегородку. Статья [14] посвящена исследованию задачи о малых движениях несжимаемой жидкости, вытекающей из бака произвольной формы через плоскую поверхность слива. В [15] рассмотрена задача, порожденная проблемой перераспределения топлива, находящегося в баках ракет-носителей пакетной схемы, с целью получить максимальный прирост энергетики выведения полезной нагрузки. Операторная постановка задачи о малых движениях жидкости, вытекающей из бака, рассмотрена в [16]. В работе [17] исследовались колебания упругой проницаемой перегородки, взаимодействующей с жидкостью. В работах [18, 19, 20] изложены аспекты экспериментальных исследований разделителей.

1. Постановка задачи

Схематическое изображение экспериментальной установки приведено на рис. 1.

На рис. 2 приведена фотография материала разделителя (пеноникель).

Будем рассматривать движение жидкости в баке 1 (см. рис. 1). Введем системы координат в соответствии с рис. 3. Жидкость считаем идеальной и несжимаемой, ее движение — осесимметричным и потенциальным с потенциалом скоростей $\Phi_i(x_i, r, t)$, $i = 1, 2$. Индекс 1 относится к объему τ_1 , индекс 2 — к объему τ_2 . Полость, заполненную жидкостью, считаем цилиндрической радиуса R и абсолютно жесткой.

Предположим, что сила сопротивления разделителя $F_i^{(r)}(r, t)$ подчиняется закону

$$F_i^{(r)}(r, t) = \gamma \frac{\partial \Phi_i(x_i, r, t)}{\partial x_i}. \quad (1)$$

Вибровозбудитель задает баку с жидкостью возмущающее перемещение в вертикальном направлении $u(t) = u_0 \cos(pt)$, где u_0 — амплитуда возмущающего воздействия, p — частота. Экспериментальное исследование симметричных свободных колебаний x_1 проводится методом вынужденных колебаний.

2. Проведение эксперимента

Эксперимент состоит из двух этапов. На первом этапе разделитель отсутствует. Период этих колебаний — T , его определяем непосредственно по данным, получаемым с ЭВМ, связанной с возбудителем. График колебаний представлен на рис. 4. Здесь $s(t)$ — временной множитель в потенциале скоростей

$$\Phi_i(x, r, t) = A_i \operatorname{ch}\left(\lambda \frac{x_i}{R}\right) J_0\left(\lambda \frac{x_i}{R}\right) s(t). \quad (2)$$

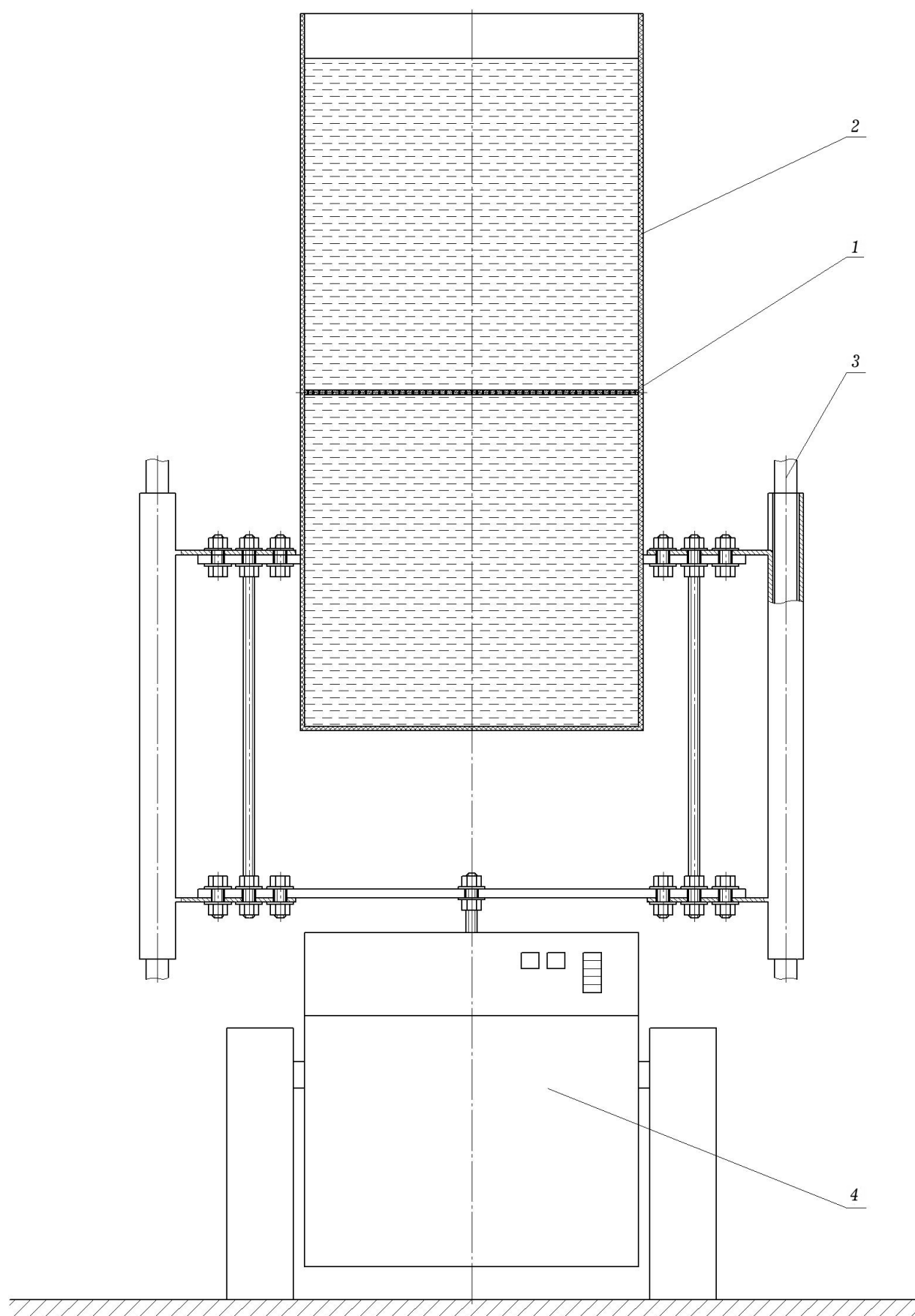


Рис. 1. Схема установки: 1 — разделитель; 2 — бак с жидкостью; 3 — направляющие; 4 — вибровозбудитель

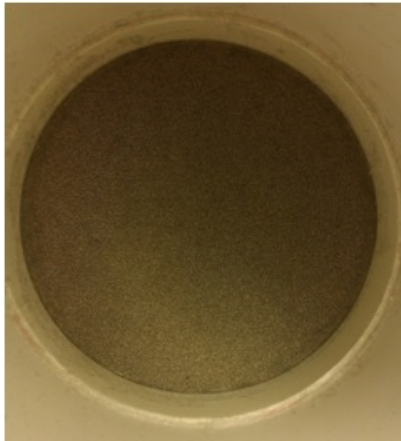


Рис. 2. Разделитель из пеноникеля

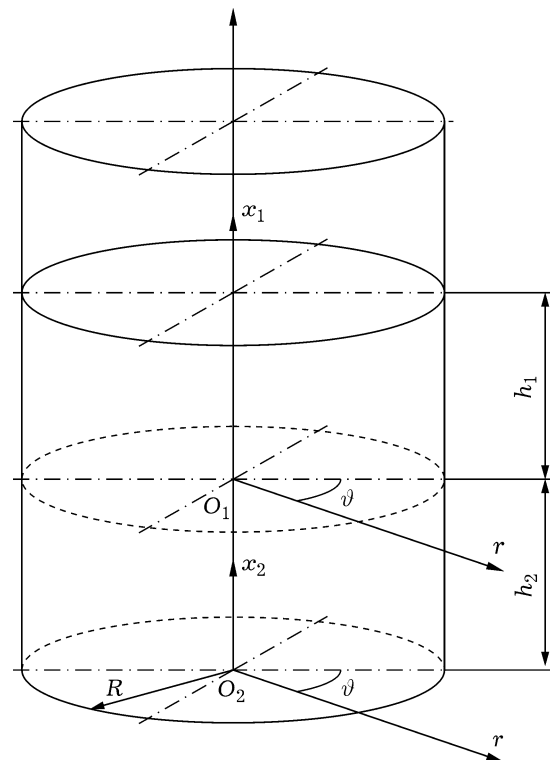


Рис. 3. Системы координат, вводимые применительно к баку с жидкостью 1, обозначенному на схеме установки (см. рис. 1)

Формула (2) представляет собой выражение функции Φ для первого тона симметричных колебаний жидкости в баке без разделителя. Сопротивление колебаниям отсутствует. На втором этапе исследуются колебания бака с разделителем. Возбуждаются симметричные колебания жидкости и определяется период T_1 первого тона колебаний системы с сопротивлением. Полагая демпфирование в системе линейно-вязким находим коэффициент затухания по известной формуле

$$n_{\text{exp}}^2 = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 - \left(\frac{2\pi}{T_1}\right)^2, \quad (3)$$

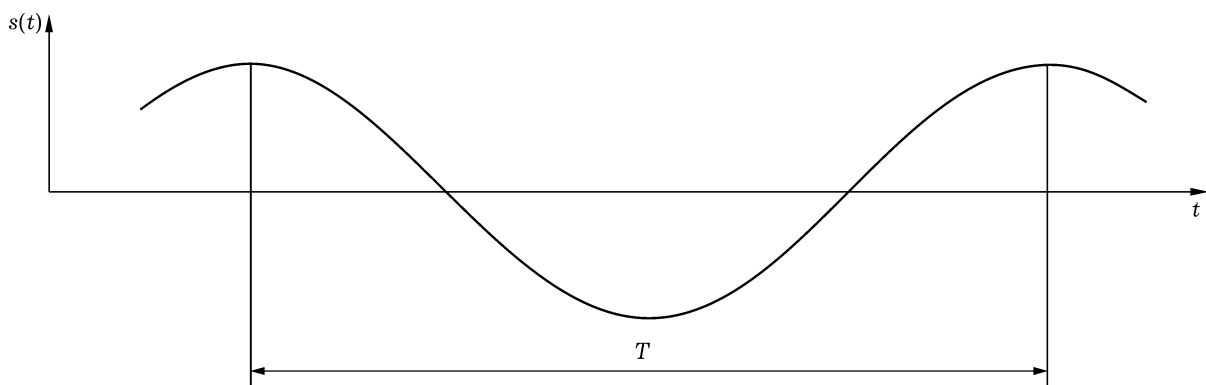


Рис. 4. График колебаний

где n — коэффициент затухания T_1 ; T — периоды симметричных колебаний жидкости в баке учетом и без учета разделителя соответственно. Таким образом, имеем

$$n_{\text{exp}} = 2\pi \sqrt{\left(\frac{1}{T}\right)^2 - \left(\frac{1}{T_1}\right)^2}. \quad (4)$$

Дифференциальные уравнения движения механического аналога имеют вид

$$m^0 \frac{d^2 y}{dt^2} + k \frac{dy}{dt} + c^0 y = 0. \quad (5)$$

В (5) речь идет о первом тоне свободных колебаний бака с разделителем, заполненным на высоту $h_1 + h_2$. Приведенную массу m^0 вычисляем по формуле

$$m^0 = \frac{\rho}{2} \left(\int_{S_1} \Phi_1 \frac{\partial \Phi_1}{\partial \mathbf{n}_1} dS_1 + \int_{S_2} \Phi_2 \frac{\partial \Phi_2}{\partial \mathbf{n}_2} dS_2 \right), \quad (6)$$

где ρ — плотность жидкости; Φ_1, Φ_2 — потенциалы скоростей жидкости выше и ниже разделителя соответственно; $\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2$ — векторы нормали к смачиваемым цилиндрическим поверхностям выше и ниже разделителя; S_1, S_2 — площади этих поверхностей.

Приведем (5) к каноническому виду

$$m^0 \frac{d^2 y}{dt^2} + 2n \frac{dy}{dt} + \omega_1^2 y = 0, \quad (7)$$

где $2n_{\text{exp}} = \frac{k}{m^0}$ — коэффициент затухания системы с разделителем. В дальнейшем будем исходить из постулата

$$n_{\text{exp}} = n_1(\gamma), \quad (8)$$

где n_{exp} — коэффициент затухания, получаемый из эксперимента; $n_1(\gamma)$ — коэффициент затухания, найденный аналитически.

Далее используем результаты, изложенные в [1]. В этой работе частотный параметр p принят в соответствии с представлением

$$p = \alpha + i\beta,$$

временной множитель в выражении для потенциала скоростей имел следующий вид:

$$e^{ipt} = e^{-\beta t} \cdot e^{i\alpha t}.$$

Здесь первый сомножитель временного множителя в выражении для потенциала скоростей Φ характеризует затухание колебаний, а второй — частоту свободных гармонических колебаний. На этом основании можно утверждать, что $n = \beta$. В выражение для β входит величина искомого коэффициента γ . На основании [1] можно получить трансцендентное уравнение, в котором будут присутствовать величины α и β . Для первого тона колебаний это уравнение имеет вид

$$2\alpha\beta\chi_1 \operatorname{ch}\left(\lambda_1 \frac{h_2}{R}\right) - \xi_1(\alpha^2 - \beta^2)\alpha\lambda_1 - 2\alpha\beta^2\lambda_1\xi_1 + 2\alpha\beta \operatorname{sh}\left(\lambda_1 \frac{h_1}{R}\right) \operatorname{sh}\left(\lambda_1 \frac{h_2}{R}\right) = 0, \quad (9)$$

где λ_1 — корень функции Бесселя I-го рода первого порядка;

$$\xi_1 = \gamma \frac{\operatorname{sh}\left(\lambda_1 \frac{h_1}{R}\right) \chi_1}{\varrho R(\alpha^2 - \beta^2)}, \quad \chi_1 = \operatorname{ch}\left(\lambda_1 \frac{h_1}{R}\right) + g \frac{h_1}{R} \operatorname{sh}\left(\lambda_1 \frac{h_1}{R}\right). \quad (10)$$

Подставим в выражение (9) вместо α и β их значения, найденные экспериментально, т.е. $\alpha = \omega_1$, $\beta = n_{\text{exp}}$. Тогда из (9) получим формулу для искомого коэффициента γ , которая поле несложных преобразований с учетом (10) примет вид

$$\gamma = \frac{(n_{\text{exp}}^2 - \omega_1^2) \chi_1 + \frac{g \lambda_1}{R} \chi_2}{n_{\text{exp}} \operatorname{sh}\left(\lambda_1 \frac{h_2}{R}\right) \left[\operatorname{ch}\left(\lambda_1 \frac{h_1}{R}\right) + \frac{g}{(n_{\text{exp}}^2 + \omega_1^2)} \frac{\lambda_1}{R} \operatorname{sh}\left(\lambda_1 \frac{h_1}{R}\right) \right]},$$

где

$$\begin{aligned} \chi_1 &= \operatorname{ch}\left(\lambda_1 \frac{h_2}{R}\right) \operatorname{ch}\left(\lambda_1 \frac{h_1}{R}\right) + \operatorname{sh}\left(\lambda_1 \frac{h_2}{R}\right) \operatorname{sh}\left(\lambda_1 \frac{h_1}{R}\right), \\ \chi_2 &= \operatorname{ch}\left(\lambda_1 \frac{h_2}{R}\right) \operatorname{sh}\left(\lambda_1 \frac{h_1}{R}\right) + \operatorname{sh}\left(\lambda_1 \frac{h_2}{R}\right) \operatorname{ch}\left(\lambda_1 \frac{h_1}{R}\right). \end{aligned}$$

Заключение

Таким образом, показана связь между аналитической зависимостью коэффициента затухания при симметричных колебаниях жидкости в баке с сопротивлением с коэффициентом затухания определяемым экспериментально, что позволяет осуществить экспериментальное определение значение коэффициента сопротивления γ с целью дальнейшего подробного исследования динамики взаимодействия жидкости с разделителем.

Работа выполнена в рамках гранта Президента РФ НШ-4058.2014.8.

Список литературы

1. Пожалостин А.А., Гончаров Д.А., Кокушкин В.В. Малые колебания двухслойной жидкости с учетом проницаемости разделителя // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2014. № 5. С. 109–116.
2. Темнов А.Н., Тэйн У. Осесимметричные колебания оболочки, частично заполненной жидкостью, вытекающей через заборное устройства // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2008. № 1. С. 46–59.
3. Багров В.В., Курпатенков А.В., Поляев В.М., Синцов А.Л., Сухоставец В.Ф. Капиллярные системы отбора жидкости из баков космических летательных аппаратов / под ред. В.М. Поляева. М.: УНЦ Энергомаш, 1997. 328 с.
4. Гончаров Д.А. Осесимметричные колебания двухплотностной жидкости в цилиндрическом баке // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 4. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/362856.html> (дата обращения: 01.03.2015).

5. Гончаров Д.А. Динамика двухслойной жидкости, разделенной упругой перегородкой с учетом сил поверхностного натяжения // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э.Баумана. Электрон. журн. 2013. № 11. С. 547–556. DOI: [10.7463/1113.0619258](https://doi.org/10.7463/1113.0619258)
6. Пожалостин А.А. Свободные колебания жидкости в жестком круговом цилиндрическом сосуде с упругим плоским дном // Известия ВУЗов. Авиационная техника. 1963. № 4. С. 25–32.
7. Шунгаров Э.Х., Гончаров Д.А. Об устойчивости малых колебаний свободной поверхности жидкости // Молодежный научно-технический вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. № 4. Режим доступа: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/566824.html> (дата обращения 01.03.2015).
8. 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. № 12. Режим доступа: <http://engjournal.ru/catalog/eng/teormach/1147.html> (дата обращения 01.03.2015).
9. Петренко М.П. Собственные колебания жидкости со свободной поверхностью и упругого днища цилиндрической полости // Прикладная механика. 1969. Т. 5, № 6. С. 44–50.
10. Андронов А.В. Колебания идеальной стратифицированной жидкости в контейнере с упругим днищем // Вопросы волновых движений жидкости: сб. науч. тр. Краснодар: КубГУ, 1987. С. 7–15.
11. 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.
12. Кононов Ю.Н., Татаренко Е.А. Свободные колебания многослойной жидкости, разделенной упругими инерционными мембранами // Динамические системы. 2004. Вып. 18. С. 111–118.
13. Нго Зуй Кан. О движении не смешивающихся жидкостей в сосуде с плоским упругим днищем // Известия АН СССР. Механика твердого тела. 1979. № 5. С. 151–163.
14. Степанова М.И., Темнов А.Н. Малые движения жидкости с поверхностной диссипацией энергии // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2011. № 4. С. 99–110.
15. Дьяченко М.И., Темнов А.Н. Собственные колебания жидкого топлива в условиях перераспределения // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2012. № 3. С. 31–38.
16. Орлов В.В., Темнов А.Н. Малые движения жидкости, вытекающей из бака // Современные методы теории функций и смежные проблемы: тез. докл. Воронеж: 1997. С. 124.
17. Тэйн У. Колебания упругого днища с протекающей жидкостью // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение. 2008. № 2. С. 121–124.

18. Finodeyev F., Ghrist M., Best F. Development of a Passive Flow Coalescence Device for TwoPhase Phase Separation Under Microgravity // AIP Conference Proceedings. 2005. Vol. 746. P. 141–149. DOI: [10.1063/1.1867128](https://doi.org/10.1063/1.1867128)
19. Elston L.J., Yerkes K.L., Thomas S.K., McQuillen J. Qualitative Evaluation of a LiquidVapor Separator Concept in MicroGravity Conditions // AIP Conference Proceedings. 2009. Vol. 1103. P. 3–13. DOI: [10/1063/1/3115546](https://doi.org/10/1063/1/3115546)
20. Gaul L., Papas Z., Kurwitz C., Best F. Equilibrium Interface Position During Operation of a Fixed Cylinder Vortex Separator // AIP Conference Proceedings. 2010. Vol. 1208. P. 3-11. DOI: [10.1063/1.3326268](https://doi.org/10.1063/1.3326268)

Experimental and Analytical Method for Determining a Drag Coefficient of the Double-Layer Liquid Separator

Pozhalostin A. A.¹, Goncharov D. A.^{1,*},
Kokushkin V. V.^{1,2}

*goncharov@bmstu.ru

¹Bauman Moscow State Technical University, Russia

²Korolev Rocket and Space Corporation “Energia”, Russia

Keywords: liquid, phase separator, axisymmetric oscillations, separator, the drag coefficient

The paper considers a problem of small axisymmetric oscillations of two-layer liquid with a foam-based separator. The separator is supposed to be rigid and non-deformable, liquid flow through the separator is modeled as a stream with a certain linear-viscous resistance. The liquid is assumed to be ideal and incompressible, its stream being potential. The paper presents experimental and analytical method for finding such a drag coefficient.

The work [1] considered the problem of oscillations of a two-layer liquid divided by non-deforming permeable separator where, taking into consideration the interaction between liquid and separator, a reduced drag coefficient is introduced, which is expected to be determined experimentally, thereby generalizing the results of works [4] and [5] in case of moving two-layer liquid through a resistance. The work [6] investigated the motion of ideal incompressible and non-stratified liquid together with the elastic bottom. The work [7] studied a stability of the free liquid surface in low gravity. The paper [8] examined free axially symmetric oscillations of a two-layer liquid with an impermeable separator.

Analytical dependence for the drag coefficient obtained in the paper [1] contains the frequency values of free harmonic oscillation system with no resistance (with a missing delimiter) and the damping coefficient for the system with resistance (with a separator available). These values can be obtained experimentally if the tank model oscillations with a separator and without it are excited and the natural frequencies of these oscillations are determined. The model under consideration can be used to analyze dynamic interaction between liquid and phase separator of the upper stage or launch vehicle stage and provide ground experimental method for the starting systems from the gravity-free state and low gravity one.

The article shows the relationship of the analytic dependence of the damping coefficient at symmetric oscillations of liquid in a tank with resistance to the damping coefficient obtained experimentally that allows us to determine experimentally a drag coefficient value for further detailed study of interaction dynamics between liquid and separator.

References

1. Pozhalostin A.A., Goncharov D.A., Kokushkin V.V. Small Oscillations of Two-Layer Liquid in View Permeability of Separator. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Estestvennye nauki* = *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Natural science*, 2014, no. 5, pp. 109–116. (in Russian).
2. Temnov A.N., Tein U. Axisymmetric Oscillations of Shell that Is Partly Filled with Liquid Escaping through Intake. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie* = *Herald of the Bauman MSTU. Ser. Mechanical Engineering*, 2008, no. 1, pp. 46–59. (in Russian).
3. Bagrov V.V., Kurpatenkov A.V., Polyayev V.M., Sintsov A.L., Sukhostavets V.F. *Kapillyarnye sistemy otbora zhidkosti iz bakov kosmicheskikh letatel'nykh apparatov* [Capillary system of selection of fluid from the tank of spacecraft]. Moscow, UNTs Energomash Publ., 1997. 328 p. (in Russian).
4. Goncharov D.A. Axisymmetric oscillations of dual-density liquid in the cylindrical tank. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana* = *Science and Education of the Bauman MSTU*, 2012, no. 4. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/362856.html>, accessed 01.03.2015. (in Russian).
5. Goncharov D.A. Dynamics of two-layer liquid, divided by an elastic baffle considering surface tension forces (with corrections). *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana* = *Science and Education of the Bauman MSTU*, 2013, no. 11, pp. 547–556. DOI: [10.7463/1113.0619258](https://doi.org/10.7463/1113.0619258) (in Russian).
6. Pozhalostin A.A. Free oscillations of liquid in rigid circular cylindrical vessel with elastic flat-bottomed. *Izvestiia VUZov. Aviatsonnaia tekhnika*, 1963, no. 4. pp. 25–32. (in Russian).
7. Shungarov E.Kh., Goncharov D.A. On the stability of small oscillations of the free surface. *Molodezhnyi nauchno-tekhnicheskii vestnik MGTU im. N.E. Baumana* = *Youth Science and Technology Herald of the Bauman MSTU*, 2013, no. 4. Available at: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/566824.html>, accessed 01.03.2015. (in Russian).
8. Pozhalostin A.A., Goncharov D.A. Free axisymmetric oscillations of two-layered liquid with the elastic separator between layers in the presence of surface tension forces. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* = *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2013, no. 12. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/eng/teormach/1147.html>, accessed 01.03.2015. (in Russian).

9. Petrenko M.P. Natural oscillation of a fluid with free surface and the elastic bottom of a cylindrical cavity. *Prikladnaia mekhanika*, 1969, vol. 5, no. 6, pp. 44–50 (English version of journal: *Soviet Applied Mechanics*, 1969, vol. 5, iss. 6, pp. 593–597. DOI: [10.1007/BF00887521](https://doi.org/10.1007/BF00887521)).
10. Andronov A.V. Oscillations of ideal stratified fluid in container with elastic bottom. *Voprosy volnovykh dvizhenii zhidkosti: sb. nauch. tr.* [Questions of wave motions of fluid: collected papers]. Krasnodar, KubSU Publ., 1987, pp. 7–15. (in Russian).
11. Kononov Yu.N., Tatarenko E.A. Free oscillations of elastic membranes divided the multilied fluid in cylindrical tank with elastic bottom. *Dinamicheskie sistemy*, 2006, iss. 21, pp. 7–13. (in Russian).
12. Kononov Yu.N., Tatarenko E.A. Free vibrations of multilayered fluid inertia divided by elastic membranes. *Dinamicheskie sistemy*, 2004, iss. 18, pp. 111–118. (in Russian).
13. Ngo Zui Kan. On the motion of immiscible fluids in a vessel with a flat bottom elastic. *Izvestiya AN SSSR. Mekhanika tverdogo tela = Journal of USSR Academy of Sciences. Mechanics of Solids*, 1979, no. 5, pp. 151–163. (in Russian).
14. Stepanova M.I., Temnov A.N. Small motions of liquid with surface energy dissipation. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Estestvennye nauki = Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Natural science*, 2011, no. 4, pp. 99–110. (in Russian).
15. D'yachenko M.I., Temnov A.N. Natural oscillations of liquid propellant under redistribution conditions. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie = Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Mechanical Engineering*, 2012, no. 3, pp. 31–38. (in Russian).
16. Orlov V.V., Temnov A.N. Small movement of the liquid flowing out of the tank. *Sovremennye Metody Teorii Funktsiy i Smezhnye Problemy: tez. dokladov* [Modern Methods of the Theory of Functions and Related Problems: abstracts]. Voronezh, VSU Publ., 1997, p. 124. (in Russian).
17. Tane U. Oscillations of Elastic Bottom with Flowing Liquid. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie = Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Mechanical Engineering*, 2008, no. 2, pp. 121–124. (in Russian).
18. Finodeyev F., Ghrist M., Best F. Development of a Passive Flow Coalescence Device for Two-Phase Phase Separation Under Microgravity. *AIP Conference Proceedings*, 2005, vol. 746, pp. 141–149. DOI: [10.1063/1.1867128](https://doi.org/10.1063/1.1867128)
19. Elston L.J., Yerkes K.L., Thomas S.K., McQuillen J. Qualitative Evaluation of a Liquid-Vapor Separator Concept in MicroGravity Conditions. *AIP Conference Proceedings*, 2009, vol. 1103, pp. 3–13. DOI: [10/1063/1/3115546](https://doi.org/10.1063/1.3115546)
20. Gaul L., Papas Z., Kurwitz C., Best F. Equilibrium Interface Position During Operation of a Fixed Cylinder Vortex Separator. *AIP Conference Proceedings*, 2010, vol. 1208, pp. 3–11. DOI: [10.1063/1.3326268](https://doi.org/10.1063/1.3326268)