

УДК 629.7.015.4

DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-2-60-68

Экспериментальные исследования влияния подвижности жидкости в баке на динамические характеристики системы «модель крыла – топливный бак»

Г.Б. Варданын¹, А.С. Кочетов¹, Ю.В. Петров¹

¹*Московский государственный технический университет гражданской авиации,
Москва, Россия*

Аннотация: Упругие колебания элементов конструкции планера самолета при действии эксплуатационных нагрузок являются одним из основных источников накопления усталостных повреждений. Известно, что подвижность топлива в баках может изменять динамические (частоты и формы собственных колебаний) и диссипативные (декременты затухания колебаний) свойства упругой системы, включающей баки, частично или полностью заполненные топливом. При этом волновое движение топлива в баках за счет дополнительной диссипации энергии колебаний упругой системы может оказывать существенное влияние как на усталостные, так и на аэроупругие характеристики элементов конструкции воздушного судна. Теоретические и экспериментальные исследования применительно к большинству эксплуатирующихся в настоящее время транспортных самолетов показали, что топливо при моделировании динамических явлений и решении задач аэроупругости можно рассматривать условно затвердевшим, что фактически не влияет на конечный результат. Появление современных тяжелых транспортных самолетов с крылом большого удлинения и четырьмя двигателями на пилонах под крылом привело к существенному изменению динамической картины взаимодействия ЛА с окружающей средой. Основная особенность заключается в том, что при данной компоновке в число основных упругих тонов, определяющих динамическую реакцию на внешние воздействия, входит первый тон горизонтально-изгибных колебаний крыла. В этом случае модель затвердевшего топлива может оказать существенное влияние на точность прогнозирования динамических нагрузок и, как следствие, на количественные показатели долговечности и аэроупругости. В статье приводятся результаты экспериментальных исследований влияния подвижности жидкости в баке на динамические характеристики (частоты собственных колебаний и амплитуды вынужденных колебаний) системы «модель крыла – бак». Описана конструкция экспериментальной установки и методика проведения экспериментов. В процессе эксперимента бак частично или полностью заполнялся жидкостью, исследовались горизонтально-изгибные формы колебаний модели крыла, для которых учет подвижности жидкости в баке наиболее актуален. Определены уровни заправки бака, при которых достигается наибольший эффект демпфирования колебания системы за счет рассеивания энергии при волновом движении жидкости. Проанализировано влияние различных факторов (наличие верхней крышки, внутреннего силового набора, перфорации в силовом наборе) на амплитуды и частоты вынужденных колебаний.

Ключевые слова: волновое движение жидкости, динамические характеристики, частота и амплитуда колебаний, амплитудно-частотные характеристики.

Для цитирования: Варданын Г.Б., Кочетов А.С., Петров Ю.В. Экспериментальные исследования влияния подвижности жидкости в баке на динамические характеристики системы «модель крыла – топливный бак» // Научный Вестник МГТУ ГА. 2024. Т. 27, № 2. С. 60–68. DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-2-60-68

Experimental studies of the impact of fluid sloshing in the tank on the dynamic characteristics of the “wing model – fuel tank” system

G.B. Vardanyan¹, A.S. Kochetov¹, Y.V. Petrov¹

¹*The Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia*

Abstract: Flexible response of the airframe structural elements under operational loads are one of the main sources of fatigue damage accumulation. It is known that fuel sloshing in tanks can change the dynamic (frequencies and shapes of natural oscillations) and dissipative properties (oscillation damping decrements) of an elastic system, including partially or completely fuel-filled tanks. It is specified that fuel sloshing in tanks due to the additional oscillation energy dissipation of the elastic system can

have a significant impact on both the fatigue and aeroelastic characteristics of aircraft structural elements. Theoretical and experimental studies, applicably to the majority of currently operating transport aircraft, have shown that when modeling dynamic phenomena and solving aeroelasticity problems, fuel can be considered conditionally solidified, which actually does not affect the resultant effect. The advent of modern heavy transport aircraft with a high aspect ratio wing and four engines on pylons under the wing has led to a considerable change in the dynamic picture of the aircraft interaction with the environment. The main feature is that, under this arrangement, the first horizontal bending mode of the wing is embedded in the main flexible modes that determine the dynamic response to external effects. In this case, the model of solidified fuel can have a significant impact on the accuracy of predicting dynamic loads and, as a consequence, on the quantitative characteristics of durability and aeroelasticity. The article presents the results of experimental studies of the impact of fluid sloshing in the tank on the dynamic characteristics (frequencies of natural oscillations and amplitudes of forced oscillations) of the “wing model – fuel tank” system. The design of the experimental installation and the methodology of conducting experiments are described. During the experiment, the tank was partially filled with liquid or full, and horizontal bending modes of the wing model, for which considering liquid sloshing in the tank is the most relevant, were studied. The tank refueling levels are determined at which the maximum effect of the system oscillation damping is achieved due to energy dissipation under liquid sloshing. The effect of various factors (presence of a top cover, internal structural frame, perforation in the structural frame) on the amplitudes and frequencies of forced oscillations is analyzed.

Key words: liquid sloshing, dynamic characteristics, oscillatory frequency and amplitude, frequency response.

For citation: Vardanjan, G.B., Kochetov, A.S., Petrov, Y.V. (2024). Experimental studies of the impact of fluid sloshing in the tank on the dynamic characteristics of the “wing model – fuel tank” system. Civil Aviation High Technologies, vol. 27, no. 2, pp. 60–68. DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-2-60-68

Введение

Упругие колебания элементов конструкции планера самолета при действии эксплуатационных нагрузок являются одним из основных источников накопления усталостных повреждений. В ряде теоретических и экспериментальных исследований для баков различной формы показано [1–16], что подвижность жидкости в баках может изменять частоты и формы собственных колебаний технических объектов с полостями частично или полностью заполненными жидкостью. Кроме того, при определенных условиях существенно изменяется уровень и повторяемость действующих на конструкцию нагрузок от подвижной жидкости, что оказывает влияние на интенсивность накопления усталостных повреждений в элементах конструкции. Подвижность топлива в баках также влияет и на характеристики аэроупругости элементов конструкции воздушного судна [2, 3].

Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования применительно к большинству эксплуатирующихся транспортных самолетов показали, что топливо при решении динамических задач можно рассматривать условно затвердевшим, что фактически не влияет на конечный результат. Появление современных тяжелых транспорт-

ных самолетов с крылом большого удлинения и четырьмя двигателями на пилонах под крылом привело к существенному изменению динамической картины взаимодействия ЛА с окружающей средой. Основная особенность заключается в том, что при данной компоновке в число основных упругих тонов, определяющих динамическую реакцию на внешние воздействия, входит первый тон горизонтально-изгибных колебаний крыла. В этом случае, как показали проведенные исследования [2, 3], модель затвердевшего топлива может оказать существенное влияние на точность прогнозирования динамических нагрузок и, как следствие, на количественные показатели долговечности.

Известные аналитические решения не позволяют адекватно ответить на ряд важных вопросов: как уровень заправки топливного бака влияет на динамические и диссипативные характеристики системы «крыло – бак» в целом; как оценить значения парциальных логарифмических декрементов затухания волнового движения топлива в баках для использования при математическом моделировании; выявить наиболее рациональную конструктивную схематизацию баков при моделировании; каково влияние верхней панели крыла на волновое движение топлива в баках при различных уровнях заправки.

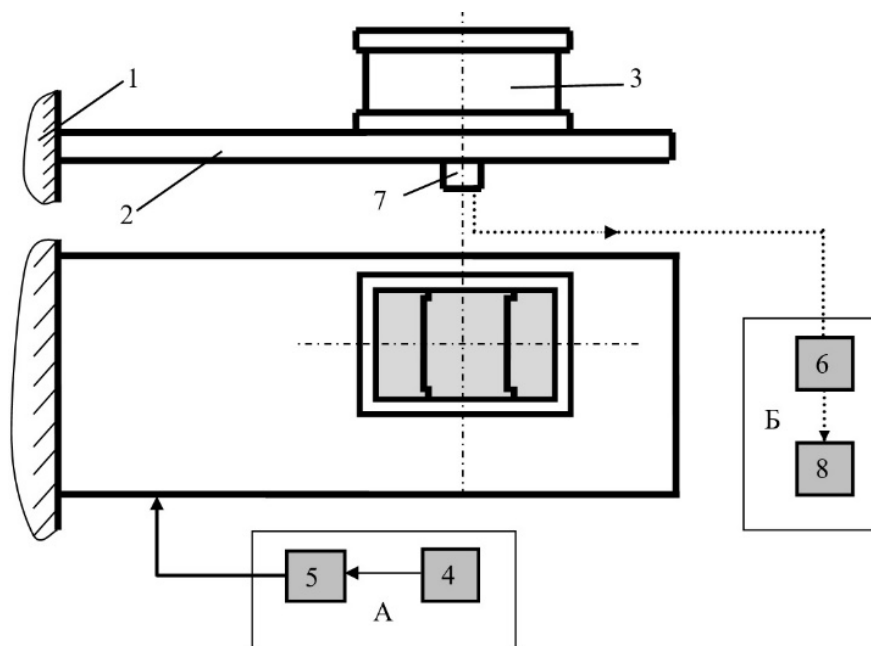


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки
Fig. 1. Schematic diagram of the experimental installation

Методы исследования

Решению некоторых из указанных вопросов и посвящены данные экспериментальные исследования. Схема экспериментальной установки, предназначенной для исследования влияния подвижности жидкости в баках, изображена на рис. 1.

На массивном основании 1 жестко закреплена балка 2, моделирующая крыло летательного аппарата, инерционно-массовые и жесткостные параметры которой известны. На балке установлен бак 3, изготовленный из дюралюминиевых пластин с верхней крышкой из органопластика. Бак представляет собой геометрически подобный фрагмент бака отсека типового крыла тяжелого транспортного самолета. Реальный бак крыла самолета схематизируется прямоугольным параллелепипедом. Предусмотрена возможность установки внутри бака до пяти дополнительных нервюр (стенок). Набор нервюр включает сплошные стенки, а также стенки с перфорацией различной суммарной площади. Бак заполнялся водой.

Блок возбуждения А (рис. 1) включает генератор сигналов 4 и электродинамический

вибратор 5. Посредством блока А возбуждались вынужденные гармонические колебания балки в горизонтальной плоскости в частотном диапазоне $f_B = 2.5...4.5$ Гц, внутри которого находится собственная частота первого тона горизонтально-изгибных колебаний балки с пустым баком. Блок регистрации Б включает датчики виброперемещений 7, усилитель сигнала 6 и регистрирующее устройство 8. Обработка результатов измерений проводилась в соответствии с ГОСТ Р 8.736-2011.

Методика проведения эксперимента заключалась в следующем.

На первом этапе определялись динамические и диссипативные характеристики балки с пустым баком, строились соответствующие амплитудно-частотные характеристики (АЧХ). Затем в бак заливалась жидкость (вода) и строились новые АЧХ системы, содержащей полость, частично заполненную жидкостью, которая совершает волновое движение. При известных геометрических размерах бака и заданном уровне его заправки по известной методике [2, 17, 18] вычисляются параметры эквивалентного механического аналога, которые использовались для формирования уравнений возмущенного движения системы

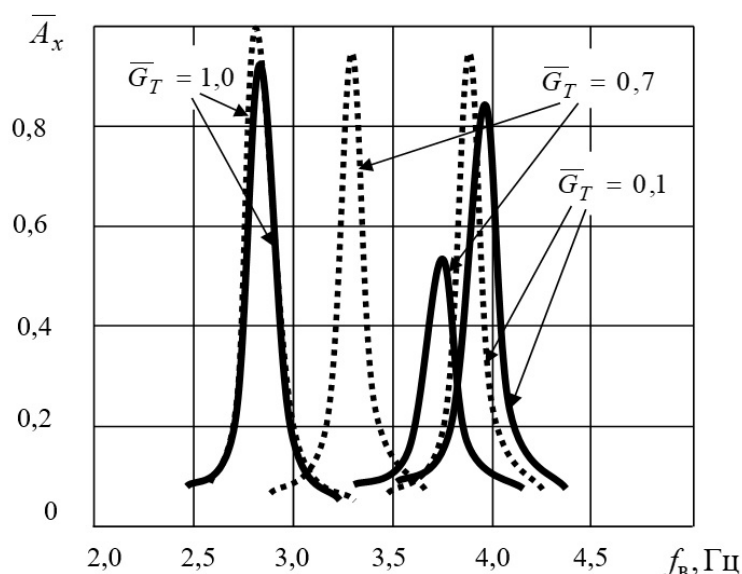


Рис. 2. Нормированные АЧХ горизонтальных колебаний балки в месте установки датчика виброперемещений (сплошная линия – жидкость подвижна, штриховая линия – жидкость условно затвердевшая)

Fig. 2. Normalized amplitude-frequency responses of horizontal beam oscillations at the location of the vibration displacement sensor installation (solid line – sloshing liquid, dashed line – conditionally solidified liquid)

«модель крыла – бак с жидкостью» и проведения теоретических расчетов. Параметры механического аналога определялись также экспериментально в соответствии с резонансным методом. Шаг изменения уровня заправки составлял $\Delta \bar{G}_T = \frac{\Delta G_T}{G_{T0}} = 0,1$, где

ΔG_T – вес дополнительно залитой в бак воды, G_{T0} – вес воды в полностью заполненном баке. Исследовались также характеристики системы при использовании модели затвердевшего топлива. В этом случае в бак помещался груз весом G_{T0} .

Результаты исследований

Основные результаты экспериментальных исследований приведены на рис. 2–5. Так, на рис. 2 изображены нормированные амплитудно-частотные характеристики в месте установки датчика виброперемещений рассматриваемой динамической системы в области первого горизонтально-изгибного тона при различных уровнях заправки $\bar{G}_T = \frac{G_T}{G_{T0}}$, где G_T – вес залитой в бак воды.

Анализ результатов показывает, что наиболее существенно подвижность жидкости сказывается на динамических (частоты

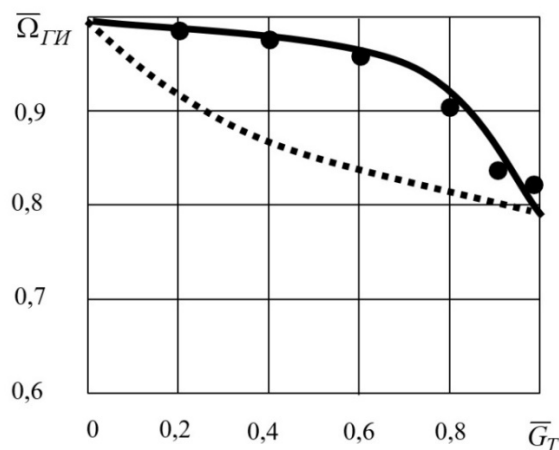


Рис. 3. Зависимость относительной собственной частоты колебаний балки с баком $\bar{Q}_{GH}$ от уровня заправки бака $\bar{G}_T$ (сплошная линия – расчет с учетом подвижности жидкости; штриховая линия – расчет с затвердевшей жидкостью; точки – экспериментальные данные)

Fig. 3. Dependence of the relative beam eigen frequency with the tank $\bar{Q}_{GH}$ on the level of tank refueling $\bar{G}_T$ (solid line – the calculation considering liquid sloshing; dashed line – the calculation with solidified liquid; dots – experimental data)

собственных колебаний) и диссипативных (амплитуды колебаний) параметрах упругой системы при средних заправках ($\bar{G}_T = 0,7$). При малых ($\bar{G}_T = 0,1$) заправках и для полных баков ($\bar{G}_T = 1,0$) влиянием подвижности жидкого наполнителя в первом приближении можно пренебрегать и считать его условно затвердевшим.

Изменение собственной частоты колебаний балки с баком по первому горизонтально-изгибному тону $\bar{\Omega}_{ГИ} = \frac{\Omega_i}{\Omega_0}$ (Ω_i – собственная частота при промежуточном уровне заправки, Ω_0 – собственная частота колебаний балки с пустым баком) от уровня заправки $\bar{G}_T$ показано на рис. 3. Анализ полученных результатов показывает удовлетворительную сходимость расчета и эксперимента.

В ходе эксперимента оценивалось также влияние внутреннего набора (нервюр) на динамические характеристики системы «модель крыла – бак» и параметры механического аналога. В частности, на рис. 4 изображены графики функции $\Omega_{ГИ} = f(\bar{G}_T)$, где $\Omega_{ГИ}$ – собственная частота горизонтально-изгибных колебаний балки с баком первого тона; $\bar{G}_T$ – уровень заправки. Из графиков следует, что в процессе схематизации реальной конструкции бака ряд его отсеков (2...5) могут объединяться в группы, для которых влиянием внутренних нервюр можно пренебречь.

Особую важность представляет экспериментальное определение логарифмических декрементов затухания колебаний жидкости при ее волновом движении в баке, так как существующие аналитические методы применимы лишь для определенных форм баков с гладкими стенками. В данном эксперименте определялись логарифмические декременты затухания колебаний системы «модель крыла – бак с жидкостью». Парциальный логарифмический декремент затухания волновых колебаний жидкости основного тона рассчитывался аналитически с использованием экспериментальных данных. Для этого использовалась двухмассовая расчетная модель си-

стемы: одномассовая модель балки с приведенной массой в центр тяжести бака и одномассовая маятниковая модель волнового движения жидкости. По результатам обработки экспериментальных осциллограмм свободных колебаний системы были получены парциальные частоты и логарифмические декременты затухания колебания балки (бак пустой) основного тона и системы в целом при разных уровнях заправки бака. Расчетная модель позволяет вычислить парциальный декремент затухания колебаний маятникового осциллятора. В результате был получен массив данных: уровень заправки бака $\bar{G}_T$ – парциальный логарифмический декремент затухания колебаний маятникового осциллятора δ_T , моделирующего волновое движение топлива. Для получения аналитической зависимости использовался метод наименьших квадратов.

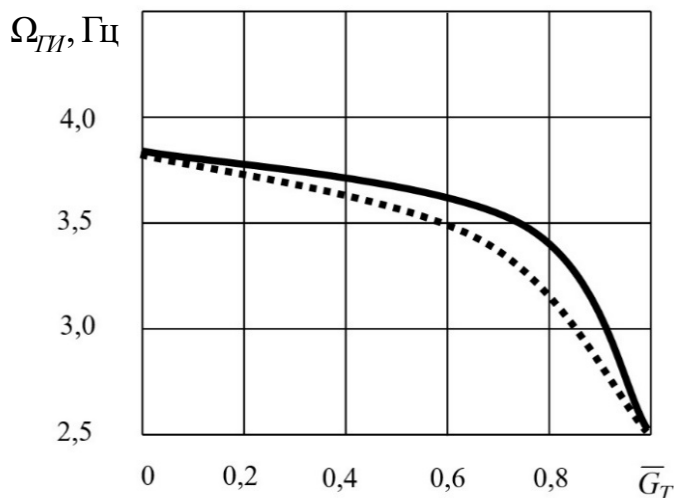


Рис. 4. Зависимость собственной частоты колебаний балки с баком $\Omega_{ГИ}$ от уровня заправки бака $\bar{G}_T$ (сплошная линия – бак без нервюр; штриховая линия – бак с пятью нервюрами)

Fig. 4. Dependence of the beam eigen frequency with the tank $\Omega_{ГИ}$ on the level of refueling the tank $\bar{G}_T$ (solid line – a tank without ribs; dashed line – a tank with five ribs)

Результаты приведены на рис. 5 в виде зависимости логарифмического декремента затухания колебаний жидкости в баке по пер-

вому тону δ_T волнового движения в горизонтальной плоскости от уровня заправки $\bar{G}_T$, где сплошной линией изображена кривая, полученная по предлагаемой эмпирической формуле $\delta_T = 0,08 + 0,2\bar{G}_T^3$. На рисунке точками показаны экспериментальные данные. Приведенная эмпирическая формула может быть использована при проведении предварительных оценочных расчетов аэроупругих и прочностных характеристик ЛА с подвижным топливом в баках.

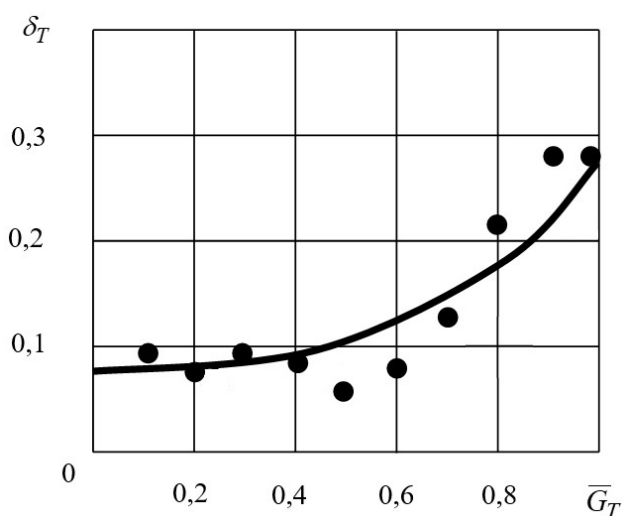


Рис. 5. Зависимость логарифмического декремента затухания колебаний δ_T от уровня заправки $\bar{G}_T$

Fig. 5. Dependence of the logarithmic oscillation decrement δ_T on the refueling level $\bar{G}_T$

Заключение

Результаты проведенных экспериментальных исследований показали, что учет подвижности жидкости (топлива) в баках при горизонтально-изгибных колебаниях консолей крыла самолета может существенно уточнить его динамический отклик на внешние возмущающие воздействия. Оценено влияние уровня заправки бака как на частоты собственных колебаний, так и на диссипативные параметры системы. Предложена эмпирическая формула для вычисления парциального логарифмического декремента затухания волнового движения жидкости при го-

ризонтально-изгибных колебаниях модели крыла, которая может быть использована при предварительном математическом моделировании.

Список литературы

1. Гончаров Д.А., Пожалостин А.А. Исследования осесимметричных колебаний жидкости в цилиндрическом сосуде с пористой перегородкой // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2021. № 1. С. 66–71.
2. Овчинников В.В. Влияние подвижности топлива в баках на характеристики аэроупругости воздушного судна / В.В. Овчинников, С.Ф. Бородин, М.А. Киселев, Ю.В. Петров // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2022. № 4. С. 4–11.
3. Овчинников В.В., Петров Ю.В. Численные методы исследования аэроупругости летательных аппаратов. М.: ИД Академии имени Н.Е. Жуковского, 2017. 160 с.
4. Flow-induced vibrations. Classifications and lessons from practical experiences. 2nd ed. Chapter 8: Vibrations in fluid–structure interaction systems / Под ред. Sh. Kaneko, T. Nakamura, F. Inada, M. Kato, K. Ishihara, T. Nishihara, M.A. Langthjem. Academic Press, 2014. Pp. 359–401. DOI: 10.1016/B978-0-08-098347-9.00008-4
5. Wang Y. A Study on the movement characteristics of fuel in the fuel tank during the maneuvering process / Y. Wang, C. Ruan, S. Lu, Z. Li [Электронный ресурс] // Applied sciences. 2023. Vol. 13, iss. 15. ID: 8636. DOI: 10.3390/app13158636 (дата обращения: 04.11.2023).
6. Дьяченко М.И., Хунг Н.З., Темнов А.Н. О движении несжимаемой жидкости в топливных баках с заборными устройствами // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2017. Т. 16, № 2. С. 23–25. DOI: 10.18287/2541-7533-2017-16-2-23-35

7. 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.

8. Бужинский В.А. Колебания жидкости в цилиндрических баках с продольными демпфирующими перегородками // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2020. № 1. С. 9–21. DOI: 10.31857/S0568528119060033

9. Кречко А.В., Крикунов В.А., Кречко И.А. Влияние поперечных перегородок на продольную устойчивость автоцистерны // Современные прикладные исследования: материалы третьей национальной научно-практической конференции. Шахты, 16–19 апреля 2019 г. Новочеркасск: Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова, 2019. С. 126–129.

10. Попков А.А. Анализ динамического поведения демпфирующей перегородки в баке ракеты-носителя // Теория и практика современной науки: сборник статей Международной научно-практической конференции. В 2 ч. Ч. 1. Пенза, 17 июня 2020 г. Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение», 2020. С. 71–75.

11. Букреев В.И., Чеботников А.В. Волны на воде в продольно колеблющемся контейнере // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2015. № 3. С. 140–147.

12. Shamsoddini R. Numerical investigation of vertical and horizontal baffle effects on liquid sloshing in a rectangular tank using an improved incompressible smoothed particle hydrodynamics method // Journal of Computational and Applied Research in Mechanical Engineering. 2018. Vol. 8, no. 2. Pp. 177–187. DOI: 10.22061/jcar.me.2019.2437.1231

13. Dalmon A., Lepilliez M., Tanguy S. et al. Comparison between the FLUIDICS experiment and direct numerical simulations of fluid sloshing in spherical tanks under microgravity conditions // Microgravity Science and Technology. 2019. Vol. 31, no. 1. Pp. 123–138. DOI: 10.1007/s12217-019-9675-4

14. Пожалостин А.А., Гончаров Д.А. Определение декремента колебаний жидкости в цилиндрическом сосуде с упругим плоским днищем // Естественные и технические науки. 2020. № 6 (144). С. 14–17.

15. Пожалостин А.А., Гончаров Д.А. Экспериментально-аналитический метод определения логарифмического декремента колебаний для случая осесимметричных колебаний упругого бака с жидкостью // Естественные и технические науки. 2018. № 6 (120). С. 93–94.

16. Бондаренко А.Ю., Лиходед А.И., Сидоров В.В. Построение механических аналогов подконструкций с учетом действующих на них активных сил // Математическое моделирование. 2020. Т. 32, № 8. С. 106–118. DOI: 10.20948/mm-2020-08-07

17. Пожалостин А.А. Механические аналогии и колебания бака с жидкостью // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2019. № 7. С. 15–19. DOI: 10.1134/S0235711919070095

18. Вин К., Темнов А.Н. Колебания вязкой трехслойной жидкости в неподвижном баке [Электронный ресурс] // Инженерный журнал: наука и инновации. 2019. № 7 (91). С. 1–17. DOI: 10.18698/2308-6033-2019-7-1895 (дата обращения: 04.11.2023).

References

1. Goncharov, D.A., Pozhalostin, A.A. (2021). Experimental study of axisymmetric vibrations of a liquid in a cylindrical vessel with a porous partition. *Russian Aeronautics*, vol. 64, no. 1, pp. 71–77. DOI: 10.3103/S1068799821010098

2. Borodkin, S.F., Kiselev, M.A., Ovchinnikov, V.V., Petrov, Yu.V. (2022). The impact of fuel fluidity in wing tanks on the aeroelasticity characteristics of an aircraft. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Aviatcionnaya tekhnika*, no. 4, pp. 4–11. (in Russian)

3. Ovchinnikov, V.V., Petrov, Yu.V. (2017). Numerical methods for studying the aeroelasticity of aircraft. Moscow: Izdatel'kiy

Dom Akademii imeni N.Ye. Zhukovskogo, 160 p. (in Russian)

4. Kaneko, Sh., Nakamura, T., Inada, F., Kato, M., Ishihara, K., Nishihara, T., Langthjem, M.A. (Ed.). (2014). Flow-induced vibrations. Classifications and lessons from practical experiences. 2nd ed. Chapter 8: Vibrations in fluid–structure interaction systems. Academic Press, pp. 359–401. DOI: 10.1016/B978-0-08-098347-9.00008-4

5. Wang, Y., Ruan, C., Lu, S., Li, Z. (2023). A study on the movement characteristics of fuel in the fuel tank during the maneuvering process. *Applied sciences*, vol. 13, issue 15, ID: 8636. DOI: 10.3390/app13158636 (accessed: 04.11.2023).

6. Dyachenko, M.I., Hung, N.D., Temnov, A.N. (2017). Fluctuations of liquid fuel in tanks with oil recovery units. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*, vol. 16, no. 2, pp. 23–25. DOI: 10.18287/2541-7533-2017-16-2-23-35 (in Russian)

7. Kalinichenko, V.A., Soe, A.N. (2015). Experimental study of coupled vibrations of a vessel with liquid. *Vestnik MGTU imeni N.E. Bauman. Seriya Yestestvennyye nauki*, no. 1 (58), pp. 14–25. (in Russian)

8. Buzhinskii, V.A. (2020). Fluid oscillations in cylindrical tanks with longitudinal damping partitions. *Fluid Dynamics*, vol. 55, no. 1, pp. 7–19. DOI: 10.31857/S0568528119060033

9. Krechko, A.V., Krikunov, V.A., Krechko, I.V. (2019). Impact of transverse partitions on the longitudinal stability of tanker. In: *Sovremennyye prikladnyye issledovaniya: materialy tretyey natsionalnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Novocherkassk: Yuzhno-Rossiyskiy gosudarstvennyy politekhnicheskii universitet (NPI) imeni M.I. Platova, pp. 126–129. (in Russian)

10. Popkov, A.A. (2020). Analysis of the dynamic behavior of the damping partition in the launch vehicle tank. In: *Teoriya i praktika sovremennoy nauki: sbornik statey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. In 2 parts, part 1, pp. 71–75. (in Russian)

11. Bukreev, V.I., Chebotnikov, A.V. (2015). Water waves in a longitudinally oscillating container. *Fluid Dynamics*, vol. 50, no. 3, pp. 435–441.

12. Shamsoddini, R. (2018). Numerical investigation of vertical and horizontal baffle effects on liquid sloshing in a rectangular tank using an improved incompressible smoothed particle hydrodynamics method. *Journal of Computational and Applied Research in Mechanical Engineering*, vol. 8, no. 2, pp. 177–187. DOI: 10.22061/jcarme.2019.2437.1231

13. Dalmon, A., Lepilliez, M., Tanguy, S. et al. (2019). Comparison between the FLUIDICS experiment and direct numerical simulations of fluid sloshing in spherical tanks under microgravity conditions. *Microgravity Science and Technology*, vol. 31, no. 1, pp. 123–138. DOI: 10.1007/s12217-019-9675-4

14. Pozalostin, A.A., Goncharov, D.A. (2020). Longitudinal vibrations of a system of the liquid filled thin-walled rods. *Natural and technical sciences*, no. 6, pp. 14–17. (in Russian)

15. Pozalostin, A.A., Goncharov, D.A. (2018). Experimental and analytical method for determining the logarithmic decrement of vibrations for the case of axisymmetric vibrations of an elastic tank with liquid. *Natural and technical sciences*, no. 6 (120), pp. 93–94. (in Russian)

16. Bondarenko, A.Yu., Lixoded, A.I., Sidorov, V.V. (2020). Modeling of a space-rocket structures when subjected to active forces by mechanical analogs. *Mathematical Models and Computer Simulations*, vol. 32, no. 8, pp. 106–118. DOI: 10.20948/mm-2020-08-07 (in Russian)

17. Pozalostin, A.A. (2019). Mechanical analogies and vibrations of a tank with liquid. *Problemy Mashinostroyeniya i Nadezhnosti Mashin*, no. 7, pp. 15–19. DOI: 10.1134/S0235711919070095 (in Russian)

18. Vin, K., Temnov, A.N. (2019). Oscillations of a three-layer viscous fluid in a stationary tank. *Engineering journal: science and innovation*, no. 7 (91), 17 p. DOI: 10.18698/2308-6033-2019-7-1895 (accessed: 04.11.2023). (in Russian)

Сведения об авторах

Варданын Георгий Бенурович, кандидат технических наук, доцент кафедры технической механики и инженерной графики МГТУ ГА, g.vardanyan@mstuca.aero.

Кочетов Александр Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры технической механики и инженерной графики МГТУ ГА, a.kochetov@mstuca.aero.

Петров Юрий Владимирович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технической механики и инженерной графики МГТУ ГА, doctor561@rambler.ru.

Information about the authors

Georgiy B. Vardanyan, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Technical Mechanics and Engineering Graphics Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, g.vardanyan@mstuca.aero.

Aleksander S. Kochetov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Technical Mechanics and Engineering Graphics Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, a.kochetov@mstuca.aero.

Yuriy V. Petrov, Doctor of Technical Sciences, Professor, The Head of the Technical Mechanics and Engineering Graphics Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, doctor561@rambler.ru.

Поступила в редакцию	01.12.2023	Received	01.12.2023
Одобрена после рецензирования	10.01.2024	Approved after reviewing	10.01.2024
Принята в печать	21.03.2024	Accepted for publication	21.03.2024