

УДК 534.647

DOI: 10.18799/24131830/2025/3/4999

Шифр специальности ВАК: 2.5.2

Исследование демпфирующих свойств алюминиевого сплава Д16 для снижения виброактивности электромеханического устройства системы жизнеобеспечения нефтегазовых станций

А.Н. Гаврилин, В.С. Дмитриев, Д.В. Ермаков[✉], Д.А. Дерусова, Р.К. Беликов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

[✉]dvermakov@tpu.ru

Аннотация. Актуальность. Системы вентиляции и кондиционирования нефтегазовых станций содержат электромеханические устройства, работа которых сопровождается производственным шумом и вибрацией. Это оказывает негативное влияние на износ самого оборудования и на здоровье операторов, находящихся в помещении, так как наличие шума является вредным производственным фактором. В связи с этим снижение вибрационной и акустической активности электромеханических устройств является актуальной научно-технической задачей, которая привлекает внимание разработчиков на протяжении многих лет. Известно, что алюминий как конструкционный материал сочетает в себе высокую жесткость, прочность и способность диссипировать в своем объеме энергию, актуальным является его применение для создания твердотельных гасителей вибрационных колебаний. Настоящая работа посвящена исследованию демпфирующих свойств алюминиевого сплава и оценке возможности его применения в качестве гасителя колебаний в демпфирующих устройствах для электромеханических устройств систем жизнеобеспечения нефтегазовых станций. С этой целью проведены экспериментальные исследования образцов литого и вспененного алюминиевого сплава Д16 с использованием ударного стенда. **Объектом** исследования являются образцы литого и вспененного алюминиевого сплава Д16. **Цель:** экспериментальные исследования демпфирующих свойств литого и вспененного алюминиевого сплава Д16 для оценки возможности его применения в качестве демпфирующего элемента гасителя колебаний в конструкциях электромеханических устройств систем жизнеобеспечения нефтегазовых станций. **Методы.** Современные подходы вибродиагностики, вычислительной математики и средств измерений. **Результаты** исследования показали, что вспененные образцы по сравнению с литыми имеют больший потенциал диссипировать энергию возмущающих воздействий виброактивности электромеханического устройства и могут быть использованы в качестве демпфирующего элемента.

Ключевые слова: нефтегазовые станции, алюминиевый сплав, пеноалюминий, виброактивность, твердотельный демпфер

Благодарности: Работа выполнена в рамках гранта РНФ № 23-79-10107 (лабораторное оборудование, результаты исследования демпфирующих свойств материалов).

Для цитирования: Исследование демпфирующих свойств алюминиевого сплава Д16 для снижения виброактивности электромеханического устройства системы жизнеобеспечения нефтегазовых станций / А.Н. Гаврилин, В.С. Дмитриев, Д.В. Ермаков, Д.А. Дерусова, Р.К. Беликов // Известия томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 3. – С. 163–169. DOI: 10.18799/24131830/2025/3/4999

UDC 534.647

DOI: 10.18799/24131830/2025/3/4999

Damping properties of aluminum alloy D16 to reduce the vibration activity of the electromechanical device of an oil and gas station life support system

A.N. Gavrilin, V.S. Dmitriev, D.V. Ermakov[✉], D.A. Derusova, R.K. Belikov

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

[✉]dvermakov@tpu.ru

Abstract. Relevance. Ventilation and air conditioning systems of oil and gas stations contain electromechanical devices, which operation is accompanied by industrial noise and vibration. This has a negative impact on the wear of the equipment itself and on the health of the operators in the room, as the presence of noise is a harmful production factor. In this regard, reducing the vibration and acoustic activity of electromechanical devices is an urgent scientific and technical task that has attracted the attention of developers for many years. It is known that aluminum, as a structural material, combines high rigidity, strength, and the ability to dissipate energy within its volume, making its application for creating solid-state vibration dampers relevant. This work is devoted to studying the damping properties of aluminum and assessing its potential use as a vibration dampener in damping devices for electromechanical devices in life support systems of oil and gas stations. To achieve this, the authors have carried out the experimental studies of samples made from cast and foamed aluminum alloy D16 using an impact stand. **Object.** Samples of cast and foamed aluminum alloy D16. **Aim.** Experimental studies of the damping properties of cast and foamed aluminum alloy D16 to assess the possibility of its use as a damping element in the oscillators of electromechanical devices within the life support systems of oil and gas stations. **Methods.** Modern approaches to vibration diagnostics, computational mathematics, and measuring instruments. **Results.** Foamed samples, compared to the cast ones, have greater potential to dissipate the energy of disturbing vibrations from the activity of an electromechanical device and can be used as a damping element.

Keywords: oil and gas stations, aluminum alloy, aluminum foam, vibration activity, solid-state damper

Acknowledgements: This study was supported by the Russian Science Foundation grant number 23-79-10107 (laboratory equipment, the results of experimental and theoretical studying on damping characteristics of materials).

For citation: Gavrilin A.N., Dmitriev V.S., Ermakov D.V., Derusova D.A., Belikov R.K. Damping properties of aluminum alloy D16 to reduce the vibration activity of the electromechanical device of an oil and gas station life support system. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic university. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 3, pp. 163–169. DOI: 10.18799/24131830/2025/3/4999

Введение

Системы вентиляции и кондиционирования нефтегазовых станций содержат электромеханические устройства (ЭМУ), работа которых сопровождается производственным шумом и вибрацией [1–6]. Это оказывает негативное влияние на износ самого оборудования и на здоровье операторов, находящихся в помещении, так как наличие шума, является вредным производственным фактором. В связи с этим снижение вибрационной и акустической активности ЭМУ является актуальной научно-технической задачей, которая привлекает внимание разработчиков на протяжении многих лет.

Шум, вызываемый дисбалансом роторов, имеет низкую частоту, но, как следует из работ [6–9], шарикоподшипниковые опоры генерируют высшие гармонические составляющие, которые могут совпасть с собственной частотой деталей (узлов). В таком случае шум устройства резко возрастает. Низкочастотная вибрация может вызвать дребезжание плохо закрепленных деталей или модуляцию шума от каких-либо источников. Для снижения влияния механических воздействующих факторов в конструкциях необходимо применять демпфирующие устройства.

Известно, что пеноалюминий как конструкционный материал сочетает в себе высокую жесткость, прочность и способность диссипировать в своем объеме энергию, актуальным является его применение для создания твердотельных гасителей вибрационных колебаний [10–25].

Настоящая работа посвящена исследованию демпфирующих свойств пеноалюминиевого материала и оценки возможности его применения в ка-

честве гасителя колебаний в демпфирующих устройствах для ЭМУ систем жизнеобеспечения нефтегазовых станций. С этой целью проведены сравнительные экспериментальные исследования образцов литого алюминиевого сплава Д16 и пеноалюминия на основе алюминиевого сплава Д16 с использованием ударного стенда.

Экспериментальное исследование демпфирующих свойств, литых и пористых образцов алюминиевого сплава

Объектами настоящего исследования являются образцы литого и вспененного алюминиевого сплава Д16, изготовленные на Каменск-Уральском металлургическом заводе [26]. Габариты образцов, примененных в испытаниях, 97×92×30 мм и 97×92×16 мм (рис. 1).

Исследование демпфирующих свойств образцов из алюминиевого сплава Д16 проведено с использованием ударно-лабораторных стендов. При проведении ударных воздействий исследуемый образец жестко закрепляется на платформе ударного стенда посредством крепежного приспособления, как показано на рис. 2.

Контроль параметров испытательного режима осуществлялся на платформе стенда с использованием вибропреобразователей (ВИП) с осевой и поперечной погрешностью измерения 2 %. Механические импульсы, зарегистрированные на ВИП, преобразовывались в электрический сигнал и передавались на вход системы анализа данных. Импульсные сигналы, полученные от анализатора, сохранялись на компьютер и подлежали последующему анализу.

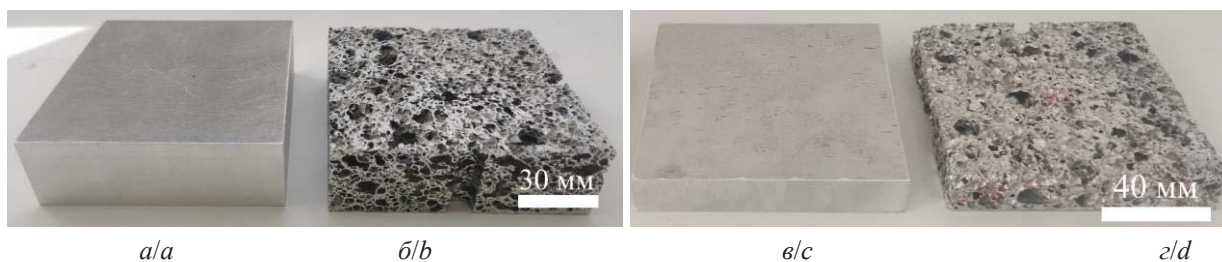


Рис. 1. Фотография литых – (а) образец № 1, (в) образец № 2 – и вспененных – (б) образец № 3, (г) образец № 4 – образцов, изготовленных из алюминиевого сплава Д16

Fig. 1. Photo of cast – (a) sample no. 1, (c) sample no. 2 – and foamed – (b) sample no. 3, (d) sample no. 4 – samples made of aluminum alloy D16

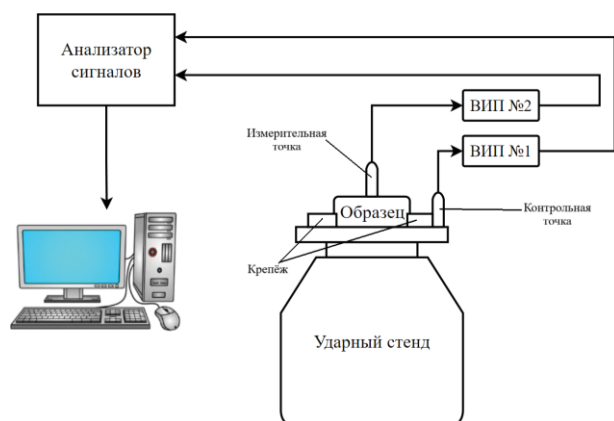


Рис. 2. Блок-схема лабораторной установки для проведения испытаний образцов на ударное воздействие

Fig. 2. Block diagram of a laboratory setup for impact testing of samples

Параметры испытаний образцов из алюминиевого сплава на ударное воздействие (амплитуда и длительность импульса) задавались высотой падения платформы и прокладками (прокладками),

расположенными между падающей платформой и сейсмической массой. Образцы подвергались ударно-импульсным нагрузкам полусинусоидального типа с пиковым ускорением номинального импульса 100 g ($980,665 \text{ м/с}^2$), длительностью импульса 3,4 мс.

Результаты экспериментальных исследований

В ходе исследования образцов 1 и 2 на ударное воздействие в течение 15 мс была зарегистрирована амплитудно-временная зависимость (рис. 3, а) симметричного полусинусоидального импульса, а также соответствующие ударные спектры в диапазоне частот от 10 Гц до 10 кГц (рис. 3, б).

Как видно из графика (рис. 3, а), пеноалюминий демонстрирует повышенные характеристики амортизации удара по сравнению с литым образцом из алюминиевого сплава. В частности, на поверхности литого образца наблюдается увеличение амплитуды ускорения на 4 g ($39,226 \text{ м/с}^2$) по отношению к амплитуде сигнала в контрольной измерительной точке на платформе стэнда.

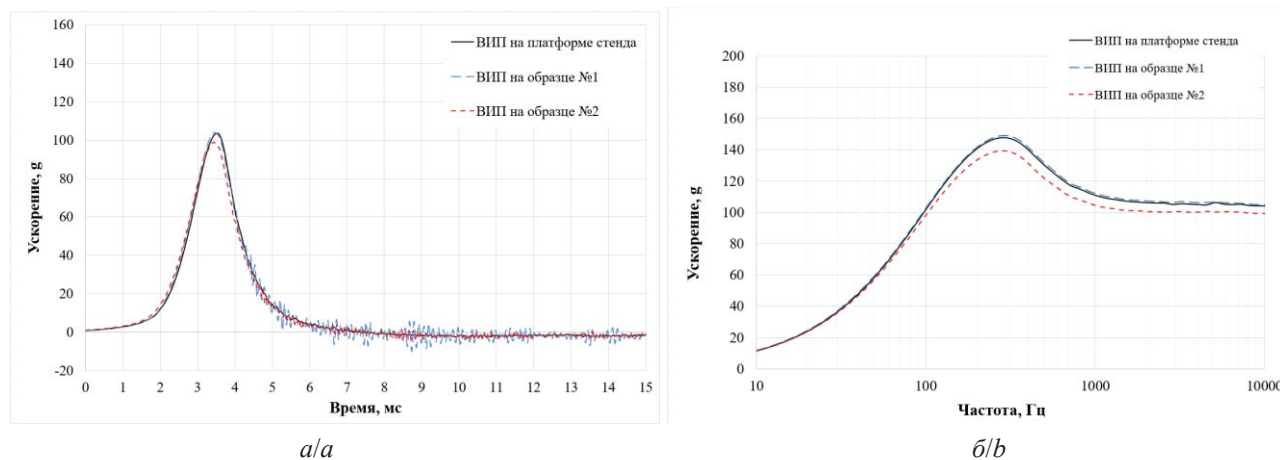


Рис. 3. Амплитудно-временная зависимость (а) и ударный спектр (б) симметричного полусинусоидального импульса, зарегистрированные в ходе испытаний образцов 1 и 2 на воздействие ударных нагрузок амплитудой 100 g ($980,665 \text{ м/с}^2$) и длительностью 3,4 мс

Fig. 3. Amplitude-time dependence (a) and shock spectrum (b) of a symmetrical half-sine pulse recorded during tests of samples 1 and 2 under the impact of shock loads with an amplitude of 100 g ($980,665 \text{ м/с}^2$) and a duration of 3.4 ms

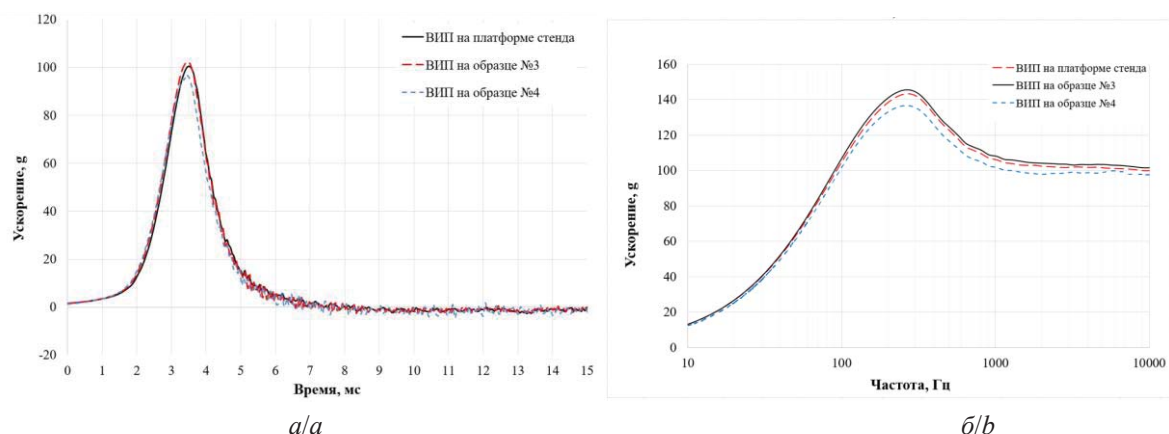


Рис. 4. Амплитудно-временная зависимость (а) и ударный спектр (б) симметричного полусинусоидального импульса, зарегистрированные в ходе испытаний образцов 3 и 4 на воздействие ударных нагрузок амплитудой 100 g (980,665 м/с²) и длительностью 3,4 мс

Fig. 4. Amplitude-time dependence (a) and shock spectrum (b) of a symmetrical half-sine pulse recorded during testing of samples 3 and 4 under the impact of shock loads with an amplitude of 100 g (980,665 м/с²) and a duration of 3.4 ms

В то же время образец пеноалюминия показал наибольшую эффективность амортизации импульсного удара, что проявляется в виде уменьшения амплитуды удара на 5 g (49,033 м/с²) по отношению к амплитуде сигнала в контрольной измерительной точке на платформе стенда и на 9 g (88,259 м/с²) по сравнению с амплитудой ускорения, зарегистрированной на поверхности литого образца. Таким образом, амплитуда отклика пеноалюминия в частотном диапазоне от 10 Гц до 10 кГц на 7 % ниже соответствующего значения, измеренного для литого образца. Стоит также отметить, что после окончания ударных импульсов затухающих колебаний не наблюдалось (рис. 3, а), что свидетельствует о демпфировании импульсного удара.

Образцы 3, 4 подвергались тому же уровню ударно-импульсного воздействия в течение 15 мс. Результаты испытаний показаны на рис. 4, а, б.

Из графиков (рис. 4, а) видно, что образец вспененного алюминия показывает повышенные характеристики амортизации удара по сравнению с монолитным образцом. На поверхности литого образца (образец 3) наблюдается увеличение амплитуды ускорения на 3 g (29,419 м/с²) по отношению к амплитуде сигнала в контрольной измерительной точке на платформе стенда. В то же время вспененный алюминий (образец 4) показал наибольшую эффективность амортизации импульсного удара, снижая амплитуду удара на 5 g (49,033 м/с²) (5 %) по отношению к амплитуде сигнала в контрольной измерительной точке на платформе стенда и на 8 g (78,453 м/с²) (8 %) по сравнению с амплитудой ускорения, зарегистрированной на поверхности литого образца (образец 3).

По результатам проведенных исследований можно сделать вывод о том, что пеноалюминий

может быть использован в качестве демпфирующего элемента импульсных нагрузок.

По результатам экспериментов образец номер 2 показал наиболее эффективное снижение амплитуды импульсных нагрузок. Это можно объяснить тем, что данный образец имеет больше механизмов, связанных с внутренним изменением микро- и макроструктур твердотельных материалов, а именно дислокаций, локальных дефектов кристаллических решеток, релаксаций напряжений на границах зерен и т. д., которые влияют на эффективность рассеивания энергии. Образец номер 4 также обладает потенциалом демпфирования импульсных нагрузок, однако из-за меньших габаритов он имеет меньше механизмов диссипации энергии твердотельного материала.

Заключение

В настоящей работе проведено исследование литых и вспененных образцов алюминиевого сплава Д16 для оценки снижения виброактивности электромеханических устройств нефтегазовых станций. В ходе сравнительного анализа демпфирующих свойств образцов показано, что образцы из вспененного алюминия более эффективно амортизируют импульсные ударные воздействия, чем литые образцы из того же алюминиевого сплава. В частности, при уровне заданных нагрузок 100 g (980,665 м/с²) амплитуда ускорения, измеренная на поверхности пеноалюминия, уменьшается на 5 g (49,033 м/с²) (5 %) по отношению к амплитуде сигнала в контрольной измерительной точке на платформе стенда, и на 8 g (78,453 м/с²) (8 %) по сравнению с амплитудой ускорения, зарегистрированной на поверхности литого образца алюминия.

При этом погрешность во время проведения эксперимента зависела от чувствительности ВИП в

осевом и поперечном направлении и влияния установки образцов. Установка образцов осуществлялась по маркерам на одни и те же места с одинаковым усилием затяжки винтов прижимающих их трубочин, т. е. влиянием этой погрешности можно пренебречь, при этом чувствительность ВИП составила 2 %.

Тогда можно сказать, что полученные данные в ходе эксперимента с погрешностью 2 % подтверждают перспективы использования вспененного алюминия при амортизации импульсных ударных воздействиях, возникающих в резонансных режимах электромеханических устройств нефтегазовых станций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Якубович В.А. Вибрационная диагностика трубопроводов компрессорных станций. – М.: Недра-Бизнесцентр, 2004. – 334 с.
2. Ковалёв В.К. Причины вибрации газоперекачивающих агрегатов // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2014. – № 2. – С. 23–27.
3. Shuangshuang Li, Zhang L., Kong C. Vibration failure analysis and countermeasures of the inlet pipelines at a gas compressor station // Shock and Vibration. – 2019. – Vol. 2019. – P. 6032962.
4. Vibration characteristics of pressure pipelines at pumping stations and optimized design for vibration attenuation / Y. Xu, Z. Liu, D. Zhou, J. Tian, X. Zhu // Water Supply. – 2022. – Vol. 22. – № 1. – P. 990–1003.
5. Analytical and experimental investigation on stability of rotor system with spline coupling considering torque, friction coefficient and external damping / Z. Dai, J. Jing, Ch. Chen, J. Cong, Y. Quan // Mechanism and Machine Theory. – March 2023. – Vol. 181. – 105200. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2022.105200>.
6. Iskakov Z., Bissebayev K., Jamalov N. Resonance vibrations of a gyroscopic rotor with linear and nonlinear damping and nonlinear stiffness of the elastic support in interaction with a non-ideal energy source // Mechanical Systems and Signal Processing. – 1 May 2022. – Vol. 170. – 108773. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.108773>.
7. Минимизация виброактивности малозумных вентиляторов / В.С. Дмитриев, Л.Я. Миньков, Т.Г. Костюченко, В.В. Дердященко, Д.С. Панфилов, Д.В. Ермаков // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2022. – № 76. – С. 101–117. DOI: 10.17223/19988621/76/8.
8. Журавлев В.Ф., Бальмонт В.Б. Механика шарикоподшипников гироскопов / под ред. Д.М. Климова. – М.: Машиностроение, 1985. – 271 с.
9. Негативное воздействие вибрации на технологические трубопроводы компрессорной станции с электроприводными газоперекачивающими агрегатами / А.С. Шредер, О.А. Курасов, П.В. Бурков, А.Н. Гаврилин, Д.В. Ермаков // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 10. – С. 167–177. DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4729.
10. Analyses of impact energy-absorbing performance of open- and closed-cell Al foams using modified split Hopkinson pressure bar / S. Kim, D. Kim, M. Kim, K. Kim, J. Lee, J. Lee, H. Cheong, H. Kim, S. Lee // Journal of Alloys and Compounds. – 2023. – Vol. 965. – 171349. DOI: 10.1016/j.jallcom.2023.171349.
11. Stress-strain states and energy absorption in open-cell aluminium foams under hypervelocity impact / S. Zhao, X. Zhang, R. Wang, R. Li // Composite Structures. – 2023. – Vol. 313. – 116885. DOI: 10.1016/j.compstruct.2023.116885.
12. Madhu H.C., Kailas S.V. Exploring damping behavior of novel polymer-derived aluminum alloy foam // Materials Letters. – 2024. – Vol. 357. – article number 135758.
13. Local deformation on damping performance of integral-forming aluminum foam sandwich / N. Liu, Z. Zhang, X. Xia, T. Xu, Z. Wang, J. Ding, Y. Liu // Materials Letters. – 2022. – Vol. 323. – Article number 132545.
14. Ermakov D., Dmitriev V. Solid state damper based on foam aluminum to reduce vibration activity of electromechanical devices // Recent Developments in the Field of Non-Destructive Testing, Safety and Materials Science. ICMTNT 2021. Studies in Systems, Decision and Control / Eds. E. Lysenko, A. Rogachev, O. Starý. – 2023. – Vol. 433. DOI: 10.1007/978-3-030-99060-2_8
15. Frequency dependence of the internal friction of the AMg6 alloy / A.K. Tomilin, F.Y. Kuznetsov, I.S. Konovalev, V.A. Krasnovеikin, I.Y. Smolin // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2021. – Vol. 50 (3) – P. 243–250. DOI: 10.3103/S1052618821030158.
16. Бутарович Д.О., Смирнов А.А., Рябов Д.М., Пеноалюминий как энергопоглощающий материал и его механические свойства // Известия высших учебных заведений. Сер. Машиностроение. – 2011. – № 7. – С. 53–58.
17. Thorntor P.H., Magee C.L. The deformation of aluminium foams // Met. Trans. A. – 1975. – Vol. 6A. – № 6. – P. 1253–1263.
18. Wei P., Liu L. Influence of density on compressive properties and energy absorption of foamed aluminium alloy // J. of Wuhan Univ. of Techn. Mater. Sci. – 2007. – Vol. 22. – № 2. – P. 225–228.
19. Об основных особенностях механических и амортизирующих свойств высокопористых алюминиевых сплавов / В.А. Марков, А.Ф. Овчинников, В.И. Пусев, В.В. Селиванов // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред: Материалы XVI Международного симпозиума имени А.Г. Горшкова. – Ярополец, 15–19 февраля 2010. – Чебоксары: ГУП «ИПК «Чувашия», 2010. – Т. 2. – С. 218–225.
20. Механические и амортизирующие свойства высокопористого ячеистого алюминия / А.П. Гусаров, А.В. Жариков, В.А. Марков, А.Ф. Овчинников, В.И. Пусев, В.В. Селиванов, А.Н. Сообщиков // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2009. – № 1 (74). – С. 58–66.
21. Селиванов В.В. О механических свойствах высокопористых алюминиевых сплавов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – № 4. – Ч. 4. – С. 1760–1762.
22. Идентификация параметров механической системы на примере вибрационного электромеханического преобразователя энергии / А.С. Глазырин, В.В. Тимошкин, С.В. Цурпал, Т.А. Глазырина // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316. – № 4. – С. 174–177.

23. Разработка наблюдателя угловой скорости ротора и момента сопротивления на валу регулируемого синхронного двигателя с постоянными магнитами, питающегося через длинный кабель / А.С. Глазырин, Е.И. Попов, В.А. Копырин, С.С. Попов, Е.В. Боловин, В.З. Ковалев, Р.Н. Хамитов, В.В. Тимошкин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 11. – С. 237–257. DOI: 10.18799/24131830/2024/11/4879.
24. Оптимизация порядка редуцированной динамической модели ненагруженного нефтепогружного кабеля на основе аппроксимации амплитудно-частотной характеристики / А.С. Глазырин, Ю.Н. Исаев, С.Н. Кладиев, А.П. Леонов, И.В. Раков, С.В. Колесников, С.В. Ланграф, А.А. Филипас, В.А. Копырин, Р.Н. Хамитов, В.З. Ковалев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 9 – С. 154–167. DOI: 10.18799/24131830/2021/9/3365.
25. Aluminum foam production, properties, and applications: a review / N. Patel, G. Mittal, M. Agrawal et al. // Inter Metalcast. – 2023. DOI: 10.1007/s40962-023-01174-8.
26. Снижение виброактивности вентилятора системы жизнеобеспечения нефтегазовых станций / А.Н. Гаврилин, В.С. Дмитриев, Д.В. Ермаков, Д.А. Дерусова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 11. – С. 128–137. DOI: 10.18799/24131830/2023/11/4293.

Информация об авторах

Алексей Николаевич Гаврилин, доктор технических наук, профессор отделения машиностроения Школы новых производственных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. gawral@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9205-2283>

Виктор Степанович Дмитриев, доктор технических наук, профессор, экс-профессор Школы неразрушающего контроля и безопасности Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. dmitriev@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9108-9845>

Дмитрий Владимирович Ермаков, кандидат технических наук, доцент отделения машиностроения Школы новых производственных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. dvermakov@tpu.ru

Дарья Александровна Дерусова, доктор технических наук, старший научный сотрудник Центра промышленной томографии Школы неразрушающего контроля и безопасности Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. red@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2142-856X>

Ростислав Константинович Беликов, инженер лаборатории лазерной вибродиагностики Школы неразрушающего контроля и безопасности Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. rkb3@tpu.ru

Поступила в редакцию: 10.02.2025

Поступила после рецензирования: 21.02.2025

Принята к публикации: 03.03.2025

REFERENCES

1. Yakubovich V.A. *Vibration diagnostics of pipelines of compressor stations*. Moscow, Nedra-Business Center Publ., 2004. 334 p. (In Russ.)
2. Kovalev V.K. Causes of vibration of gas pumping units. *Transport and storage of petroleum products and hydrocarbon raw materials*, 2014, no. 2, pp. 23–27. (In Russ.)
3. Shuangshuang Li, Zhang L., Kong C. Vibration failure analysis and countermeasures of the inlet pipelines at a gas Compressor Station. *Shock and Vibration*, 2019, vol. 2019, pp. 6032962.
4. Xu Y., Liu Z., Zhou D., Tian J., Zhu X. Vibration characteristics of pressure pipelines at pumping stations and optimized design for vibration attenuation. *Water Supply*, 2022, vol. 22, no. 1, pp. 990–1003.
5. Dai Z., Jing J., Chen Ch., Cong J., Quan Y. Analytical and experimental investigation on stability of rotor system with spline coupling considering torque, friction coefficient and external damping. *Mechanism and Machine Theory*, March 2023, vol. 181, 105200. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2022.105200>.
6. Isakov Z., Bissembayev K., Jamalov N. Resonance vibrations of a gyroscopic rotor with linear and nonlinear damping and nonlinear stiffness of the elastic support in interaction with a non-ideal energy source. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 1 May 2022, vol. 170, 108773. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2021.108773>.
7. Dmitriev V.S., Minkov L.L., Kostyuchenko T.G., Derdiyashchenko V.V., Panfilov D.S., Ermakov D.V. Minimization of vibration activity of low-noise fans. *Bulletin of Tomsk State University. Mathematics and mechanics*, 2022, no. 76, pp. 101–117. (In Russ.) DOI: 10.17223/19988621/76/8.
8. Zhuravlev V.F., Balmont V.B. *Mechanics of ball bearings of gyroscopes*. Ed. by D.M. Klimov. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 271 p. (In Russ.)
9. Schreder A.S., Kurasov O.A., Burkov P.V., Gavrilin A.N., Ermakov D.V. Negative impact of vibration on process pipelines of a compressor station with electrically driven gas pumping units. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 10, pp. 167–177. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4729.

10. Kim S., Kim D., Kim M., Kim K., Lee J., Lee J., Cheong H., Kim H., Lee S. Analyses of impact energy-absorbing performance of open- and closed-cell Al foams using modified split Hopkinson pressure bar. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, vol. 965, 171349. DOI: 10.1016/j.jallcom.2023.171349.
11. Zhao S., Zhang X., Wang R., Li R. Stress-strain states and energy absorption in open-cell aluminium foams under hypervelocity impact. *Composite Structures*, 2023, vol. 313, 116885. DOI: 10.1016/j.compstruct.2023.116885.
12. Madhu H.C., Kailas S.V. Exploring damping behavior of novel polymer-derived aluminum alloy foam. *Materials Letters*, 2024, vol. 357, article number 135758.
13. Liu N., Zhang Z., Xia X., Xu T., Wang Z., Ding J., Liu Y. Local deformation on damping performance of integral-forming aluminum foam sandwich. *Materials Letters*, 2022, vol. 323, article number 132545.
14. Ermakov D., Dmitriev V. Solid state damper based on foam aluminum to reduce vibration activity of electromechanical devices. *Recent Developments in the Field of Non-Destructive Testing, Safety and Materials Science. ICMTNT 2021. Studies in Systems, Decision and Control*. Eds. E. Lysenko, A. Rogachev, O. Starý. 2023. Vol. 433. DOI: 10.1007/978-3-030-99060-2_8.
15. Tomilin A.K., Kuznetsov F.Y., Konovalenko I.S., Krasnovеikin V.A., Smolin I.Y. Frequency dependence of the internal friction of the AMg6 alloy. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2021, vol. 50 (3), pp. 243–250. DOI: 10.3103/S1052618821030158.
16. Butarovich D.O., Smirnov A.A., Ryabov D.M., Aluminum foam as an energy-absorbing material and its mechanical properties. *Proceedings of higher educational institutions. Ser. Mechanical engineering*, 2011, no. 7, pp. 53–58. (In Russ.)
17. Thornton P.H., Magee C.L. The deformation of aluminium foams. *Met. Trans. A*, 1975, vol. 6A, no. 6, pp. 1253–1263.
18. Wei P., Liu L. Influence of density on compressive properties and energy absorption of foamed aluminium alloy. *J. of Wuhan Univ. of Techn. Mater. Sci.*, 2007, vol. 22, no. 2, pp. 225–228.
19. Markov V.A., Ovchinnikov A.F., Pusev V.I., Selivanov V.V. On the main features of the mechanical and shock-absorbing properties of highly porous aluminum alloys. *Dynamic and technological problems of mechanics of structures and continuous media. Proc. of the XVI International Symposium named after A.G. Gorshkov*. Yaropolets, February 15–19, 2010. Cheboksary, SUE IPK Chuvashia Publ., 2010. Vol. 2, pp. 218–225.
20. Gusarov A.P., Zharikov A.V., Markov V.A., Ovchinnikov A.F., Pusev V.I., Selivanov V.V., Soobshikov A.N. Mechanical and shock-absorbing properties of highly porous cellular aluminum. *Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Mashinostroenie*, 2009, no. 1 (74), pp. 58–66.
21. Selivanov V.V. On the mechanical properties of highly porous aluminum alloys. *Bulletin of the Nizhny Novgorod University named after N.I. Lobachevsky*, 2011, no. 4, P. 4, pp. 1760–1762. (In Russ.)
22. Glazyrin A.S., Timoshkin V.V., Tsurpal S.V., Glazyrina T.A. Identification of parameters of a mechanical system by the example of a vibrating electromechanical energy converter. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2010, vol. 316, no. 4, pp. 174–177. (In Russ.)
23. Glazyrin A.S., Popov E.I., Kopyrin V.A., Popov S.S., Bolovin E.V., Kovalev V.Z., Khamitov R.N., Timoshkin V.V. Development of an observer of rotor angular velocity and resistance moment on the shaft of an adjustable permanent magnet synchronous motor powered through long cable. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 11, pp. 237–257. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2024/11/4879.
24. Glazyrin A.S., Isaev Yu.N., Kladiev S.N., Leonov A.P., Rakov I.V., Kolesnikov S.V., Langraf S.V., Filipas A.A., Kopyrin V.A., Khamitov R.N., Kovalev V.Z. Optimization of the order of a reduced dynamic model of an unloaded oil-submersible cable based on the approximation of the amplitude-frequency response. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 9, pp. 154–167. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2021/9/3365.
25. Patel N., Mittal G., Agrawal M. Aluminum foam production, properties, and applications: a review. *Inter Metalcast*, 2023. DOI: 10.1007/s40962-023-01174-8.
26. Gavrilin A.N., Dmitriev V.S., Ermakov D.V., Derusova D.A. Reduction of a fan vibration activity in a life support system of oil and gas stations. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 11, pp. 128–137. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2023/11/4293.

Information about the authors

Alexey N. Gavrilin, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. gawral@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9205-2283>

Viktor S. Dmitriev, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. dmitriev@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9108-9845>.

Dmitry V. Ermakov, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. dvermakov@tpu.ru.

Daria A. Derusova, Dr. Sc., Senior Researcher, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. red@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2142-856X>.

Rostislav K. Belikov, Engineer, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. rkb3@tpu.ru

Received: 10.02.2025

Revised: 21.02.2025

Accepted: 03.03.2025