

DOI: 10.17122/ntj-oil-2019-3-113-121
УДК 629.3.015.5

А.Р. Валеев, А.В. Колчин, Е.И. Горбунова, К.К. Садреева (Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Российская Федерация)

РАЗРАБОТКА ВИБРОУДАРОЗАЩИТНЫХ МЕТАМАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ НЕГАТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НЕФТЕГАЗОВЫХ ОБЪЕКТАХ

Anvar R. Valeev, Aleksandr V. Kolchin, Elizaveta I. Gorbunova,
Karina K. Sadreeva (Ufa State Petroleum Technological University,
Ufa, Russian Federation)

DEVELOPMENT OF VIBRATION-PROOF METAMATERIALS TO REDUCE THE NEGATIVE IMPACT ON OIL AND GAS FACILITIES

Введение

Статья посвящена концепции новых виброударозащитных метаматериалов с квазинулевой жесткостью для снижения негативного воздействия на человека, машины и оборудование.

На нефтегазовых объектах вибрация может возникать от разнообразных источников. Для защиты предлагается использовать современные подходы в виброизоляции. С точки зрения механики, самым перспективным направлением является использование специальных упругих механических систем, получивших название систем с квазинулевой жесткостью.

Современные достижения в области аддитивных технологий, трехмерной печати, предоставляют широкие возможности в области создания метаматериалов. В частности, такой подход можно использовать для создания специальных упругих структур в эластичных конструкциях, иначе говоря, для создания новых средств защиты от вибрации и ударов.

Background

The article is devoted to the concept of new vibration-proof metamaterials with quasi-zero stiffness to reduce the negative impact on humans, machines and equipment.

At oil and gas facilities, vibration can occur from a variety of sources. For protection, it is proposed to use modern approaches in vibration isolation. From the point of view of mechanics, the most promising direction is the use of special elastic mechanical systems, known as systems with quasi-zero stiffness.

Modern advances in the field of additive technologies, three-dimensional printing, provide ample opportunities in the field of creating metamaterials. In particular, this approach can be used to create special elastic structures in elastic constructions, in other words, to create new means of protection against vibration and shock.

Создавая различные внутренние структуры упругих метаматериалов, можно придавать им различные силовые характеристики, в том числе и с квазиулевой жесткостью.

Цели и задачи

Изучить виброзащитный метаматериал с внутренней структурой, обеспечивающей квазиулевую жесткость при его сжатии. Предлагаемый виброзащитный метаматериал состоит из двух внешних упругих слоев, а также внутреннего слоя, представляющего собой упругую волнообразную структуру, которая при деформации обеспечивает квазиулевую жесткостью.

Методы

Проведено предварительное математическое моделирование одной ячейки предлагаемого метаматериала. Оценены возможные размеры ячеек.

Для проверки данных результатов проведено компьютерное моделирование одной ячейки при помощи программного пакета ANSYS.

Результаты

Результаты аналитических и компьютерных расчетов показали, что данный виброударозащитный материал при принятых параметрах будет иметь оптимальную нагрузку равную 8154 кг/м^2 .

Для проверки возможности изготовления данных метаматериалов были изданы демонстрационные образцы при помощи печати на 3D принтере Picaso Designer. Толщина слоев составила 0,3 мм.

Анализ полученных образцов показал, что при помощи 3D печати возможно создание разрабатываемых виброударозащитных метаматериалов, которые потенциально могут иметь высокие эксплуатационные свойства.

Предлагаемая структура метаматериалов позволяет эффективно и плавно гасить колебания объектов, иначе говоря, иметь высокие виброизоляционные и ударозащитные свойства, и быть эффективной на различных объектах нефтегазовой отрасли.

By creating various internal structures of elastic metamaterials, one can impart to them various force characteristics, including those with quasi-zero rigidity.

Aims and Objectives

To study the vibration-proof metamaterial with an internal structure that provides quasi-zero stiffness during its compression. The proposed vibroprotection metamaterial consists of two external elastic layers, as well as an internal layer, which is an elastic undulating structure that, when deformed, provides quasi-zero rigidity.

Methods

A preliminary mathematical modeling of a single cell of the proposed metamaterial has been carried out. Possible cell sizes are estimated.

To verify the data results, computer simulation of a single cell was performed using the ANSYS software package.

Results

The results of analytical and computer calculations showed that this vibration-proof material with the adopted parameters will have an optimal load equal to 8154 kg/m^2 .

To test the feasibility of manufacturing these metamaterials, demo samples were published using printing on a Picaso Designer 3D printer. The thickness of the layers was 0.3 mm.

The analysis of the obtained samples showed that using 3D printing it is possible to create the developed vibration-proof metamaterials, which potentially can have high operational properties.

The proposed structure of metamaterials makes it possible to effectively and smoothly damp oscillations of objects, in other words, to have high vibration-proofing and shock-proof properties, and to be effective at various objects of the oil and gas industry.

Ключевые слова: вибрация; виброизоляция; метаматериал; квазиулевая жесткость; аддитивные технологии

Key words: vibration; vibration isolation; metamaterial; quasi-zero stiffness; additive technology

Защита от вибрации и ударов является одной из важных проблем в ряде промышленных отраслей, в частности в нефтегазовой. Высокий уровень вибрации и постоянные удары вызывают ускоренный износ оборудования, подшипников узлов, оснований зданий и сооружений. Лабораторное оборудование и высокоточное оборудование также имеет проблему защиты от вибрации. Кроме того, известно, что продолжительное воздействие вибрации или ударов негативно влияет на людей [1-3]. Длительное воздействие общей вибрации вызывает у человека расстройство нервной системы, нарушение функциональных свойств сосудов и вестибулярного аппарата. Локальная вибрация поражает нервную систему и опорно-двигательный аппарат, приводит к спазму периферических сосудов. В конечном счете, длительное воздействие вибрации может быть причиной развития вибрационной болезни.

В нефтегазовой отрасли источниками повышенной вибрации может быть большое количество различных объектов. При бурении скважин используются различные машины и механизмы, при работе которых увеличивается уровень шума и вибраций: электромоторы, лебедки, вибросита, буровые насосы, ротор и др. На нефтеперекачивающих и компрессорных станциях основными источниками вибрации являются соответственно насосный и газоперекачивающий агрегаты. Дополнительно вибрацию создают вентиляторы и различные насосы. Также источником повышенной вибрации и ударов могут быть различные дорожно-строительные машины - грузовые автомобили, тракторы, снегоочистители и др. Здесь негативному воздействию подвергаются машинисты экскаваторов, строительных кранов, бетоноукладчиков и т.д.

В целом, существуют четыре основных подхода по борьбе с вибрацией и ударами: снижение виброактивности источником вибрации, изменение конструкции объекта, использование динамического гасителя и виброизоляция. На практике рациональнее всего использовать виброизоляцию.

Традиционные средства виброизоляции представлены в основном пружинными виброизоляторами или различными упругими

материалами в виде сплошных изделий (в основном резинами). Как показывает опыт, данные средства защиты имеют ограниченную эффективность.

Современные достижения в области аддитивного производства позволяют создавать новые возможности в области метаматериалов. Метаматериал - это конструкция со специальной внутренней структурой, которая придает метаматериалу уникальные свойства, не встречаемые в естественной природе. Например, материалы с отрицательным коэффициентом Пуассона практически не существуют в природе, однако благодаря метаматериалу получение материалов и веществ с уникальными свойствами становится технически возможным [4]. В целом, метаматериалы позволяют получать уникальные свойства в различных областях, и на данный момент они активно развиваются в акустике, оптике, электромагнетизме и ряде других областях. Иногда метаматериалы также называют «интеллектуальными материалами».

На данный момент область применения метаматериалов постоянно расширяется, создаются новые подходы к созданию структуры метаматериалов, синтезируются заданные свойства, находятся перспективные области применения.

Современные достижения в области аддитивных технологий, трехмерной печати, открывают широкие возможности в области создания метаматериалов. В частности, такой подход можно использовать для создания специальных упругих структур в эластичных конструкциях, иначе говоря, для создания новых средств защиты от вибрации и ударов [5, 6]. Создавая различные внутренние структуры упругих метаматериалов, можно придавать им различные силовые характеристики (различные зависимости их восстанавливающей силы от сжатия), в том числе и нелинейные.

Стоит отметить, что упругие конструкции и материалы с нелинейной силовой характеристикой с практически пологим участком получили названия систем с квазиулевой жесткостью [7]. Такие системы на данный момент активно развиваются в области защиты от вибрации и ударов, поскольку обес-

печивают практически полное отсутствие передаваемой динамической силы, что делает их крайне эффективными средствами виброизоляции [8, 9]. Обеспечение практически нулевой (квазинулевой) жесткости при определенной нагрузке позволит одновременно иметь малую частоту собственных колебаний, широкий диапазон изолируемых частот и очень высокие виброизоляционные свойства, больше, чем у традиционных материалов или виброизоляторов.

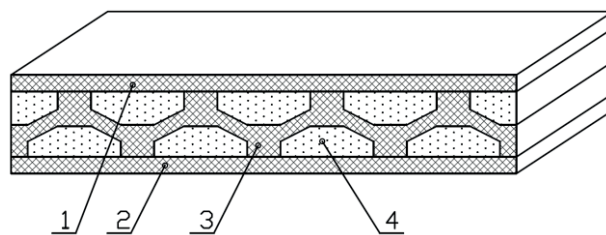
Благодаря 3D-аддитивной технологии и использованию концепции метаматериалов с квазинулевой жесткостью можно создавать средства защиты от ударов и системы виброизоляции, которые могут быть очень тонкими и компактными. Один слой материала может быть меньше нескольких миллиметров. Кроме того, создание метаматериала с разными слоями приводит к конструкции с набором специальных свойств.

Использование периодических структур наподобие метаматериалов в области ударозащитных и виброизоляционных метаматериалов изучалось авторами A. Carrella [10], D.M Correa, C.C. Seepersad и M.R Haberman [11, 12], Зотовым А.Н., Тихоновым А.Ю. [13]. Также известен метаматериал для широкополосной виброизоляции на низкой частоте авторов Z. Wang, Q. Zhang, K. Zhang и G. Hu [14].

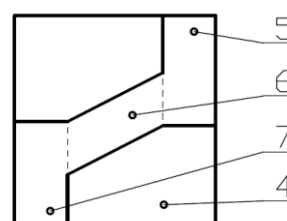
Далее будет представлена концепция виброзащитного метаматериала с внутренней структурой, обеспечивающей квазинулевую жесткость при его сжатии. Принципиальный вид такого материала представлен на рисунке 1.

Предлагаемый виброзащитный метаматериал состоит из двух внешних упругих слоев 1 и 2 (рисунок 1), а также внутреннего слоя. Этот внутренний слой представляет собой упругую волнообразную структуру 3; свободное пространство вокруг нее заполнено более мягким упругим материалом 4. Упругая волнообразная структура 3 и упругий материал 4 представляют собой периодическую структуру из ячеек. Ячейка панели условно состоит из верхней опорной стенки 5, стенки 6, нижней опорной стенки 7 и упругого мате-

риала 4, который заполняет оставшееся свободное пространство.



а)



б)

- 1, 2 - упругие слои; 3 - внутренний слой;
- 4 - наполнитель; 5 - верхняя опорная стенка одной ячейки;
- 6 - наклонная стенка одной ячейки;
- 7 - верхняя опорная стенка одной ячейки

- а) общий эскиз;
- б) эскиз одной ячейки

Рисунок 1. Концепция виброзащитного метаматериала с внутренней структурой, обеспечивающей квазинулевую жесткость

В качестве материала упругих слоев 1, 2 и 3 может быть упругий материал, допускающий большую упругую деформацию, например резина, ее производные, полиуретаны, другие упругие полимерные материалы. В качестве наполнителя 4 может быть упругий материал, обладающий меньшим модулем упругости по сравнению с упругими слоями 1 и 2, а также газами, в частности воздухом.

Рассмотрим механику одной ячейки. Стенка 6 испытывает два вида деформации: изгиб и сжатие в радиальном направлении. Деформация изгибом стенки 6 без учета деформации сжатия имеет линейную силовую характеристику. По мере сжатия ячейки радиальное сжатие стенки 6 увеличивается. Это приводит к тому, что стенка 6 стремится вернуться в исходное положение, компенсируя деформацию за счет изгиба. Данное обстоятельство придает силовой характеристике ячейки заданную нелинейную силовую характеристику. При большем сжатии ячейки радиальное сжатие стенки 6 достигает своего максимума. Размеры элементов ячейки и упругие свойства верхней опорной стенки 5, стенки 6, нижней опорной стенки 7 и заполнителя 4 подбираются таким образом, чтобы в данном положении наблюдалась квазиузеловая жесткость. Нагрузка, соответствующая этому положению, является номинальной (рабочей).

Ячейки формируют упругую волнообразную структуру, которая в целом также обладает в определенном положении квазиузеловой жесткостью. Следовательно, это придает всему виброзащитному метаматериалу также квазиузеловую жесткость.

Проведено предварительное математическое моделирование одной ячейки предлагаемого метаматериала.

На рисунке 2 показаны принимаемые геометрические размеры ячейки.

Для проведения предварительного математического анализа и установления силовой характеристики воспользуемся энергетическим методом. Деформация одной ячейки складывается из следующих деформаций: сжатия зоны I, сжатия зоны II, продольного сжатия наклонной стенки, изгиба наклонной стенки.

Энергия сжатия для зоны I определяется выражением:

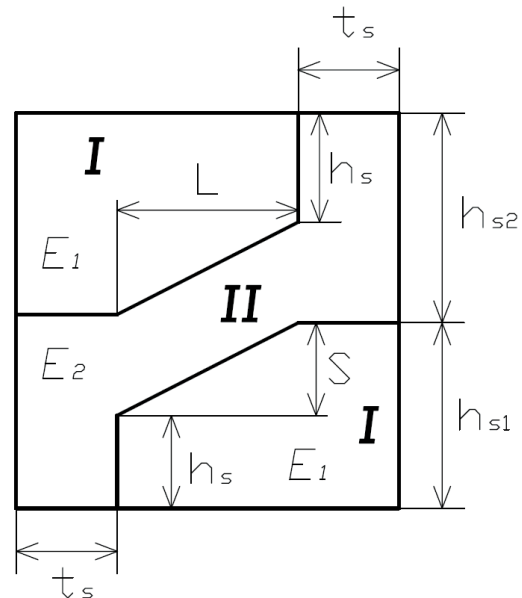
$$W_{ts1} = \frac{E_1 b (L + t_s)}{\frac{1}{2} (h_{s2} + h_s)} \cdot \frac{\left(\Delta h_1 + \Delta h_2 \frac{h_s}{h_s + t} \right)^2}{2}; \quad (1)$$

где E_1 - модуль упругости материала I;

Δh_1 - изменение величины h_1 под нагрузкой;

Δh_2 - изменение величины h_2 под нагрузкой;

b - толщина метматериала.



E_1 - модуль упругости материала I;
 E_2 - модуль упругости материала II;
 L, S, t_s, h_s, t, t_0 - геометрические размеры

Рисунок 2. Размеры одной ячейки метаматериала

Энергия сжатия для зоны II определяется выражением:

$$W_{ts2} = \frac{E_2 b t_s}{h_{s2}} \cdot \frac{\Delta h_2^2}{2}, \quad (2)$$

где E_2 - модуль упругости материала II.

Энергия сжатия наклонной стенки равна:

$$W_c = \frac{E_2 b t_s}{\sqrt{L^2 + S^2}} \cdot \frac{\Delta L^2}{2}, \quad (3)$$

где ΔL - изменение величины L под нагрузкой.

Энергия изгиба наклонной стенки равна

$$W_b = \frac{1}{8} \frac{E_2 b t^3}{(\sqrt{L^2 + S^2})^3} \cdot \Delta S^2, \quad (4)$$

где ΔS - изменение величины S под нагрузкой.

Пусть x - сжатие метаматериала.

Тогда из геометрических соображений справедливы следующие соотношения между геометрическими параметрами:

$$\begin{aligned} \Delta x_1 &= \frac{E_2}{E_1 + E_2} \cdot x; \\ \Delta x_2 &= \frac{E_1}{E_1 + E_2} \cdot x; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\Delta L = \sqrt{S^2 + L^2} - \sqrt{(S - \Delta S)^2 + L^2};$$

$$\Delta S = S - \left[(h_{s1} - \Delta h_1) - \left(h_s - \frac{h_s}{h_s + t_0} \Delta h_2 \right) \right]; \quad (6)$$

$$h_{s1} = h_s + S;$$

$$h_{s2} = h_s + t_0;$$

$$t_0 = t \sqrt{1 + \frac{S^2}{L^2}}. \quad (7)$$

Полная потенциальная энергия равна:

$$W = 2W_{is1} + 2W_{is2} + W_c + W_b. \quad (8)$$

Для получения квазиулевого жесткости необходимо равенство жесткости в определенной точке.

Восстанавливающая сила определяется как первая производная от полной потенциальной энергии по перемещению, а жесткость как вторая производная.

Таким образом, должно выполняться условие

$$\frac{\partial^2 W}{\partial x^2}(S) = 0. \quad (9)$$

Проведен анализ параметров. Установлено, что квазиулевого жесткость достигается при следующих параметрах:

$$\begin{aligned} \frac{E_1}{E_2} &= 0,01; \quad \frac{b}{L} = 1; \quad \frac{h_s}{L} = 0,1; \\ \frac{t_s}{L} &= 0,1; \quad \frac{t}{L} = 0,4; \quad \frac{S}{L} = 0,61. \end{aligned} \quad (10)$$

Для данных параметров оптимальная нагрузка определяется следующим безразмерным выражением:

$$\frac{F}{bLE_2} = 0,042. \quad (11)$$

Итак, для параметров одной ячейки

$$E_2 = 10 \text{ МПа}; \quad E_1 = 0,1 \text{ МПа};$$

$$L = 10 \text{ мм}; \quad b = 10 \text{ мм};$$

$$h_s = 5 \text{ мм}; \quad t_s = 5 \text{ мм};$$

$$t = 4 \text{ мм}; \quad S = 6,1 \text{ мм}$$

оптимальная нагрузка (т.е. когда достигается квазиулевого жесткость, и, соответственно, виброударозащитные свойства наилучшие) равна 8 Н, или 8154 кг/м².

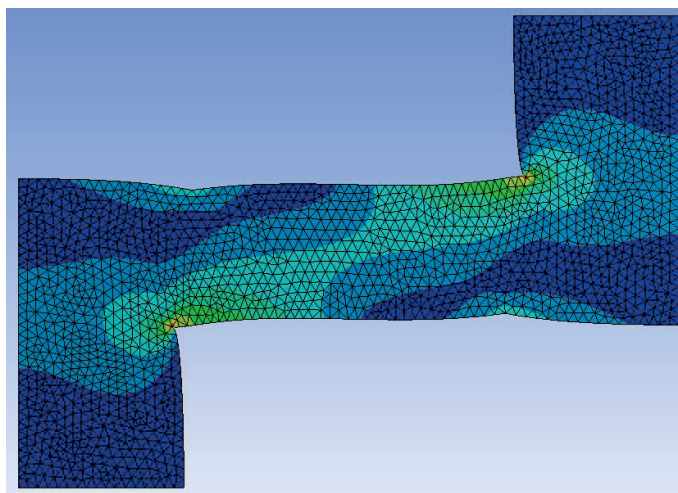
Для проверки данных результатов проведено компьютерное моделирование одной ячейки при помощи программного пакета ANSYS. Общий вид модели представлен на рисунке 3.

Было произведено последовательное нагружение компьютерной модели. Полученная силовая характеристика представлена на рисунке 4.

Таким образом, по данным компьютерного анализа получена оптимальная нагрузка 8,5 Н, которая достигается при сжатии 5,5 мм. Данные результаты хорошо сходятся с данными предварительного математического моделирования.

Для проверки возможности изготовления данных метаматериалов были изданы демонстрационные образцы при помощи печати на 3D принтере Picaso Designer (рисунок 5).

Был использован упругий пластик с модулем Юнга 74 МПа. Толщина слоев составила 0,3 мм.



наибольшие напряжения - 3,146 МПа (красный цвет);
наименьшие напряжения - 0,005 МПа (синий цвет)

Рисунок 3. Компьютерная модель одной ячейки (материал с меньшей упругостью на данном изображении скрыт)

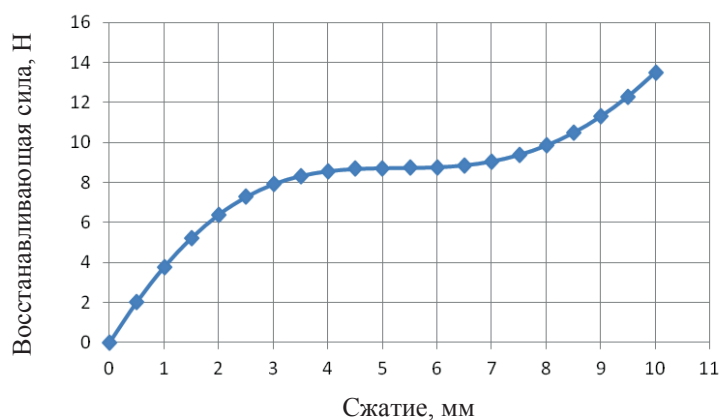


Рисунок 4. Силовая характеристика одиночной ячейки метаматериала



Рисунок 5. Демонстрационные образцы виброударозащитного метаматериала

Вывод

Анализ полученных образцов показал, что при помощи 3D печати возможно создание разрабатываемых виброударозащитных метаматериалов, которые потенциально могут иметь высокие эксплуатационные свойства.

Предлагаемая структура метаматериалов позволяет эффективно и плавно гасить колебания объектов, иначе говоря, иметь вы-

сокие виброизоляционные и ударозащитные свойства, и быть эффективной на различных объектах нефтегазовой отрасли, как в добыче, так и на объектах транспорта и хранения нефти и газа.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-2965.2018.8.

Список литературы

1. Hassan R. McManus K. Perception of Low Frequency Vibrations by Heavy Vehicle Drivers // *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*. 2009. Vol. 21. P. 65-76.
2. Takahashi Y., Harada N.A. Consideration of an Evaluation Index for High-Level Low-Frequency Noise by Taking into Account the Effect of Human Body Vibration // *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*. 2009. Vol. 26. P. 15-27.
3. Takahashi Y.A. Consideration of the Relationship between Subjective Unpleasantness and Body Surface Vibrations Induced by High-Level, Complex Low Frequency Noise // *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*. 2009. Vol. 6. P. 7-17.
4. Li D., Dong L., Yin J., Dong L., Lakes R.S. Numerical Analysis on Mechanical Behaviors of Hierarchical Cellular Structures with Negative Poisson's Ratio // *Smart Materials and Structures*. 2017. Vol. 26. 7 p.
5. Valeev A. Numerical and Experimental Analysis of Metamaterials with Quasi-Zero Effect for Vibration Isolation // *AIP Conference Proceedings*. 2017. Vol. 1859. 4 p.
6. Valeev A. Vibration Isolating Metamaterial with Arc-Structure // *IOP Conference Proceedings*. 2017. Vol. 225. 6 p.
7. Alabuzhev P.A., Gritchin L., Kim L., Migirenko G., Chon V., Stepanov P. *Vibration Protecting and Measuring Systems with Quasi-Zero Stiffness*. New York: Hemisphere Publ., 1989. 100 p.
8. Valeev A.R., Kharisov Sh. A. Application of Vibration Isolators with a Low Stiffness for the Strongly Vibrating Equipment // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 150. P. 641-646.
9. Valeev A.R., Zotov A.N., Kharisov Sh. A. Designing of Compact Low Frequency Vibration Isolator with Quasi-Zero Stiffness // *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*. 2015. Vol. 34 (4). P. 459-474.
10. Carrella A. *Passive Vibration Isolators with High-Static-Low-Dynamic-Stiffness: Cand. Engin. Sci. Diss.* UK, University of Southampton, 2008. 226 p.

References

1. Hassan R. McManus K. Perception of Low Frequency Vibrations by Heavy Vehicle Drivers. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 2009, Vol. 21, pp. 65-76.
2. Takahashi Y., Harada N.A. Consideration of an Evaluation Index for High-Level Low-Frequency Noise by Taking into Account the Effect of Human Body Vibration. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 2009, Vol. 26, pp. 15-27.
3. Takahashi Y.A. Consideration of the Relationship between Subjective Unpleasantness and Body Surface Vibrations Induced by High-Level, Complex Low Frequency Noise. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 2009, Vol. 6, pp. 7-17.
4. Li D., Dong L., Yin J., Dong L., Lakes R.S. Numerical Analysis on Mechanical Behaviors of Hierarchical Cellular Structures with Negative Poisson's Ratio. *Smart Materials and Structures*, 2017, Vol. 26, 7 p.
5. Valeev A. Numerical and Experimental Analysis of Metamaterials with Quasi-Zero Effect for Vibration Isolation. *AIP Conference Proceedings*, 2017, Vol. 1859, 4 p.
6. Valeev A. Vibration Isolating Metamaterial with Arc-Structure. *IOP Conference Proceedings*, 2017, Vol. 225, 6 p.
7. Alabuzhev P.A., Gritchin L., Kim L., Migirenko G., Chon V., Stepanov P. *Vibration Protecting and Measuring Systems with Quasi-Zero Stiffness*. New York, Hemisphere Publ., 1989. 100 p.
8. Valeev A.R., Kharisov Sh. A. Application of Vibration Isolators with a Low Stiffness for the Strongly Vibrating Equipment. *Procedia Engineering*, 2016, Vol. 150, pp. 641-646.
9. Valeev A.R., Zotov A.N., Kharisov Sh. A. Designing of Compact Low Frequency Vibration Isolator with Quasi-Zero Stiffness. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 2015, Vol. 34 (4), pp. 459-474.
10. Carrella A. *Passive Vibration Isolators with High-Static-Low-Dynamic-Stiffness: Cand. Engin. Sci. Diss.* UK, University of Southampton, 2008. 226 p.

11. Corre D.M., Seepersad C.C., Haberman M.R. Mechanical Design of Negative Stiffness Honeycomb Materials // *Integrating Materials and Manufacturing Innovation*, 2015, Vol. 4:10, 11 p.

12. Correa D.M., Klatt T.D., Cortes S.A., Haberman M.R., Kovar D., Seepersad C.C. Negative Stiffness Honeycombs for Recoverable Shock Isolation // *Rapid Prototyping Journal*, 2015, Vol. 21(2), P. 193-200.

13. Валеев А.Р., Зотов А.Н., Тихонов А.Ю. Виброизоляционная подвеска валов с квазинулевой жесткостью // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2010. Вып. 3. С. 68-77.

14. Wang Z., Zhang Q., Zhang K., Hu G. Tunable Digital Metamaterial for Broadband Vibration Isolation at Low Frequency // *Advanced Materials*, 2016, Vol. 28, P. 9857-9861.

11. Corre D.M., Seepersad C.C., Haberman M.R. Mechanical Design of Negative Stiffness Honeycomb Materials. *Integrating Materials and Manufacturing Innovation*, 2015, Vol. 4:10, 11 p.

12. Correa D.M., Klatt T.D., Cortes S.A., Haberman M.R., Kovar D., Seepersad C.C. Negative Stiffness Honeycombs for Recoverable Shock Isolation. *Rapid Prototyping Journal*, 2015, Vol. 21(2), pp. 193-200.

13. Valeev A.R., Zotov A.N., Tikhonov A.Yu. Vibrozolyatsionnaya podveska valov s kvazinulevoi zhestkost'yu [Vibration Isolation Suspension of Shafts with Quasi-Zero Stiffness]. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefti i nefteproduktov - Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*, 2010, No. 3, pp. 68-77. [in Russian].

14. Wang Z., Zhang Q., Zhang K., Hu G. Tunable Digital Metamaterial for Broadband Vibration Isolation at Low Frequency. *Advanced Materials*, 2016, Vol. 28, pp. 9857-9861.

Авторы

• Валеев Анвар Рашитович, канд. техн. наук
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
Доцент кафедры «Транспорт и хранение нефти
и газа»
Российская Федерация, 450062, г. Уфа,
ул. Космонавтов, 1
e-mail: anv-v@yandex.ru

• Колчин Александр Владимирович
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
Старший преподаватель кафедры
«Транспорт и хранение нефти и газа»
Российская Федерация, 450062, г. Уфа,
ул. Космонавтов, 1
e-mail: kolchin-alexander@mail.ru

• Горбунова Елизавета Игоревна
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
Студент кафедры «Автоматизация
технологических процессов и производств»
Российская Федерация, 450062, г. Уфа,
ул. Космонавтов, 1
e-mail: lizoknuf@gmail.com

• Садреева Карина Каримовна
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
Студент кафедры «Прикладная экология»
Российская Федерация, 450062, г. Уфа,
ул. Космонавтов, 1
e-mail: sadreeva-karina@mail.ru

The Authors

• Valeev Anvar R., Candidate of Engineering
Sciences
Ufa State Petroleum Technological University
Assistant Professor of Oil and Gas Transport
and Storage Department
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450062,
Russian Federation
e-mail: anv-v@yandex.ru

• Kolchin Aleksandr V.
Ufa State Petroleum Technological University
Senior Lecturer of Oil and Gas Transport
and Storage Department 1, Kosmonavtov str.,
Ufa, 450062, Russian Federation
e-mail: kolchin-alexander@mail.ru

• Gorbunova Elizaveta I.
Ufa State Petroleum Technological University
Student of Automation of Technological Processes
and Industrial Facilities Department
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450062,
Russian Federation
e-mail: lizoknuf@gmail.com

• Sadreeva Karina K.
Ufa State Petroleum Technological University
Student of Applied Ecology Department
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450062,
Russian Federation
e-mail: sadreeva-karina@mail.ru