

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.127.41>

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В МОДЕЛЯХ ГОФРИРОВАННЫХ ОБОЛОЧЕК

Научная статья

Кривошеева С.^{1,*}

¹ Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (krivosheevaj[at]tyuiu.ru)

Аннотация

Гибкие металлические трубопроводы (ГМТ) широко используются в разных отраслях промышленности. Условия их эксплуатации часто связаны с повышенной температурой, агрессивной средой, колебаниями, возникающими при работе агрегатов. Предотвращение разрушения гибких металлических рукавов и продление сроков их работы является предметом данных исследований. В работе исследовано влияние геометрии гофрированных оболочек и скорости протекания жидкости на возникновение разных форм колебаний. Рассмотрено влияние всех этих факторов, в совокупности, на процесс разрушения ГМТ. На основании проведенных лабораторных исследований построены графические зависимости, позволяющие наглядно убедиться в правильности сделанных выводов.

Ключевые слова: гибкий металлический трубопровод, колебания гофрированной оболочки, колебания уровня жидкости в гофрах.

A STUDY OF FLUID FLOW IN CORRUGATED SHELL MODELS

Research article

Krivosheeva S.^{1,*}

¹ Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation

* Corresponding author (krivosheevaj[at]tyuiu.ru)

Abstract

Flexible metal conduits (FMC) are widely used in various industries. Their operating conditions are often associated with elevated temperatures, corrosive environments, vibrations that occur during the work of units. Prevention of rupture of flexible metal tubes and extension of their operating life is the subject of this research. The influence of geometry of corrugated shells and fluid flow velocity on the occurrence of different forms of oscillations is examined in the paper. The influence of all these factors, in the aggregate, on the process of rupture of FMCs is reviewed. On the basis of the laboratory studies, graphical dependences were drawn, which allow to visually verify the accuracy of the conclusions made.

Keywords: flexible metal pipeline, fluctuations of the corrugated shell, fluctuations of the liquid level in the corrugations.

Введение

Гибкие металлические трубопроводы (ГМТ) широко применяются в различных отраслях промышленности: нефтедобывающей, нефтеперерабатывающей, в машиностроении, в трубопроводных системах авиационной техники и т.д. При разрушении ГМТ происходит остановка работы всего агрегата, поэтому важно исследовать все негативные факторы, действующие на гофрированные оболочки, и учесть их еще на этапе проектирования ГМТ.

Работа гибких трубопроводов происходит в агрессивной среде, они подвергаются вибрациям, вызывающими колебания различных форм, на них действуют статические и динамические нагрузки. Через ГМТ могут перекачиваться криогенные жидкости, присутствует пульсация давления потока. Все это создает условия для преждевременного разрушения ГМТ и выхода из строя агрегата. Исследованиям всех этих факторов посвящены работы и научные исследования различных авторов. В данной работе исследовано течение жидкости в моделях гофрированной оболочки.

При эксплуатации гибких металлических рукавов было замечено, что гофрированная оболочка при некоторых скоростях потока жидкости испытывает значительные колебания, которые часто заканчиваются разрушением гибкого рукава [1], [2], [3].

Анализ литературы [4], [6], [9], [11] по данному вопросу приводит к выводу, что причина такого явления кроется в высокочастотных резонансных продольных колебаниях гофрированной оболочки, которые вызывают ее усталостное разрушение. Резонансные колебания возникают при совпадении частоты пульсации давления с частотой собственных колебаний гофрированных оболочек. Пульсация давления образуется в результате периодических срывов вихрей с впадин гофров.

Методы и принципы исследования

Для изучения механизма возбуждения колебаний гофрированной оболочки использован метод гидравлической аналогии [12], [13], [14]. Для проливки в гидрлотке были изготовлены плоские модели гофрированной оболочки в увеличенном масштабе.

Для математического описания движения газа или жидкости используют число Струхалия и число Маха.

Число Струхалия:

$$Sh = \frac{fL}{v},$$

где f – характерная частота образования вихрей,

L – характерный линейный размер течения,

v – характерная скорость потока.

Число Маха – это безразмерная величина скорости потока к локальной скорости звука:

$$M = \frac{u}{c},$$

где u – локальная скорость потока относительно границ внутренних или внешних,

c – скорость звука в среде.

Для наглядности процесса обтекания гофров потоком на поверхность жидкости наносилась алюминиевая пудра. Картины обтекания фотографировались. В гофра, в зависимости от их геометрии, существуют стационарные вихри, которые при увеличении скорости потока медленно увеличивают свою интенсивность, оставаясь внутри гофра. Начиная с определенной скорости потока, с подветренной стороны впадины гофра начинают срывать мелкие вихри, вызывая при этом незначительные колебания уровня жидкости в полости гофра. Срыв вихря инициирует колебание давления в гофрированной оболочке. Такой режим периодического срыва вихрей с гофров сохраняется при дальнейшем увеличении скорости потока. Колебания уровня жидкости остаются незначительными.

Основные результаты

В процессе проливки всех образцов, моделирующих гибкую оболочку, в определенном диапазоне скоростей наблюдается особый режим, при котором возрастала амплитуда колебаний уровня жидкости в гофра. Этот процесс периодический и устойчивый. Если в поток вносились возмущения, прекращающие колебания, то после их снятия картина восстанавливалась.

Было замечено существование двух форм колебаний уровня жидкости:

- с длиной волны, включающей четыре гофра;
- с длиной волны, включающей два гофра.

По мере роста скорости потока увеличивается скорость срыва вихрей в гребне гофра (f_c), которая пропорциональна скорости потока. Процесс срыва вихрей приводит к колебанию уровня жидкости в полости гофра. Эти колебания происходят с частотой, определяемой геометрией полости (f_s).

При определенном соотношении этих частот (f_c/f_s) колебания жидкости в гофре начинают вызывать преждевременный отрыв вихрей, то есть частота срывов вихрей подстраивается под частоту собственных колебаний полости и наступает резонанс. При этом режиме в полости гофра заметен только один нестационарный интенсивный вихрь, который периодически образуется и срывается. Этот процесс происходит в определенном диапазоне скорости течения жидкости, который можно назвать диапазоном «затягивания в синхронизм».

Исследование моделей гофрированных оболочек с различной геометрией гофров показала, что критическая скорость и диапазон «затягивания в синхронизм» зависит от шага гофрировки [15], [16]. Это связано с тем, что с изменением шага изменяется и собственная частота колебаний уровня жидкости в полости модели (f_s).

Исследование влияния геометрии гофра на процесс вихреобразования показал, что уменьшение шага гофрировки сдвигает «диапазон затягивания в синхронизм» в сторону увеличения скорости потока. Это связано с тем, что уменьшается масса газа, заключенного в полости гофра и увеличивается собственная частота колебаний оболочки (рис. 1).

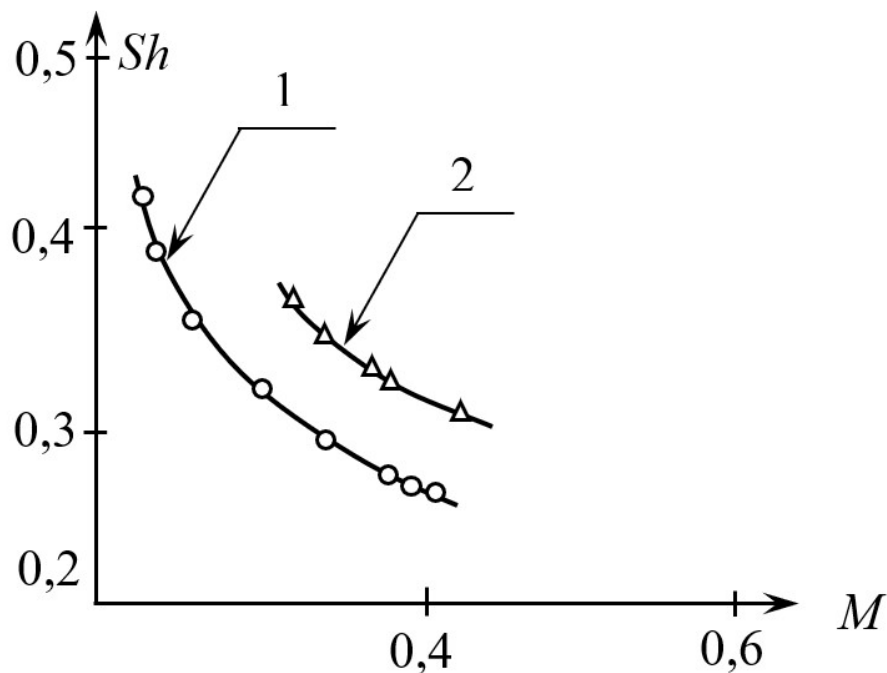


Рисунок 1 - Зависимость числа Струхалия от числа Маха:
 1 – оболочка с прямыми гофрами; 2 – оболочка со сближенными гофрами
 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.127.41.1>

Обсуждение

Выводы, полученные на основании результатов проливки моделей в гидрлотке подтверждены на гидроустановке при проливке натуральных образцов $D_v = 40$ мм. Мощность установки позволила на образцах получать скорость до 10 м/с. Перед проливкой образцы препарировались тензодатчиками по вершинам гофров. Наличие тензодатчиков позволило определять не только уровень напряжения в гофрированной оболочке, но и номер наблюдаемой формы колебаний. Распределение напряжений по длине гофрированной оболочки при различных формах колебаний представлено на рис. 2.

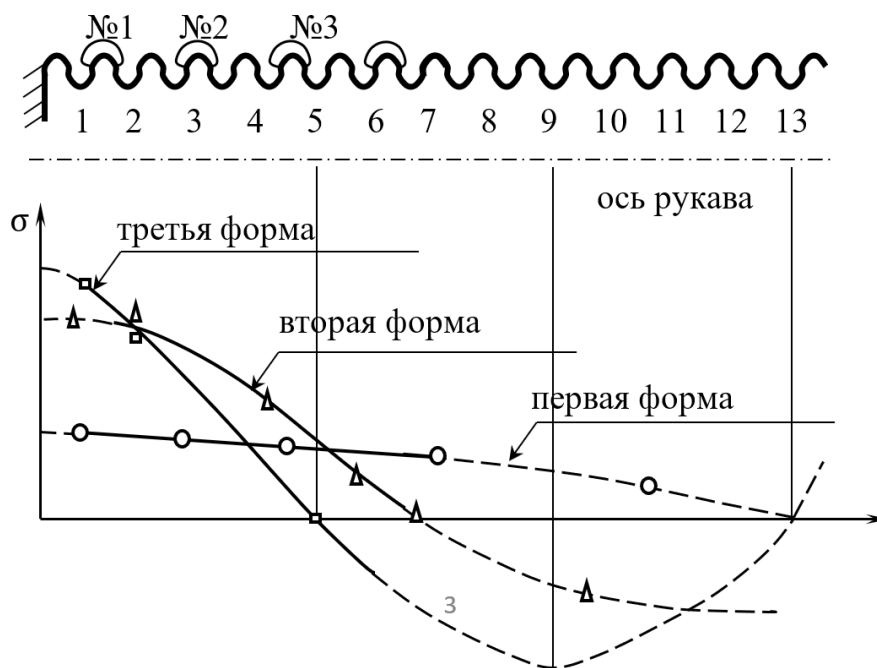


Рисунок 2 - Распределение напряжений по длине гофрированной оболочки при различных формах колебаний
 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.127.41.2>

Зависимость уровня напряжений от скорости потока для различных форм колебаний оболочки представлена на рис. 3.

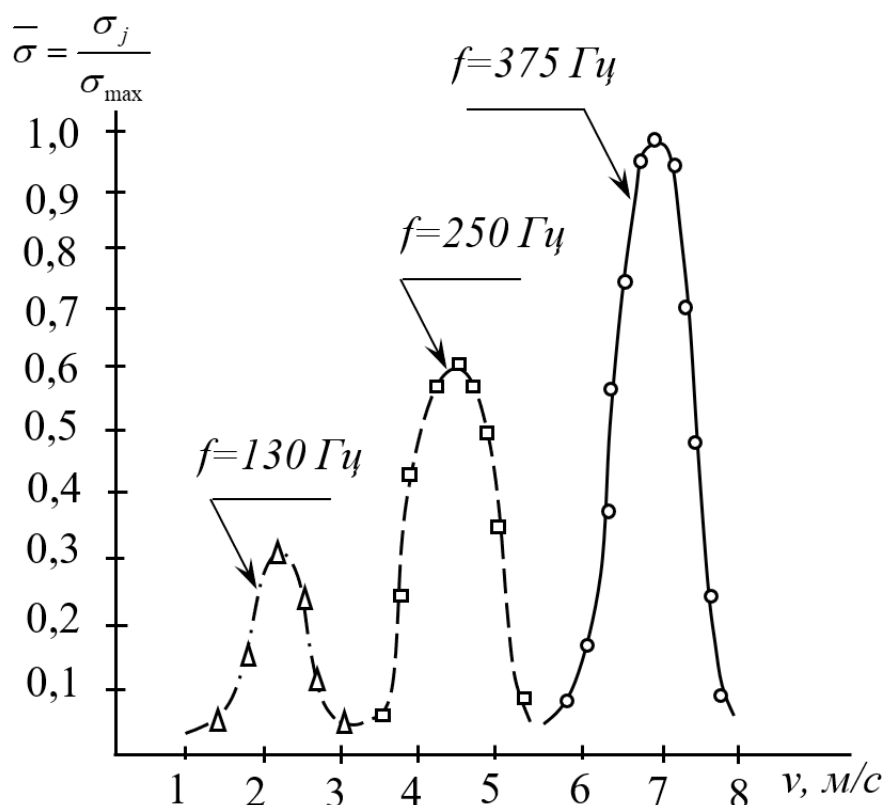


Рисунок 3 - Зависимость уровня напряжений от скорости потока для различных форм колебаний оболочки с числом гофров 33

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.127.41.3>

Номер получаемой формы колебаний зависит от величины скорости потока, при этом каждой форме колебаний соответствует свой определенный диапазон скоростей. В этом диапазоне колебания оболочки происходят с определенной частотой, а уровень напряжений имеет максимум и минимум колебаний.

Переход от одной формы колебаний к другой происходит скачкообразно в узком диапазоне скоростей. С увеличением скорости потока происходит увеличение номера формы колебаний.

Заключение

Анализ исследований, проведенных на гидрлотке, позволяет сделать следующие выводы:

1. При движении газа в гофрированной оболочке возникает отрывное обтекание гофр, выражающееся в периодическом срыве вихрей с впадин гофров. Срыв вихрей вызывает колебание давления в полости гофра, что может привести к резонансным колебаниям гофрированной оболочки.

2. Пульсация давления в полости гофра имеет малую интенсивность, но при совпадении частоты срыва вихрей с собственной частотой колебания газа, заключенного в полости гофра, наблюдается резкое увеличение интенсивности срывающихся вихрей и пульсаций давления в полости гофра.

Анализируя графические зависимости, представленные на рис.3 можно сделать вывод о том, что с увеличением формы колебаний увеличивается уровень напряжений в гофрах гофрированной оболочки и возрастает опасность разрушений с ростом номера формы колебаний.

Полученные в результате исследований результаты, должны быть учтены на этапе проектирования гибких металлических рукавов и при выборе оптимальных условий их работы. Это значительно продлит срок их эксплуатации.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Головина Н.Я. Исследование вынужденных колебаний гибких металлических трубопроводов машин и агрегатов: дис. ... канд. тех. наук / Н.Я. Головина. — Тюмень, 2002.
2. Глебович С.А. Действие внутреннего давления на сильфонный компенсатор / С.А. Глебович // Актуальные проблемы современной науки. — 2017. — 6(97). — с. 89-91.
3. Кривошеева С.Я. Влияние внутреннего давления и деформации на устойчивость гибких металлических трубопроводов / С.Я. Кривошеева // Отраслевые аспекты технических наук. — 2012. — 5(17). — с. 20-21.
4. Кривошеева С.Я. Исследование влияния осевой жесткости на работу гибких металлических трубопроводов / С.Я. Кривошеева, Н.Я. Головина // Научное обозрение. — 2016. — 16. — с. 213-216.
5. Golovina N.Y. Analysis on compressor blading conditions of helicopter's gas-turbine engine working in polluted environment / N.Y. Golovina, L.G. Akhmetov, A.N. Vikharev et al. // International Journal of Applied Engineering Research. — 2017. — Vol. 12. — 3. — p. 293-296.
6. Копытов А.А. Сильфон, расчёт перемещения границы потоков / А.А. Копытов, А.М. Мейрманов, О.В. Гальцев // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Медицина. Фармация. — 2011. — 10(105). — с. 218-222.
7. Головина Н.Я. Вопросы устойчивости вынужденных поперечных колебаний гибких металлических трубопроводов / Н.Я. Головина // Научное обозрение. — 2014. — 10-1. — с. 63-66.
8. Golovina N.Y. Research in area of longevity of sylphon scraies / N.Y. Golovina, S.Y. Krivosheeva // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Current Problems and Solutions. — 2018. — p. 012043.
9. Баклушина И.В. Сильфонный компенсатор как энергоэффективный конструктивный элемент тепловой сети / И.В. Баклушина // Моделирование и механика конструкций. — 2015. — 2. — с. 16.
10. Головина Н.Я. Сравнительный анализ моделей ресурса пластичных материалов / Н.Я. Головина // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Сборник трудов. В 4-х томах. — 2019. — с. 611-613.
11. Головина Н.Я. Анализ повреждений лопаточного аппарата газотурбинных двигателей / Н.Я. Головина // Естественные и технические науки. — 2011. — 2(52). — с. 346-348.
12. Костишин В.С. Моделирование режимов работы центробежных насосов на основе электрогидравлической аналогии / В.С. Костишин. — М.: Ивано-Франковск: ИФДТУНГ. — 2000 — с. 115.
13. Кузьмин С.А. Подбор насосов для инженерных объектов / С.А. Кузьмин, О.Е. Волков // Ремонт, восстановление, модернизация. — М.: Металлургия, 2003. — 11. — с. 38-42.
14. Волков О.Е. К вопросу моделирования гидравлических систем методом электрических аналогий / О.Е. Волков, В.А. Корнев, Р.И. Кюннап // Труды 25 ГосНИИ МО РФ. — 2016. — 57. — с. 449-451.
15. Кривошеева С.Я. Влияние рассеяния энергии на долговечность работы гибких металлических трубопроводов / С.Я. Кривошеева, Н.Я. Головина // Научное обозрение. — 2015. — 12. — с. 106-108.
16. Тарабрин Г.Т. Пространственная конструкция вида сильфон / Г.Т. Тарабрин // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. — 2021. — 2. — с. 31-41.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Golovina N.Ja. Issledovanie vynuzhdennyh kolebanij gibkih metallicheskih truboprovodov mashin i agregatov [Study of Forced Vibrations of Flexible Metal Piping of Machines and Aggregates]: dis. ... for PhD in Technical Sciences / N.Ja. Golovina. — Tyumen, 2002. [in Russian]
2. Glebovich S.A. Dejstvie vnutrennego davlenija na sil'fonnyj kompensator [The Effect of Internal Pressure on the Bellows Expansion Joint] / S.A. Glebovich // Aktual'nye problemy sovremennoj nauki [Current Problems of Modern Science]. — 2017. — 6(97). — p. 89-91. [in Russian]
3. Krivosheeva S.Ja. Vlijanie vnutrennego davlenija i deformacii na ustojchivost' gibkih metallicheskih truboprovodov [Impact of Internal Pressure and Deformation on the Stability of Flexible Metal Pipelines] / S.Ja. Krivosheeva // Otrasleyve aspekty tehniceskikh nauk [Branch Aspects of the Technical Sciences]. — 2012. — 5(17). — p. 20-21. [in Russian]
4. Krivosheeva S.Ja. Issledovanie vlijanija osevoj zhestkosti na rabotu gibkih metallicheskih truboprovodov [Study of the Effect of Axial Stiffness on the Operation of Flexible Metal Pipelines] / S.Ja. Krivosheeva, N.Ja. Golovina // Nauchnoe obozrenie [Scientific Review]. — 2016. — 16. — p. 213-216. [in Russian]
5. Golovina N.Y. Analysis on compressor blading conditions of helicopter's gas-turbine engine working in polluted environment / N.Y. Golovina, L.G. Akhmetov, A.N. Vikharev et al. // International Journal of Applied Engineering Research. — 2017. — Vol. 12. — 3. — p. 293-296.
6. Kopytov A.A. Sil'fon, raschjot peremeshhenija granicy potokov [Bellows, Calculation of Flow Boundary Displacement] / A.A. Kopytov, A.M. Mejrmanov, O.V. Gal'cev // Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Medicina. Farmacija [Scientific Journal of Belgorod State University. Series: Medicine. Pharmacy]. — 2011. — 10(105). — p. 218-222. [in Russian]
7. Golovina N.Ja. Voprosy ustojchivosti vynuzhdennyh poperechnyh kolebanij gibkih metallicheskih truboprovodov [Problems of Stability of Forced Transverse Vibrations of Flexible Metal Pipelines] / N.Ja. Golovina // Nauchnoe obozrenie [Scientific Review]. — 2014. — 10-1. — p. 63-66. [in Russian]
8. Golovina N.Y. Research in area of longevity of sylphon scraies / N.Y. Golovina, S.Y. Krivosheeva // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Current Problems and Solutions. — 2018. — p. 012043.
9. Baklushina I.V. Sil'fonnyj kompensator kak jenergojeffektivnyj konstruktivnyj jelement teplovoj seti [Bellows Expansion Joint as an Energy Efficient Construction Element for Heat Networks] / I.V. Baklushina // Modelirovanie i mehanika konstrukcij [Modeling and Mechanics of Structures]. — 2015. — 2. — p. 16. [in Russian]

10. Golovina N.Ja. Sravnitel'nyj analiz modelej resursa plastichnyh materialov [Comparative Analysis of Plastic Life Models] / N.Ja. Golovina // XII Vserossijskij s'ezd po fundamental'nym problemam teoreticheskoj i prikladnoj mehaniki. Sbornik trudov. V 4-h tomah [XII All-Russian Congress on Fundamental Problems of Theoretical and Applied Mechanics. Proceedings. In 4 volumes.]. — 2019. — p. 611-613. [in Russian]
11. Golovina N.Ja. Analiz povrezhdenij lopatochnogo apparata gazoturbinyh dvigatelej [Analysis of Damage to the Blading Apparatus of Gas Turbine Engines] / N.Ja. Golovina // Estestvennye i tehničeskie nauki [Natural and Technical Sciences]. — 2011. — 2(52). — p. 346-348. [in Russian]
12. Kostishin V.S. Modelirovanie rezhimov raboty centrobezhnyh nasosov na osnove jelektrogidravlicheskoj analogii [Modeling of Operating Conditions of Centrifugal Pumps Based on Electro-Hydraulic Analogy] / V.S. Kostishin. — M.: Ivano-Frankovsk: IFDTUNG. — 2000 — p. 115. [in Russian]
13. Kuz'min S.A. Podbor nasosov dlja inženernykh ob'ektov [Selection of Pumps for Engineering Facilities] / S.A. Kuz'min, O.E. Volkov // Remont, vosstanovlenie, modernizacija [Repair, Restoration, Modernization]. — M.: Metallurgija, 2003. — 11. — p. 38-42. [in Russian]
14. Volkov O.E. K voprosu modelirovanija gidravlicheskih sistem metodom jelektricheskih analogij [On the Modeling of Hydraulic Systems by the Method of Electrical Analogies] / O.E. Volkov, V.A. Kornev, R.I. Kjunnap // Trudy 25 GosNII MO RF. [Proceedings of the 25th State Research Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation] — 2016. — 57. — p. 449-451. [in Russian]
15. Krivosheeva S.Ja. Vlijanie rassejanija jenergii na dolgovečnost' raboty gibkih metallicheskih truboprovodov [The Effects of Energy Dissipation on the Durability of Flexible Metal Piping] / S.Ja. Krivosheeva, N.Ja. Golovina // Nauchnoe obozrenie [Scientific Review]. — 2015. — 12. — p. 106-108. [in Russian]
16. Tarabrin G.T. Prostranstvennaja konstrukcija vida sil'fon [Spatial Bellows Design] / G.T. Tarabrin // Izvestija Rossijskoj akademii nauk. Mehanika tverdogo tela [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Mechanics of Solids]. — 2021. — 2. — p. 31-41. [in Russian]