Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»
==========

УДК 532.787

Развитие теории колебаний манометрических трубчатых пружин

Пирогов С.П.[1,2], Чуба А.Ю.[1,3]

[1]Государственный аграрный университет Северного Зауралья

[2]Тюменский индустриальный университет

[3]Уральский государственный университет путей сообщения

Аннотация

В данной статье рассматривается развитие теории колебаний манометрических трубчатых пружин (трубок Бурдона). Также сделан обзор работ, посвященных этой области, показано развитие теории колебаний трубчатых пружин и методы расчетов параметров колебательного движения, в частности, собственных частот и коэффициентов затухания при движении в вязкой среде.

Ключевые слова: ТЕОРИЯ КОЛЕБАНИЙ, МАНОМЕТРИЧЕСКИЕ ТРУБЧАТЫЕ ПРУЖИНЫ, ПАРАМЕТРЫ КОЛЕБАНИЙ, ЧАСТОТА КОЛЕБАНИЙ

Целью исследования является анализ развития методов расчета характеристик колебательных движений манометрических трубчатых пружин.

Задачи исследования:

1. Провести анализ существующих методов расчета характеристик колебательных движений манометрических трубчатых пружин;
2. Определить направление дальнейшего развития методов расчета характеристик колебательных движений манометрических трубчатых пружин.

Введение

Французский механик Бурдон подавал давление во внутреннюю полость змеевика, имеющего сплющенную форму поперечного сечения и обнаружил эффект раскручивания

змеевика при увеличении давления. Ему принадлежит идея использовать это свойство для измерения давления, и он запатентовал манометр, основным рабочим элементом которого была трубчатая пружина. Поэтому трубкой Бурдона до сих пор иногда называют манометрические трубчатые пружины. Первое применение трубчатые пружины нашли в приборах для измерения давления, регистрации разности давлений, расхода жидкости или газа и регистрации температуры в качестве основных рабочих элементов [1]. В последнее время они используются и в качестве силовых элементов различных механизмов – тормозов, робототехнических устройств, сельхозмашин [2-4].

При этом, к трубчатым пружинам предъявляются различные требования по обеспечению необходимых технических характеристик (чувствительность, тяговое усилие, параметры колебательного движения, габариты и др.). Это привело к появлению пружин разнообразных конструкций, которые отличаются между собой по форме продольной оси: С-образные, S-образные; по количеству витков: одновитковые и много витковые; по параметрам трубки-заготовки: с постоянными параметрами и с переменными параметрами поперечного сечения. Наибольшее различие трубчатых пружин заключается в геометрических параметрах поперечного сечения. Наиболее часто встречающимися формами поперечных сечений трубчатых пружин являются плоскоовальная, эллиптическая и восьмеркообразная формы (Рис. 1 а, б, в). Существуют также пружины, форма поперечного сечения которых ромбовидная (Рис. 1 г), бывают с продольными впадинами или гребнями (Рис. 1 ж, з). Поперечное сечение трубчатых пружин может содержать различное количество гребней (гофров) как на наружной, так и на внутренней контурной поверхности пружины. Сечения пружин в форме сегментов (Рис. 1 д, е), когда велика вероятность скачкообразного значительного увеличения давления выше номинального.

Кроме того, трубчатые пружины могут быть изготовлены не только из цельной трубки, но и сваренные из листового материала с различной формой поперечного сечения. Известны также конструкции трубчатых пружин, толщина стенки которых изменяется по периметру поперечного сечения трубки. Все это многообразие трубчатых пружин создает сложности в разработке приемлемых универсальных методов расчета их характеристик. И первые научные труды, посвященные расчету характеристик манометрических трубчатых пружин, предназначались только для пружин определенной конструкции.

Во многих устройствах и технологических процессах используются трубчатые пружины, которые совершают колебательное движение. Важным фактором, влияющим на

результаты работы этих механизмов, являются параметры колебаний трубчатых пружин.

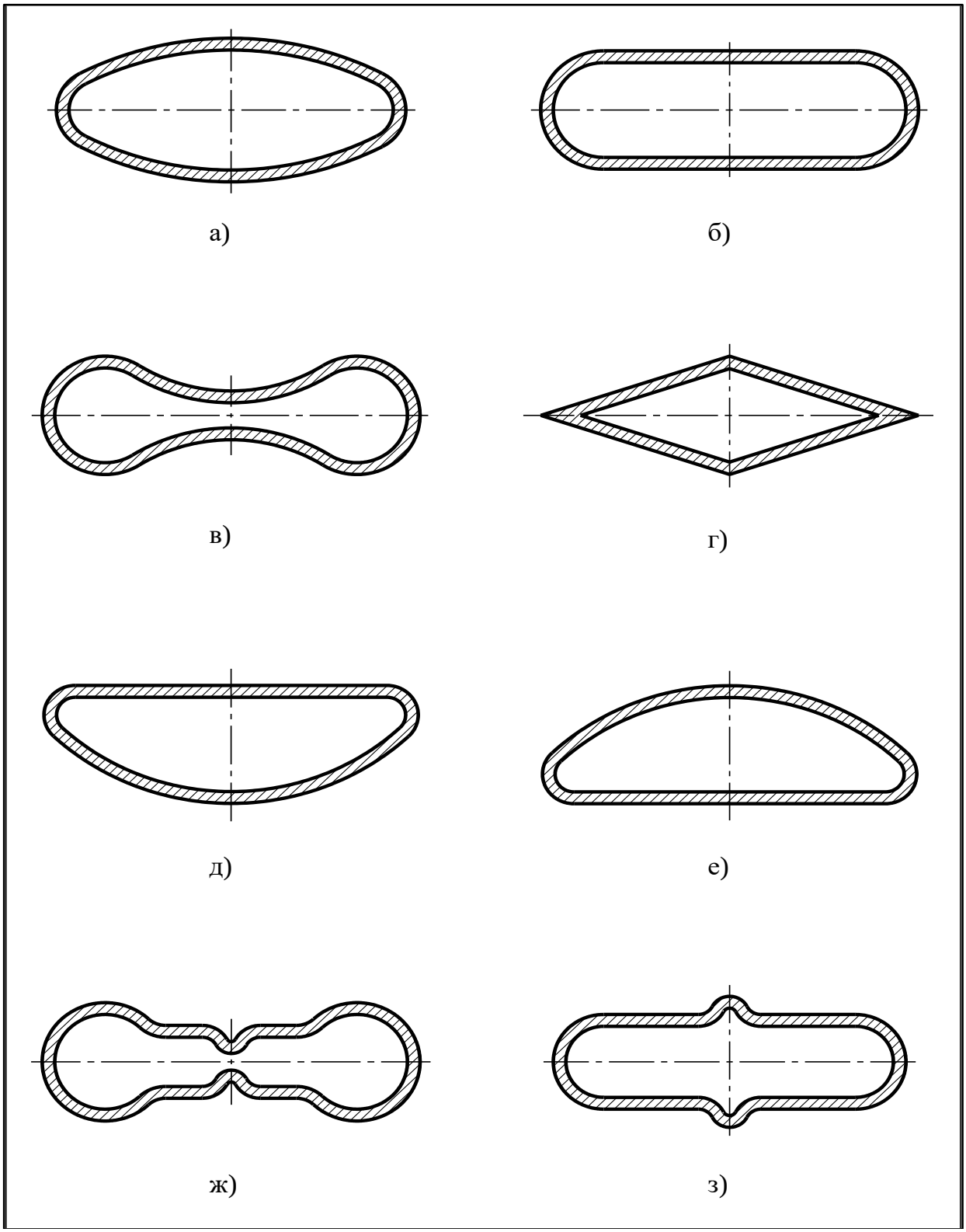

Рис. 1. Варианты поперечных сечений трубчатых пружин

При изгибных колебаниях криволинейных труб в плоскости кривизны центральной оси трубы собственные частоты определяются с использованием стержневой теории по формулам для расчета круговых арок. Например, если труба закреплена с помощью шарнирно неподвижных опор, то круговую частоту ω изгибных колебаний можно определить по следующей формуле [5]:

$$\omega_i = \frac{K_i}{R^2\varphi^2}\sqrt{\frac{EJ}{m}}\,, \qquad (1)$$

где: K_i - коэффициент, зависящий от формы колебаний трубы и от условий закрепления;

R - радиус центральной оси;

φ - центральный угол пружины;

E–модуль упругости материала;

J– осевой момент инерции сечения;

m– масса трубы.

Такой способ определения частот колебаний для манометрических трубчатых пружин не подходит, так как форма поперечного сечения может значительно отличаться от круглой.

Собственные колебания манометрических трубчатых пружин постоянного поперечного сечения исследовал в работе [6] М.П. Гриднев. С использованием стержневой теории и принципа Даламбера была получена система уравнений изгибного движения. Путем преобразования этой системы уравнений получили одно дифференциальное уравнение шестой степени, описывающее изгибные колебания в плоскости ее центральной оси:

$$\frac{\partial^6 V}{\partial\theta^6} + 2\frac{\partial^4 V}{\partial\theta^4} + \frac{\partial^2 V}{\partial\theta^2} + \frac{\rho S R^4}{B}\cdot\frac{\partial^2}{\partial t^2}\left(\frac{\partial^2 V}{\partial\theta^2} - V\right) = 0\,, \qquad (2)$$

где: V – составляющая перемещения элемента в проекции на касательную;

ρ – плотность материала пружины;

S – площадь поперечного сечения трубки;

R – радиус кривизны центральной оси;

B – жесткость пружины на изгиб.

В результате решения была получена формула для определения собственных частот колебаний:

$$\omega = \frac{\beta\gamma^2}{l^2}\sqrt{\frac{EJ_x k}{\left(1-\mu^2\right)\rho S}}\ , \qquad (3)$$

где: γ – центральный угол пружины;

E – модуль упругости;

J_x– момент инерции поперечного сечения;

k – коэффициент Кармана;

l – длина пружины по нейтральной оси;

μ– коэффициент Пуассона;

β – коэффициент, зависящий от центрального угла;

S – площадь поперечного сечения;

ρ – плотность материала.

К недостаткам этого метода можно отнести то, что он применим только для трубчатых пружин, имеющих постоянную толщину стенки трубки и постоянную форму поперечного сечения пружины.

В работах [7-9] разработаны методы расчета для определения собственных частот колебаний трубчатых пружин. Кроме того, в работах приведены результаты экспериментальных исследований частот колебаний таких пружин.

Первый метод расчета основан на представлении трубки в качестве механической системы, имеющей две степени свободы, а для получения уравнений движения использовались уравнения Лагранжа второго рода.

Недостатком этого метода являются значительные отклонения теоретических расчетов от экспериментальных данных для тонкостенных пружин. Это можно объяснить тем, что предполагалась деформация поперечных сечений пружин аналогичной деформациям сечений прямых трубок.

Во втором методе трубка рассматривалась в качестве тонкостенного изогнутого стержня. При этом учитывался и коэффициент Кармана, он определялся с помощью полубезмоментной теории оболочек [10]. Для составления уравнений движения использовался принцип Даламбера: суммы проекций всех сил, приложенных к элементу трубчатой пружины, с учетом и сил инерции должны равняться нулю. Этот метод определения соб-

ственных частот колебаний является более универсальным и его можно применять даже для пружин с переменными по длине сечениями любой кривизны.

Сравнение теории с экспериментом показали, что и при этом методе расчета, погрешность увеличивается с уменьшением толщины стенки. Оказалось, что на это влияет наличие жесткого наконечника, который играл роль присоединенной массы. Коррекция результатов вначале проведена введением коэффициента, определяемого экспериментально [11], а затем присоединенная масса была введена в уравнения движения [12].

Результаты исследования

В результате этих исследований было установлено, что частоты собственных колебаний пружин возрастают с увеличением толщины стенки трубки h, с уменьшением радиуса кривизны R центральной оси пружины, отношения большой полуоси к малой a/b, центрального угла пружины γ.

Следующим этапом развития теории колебательного движения трубчатых пружин стало изучение их движения в сопротивляющейся среде [12-17]. Дело в том, что трубчатые пружины стали использоваться в качестве деталей посевных и почвообрабатывающих орудий, где на них действовали значительные силы сопротивления. Кроме того, для улучшения работы манометров в условиях вибраций они заполнялись вязкой жидкостью, например глицерином. Вибродемпфирование такими жидкостями показало эффективность, экономичность и простоту в исполнении для снижения виброактивности чувствительных элементов приборов. В этих работах впервые было учтено влияние вязкости демпфирующей жидкости на параметры затухания колебаний. Для этого использовались математические модели, полученные на основе уравнений Лагранжа второго рода. Кроме того, в работе было установлено, что на параметры затухания колебаний трубчатых пружин существенно влияет вязкость жидкости-демпфера и внутреннее давление. При этом задача была сведена к расчету затухающих колебаний криволинейного стержня.

В результате этих исследований было установлено, что к увеличению частоты затухающих колебаний и уменьшению коэффициента затухания приводят увеличение толщины стенки, уменьшение отношения полуосей, центрального угла и радиуса продольной оси. От геометрических характеристик манометрических пружин в большей степени зависят частоты колебаний и в меньшей степени коэффициент затухания. Вязкость жидкости-демпфера оказывает значительное влияние на коэффициент затухания колебаний.

Одним из направлений исследования колебательного движения трубчатых пружин стало моделирование их напряженно-деформированного состояния в системе Matlab [17-19]. Этот способ позволил получить значения частот колебаний для трубчатых пружин различных конструкций и определить зависимость частот колебаний от геометрических размеров элементов.

Дальнейшим развитием теории колебаний манометрических пружин станет изучение вынужденных колебаний, в частности параметров движения под действием периодически или гармонически изменяющейся величины внутреннего давления трубчатой пружины или переменных внешних сил.

Список использованной литературы

1. Андреева Л.Е. Упругие элементы приборов. - М.: Машиностроение, 1981. - 392 с.

2. Александрова А.Т. Новые способы передачи и формирования движения в вакууме. - М.: Высшая школа, 1979. - 69 с.

3. Пирогов С.П., Черенцов Д.А., Чуба А.Ю. Механизмы с трубчатыми пружинами. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2018. - 78 с.

4. Патент РФ № 2428825. МПК A01B 35/20, A01B 35/32, A01B 39/20, Рабочий орган культиватора / Н.Н. Устинов, С.Н. Кокошин, Н.И. Смолин. По заявке № 2009136304/21. Опубл. 20.07.2011.

5. Пратусевич Я.А. О колебаниях упругих арок // Труды МИИТ. – 1952. – Вып. 76. – С. 17–25.

6. Гриднев М.П. Исследование и разработка манометрического прибора, устойчивого в условиях вибрации и пульсации давления: автореферат дис. … канд. техн. наук: 05.13.18. – Томск. - 1969. – 18 с.

7. Чуба А.Ю. Расчет собственных частот колебаний манометрических трубчатых пружин: автореферат дис. … канд. техн. наук: 05.13.18. – Тюмень. - 2007. – 23 с.

8. Чуба А.Ю., Смолин Н.И., Пирогов С.П. Определение собственных частот колебаний изогнутых труб некругового поперечного сечения // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. - 2007. - № 1. - С. 77-82.

9. Пирогов С.П., Чуба А.Ю. Расчет частот собственных колебаний манометрических трубчатых пружин // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2012. – Т. 55. - № 1. - С. 39-42.

10. Аксельрад Э.Л. Гибкие оболочки. – М.: Наука, 1976. – 376 с.

11. Pirogov S.P., ChubaA.Y., Cherentsov D.A. Effect of section shape on frequencies of natural oscillations of tubular springs. // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – № 357.– 012032.; DOI:10.1088/1757-899X/357/1/012032

12. Черенцов Д.А. Математическое моделирование колебаний манометрических трубчатых пружин в вязкой среде: автореферат дис. … канд. техн. наук: 05.13.18. - Тюмень. - 2015. – 23 с.

13. Pirogov S.P., Cherentsov D.A. Foundations of the Design of Vibration-Resistant Manometers // Measurement Techniques. - November 2016. - V. 59, Is. 8. – pp. - 845–849.

14. Pirogov S.P., UstinovN.N., Smolin N.I. Mathematical Model of Stress-Strain State of Curved Tube of Non-Circular Cross-Section with Account of Technological Wall Thickness Variation // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. - May 2018 . - 357(1):012037; DOI: 10.1088/1757-899X/357/1/012037.

15. Pirogov S.P., Cherentsov D.A., Gulyaev B.A. Prospects of applying vibration-resistant pressure gauges in the oil and gas industry // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2016. - С. - 012013.; DOI: 10.1088/1757-899X/154/1/012013.

16. Pirogov S.P., Cherentsov D.A. Scientific research using the application software package MATLAB // Periodico Tche Quimica. - 2018. - Т. 15. - № 30. - С. 556-562.

17. Pirogov S.P., Cherentsov D.A., Chuba A.Y. Effect of section shape on frequencies of natural oscillations of tubular springs // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2018. - С. - 012032.; DOI: 10.1088/1757-899X/357/1/012032.

18. Pirogov S.P., Cherentsov D.A., Voronin K.S., Yakupov A.U. Simulation of the stress-strain state of the working body of the system for the development of the pipeline trench // IOP Conference CoSeries: Materials Science and Engineering.Сер. "International Conference on Extraction, Transport, Storage and Processing of Hydrocarbons and Materials, ETSaP 2020". - 2020. - С. - 012011.; DOI: 10.1088/1757-899X/952/1/012011.

19. Пирогов С.П., Чуба А.Ю. Исследование собственных частот колебаний гибких трубчатых элементов культиваторов // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. - 2020. - № 4 (84). - С. 153-156.

==========

Цитирование:

Пирогов С.П., Чуба А.Ю. Развитие теории колебаний манометрических трубчатых пружин [Электрон. ресурс] // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. – 2022. – № 3. – Режим доступа: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2022/3/st_304.pdf.
DOI: https://doi.org/10.51419/202123304.