

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАТУХАЮЩИХ КОЛЕБАНИЙ МАНОМЕТРИЧЕСКИХ ПРУЖИН С ЖЕСТКИМ НАКОНЕЧНИКОМ

## RESEARCH OF DAMPED OSCILLATIONS MANOMETRIC SPRING WITH HARD TIP

Д. А. Черенцов, С. П. Пирогов, С. М. Дорофеев, С. А. Черенцова

D. A. Cherentsov, S. P. Pirogov, S. M. Dorofeev, S. A. Cherentsova

Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

Тюменское высшее военно-инженерное командное училище, г. Тюмень

АО Тюменьгазпротрубопровод, г. Тюмень

*Ключевые слова:* затухающие колебания; манометрическая пружина; жесткий наконечник  
*Key words:* damped oscillations; manometric spring; hard tip

Применение механических манометров было и остается в ряде случаев единственным возможным способом измерения давления в трубопроводном транспорте, при этом приборы испытывают значительные вибрационные нагрузки. Поэтому исследования, посвященные изучению колебательных движений манометрических трубчатых пружин (МТП), играющих роль чувствительных элементов механических манометров, являются актуальными.

Исследованиям в области виброзащиты манометров посвящены работы [1–7], однако во всех этих работах пренебрегают влиянием наконечника МТП, который используется в манометрах для увеличения хода МТП и существенно влияет на частотные характеристики.

В данной работе представлены математическая модель, позволяющая учесть массу наконечника, а также основные результаты численных экспериментов, позволяющие оценить влияние массы наконечника на процесс колебаний МТП.

Система уравнений движения МТП [3] имеет вид

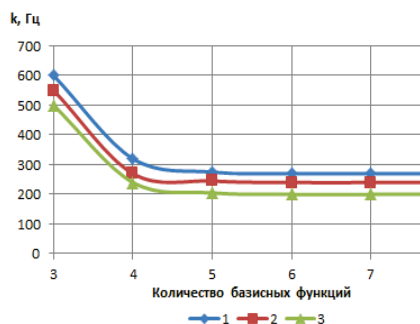
$$m(\varphi) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \left(1 + \frac{b}{R}\right) \beta \frac{\partial w}{\partial t} - \frac{\partial Q}{R \partial \varphi} + \frac{N}{R} = 0,$$

$$m(\varphi) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{Q}{R} - \frac{\partial N}{R \partial \varphi} = 0, \quad (1)$$

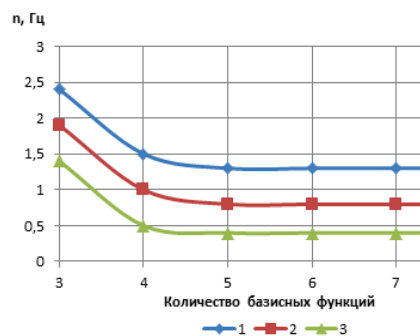
где  $m(\varphi)$  — погонная плотность (масса);  $\beta$  — коэффициент сопротивления деформирующей жидкости;  $Q$  — поперечная сила;  $N$  — продольная сила;  $R$  — радиус кривизны центральной оси;  $d\varphi$  — угол бесконечно малого элемента вырезанного из кривого стержня.

Отличием, позволяющим учесть жесткий наконечник от предыдущей модели, будет наложение специфических граничных условий. В основании манометрической пружины, при  $\varphi = 0$  продольные и поперечные перемещение, а так же угол поворота поперечного сечения трубки равны нулю (главные граничные условия). На свободном конце ( $\varphi = \gamma$ ), вблизи сосредоточенной массы искривлением МТП можно пренебречь. Такое допущение приводит к следующим граничным условиям на свободном конце:  $M(\gamma) = 0$ ;  $N(\gamma) = -m_{\text{нак}} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$ ;  $Q(\gamma) = -m_{\text{нак}} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}$  (естественные граничные условия).

Для расчета использовался метод Бубнова — Галеркина. Для оценки сходимости решения исследовалось изменение значений параметров затухания колебаний при различном количестве функций, входящих в аппроксимацию перемещений для 3 различных образцов (рис. 1).



а) Изменение частот колебаний



б) Изменение коэффициента затухания

Рис. 1. Изменение параметров затухания колебаний

Анализируя полученные результаты, приходим к выводу, что значения параметров затухания сходятся к какому-то пределу при увеличении количества базисных функций, при этом оказалось достаточно удерживать пять базисных функций, чтобы получать удовлетворительные результаты.

Теперь, когда произведена оценка сходимости численного метода, необходимо сравнить результаты математической модели с результатами натурных экспериментов, для подтверждения адекватности модели. Значения параметров затухания колебаний образцов МТП без наконечника, полученные с помощью натурального эксперимента заимствованы из работы [1]. В математической модели, для того чтобы не учитывать наконечник положим массу наконечника равную нулю. Геометрические характеристики МТП и результаты сравнения представлены соответственно в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Геометрические характеристики МТП

| Номер образца | R, мм | $\gamma$ , град | h, мм | a, мм | b, мм | e, мм |
|---------------|-------|-----------------|-------|-------|-------|-------|
| 1             | 30    | 230             | 0,2   | 5     | 2     | 50    |
| 2             | 35    | 240             | 0,5   | 7     | 2     | 50    |
| 3             | 45    | 260             | 1     | 11    | 4     | 50    |
| 4             | 50    | 270             | 1,2   | 4     | 2     | 50    |
| 5             | 55    | 280             | 1,5   | 8     | 3     | 50    |

Таблица 2

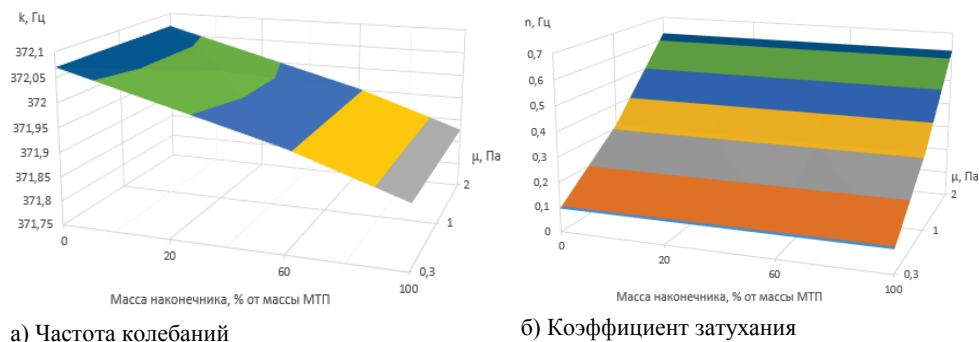
Сравнение значений параметров затухания колебаний

| Номер образца                                 | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    |
|-----------------------------------------------|------|------|------|------|------|
| Значения частот, Гц                           |      |      |      |      |      |
| Расчетное                                     | 69,8 | 101  | 118  | 146  | 148  |
| Эксперим-е [1]                                | 64   | 91   | 108  | 138  | 139  |
| Отклонение, %                                 | 8,3  | 9,5  | 8,2  | 5,6  | 6,1  |
| Значения коэффициента затухания колебаний, Гц |      |      |      |      |      |
| Расчетное                                     | 0,53 | 0,53 | 0,43 | 0,28 | 0,22 |
| Эксперим-е [1]                                | 0,46 | 0,47 | 0,37 | 0,24 | 0,19 |
| Отклонение, %                                 | 13,1 | 10,5 | 14,2 | 14,9 | 14,1 |

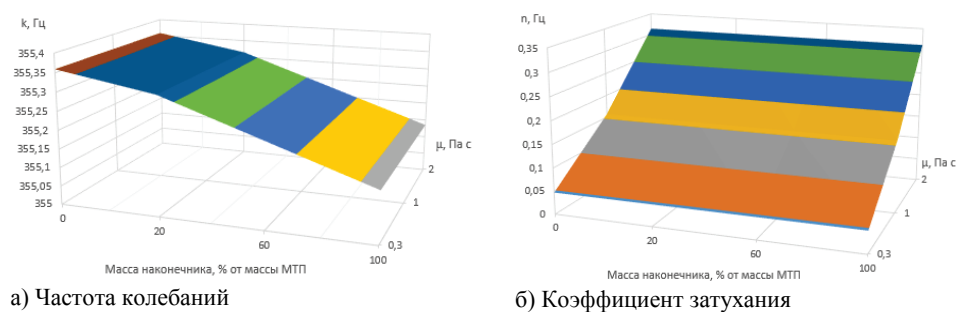
Результаты расчета математической модели имеют удовлетворительную сходимость, поэтому она может быть рекомендована для дальнейшего анализа влияния массы наконечника на процесс колебаний. Все дальнейшие исследования бу-

дуг производиться на образцах, геометрические характеристики которых представлены в таблице 1.

Результаты исследований влияния массы наконечника на частоту затухающих колебаний и коэффициент затухания колебаний представлены в виде поверхностей в зависимости от вязкости демпфирующей жидкости и массы наконечника (рис. 2, 3).

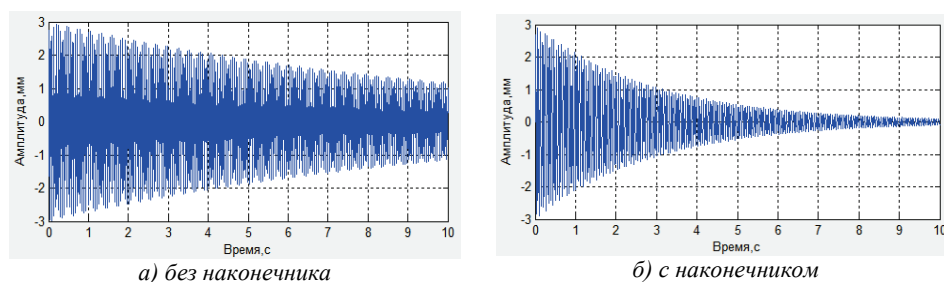


*Рис. 2. Изменение параметров затухания колебаний образца 1*



*Рис. 3. Изменение параметров затухания колебаний образца 2*

Для образцов 3–5 наблюдается картина идентичная образцам 1 и 2. Анализ приведенных зависимостей показывает, что увеличение массы наконечника ведет к снижению частоты затухающих колебаний и незначительному снижению коэффициента затухания колебаний. Снижение коэффициента затухания ведет к увеличению скорости затухания, результаты исследования с наконечником и без него представлены на рис. 4–5.



*Рис. 4. Амплитуды затухания колебаний 1 образца МТП*

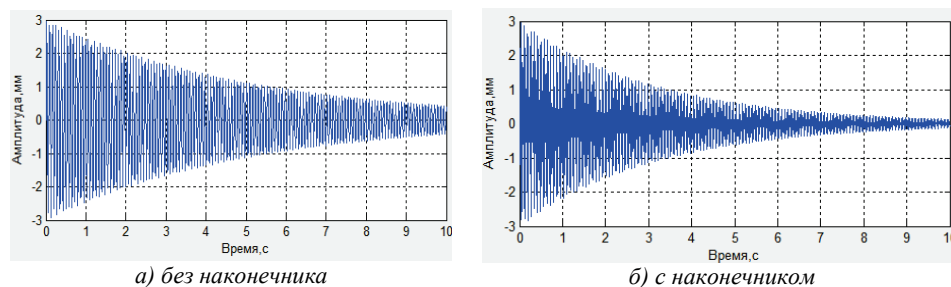


Рис. 5. Амплитуды затухания колебаний 2 образца МТП

Амплитуды для образцов 3–5 практически повторяют амплитуды затухания колебаний образцов 1 и 2. Так как изменение массы наконечника влияет на процесс колебаний, то изменению должно подвергнуться предельное значение вязкости демпфирующей жидкости, при котором начнет наблюдаться аperiodическое движение. Ниже в таблице приведены значения вязкости, при котором начинается аperiodическое движение с наконечником и без него.

Таблица 3

Значение динамической вязкости

| Значение дин. вязкости, Пас | Номер образца |      |      |      |      |
|-----------------------------|---------------|------|------|------|------|
|                             | 1             | 2    | 3    | 4    | 5    |
| Без наконечника             | 1000          | 1200 | 1200 | 1400 | 1600 |
| С наконечником              | 1200          | 1400 | 1500 | 1700 | 1950 |
| Отклонение, %               | 16,7          | 14,3 | 20,0 | 17,6 | 17,9 |

Полученные результаты показывают, что при увеличении массы наконечника предельное значение динамической вязкости снижается, однако массу возможно увеличивать только до какого-то предельного значения. В таблице 4 представлены значения массы, в процентах от массы МТП, при которых система перестанет колебаться.

Таблица 4

Значение динамической вязкости

| Номер образца        | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Масса МТП, г         | 2,84  | 13,23 | 54,6  | 24,5  | 77,71 |
| Масса наконечника, г | 13,3  | 66,7  | 260,8 | 125,9 | 390,0 |
| Масса наконечника, % | 368,3 | 404,2 | 377,7 | 413,9 | 401,9 |

Численные эксперименты подтверждают существенное влияние массы наконечника на процесс колебаний МТП. Увеличение массы наконечника ведет к увеличению общей массы системы, а это по сути своей является одним из методов виброзащиты — виброгашением. Так, увеличение массы наконечника возможно использовать как самостоятельный метод виброзащиты, так и в комплексе с методом отстройки от резонансных частот и вибродемпфированием колебаний жидкостью, повышая тем самым эффективность защиты.

#### Список литературы

1. Пирогов С. П. Манометрические трубчатые пружины. — СПб.: Недра, 2009. — 276 с.
2. Чуба А. Ю. Расчет собственных частот колебаний манометрических трубчатых пружин: дис. ... канд. техн. наук. Тюмень, 2007. — 137 с.

3. Пирогов С. П., Черенцов Д. А., Чуба А. Ю. Колебания манометрических трубчатых пружин. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2015. – 95 с.
4. Пирогов С. П., Черенцов Д. А. Теоретические основы проектирования вибростойких манометров // Измерительная техника. – 2016. – № 8. – С. 38-41.
5. Тюнин Н. И. К расчету перемещения удлинительного наконечника манометрической пружины // Приборы и системы управления. – 1969. – № 6. – С.47-48.
6. Пирогов С. П., Тыжнов Г. И. Расчет перемещения трубчатой пружины с удлинительным наконечником // Известия вузов. Приборостроение. – 1979. – № 9. – С.71-73.
7. Черенцов Д. А., Пирогов С. П., Дорофеев С. М. Математическая модель манометрической трубчатой пружины в вязкой среде // Вестник Тюменского государственного университета. – 2014. – № 7. – С. 234-241

#### *Сведения об авторах*

**Черенцов Дмитрий Андреевич**, ассистент кафедры «Транспорт углеводородных ресурсов», Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, тел. 89222652095, e-mail: cherentsovda@bk.ru

**Пирогов Сергей Петрович**, д. т. н., профессор кафедры «Прикладная механика», Тюменский индустриальный, г. Тюмень, тел. 8(3452)905785, e-mail: piro-goweov@yandex.ru

**Дорофеев Сергей Михайлович**, к. т. н., доцент кафедры «Естественно-научные дисциплины», Тюменское высшее военно-инженерное командное училище, г. Тюмень, тел. 8(3452)434121, e-mail: dorludm@mail.ru

**Черенцова Светлана Андреевна**, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, тел. 8(3452)905785. e-mail: CherentsovaSA92@mail.ru

#### *Information about the authors*

**Cherentsov D. A.**, assistant of the chair «Transport of hydrocarbon Resources», Industrial University of Tyumen, phone: 89222652095, e-mail: cherentsovda@bk.ru

**Pirogov S. P.**, Doctor of Engineering, professor of the chair «Applied mechanics», Industrial University of Tyumen, phone: 8(3452)905785, e-mail: piro-goweov@yandex.ru

**Dorofeev S. M.**, Candidate of Technical Sciences, associate professor of the chair «Applied and Pure Sciences», Tyumen Higher Military-Engineering School (Military Institute), Tyumen, phone: 8(3452)434121, e-mail: dorludm@mail.ru

**Cherentsova S. A.**, Engineer of JSC SurgutNI-Pneft, phone: 89224794898, e-mail: CherentsovaSA92@mail.ru