

УДК 629.7.06

## МЕТОДИКА РАСЧЁТА КОЛЕБАНИЙ ТРУБОПРОВОДА С ДЕМПФИРУЮЩИМИ ОПОРАМИ ИЗ МАТЕРИАЛА МР

© 2014 С. А. Безбородов<sup>1</sup>, А. М. Уланов<sup>2</sup><sup>1</sup>ОАО «Кузнецов», г. Самара<sup>2</sup>Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Разработана методика расчёта колебаний трубопровода произвольной формы с демпфирующими опорами из материала МР при помощи конечно-элементного пакета программ ANSYS. Методика учитывает нелинейность характеристик материала МР, позволяет определять амплитуды колебаний трубопровода и напряжения в нём. Результаты расчётов подтверждены экспериментом с использованием измерительной системы ARAMIS. Методика может быть применена для работ по доводке трубопроводов.

*Трубопровод, колебания, демпфирование, материал МР, ANSYS, напряжения, метод конечных элементов.*

Вибрация трубопроводов, установленных на двигателе, является фактором, определяющим долговечность их работы. Для уменьшения вибраций трубопроводов широко применяются системы конструкционного демпфирования (СКД), в частности система сухого трения в виде упругодемпфирующей опоры (УДО) с материалом МР.

Материал МР является нелинейным материалом, то есть его жёсткость и коэффициент рассеивания энергии зависят от амплитуды сжатия и предварительной статической деформации. Он изготавливается методом холодного прессования проволочной спирали, обладает высоким демпфированием и высокой стойкостью к воздействию окружающей среды. Его свойства характеризуются следующей диаграммой (рис.1), где  $P$  – нагрузка,  $x$  – амплитуда перемещения при статическом нагружении.

Важными количественными характеристиками, определяющими жёсткостные и демпфирующие свойства МР, являются:

– среднециклическая жёсткость  $C_{cp}$ :  
 $C_{cp} = P_a / A$ ,

где  $P_a$  – наибольшее значение статической нагрузки,  $A$  – соответствующее ей наибольшее значение перемещения;

– коэффициент рассеивания энергии  
 $\psi = \frac{W}{\Pi}$ ,

где  $W$  – площадь петли гистерезиса, равная количеству рассеиваемой энергии за один цикл деформации,  $\Pi$  – условная потенциальная энергия, определяемая площадью треугольника OAB на рис. 1 [1].

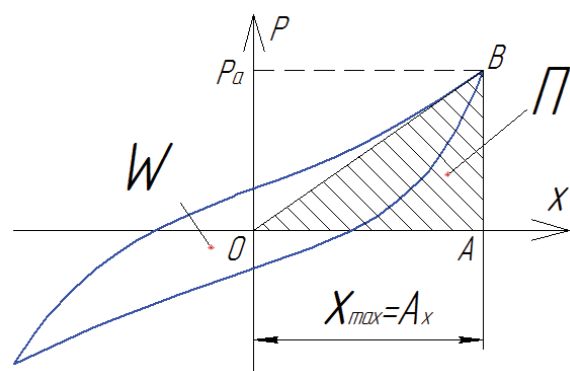


Рис. 1. К определению параметров упруго-гистерезисной петли СКД

Существующие методики расчёта колебаний трубопроводов не учитывают сложность формы трубопровода, нелинейность свойств МР, демпфирование в опорах. В них рассматривается только относительное распределение перемещений

и напряжений. Целью данного исследования является разработка методики расчёта пространственных колебаний трубопровода, которая станет основой для проектирования опор трубопроводов из материала МР.

В данной работе статические и динамические характеристики МР предполагаются одинаковыми, что подтверждается сходством с динамическим экспериментом динамических характеристик, рассчитанных на основе статического эксперимента [2, 3, 4].

Для отработки методики расчёта в качестве модели трубопровода была выбрана трубка из титанового сплава ПТ-7М

с внешним диаметром 6,2 мм, внутренним диаметром 4,0 мм. Трубка имеет достаточно сложную форму, чтобы полученные для неё результаты могли быть применимы для трубопроводов произвольной формы. Оба конца трубки имеют штуцерные опоры, моделирующие связь трубопровода с агрегатами двигателя. В средней части трубки установлена опора шириной 11 мм, в которой могут устанавливаться сменные прокладки из материала МР с различной предварительной статической деформацией  $Q$ . Опоры жёстко прикреплены к швеллеру, который крепится на вибростенд (рис. 2).



Рис. 2. Исследуемая модель трубопровода

Построение расчётной модели для исследования колебаний трубопровода проводилось в пакете ANSYS. Для задания геометрии трубки использовался упругий прямой двухузловой элемент Pipe16. Опоры моделировались конечным элементом Combin14, точечная масса задавалась типом элементов Mass21.

Параметры материала МР (жёсткость  $C$  и коэффициент рассеивания энергии  $\psi$ ) рассчитывались на основе

$$C = 14(1 + 363\varepsilon_A^{3,5}) (1 + 727\varepsilon_Q^{3,45}) d_w^{1,2},$$

$$H^{-0,33} (\varepsilon_Q / 0,262)^{0,063H} S (\bar{\rho} / 0,2)^{1,1+0,01H/d_w}, \quad (1)$$

$$\psi = 1,71(1 - 7,23H^{0,13} (\varepsilon_A - 0,048)) (1 - 0,1(10,5\varepsilon_Q - 1)^2),$$

$$d_w^{0,138} H^{0,15} (0,095 / \varepsilon_Q)^{0,057H} \cdot (0,2 / \bar{\rho})^{0,37+0,015H/d_w}, \quad (2)$$

где  $\bar{\rho} = \frac{m_{MR}}{\pi r_0^2 H \rho_S}$  – относительная плотность, равная отношению массы элемента

экспериментальных данных, полученных при статическом эксперименте с тонкими пластинами из материала МР с различной толщиной  $H$  (от 1,15 до 3,45 мм), плотностью  $\rho$  (от 1,115 до 2,028 г/см<sup>3</sup>), относительной предварительной статической деформацией  $\varepsilon_Q = Q/H$  (от 0,087 до 0,268), диаметром проволоки  $d_w$  (от 0,09 до 0,12 мм) по следующим формулам [5]:

из МР к массе сделанного из стали элемента такого же объёма.

В эксперименте эти зависимости были получены для диапазона амплитуд относительной деформации  $\varepsilon_A = A/H$  от 0,043 до 0,146 (более высокие значения деформации приводят к быстрому разрушению материала МР) [4].

Для получения реальных значений  $C$  и  $\psi$  на резонансе был разработан следующий метод последовательных приближений по амплитуде.

По формулам (1) и (2) для определения  $C$  и  $\psi$ , выведенным по результатам статических испытаний тонких пластин из МР, определялись первоначальные значения жёсткости и коэффициента рассеивания энергии  $C^{(0)}$  и  $\psi^{(0)}$  при принятой начальной амплитуде сжатия МР по двум направлениям, равной  $A^{(0)} = 0,1 \text{ мм}$ .

Далее проводился гармонический расчёт в Ansys, определялись амплитуды колебания трубопровода по двум направлениям  $A_{\text{ВЕРТ}}^{(1)}$ ,  $A_{\text{ГОР}}^{(1)}$  в месте установки опоры с МР. По этим значениям рассчитывались уточнённые значения  $C^{(1)}$  и  $\psi^{(1)}$ . Затем снова производился расчёт в ANSYS, определялись значения  $A_{\text{ВЕРТ}}^{(2)}$ ,  $A_{\text{ГОР}}^{(2)}$ ,  $C^{(2)}$  и  $\psi^{(2)}$ . Этот цикл повторялся до тех пор, пока с достаточной точностью не выполнялись условия:

$$\begin{aligned} A_{\text{ВЕРТ}}^{(N)} &= A_{\text{ВЕРТ}}^{(N-1)}, \\ A_{\text{ГОР}}^{(N)} &= A_{\text{ГОР}}^{(N-1)}. \end{aligned}$$

Таким образом, в результате метода последовательных приближений рассчитывались реальные значения  $C$  и  $\psi$ , которые имеют место при резонансе.

Поскольку на частоту и амплитуду колебаний трубопровода влияют жёсткость и коэффициент рассеивания энергии не только в демпфирующей опоре, но и в штуцерных опорах, было проведено исследование статической жёсткости штуцерных опор. Коэффициент рассеивания энергии в штуцерных опорах был определён экспериментально по коэффициенту усиления вибрации на резонансе для трубопровода без демпфирующей опоры.

Характеристики штуцерных опор задавались через жёсткость на перемещение, жёсткость на поворот и коэффициент рассеивания энергии. Жёсткость штуцерной опоры на перемещение определялась экспериментально путём приложения силы к трубопроводу в месте его присоединения к штуцерной опоре. Получено, что жёсткость штуцерной опоры составляет  $C_0 = 1111 \text{ Н/мм}$ . Жёсткость штуцерной опоры на поворот принималась бесконечно большой величиной. Коэффициент рассеивания энергии  $\Psi$  оценивался по формуле

$$\Psi \approx 2\pi/\eta = 6,28/46 = 0,14,$$

где  $\eta=46$  – коэффициент передачи вибрации на резонансе, полученный экспериментально.

В конечно-элементном пакете ANSYS была разработана программа для модального и гармонического расчёта трубопровода с опорой из МР. Поскольку применяемые конечные элементы в ANSYS используют вязкое трение, для задания коэффициента рассеивания энергии  $\Psi$  осуществлялся переход к эквивалентному коэффициенту демпфирования по площади петли гистерезиса по формуле

$$C_v = \frac{\Psi C}{2\pi\omega},$$

где  $C$  – жёсткость,  $\omega$  – резонансная частота.

Для экспериментального исследования колебаний трубопровода использовался вибрационный стенд ВДС-1500. Измерения колебаний трубопровода осуществлялись при помощи бесконтактной системы ARAMIS. Она представляет собой две высокоскоростные камеры, установленные на треножнике, которые одновременно фотографируют объект. В процессе загрузки последовательности изображений определяется 3D-форма объекта и деформации объекта. Полученная кар-

тина деформаций может быть пересчитана в напряжения.

Расчёт собственных частот и амплитуд колебаний трубопровода в районе установки опоры с МР производился при установке различных демпфирующих

пластин из МР. Характеристики образцов приведены в табл. 1. Сравнение результатов расчётов и экспериментов для образца 1 приведены в табл. 2-3, амплитуды колебаний трубопровода в районе установки опоры с МР показаны на рис. 3-4.

Таблица 1. Характеристики образцов из материала МР

№ образца	Толщина, мм	Свободный внешний диаметр системы, мм	Диаметр отверстия в опоре, мм	Диаметр трубки, мм	Относительная статическая деформация $\epsilon_0$	Относительная плотность МР $\bar{\rho}$
1	2,1	10,4	9,8	6,2	0,14	0.25
2	2,1	10,4	9,8	6,2	0,14	0.15
3	3,3	12,8	11,8	6,2	0,15	0.19

Таблица 2. Собственные частоты колебаний трубопровода

Амплитуды входного ускорения стола вибростенда, $W1, \text{ м/с}^2$	30	50
Собственная частота, измеренная системой ARAMIS, Гц	195,1	193,5
Собственная частота, рассчитанная в ANSYS, Гц	206,6	
Погрешность, %	6,5	
Амплитуда колебания опоры по вертикали, мм	0,044	0,071

Таблица 3. Перемещения трубопровода по осям (в районе средней опоры с МР)

Амплитуды входного ускорения стола вибростенда, $W1, \text{ м/с}^2$	30	50
Резонансная частота, Гц	206,6	206,6
Амплитуда колебаний трубы около опоры, мм	по вертикали /по горизонтали	по вертикали /по горизонтали
измеренная системой ARAMIS	0,052/0,04	0,074/0,065
рассчитанная в ANSYS в 1 пригл.	0,05/0,037	0,081/0,066
рассчитанная в ANSYS во 2 пригл.	0,05/0,037	0,08/0,059
Погрешность, %	4/7,5	8/9

Из табл. 2, 3 видно, что погрешность в определении перемещений трубопровода в районе опоры с МР колеблется от 4 до 9 %. Погрешность по частоте составляет 6,5%. Расхождение расчёта с экспериментом по частоте и вертикальным перемещениям менее 10%, что достаточно для практических целей, так как разброс параметров МР из-за технологии изготовления также составляет порядка 10%.

Рассчитываемые значения перемещений трубопровода в районе опоры с МР позволяют уточнять значения амплитуды деформации материала МР и, соответ-

ственно, жёсткости и коэффициента рассеивания энергии опоры с МР. Таким образом, можно более точно оценивать вибрационное состояние трубопровода и определять оптимальные характеристики материала МР (плотность, предварительное статическое сжатие и т.д.), применяемого в данных опорах.

Программа позволяет рассчитывать напряжения в трубопроводе на резонансных частотах. В качестве примера на рис. 5 приведена картина распределения эквивалентных напряжений в трубопроводе на резонансной частоте 207 Гц.

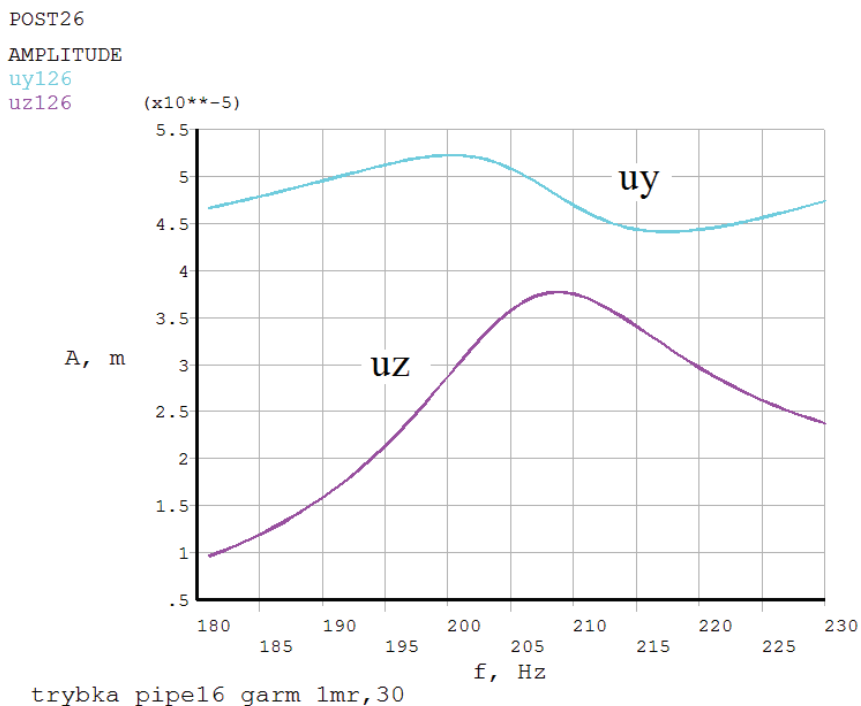


Рис. 3. Зависимость амплитуды от частоты возбуждающей нагрузки, образец 1,  $W1=30\text{м/с}^2$  (uy – перемещения по вертикали, uz – по горизонтали)

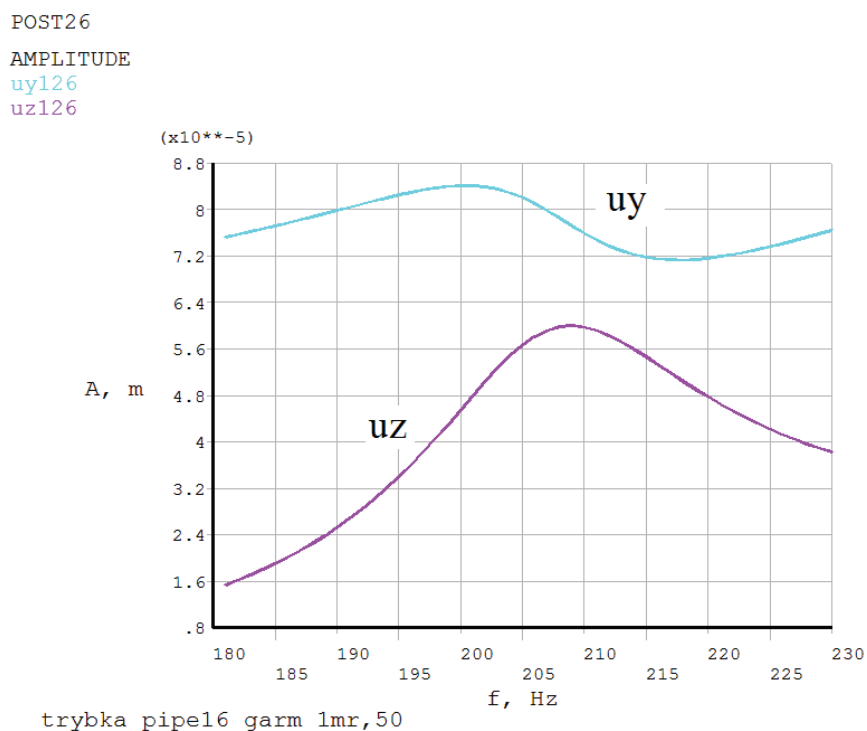


Рис. 4. Зависимость амплитуды от частоты возбуждающей нагрузки, образец 1,  $W1=50\text{м/с}^2$

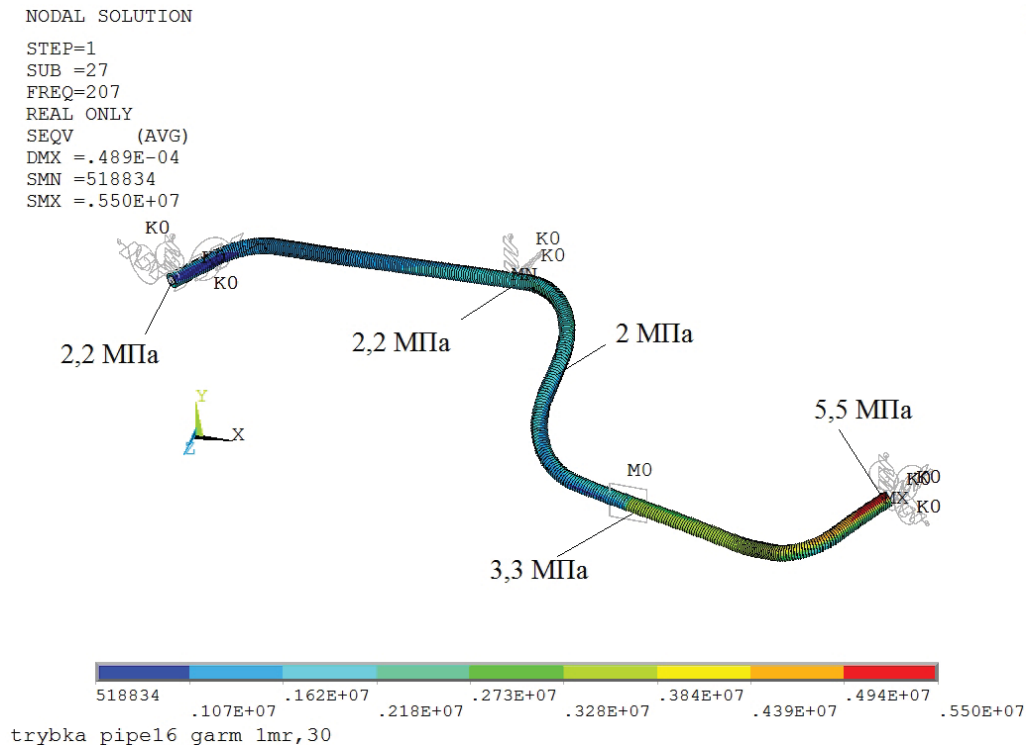


Рис. 5. Распределение эквивалентных напряжений в трубопроводе на частоте 207 Гц, образец 1,  $W1=30\text{м/с}^2$

Таким образом, разработанная программа расчёта пространственных колебаний трубопровода с опорами из материала МР позволяет определять собственные частоты колебаний трубопровода сложной формы, перемещения его узлов и напряжения в трубопроводе на интересующей частоте возбуждения при заданной амплитуде гармонической нагрузки. Данная программа по сравнению с известными

методиками учитывает зависимость жёсткости и коэффициента рассеивания энергии от амплитуды деформации МР и обладает достаточной простотой для её использования.

Методика может быть использована при доводке трубопроводов за счёт замены существенного объёма работ по тензометрированию на расчётное исследование.

### Библиографический список

1. Д.Е. Чегодаев, Ю.К. Пономарев. Демпфирование. Самара: СГАУ, 1997. 334 с.
2. Конструкционное демпфирование в неподвижных соединениях Калинин Н.Г., Лебедев Ю.А., Лебедева В.И. и др. / Рига: Изд-во АН Латвийской ССР, 1960. 172 с.
3. Пановко Я.Г. Внутреннее трение при колебаниях упругих систем. М.: Физматгиз, 1960. 196 с.
4. Э.Н. Кузьмин, Г.Я. Егоров. Исследование динамических характеристик втулочных амортизаторов // Вибрационная прочность и надёжность двигателей и систем летательных аппаратов: межвуз. сб. Куйбышев, 1975. Вып. I (68). С.54-59.
5. Уланов А.М., Швецов А.В. Механические характеристики демпферов опор трубопроводов из материала МР // Вестн. Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. №3(27). С. 94-99.



### Информация об авторах

**Безбородов Сергей Александрович**, инженер-конструктор, отдел прочности и теплофизики, ОАО «Кузнецов». E-mail: [bezborodovser@yandex.ru](mailto:bezborodovser@yandex.ru). Область научных интересов: защита трубопроводов от удара и вибрации.

**Уланов Александр Михайлович**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры конструкции и проектирова-

ния двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [alexulanov@mail.ru](mailto:alexulanov@mail.ru). Область научных интересов: защита от вибрации и удара при помощи систем сухого трения.

### METHOD OF CALCULATING VIBRATIONS IN A PIPELINE WITH DAMPING SUPPORTS MADE OF MR MATERIAL

© 2014 S. A. Bezborodov<sup>1</sup>, A. M. Ulanov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Open joint-stock company “Kuznetsov”, Samara, Russian Federation

<sup>2</sup>Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

A method of calculating vibrations in a pipeline of an arbitrary shape with damping supports made of MR material with the help of the finite element method ANSYS software is developed. The method takes into account the non-linearity of MR material, it makes it possible to determine the amplitudes of pipeline vibration and the stress in the pipeline. The calculation results are confirmed by an experiment with the ARAMIS measurement system. The method can be used for placement of pipelines.

*Pipeline, vibration, damping, MR material, ANSYS, stress, finite element method.*

### References

1. Chegodaev D.E., Ponomarev Yu.K. Dempfirovaniye [Damping]. Samara: SSAU Publ., 1997. 334 p.
2. Kalinin N.G., Lebedev Yu.A., Lebedeva V.I. etc. Konstruktsionnoye dempfirovaniye v nepodvizhnykh soedineniyakh [Structural Damping in Fixed Joints]. Riga: Latvian Academy of Science Publ., 1960. 172 p.
3. Panovko Ya.G. Vnutrennee trenie pri kolebaniyakh uprugih sistem [Inner friction in vibration of elastic systems]. Moscow: Fizmatgiz Publ., 1960. 196 p.
4. Kuzmin E.N. Research of dynamic characteristics of sleeve vibration isolators // Vibratsionnaya prochnost i nadezhnost dvigatelei i sistem letatelnykh apparatov. Kuibyshev, 1975. No. 1(68). P. 54-59. (In Russ.).
5. Ulanov A.M., Shvetsov A.V. Mechanical characteristics of pipeline support dampers made of MR material // Vestnik SGAU. 2011. No. 3(27). P. 94-99. (In Russ.).

### About the authors

**Bezborodov Sergey Alexandrovich**, Design Engineer, Open Joint-Stock Company “Kuznetsov”, Strength and Thermal Physics Department. E-mail: [bezborodovser@yandex.ru](mailto:bezborodovser@yandex.ru). Area of research: protection of pipelines against vibration and shock.

**Ulanov Alexander Mikhailovich**, Doctor of Science (Engineering), Associate Professor, Professor of the Aircraft Design Department, Samara State Aerospace University. E-mail: [alexulanov@mail.ru](mailto:alexulanov@mail.ru). Area of research: protection against vibration and shock by dry friction systems.