

## МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕМПФЕРОВ ОПОР ТРУБОПРОВОДОВ ИЗ МАТЕРИАЛА МР

©2011 А. М. Уланов, А. В. Швецов

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Тонкие пластины из проволочного материала МР широко применяются для защиты трубопроводов от вибрации. Получены зависимости жесткости и коэффициента рассеивания энергии этих пластин от амплитуды деформации, предварительной статической деформации, плотности, диаметра проволоки, толщины пластины.

*Трубопровод, защита от вибрации, материал МР, жесткость, демпфирование.*

Для защиты трубопроводов от колебаний широко используются упругодемпфирующие опоры из материала МР (рис. 1).

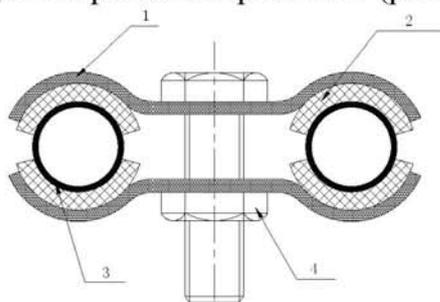


Рис. 1. Опора трубопровода из материала МР:  
1 - поддерживающий элемент; 2 - пластина из МР;  
3 - трубопровод; 4 - болт крепления

Материал МР изготавливается при помощи холодного прессования хаотически уложенной проволочной спирали из нержавеющей стали и применяется в опорах трубопроводов в виде тонких пластин и втулок. Материал МР обладает большим рассеиванием энергии, стойкостью к воздействию высоких температур, топлива, масла. Характеристиками материала (жесткостью  $C$  и коэффициентом рассеивания энергии  $\psi$ ) можно управлять в широких пределах, изменяя относительную плотность материала  $\bar{\rho}$  ( $\bar{\rho} = \rho_{MR} / \rho_S$ , где  $\rho_{MR}$  - плотность проволочного материала,  $\rho_S$  - плотность стали), диаметр проволоки  $d_w$ , предварительную статическую деформацию  $Q$ .

Для расчета колебаний трубопроводов любой формы методом конечных элементов можно рассматривать материал МР как нелинейную квазисплошную среду, характеристики которой зависят от амплитуды деформа-

ции  $A$ . Применимость такого подхода к расчету материала МР показана в [1, 2], однако данные этих работ охватывают диапазон  $H/d_w > 100$  (где  $H$  - толщина изделия из МР). Для опор трубопроводов характерно применение пластин с  $H/d_w \in [10; 40]$ . В этом диапазоне следует ожидать зависимости характеристик материала МР также и от  $H$ .

Для определения этих зависимостей был проведен эксперимент с образцами из материала МР в виде круглых пластин с радиусом  $r_0 = 20,5$  мм. Фотография одного из образцов представлена на рис. 2.



Рис. 2. Экспериментальный образец из материала МР

Определяющими параметрами в эксперименте являлись размеры элемента  $H$  и  $r_0$ , масса элемента  $m_{MR}$ , давление прессования элемента  $\sigma_{press}$ , характеристики материала проволоки - модуль упругости  $E_S$  и плотность  $\rho_S$ , характеристики проволочной спирали -  $d_w$  и  $d_s$ , амплитуда деформации  $A$  и предварительная статическая деформация  $Q$ . В качестве определяемого параметра было

выбрано усилие сжатия. Основные единицы, входящие в размерности всех контролируемых в эксперименте параметров, - метр, секунда и килограмм. Соответственно из комплекса 11 определяющих и определяемых параметров должно быть получено 8 критериев подобия, полностью описывающих поведение упругодемпфирующего элемента опоры при его деформировании:

- относительная плотность материала МР

$$\bar{\rho} = \frac{m_{MR}}{\pi r_0^2 H \rho_s};$$

- относительный диаметр проволочной спи-

$$рали \bar{d}_w = \frac{d_w}{d_s};$$

- относительная амплитуда деформации  $\varepsilon_A = A/H$ ;

- относительная предварительная статическая деформация  $\varepsilon_Q = Q/H$ ;

- относительное напряжение сжатия

$$\sigma = \frac{P}{\pi r_0^2 \sigma_{press}};$$

- относительное напряжение прессования

$$\bar{\sigma}_{press} = \frac{\sigma_{press}}{E_s};$$

- относительная толщина элемента  $\bar{h} = \frac{H}{r_0}$ ;

- относительная высота элемента  $H = \frac{H}{d_w}$ .

Поскольку в механике деформируемого твердого тела приняты координаты «относительная деформация – напряжение», в эксперименте определялось не относительное, а размерное напряжение сжатия.

Применялась стандартная проволока из стали 1Х18Н9Т с  $E_s = 2 \times 10^{11}$  Па и  $\rho_s = 7800$  кг/м<sup>3</sup>. Поддерживалось рекомендуемое оптимальное значение  $\bar{d}_w = \frac{d_w}{d_s} \approx 0,1$ .

Значения  $\sigma_{press}$  в зависимости от  $\bar{\rho}$  приведены в табл. 1. Параметры пластин приведены в табл. 2.

Таблица 1. Параметры прессования материала МР

$\bar{\rho}$	0,18	0,21	0,25	0,30
$\sigma_{press}$ , МПа	30,4	38,0	49,4	76,0

Таблица 2. Параметры образцов из материала МР

№ образца	Масса элемента $m_{MR}$ , г	Диаметр проволоки $d_w$ , мм	Толщина $H$ , мм	$\bar{\rho}$
1	3,51	0,09	2,3	0,156
2	4,11	0,09	2,1	0,20
3	4,70	0,09	1,85	0,26
4	2,06	0,09	1,15	0,183
5	6,17	0,09	3,3	0,191
6	8,22	0,09	4,35	0,192
7	4,11	0,12	2,1	0,20
8	2,94	0,09	2,1	0,143

Значения относительной толщины не превышали 0,21, что соответствует широким тонким пластинам. Диапазоны значений параметров  $\bar{\rho} \in [0,143; 0,26]$ ;  $H \in [1,15$  мм; 4,35 мм];  $d_w \in [0,09$  мм; 0,12 мм] соответствуют применяемым в опорах трубопроводов.

Чтобы исключить влияние геометрических размеров образца, применялась относительная жесткость

$$\bar{C} = CH/S$$

(здесь S – площадь пластины).

На установке фирмы «Galdabini» определялись петли гистерезиса пластин. Погрешность измерения установки составляет 1 ньютон по силе и 1 микрометр по перемещению. По петле гистерезиса далее рассчитывались  $C$  и  $\psi$  по методике [3].

Жесткость определялась как тангенс угла наклона прямой между вершинами петли гистерезиса. Если максимальная и минимальная реакции пластины для петли гистерезиса с амплитудой деформации  $A$  равны  $P_{max}$  и  $P_{min}$  соответственно, то абсолютное

значение жесткости  $C = \frac{P_{max} - P_{min}}{2A}$ , относи-

тельное  $\bar{C} = \frac{(P_{max} - P_{min}) H}{2A S} = \frac{P_{max} - P_{min}}{2\varepsilon_A S}$ .

Коэффициент рассеивания энергии определялся как отношение энергии, рассеянной за один цикл деформации пластины  $\Delta\Pi$  (она равна площади петли гистерезиса) к потенциальной энергии сжатой пластины  $\Pi$ . Поскольку петля гистерезиса пластин несимметрична, применялась средняя потенциальная энергия деформации, вычисленная как полусумма потенциальной энергии при

сжатии  $P_1 = \frac{1}{2}A(P_{\max} - P_0)$  и растяжении

$P_2 = \frac{1}{2}A(P_0 - P_{\min})$ . Здесь  $P_0$  - координата центра петли по оси реакции.

Диапазоны относительной предварительной статической деформации и относительной амплитуды деформации охватывали применяемые в опорах трубопроводов и составляли  $\varepsilon_A \in [0,043; 0,183]$ ;  $\varepsilon_Q \in [0,087; 0,262]$ .

Значения  $\varepsilon_Q$  и  $\varepsilon_A$ , превышающие представленные в указанных диапазонах, ведут к быстрому износу опор трубопроводов. Перед экспериментом пластины выпрямлялись небольшой (10...15 Н) силой так, чтобы расстояние между опорными поверхностями установки равнялось толщине пластины в свободном состоянии.

Результаты эксперимента были аппроксимированы следующими функциями.

Зависимость  $\bar{C}$  от  $\varepsilon_A$  имеет вид:

$$\bar{C} = 1,28(1 + 363\varepsilon_A^{3,5}) \text{ (МПа)}.$$

Зависимость  $\psi$  от  $\varepsilon_A$  несколько различна при различной толщине пластины и имеет вид:

$$\psi = 1,38(1 - 7,23H^{0,13}(\varepsilon_A - 0,048))$$

(здесь и далее  $H$  и  $d_w$  измеряются в миллиметрах).

Поправочные коэффициенты (множители), описывающие влияние других параметров (соответственно  $\varepsilon_Q$ ,  $d_w$ ,  $H$  и  $\bar{\rho}$ ), имеют вид:

- для  $\bar{C}$ :  $(1 + 727\varepsilon_Q^{3,45})$ ;  $18d_w^{1,2}$ ;  
 $0,61H^{0,66}(\varepsilon_Q/0,262)^{0,063H}$ ;  $(\bar{\rho}/0,2)^{1,1+0,01H/d_w}$ ;

- для  $\psi$ :  $(1 - 0,1(10,5\varepsilon_Q - 1)^2)$ ;  $1,39d_w^{0,138}$ ;  
 $0,89H^{0,15}(0,095/\varepsilon_Q)^{0,057H}$ ;  
 $(0,2/\bar{\rho})^{0,37+0,015H/d_w}$ .

Таким образом, окончательно, с учетом того, что для перехода к абсолютному значению жесткости необходимо умножить ее относительное значение на  $S/H$ ,

$$C = 14(1 + 363\varepsilon_A^{3,5})(1 + 727\varepsilon_Q^{3,45})d_w^{1,2}H^{-0,33}(\varepsilon_Q/0,262)^{0,063H}S(\bar{\rho}/0,2)^{1,1+0,01H/d_w}; \quad (1)$$

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

$$(1 - 0,1(10,5\varepsilon_Q - 1)^2)d_w^{0,138}$$

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

Полученные зависимости в исследованном диапазоне имеют точность в пределах 10%, что можно считать достаточным, так как отличие характеристик изделий из материала МР достигает 10% по технологическим причинам.

Параметры  $\varepsilon_Q$ ,  $d_w$ ,  $H$  и  $\bar{\rho}$  являются технологическими и известны до расчета колебаний трубопровода. Поэтому при расчете колебаний трубопровода методом конечных элементов (при помощи пакета ANSYS или какого-либо иного) достаточно использовать зависимости  $C$  и  $\psi$  от  $\varepsilon_A$ , рассчитанные для конкретной опоры по уравнениям (1) и (2).

Вид расчетных зависимостей для некоторых параметров опор приведен на рис. 3 – 10.

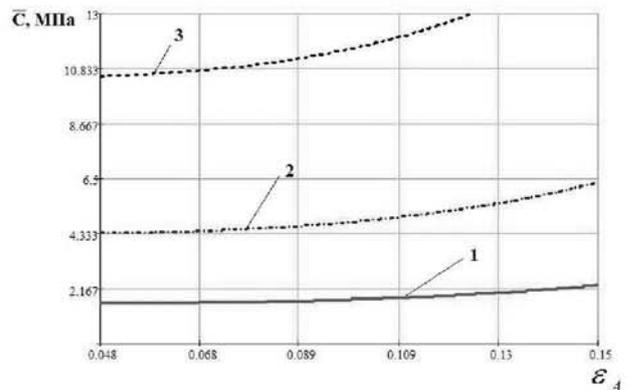


Рис. 3. Зависимость  $\bar{C}$  от  $\varepsilon_A$  при различных значениях  $\varepsilon_Q$ : 1 -  $\varepsilon_Q = 0,095$ ; 2 -  $\varepsilon_Q = 0,190$ ; 3 -  $\varepsilon_Q = 0,262$  ( $d_w = 0,09$  мм,  $H = 2,1$  мм,  $\bar{\rho} = 0,20$ )

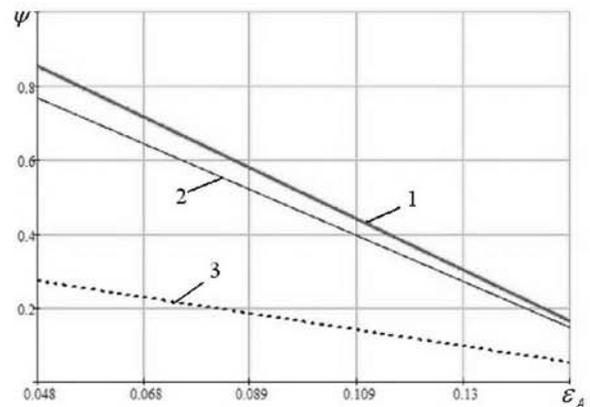


Рис. 4. Зависимость  $\psi$  от  $\varepsilon_A$  при различных значениях  $\varepsilon_Q$ : 1 -  $\varepsilon_Q = 0,095$ ; 2 -  $\varepsilon_Q = 0,190$ ; 3 -  $\varepsilon_Q = 0,262$  ( $d_w = 0,09$  мм,  $H = 2,1$  мм,  $\bar{\rho} = 0,20$ )

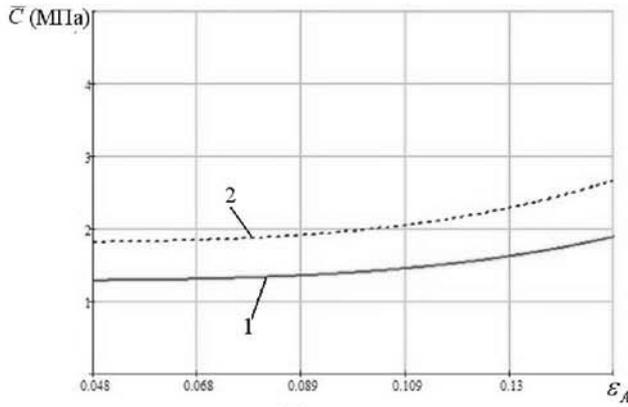


Рис. 5. Зависимость  $\bar{C}$  от  $\epsilon_A$  при различных значениях  $d_w$ : 1 -  $d_w = 0,09$ ; 2 -  $d_w = 0,12$  ( $\epsilon_Q = 0,195$  мм,  $H = 2,1$  мм,  $\bar{\rho} = 0,20$ )

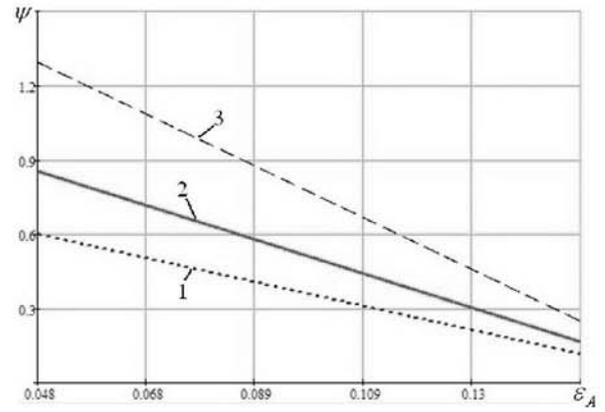


Рис. 8. Зависимость  $\psi$  от  $\epsilon_A$  при различных значениях  $H$ : 1 -  $H = 1,15$  мм; 2 -  $H = 2,1$  мм; 3 -  $H = 4,35$  мм ( $\epsilon_Q = 0,195$ ,  $d_w = 0,09$  мм,  $\bar{\rho} = 0,20$ )

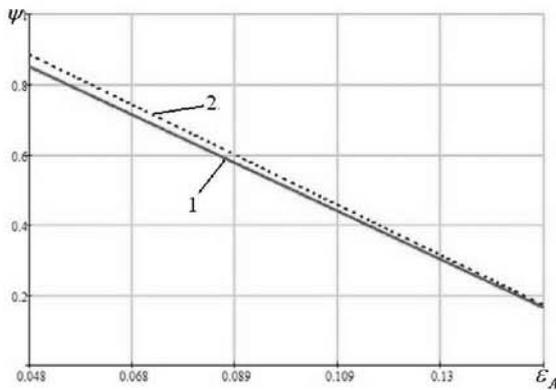


Рис. 6. Зависимость  $\psi$  от  $\epsilon_A$  при различных значениях  $d_w$ : 1 -  $d_w = 0,09$ ; 2 -  $d_w = 0,12$  ( $\epsilon_Q = 0,195$  мм,  $H = 2,1$  мм,  $\bar{\rho} = 0,20$ )

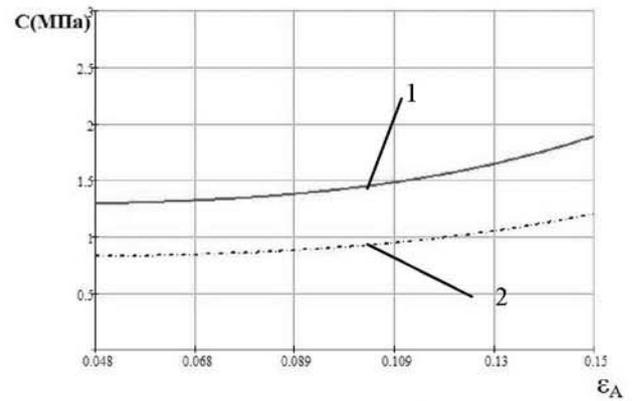


Рис. 9. Зависимость  $C$  от  $\epsilon_A$  при различных значениях  $\rho$ : 1 -  $\rho = 0,2$ ; 2 -  $\rho = 0,143$  ( $\epsilon_Q = 0,195$ ,  $d_w = 0,09$  мм,  $H = 2,1$  мм)

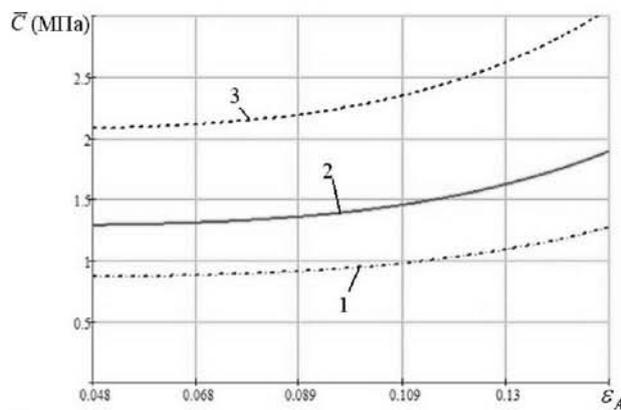


Рис. 7. Зависимость  $\bar{C}$  от  $\epsilon_A$  при различных значениях  $H$ : 1 -  $H = 1,15$  мм; 2 -  $H = 2,1$  мм; 3 -  $H = 4,35$  мм ( $\epsilon_Q = 0,195$ ,  $d_w = 0,09$  мм,  $\bar{\rho} = 0,20$ )

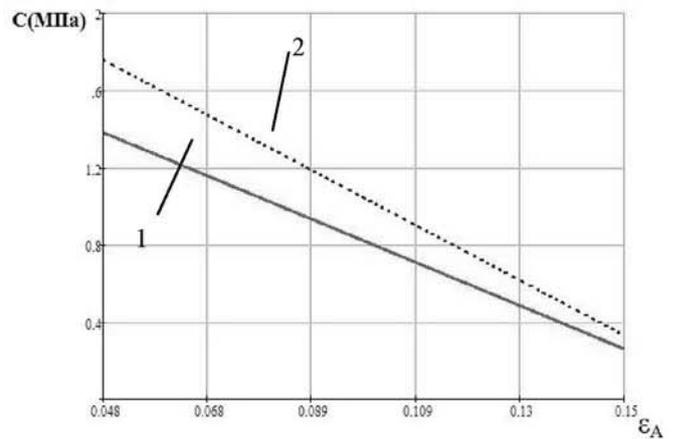


Рис. 10. Зависимость  $\psi$  от  $\epsilon_A$  при различных значениях  $\bar{\rho}$ : 1 -  $\bar{\rho} = 0,2$ ; 2 -  $\bar{\rho} = 0,143$  ( $\epsilon_Q = 0,195$ ,  $d_w = 0,09$  мм,  $H = 2,1$  мм)

Анализируя результаты эксперимента, можно сделать вывод, что характеристики пластин малой толщины ( $H/d_w \in [10; 40]$ ) из материала МР имеют некоторые особенности по сравнению с характеристиками обычного материала МР (для упругодемпфирующих элементов виброизоляторов характерно  $H/d_w > 100$ ).

При уменьшении толщины материала МР уменьшается количество контактов проволоки. В предельном случае  $H/d_w = 1$  (пластина с толщиной, равной диаметру проволоки) таких контактов вообще не будет. При этом внутреннее трение в материале МР исчезнет (останется только трение проволоки о поддерживающий элемент), поэтому с уменьшением толщины пластины коэффициент рассеивания энергии в материале МР должен падать, что подтверждается экспериментально.

Влияние относительной плотности материала  $\bar{\rho}$  на жесткость уменьшается с уменьшением толщины. Для виброизоляторов ( $H/d_w > 100$ ) показатель степени при  $\bar{\rho}$  равен 1, 7 [2], для предельного случая  $H/d_w = 1$  показатель степени при  $\bar{\rho}$  должен быть равен 1 (жесткость материала МР полностью соответствует жесткости материала проволоки), в рассмотренном диапазоне  $H/d_w \in [10; 40]$  показатель степени при  $\bar{\rho}$  принадлежит диапазону [1,1; 1,3].

Уменьшением количества контактов проволоки при малой толщине МР можно объяснить и имеющую место в тонких пластинах менее сильную, по сравнению с обычными виброизоляторами, зависимость жесткости от амплитуды деформации.

С увеличением толщины проволок жесткость тонких пластин из МР увеличивается. Это соответствует обычному материалу МР и связано с увеличением жесткости материала при увеличении жесткости отдельных проволок. При постоянной относительной плотности с увеличением диаметра проволоки уменьшается количество проволок и, соответственно, контактов в материале МР и коэффициент рассеивания энергии уменьшается, что наблюдается и для тонких пластин.

Полученные зависимости (1) и (2), определяющие жесткость и коэффициент рассеивания энергии пластин из МР, применяемых в опорах трубопроводов, позволяют рассчитывать методом конечных элементов динамику трубопровода любой формы на опорах из материала МР.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки), на основании постановления Правительства РФ №218 от 09.04.2010.

#### **Библиографический список**

1. Уланов, А.М. Учёт демпфирования при расчете упругогистерезисных систем методом конечных элементов [Текст] / А.М. Уланов, Ю.К. Пономарев // Изв. вузов: Авиационная техника. – Казань: 2009. -№ 3. - С. 5-8.
2. Уланов, А.М. Основы проектирования систем виброзащиты с упругими элементами из материала МР [Текст] / А.М. Уланов, Ю.К. Пономарев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2008. Том 10. -№ 3 (25). - С. 853-857.
3. Чегодаев, Д.Е. Демпфирование [Текст] / Д.Е. Чегодаев, Ю.К. Пономарев. - Самара: СГАУ, 1997. – 334 с.

## **MECHANICAL CHARACTERISTICS OF PIPELINE SUPPORT DAMPERS MADE OF MR MATERIAL**

©2011 A. M. Ulanov, A. V. Shvetsov

Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov  
(National Research University)

Thin plates made of wire damping material MR are used widely for pipeline vibration protection. Dependencies of stiffness and damping coefficient of these plates on deformation amplitude, preliminary static deformation, density, wire diameter, plate thickness are obtained.

*Pipeline, vibration protection, MR material, stiffness, damping.*

### Информация об авторах

**Уланов Александр Михайлович**, доктор технических наук, профессор кафедры «Конструкция и проектирование двигателей летательных аппаратов», Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел.: (846) 267-46-75, 8-917-1417335. E-mail: [alexulanov@mail.ru](mailto:alexulanov@mail.ru). Область научных интересов: защита от вибрации и удара, системы с конструкционным демпфированием.

**Швецов Антон Владимирович**, аспирант кафедры «Конструкция и проектирование двигателей летательных аппаратов», Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел. (846) 267-46-75. E-mail: [Ash56@inbox.ru](mailto:Ash56@inbox.ru). Область научных интересов: динамика гидравлических систем.

**Ulanov Aleksandr Mihailovich**, Doctor of Engineering Science, professor of Aircraft Design Department, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Phone: (846) 267-46-75, 8-917-1417335. E-mail: [alexulanov@mail.ru](mailto:alexulanov@mail.ru). Area of research: shock and vibration protection, dry friction systems.

**Shvetsov Anton Vladimirovich**, postgraduate of Aircraft Design Department, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Phone: (846) 267-46-75. E-mail: [Ash56@inbox.ru](mailto:Ash56@inbox.ru). Area of research: dynamics of hydraulic systems.