

УКД 53.99.02

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВИБРОИЗОЛЯТОРА С ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ ДВИЖЕНИЯ ИНЕРЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

© Олег Олегович Мугин, Александр Владимирович Синев

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия*

*olegmugin@rambler.ru*

**Аннотация.** В статье рассмотрен виброизолятор с гидравлическим инерционным трансформатором. Приведены статические и динамические характеристики данного виброизолятора. Показаны эффекты динамического поведения конструкций при возбуждении белым шумом. По результатам испытаний с учетом выявленных закономерностей разработаны технические решения по его настройке на необходимую частоту.

В настоящее время виброизоляторы (гидроопоры) с гидравлическим инерционным трансформатором широко применяются в системах виброизоляции машин, инженерно-строительных сооружениях (виброизоляция зданий), рельсовых транспортных магистралях, а особенно метрополитене [10, 11]. Теоретический анализ механического взаимодействия элементов в гидроопорах приведен в работах [4, 6-9]. Однако теоретические исследования не дают полной картины динамического поведения опоры в частотной области, в связи со сложностью описания процессов течения жидкости в камерах, что требует, для получения желаемого результата, дополнительных экспериментальных исследований [1-3, 12].

В статье определяются статические и динамические характеристики виброизолятора (гидроопора) с гидравлическим инерционным трансформатором. Приведено его подробное описание и принцип действия, а так же рассматриваются технические решения по доработке конструкции виброизолятора с гидравлическим инерционным трансформатором.

В качестве объекта испытаний на экспериментальном вибростенде был использован виброизолятор - гидроопора, разработанный в Нф ИМАШ РАН, при участии ИМАШ РАН [5]. Данная гидроопора, предназначена для применения в системах виброизоляции машин и инженерно-строительных сооружениях.

Гидроопора состоит из несущего статическую нагрузку упругого элемента – конической обечайки, под куполом которой находится рабочая камера (поршневая полость). За перегородкой находится дополнительная камера (компенсационная полость). Обе камеры заполнены рабочей гидравлической жидкостью. Рабочая и дополнительная камеры разделены между собой перегородкой, в которой располагается мембрана с дроссельными отверстиями. Конструкция гидроопоры представлена на рис. 1.

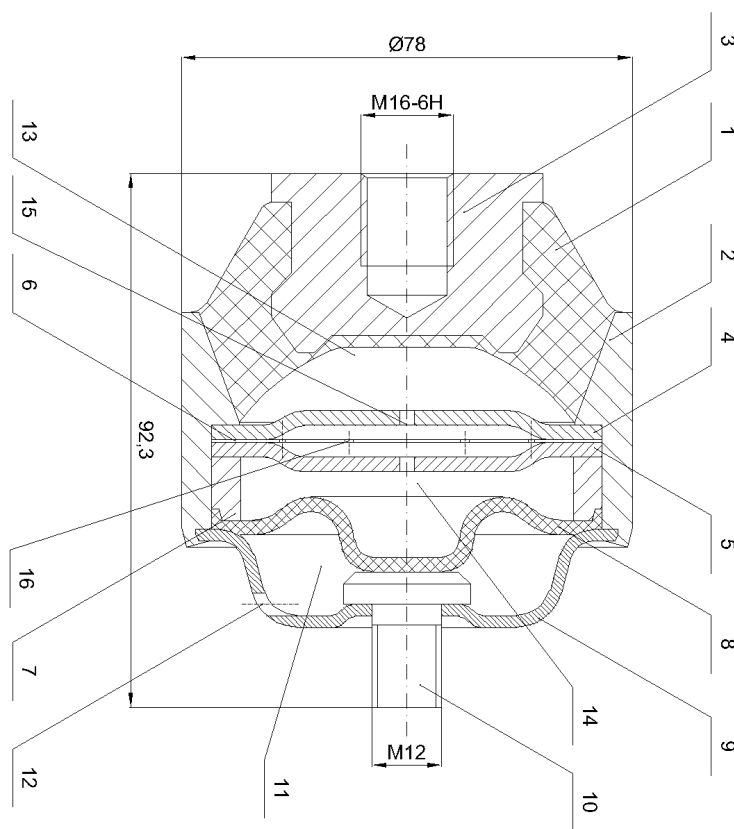
Упругий элемент – коническая обечайка (поз. 1) привулканизирована к корпусу (поз. 2) и опорной плате (поз. 3). Под куполом конической обечайки располагается рабочая камера (поршневая полость) (поз. 13), а за перегородкой находится дополнительная камера (компенсационная полость) (поз. 14).

Перегородка состоит из верхней (поз. 4) и нижней (поз. 5) плит, между которыми смонтирована металлическая мембрана (поз. 6). Верхняя и нижняя плита имеют по одному центральному отверстию (поз. 15). Мембрана имеет четыре дроссельных канала (отверстия Ø1,5) (поз. 16), расположенных равномерно по окружности Ø20 и четыре дроссельных канала (отверстия Ø2,5), расположенных равномерно по окружности Ø46.

Перегородка через металлическое кольцо (поз. 7) и диафрагму (поз. 8) опираются на поддон (поз. 9), в который вмонтировано основание для крепления (поз. 10) гидроопоры. Поддон устанавливается в корпус до упора и завальцовывается, тем самым, обеспечивая герметичность виброизолятора. Диафрагма образует с поддоном полость (поз. 11), которая через отверстие (поз. 12) в поддоне, заполняется воздухом. Для взаимодействия с внутренней сферической поверхностью диафрагмы, крепление, вмонтированное в поддон, имеет трапециидальную поверхность.

Виброизолятор работает следующим образом. Под действием внешней нагрузки на опорную плату (поз. 3) она смещается. При этом происходит деформация резиновой упругой обечайки (поз. 1). Рабочая жидкость, через поршневое действие обечайки, давлением рабочей жидкости передает статическую и динамическую нагрузку от опорной платы на корпус (поз. 2). В процессе вибрации, при сжатии, обечайка и корпус сближаются. Рабочая жидкость из рабочей камеры, через отверстие в верхней плите, встречая мембрану и обтекая ее, через отверстие в нижней плите попадает в дополнительную камеру. На обратном ходе, когда обечайка и корпус расходятся, рабочая жидкость через отверстия в верхней и нижней плитах попадает обратно в рабочую камеру. Этот процесс создает эффект инерциального трансформатора, формируя в частотной характеристике гидроопоры гашение типа «фильтра-пробки». Дроссельные отверстия (поз. 16) обеспечивают гидроопоре необходимое демпфирование.

На высоких частотах входного вибросигнала основную функцию в диссипации энергии колебаний выполняет эластичная обечайка. На низких частотах процесс диссипации механической энергии обусловлен тем фактором, что приведенная в движение рабочая жидкость рассеивает сообщенную ей энергию за счет диссипации по всем объемам рабочей камеры.



**Рис. 1.** Конструкция гидроопоры.

1- резиновая обечайка; 2 - корпусу; 3 - опорная плата; 4 - верхняя плита; 5 - нижняя плита; 6 - мембрана; 7 - металлическое кольцо; 8 - диафрагму; 9 - поддон; 10 - основание; 11 - воздушная

полость; 12 - отверстие воздушной полости; 13 - рабочая камера (поршневая полость); 14 - дополнительная камера (компенсационная полость); 15 - отверстие плиты; 16 - дроссельный канал.

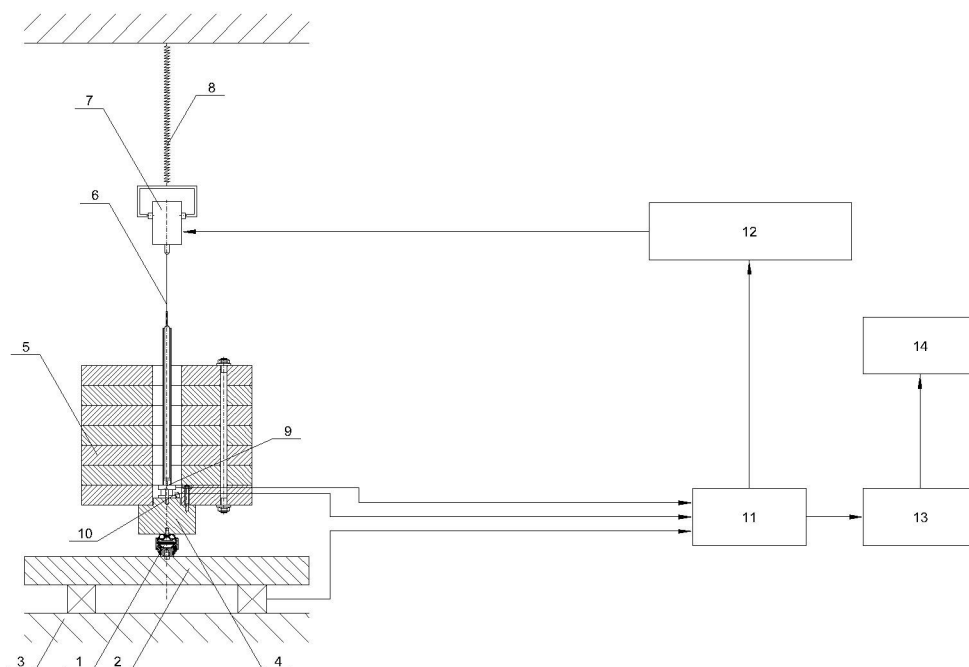
Измерения динамических характеристик виброизолятора производились на Калужском Турбинном заводе, на экспериментальном вибростенде, который позволяет производить измерения различных вибрационных характеристик процесса, в том числе комплексной жесткости и механического импеданса.

Стенд содержит механическую оснастку, позволяющую крепить различные типы опор для измерения динамических характеристик по вертикальной оси (оси z).

Экспериментальный стенд оборудован электронно-измерительной аппаратурой, блок-схема которой включает схему возбуждения и измерительную схему.

Схема возбуждения состоит из аппаратуры для создания динамической силы (вибровозбудитель типа «20JFJ20D»), действующей на испытуемый объект синусоидальным сигналом или случайным белым шумом в диапазоне от 5 до 800 Гц.

Схема экспериментального стенда приведена на рис. 2.



**Рис. 2.** Схема экспериментального вибростенда для определения динамических характеристик гидроопоры.

1 – объект испытания (гидроопора); 2 – силоизмерительная опора с датчиком силы; 3 – фундамент (бетонное основание); 4 – механическая оснастка (масса 35 кг); 5 – стальные диски (масса 665 кг); 6 – стальная струна; 7 – вибровозбудитель; 8 – пружина; 9 – датчик силы; 10 – акселерометр; 11 – двухканальный анализатор сигналов; 12 – усилитель мощности; 13 – ПЭВМ; 14 – устройство печати (принтер).

Испытуемый объект (гидроопора) (поз. 1.) устанавливается на силоизмерительную опору с датчиком силы фирмы «Kistler» (поз. 2), которая размещается на фундаменте (бетонном основании) (поз. 3). С помощью крепежных элементов, предусмотренных в конструкции гидроопоры, она крепится к опоре и механической оснастке (поз. 4).

Гидроопора нагружается статической нагрузкой массой до 700 кг. В качестве статической нагрузки используются семь жестко скрепленных стальных дисков (поз. 5), масса каждого из которых составляет 95 кг, что дает суммарную нагрузку в 665 кг и механическая оснастка массой 35 кг.

Стальные диски закреплены между собой при помощи трех шпилек М24, расположенных равномерно по окружности дисков. Механическая оснастка крепится к нижнему стальному диску при помощи трех болтов М16, расположенных равномерно по окружности диска.

При помощи стальной струны (поз. 6) механическая оснастка соединяется с вибровозбудителем (вибратором) (поз. 7), который упруго вывешен на пружине (поз. 8) с частотой  $\sim 1$  Гц.

На верхней плоскости механической оснастки располагается датчик силы (поз. 9) и акселерометр (поз. 10), измеряющие ускорение и силу на входе гидроопоры.

Сигнал с датчиков силы и акселерометра поступает на вход двухканального анализатора сигналов (со встроенным генератором синусоидальных сигналов и случайного шума) типа «2034» фирмы «BSK» (поз. 11), который соединяется с усилителем мощности типа «А438» фирмы «Prodera» (поз. 12). Двухканальный анализатор осуществляет преобразование передаточных сигналов и силы. На выходе анализатора получаем непосредственно величину переходной динамической жесткости:

$$D_{перех}(f) = F_{вых} / x_{вх}.$$

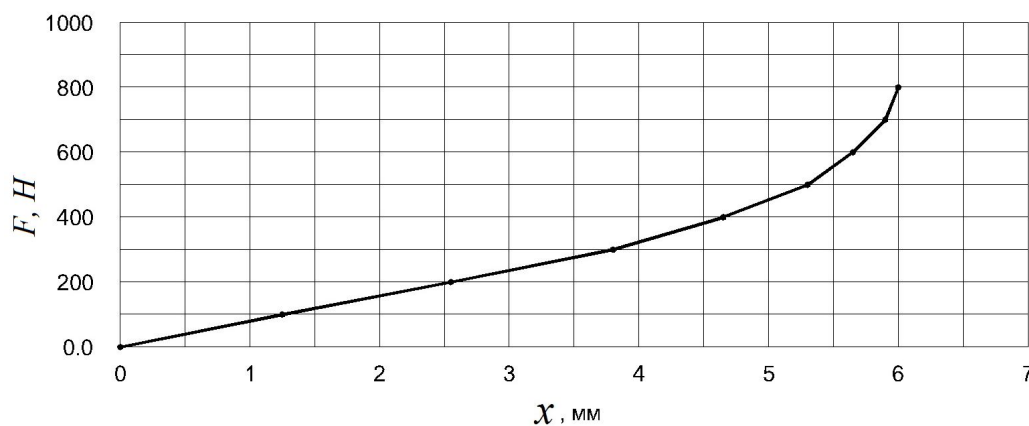
Результаты передаются с двухканального анализатора на ЭВМ (поз. 13), где они обрабатываются, хранятся и при необходимости выводятся на периферийное устройство печати – принтер (поз. 14).

Целью статических испытаний являлось определение статической жесткости гидроопоры в диапазоне 0 до 700 кг с шагом 50 кг, с целью последующей корректировки (оптимизации) конструкции и настроек гидроопоры.

В ходе статических испытаний были получены экспериментальные характеристики статической жесткости гидроопоры.

Для рабочей точки, соответствующей номинальной нагрузке в 700 кг, смещение опорной плиты  $\Delta$  соответствует 6 мм. При малых нагрузках в нижней части характеристики смещение опорной плиты  $\Delta$  находится в диапазоне 4-5 мм и имеет место жесткая нелинейность характеристики.

Нагрузочная характеристика опытного образца гидроопоры в осевом направлении  $Z$ , представлена на рис. 3.



**Рис. 3.** Статическая жесткость опытного образца гидроопоры в осевом направлении  $Z$ , с номинальной статической нагрузкой  $P = 700$  кг.

При определении динамических характеристик виброизолятора основной считается характеристика переходной динамической жесткости или эквивалентная ей характеристика переходного механического сопротивления – и импеданса.

Измерения переходной динамической жесткости выполнялись при следующих условиях:

- частотный диапазон испытаний от 5 до 200 Гц;
- статическая нагрузка на гидропору - 700 кг;
- уровень возбуждения толкающей силы на вибровозбудителе - 1 кг.

Данные динамические характеристики были получены на экспериментальном вибростенде. По полученным экспериментальным данным определяется входная динамическая жесткость -  $D_1$  и переходная динамическая жесткость -  $D_2$ :

$$D_{вх}(j\omega) = F_2(j\omega) / x(j\omega),$$

$$D_{перех}(j\omega) = F_1(j\omega) / x(j\omega),$$

где:  $F_1$  – сила на выходе,  $F_2$  – сила на входе,  $x$  – перемещение.

Для оценки динамической жесткости гидропоры применяется переходная динамическая жесткость, так как она точнее передает свойства виброизолятора как механического двухполосника, в то время как входная динамическая жесткость учитывает влияние дополнительных масс, например устройств крепления.

На рис. 4 приведены экспериментальные кривые динамической силы на выходе –  $F_2$  (а) и входе –  $F_1$  (б) опытного образца гидропоры.

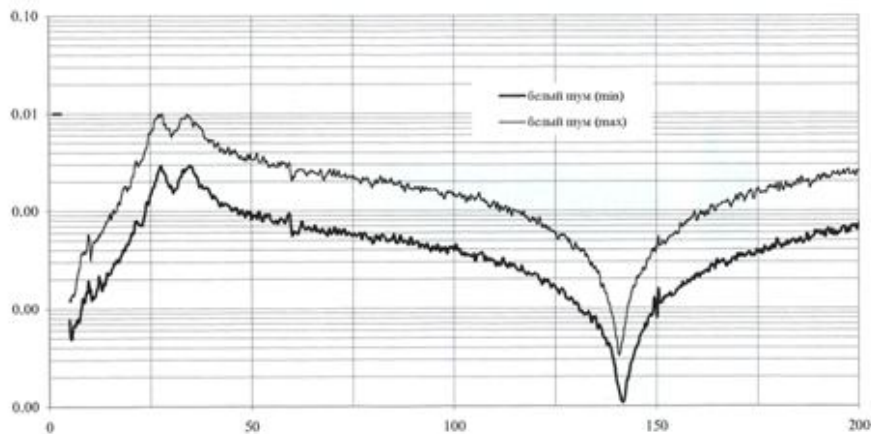


Рис. 4. (а). Динамическая сила на выходе опытного образца гидропоры в осевом направлении

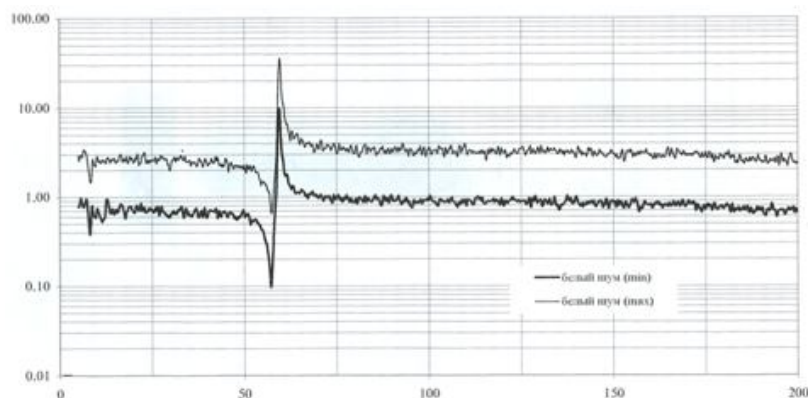


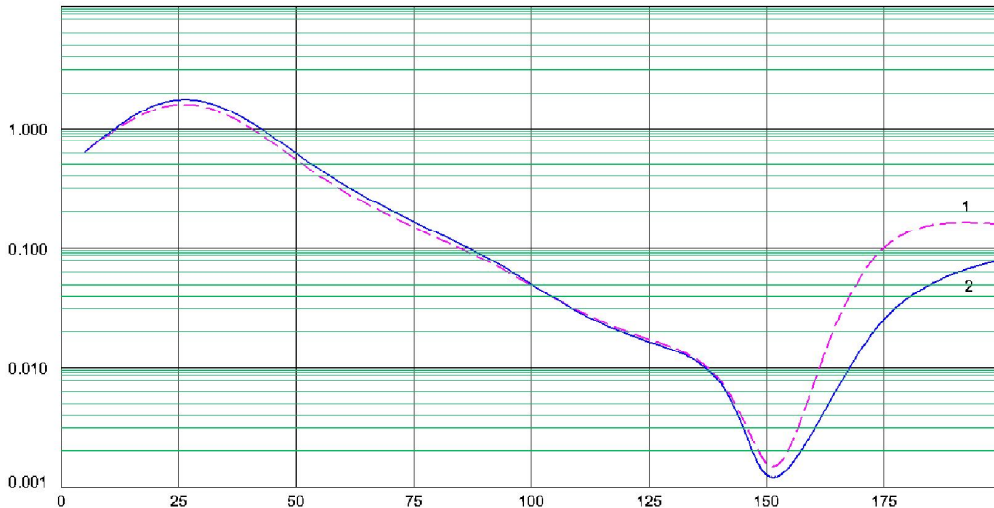
Рис. 4. (б). Динамическая на входе опытного образца гидропоры в осевом направлении.

По экспериментальным данным (рис. 4) был построен график частотной зависимости коэффициента передачи для опытного образца гидропоры:

$$\mu = F_2 / F_1.$$

где:  $F_1$  – сила на входе,  $F_2$  – сила на выходе.

На рис. 5 представлена частотная зависимость коэффициента передачи для виброизолятора (гидроопоры) с использованием инерционности и демпфирования (при настройке виброизолятора на частоту 150 Гц).



**Рис. 5.** Частотные зависимости коэффициента передачи (при настройке виброизолятора на 150 Гц).  
1 – кривая белый шум (max); 2 – кривая белый шум (min).

Анализируя экспериментальные кривые, представленные на рис. 6 можно увидеть, что опытный образец гидроопоры настроен на частоту 150 Гц. Данные настройки виброизолятора обеспечивают усиление эффекта виброизоляции в полосе частот 120-175 Гц.

В спектральном составе превышение предельно-допустимых значений вибрации для рельсовых транспортных магистралей, а особенно метрополитена, наблюдается в октавных полосах с частотами 31,5 - 63 Гц. Настройку виброизоляторов целесообразно выполнять в диапазоне 16-63 Гц, настраивая гидроопору на среднюю частоту двух октав – 45 Гц. Рассмотрим случай настройки виброизолятора на частоту 45 Гц.

Настройка данного виброизолятора на требуемую частоту возможна, например, путем уменьшения толщины и увеличения числа промежуточных камер, а так же другими изменениями. Поэтому сложность течения жидкости в камерах требует, для получения желаемого результата, дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

Проведем расчет настройки виброизолятора на частоту 45 Гц, путем увеличения числа промежуточных камер.

Перегородка гидроопоры состоит из верхней и нижней плит, между которыми вмонтирована металлическая мембрана. Верхняя и нижняя плита имеют по одному центральному отверстию. Мембрана имеет четыре дроссельных канала (отверстия  $\varnothing 1,5$ ), расположенных равномерно по окружности  $\varnothing 20$  и четыре дроссельных канала (отверстия  $\varnothing 2,5$ ), расположенных равномерно по окружности  $\varnothing 46$ .

Схема перегородки приведена на рис. 6.

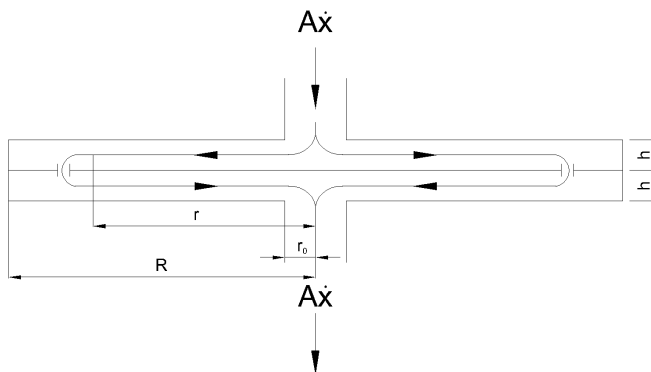


Рис. 6. Схема течения жидкости для опытного образца гидроопры.

Приведенная масса рассматриваемой системы будет равна:

$$m_{np} = ((A^2 \cdot \rho) / \pi \cdot h) \cdot \ln R / r_0,$$

где:  $A$  – площадь поршневого действия,  $\rho$  – плотность жидкости,  $h$  – высота канала мембраны,  $R$  – внешний радиус перегородки,  $r_0$  – радиус центрального отверстия верхней и нижней плиты.

Частота настройки данной системы, определяется по формуле:

$$f_{настр.} = 1/2\pi \cdot (c / m_{np})^{1/2} \quad (1)$$

Используя выражение (1), запишем ее для виброизолятора, приведенного на рис. 1, настроенного на частоту  $f = 150$  Гц:

$$150 = 1/2\pi \cdot (c / m_{np})^{1/2}$$

где:  $c$  – статическая жесткость гидроопры,  $m_{np}$  – приведенная масса гидроопры.

Аналогично получаем выражение для виброизолятора, на резонансной частоте  $f = 45$  Гц:

$$45 = 1/2\pi \cdot (c / 700)^{1/2}$$

где:  $c$  – статическая жесткость гидроопры.

Настройка такого виброизолятора на частоту 45 Гц возможна путем увеличения числа промежуточных камер виброизолятора в 3 раза и уменьшения ширины щелей скорректированная по коэффициенту передачи.

В ходе динамических испытаний опытного образца виброизолятора на вибростенде были получены экспериментальные статические и динамические характеристики виброизолятора, которые подтверждают ожидаемый эффект виброизоляции при использовании гидроопр в системах виброизоляции машин и инженерно-строительных сооружениях. Применение данного типа виброизоляторов в метрополитене, направленных на снижение вибрации, передаваемой поездами метрополитена в окружающую среду, требует дополнительных настроек и проведение испытаний на физических моделях с разными конструкциями промежуточных камер и разными жидкостными элементами, что должно привести к снижению передаточных характеристик гидроопры в среднечастотном диапазоне 31,5 – 63 Гц.

Представленные в статье результаты дают основу для создания расчетной методики проектирования гасителей с гидравлическим инерционным трансформатором. В дальнейшем авторы планируют провести натурные испытания модели с распределенным ударом [13].

### Литература

1. Фролов К.В., Чистяков А.Г., Синёв А.В., Мугин О.О., Статников И.Н., Абакумов, Е.И., Гордеев Б.А. Идентификация математической модели гидроопоры по экспериментальным данным. ПНМН, №5, 2002г., с. 3-8.
2. Фролов К.В., Тихонов В.А., Чистяков А.Г., Абакумов Е.И., Гордеев Б.А. Экспериментальное определение статических и вибрационных характеристик гидроопор двух типов. ПНМН, №4, 2001г., с. 98-102.
3. Абакумов Е.И., Гордеев Б.А., Ерофеев В.И., Синев А.В., Ложкин Ф.В. Исследование гидравлических виброопор с различными рабочими жидкостями. ПНМН №2, 2002, с35-38
4. Гордеев Б.А., Ерофеев В.И., Синев А.В., Мугин О.О. Системы виброзащиты с использованием инерционности и диссипации реологических сред. - М.: Физматлит, 2004г., 176с.
5. Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. Патент на полезную модель № 56523. Гидравлическая виброопора.
6. Обморшев А.Н., Введение в теорию колебаний. - М.: Наука, 1965, 276с.
7. Сирил М. Харрис, Чарльз И. Крид, Справочник по ударным нагрузкам: Пер. с англ. - Л.: Судостроение, 1980, 360с.
8. СН 2.2.4/ 2.1.8.566-96 «Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий». Минздрав России М.: 1997.
9. «Справочник по технической акустике». Под ред. М.Хекла и Х.Л. Мюллера. Л.: Судостроение, 1980.
10. Смородинов М. И., Федоров Б. С. Устройство сооружений и фундаментов способом «стена в грунте». - М., Стройиздат, 1986
11. Храпов В. Г., Демешко Е. А., Наумов С. Н. и др. Тоннели и метрополитены. – М., Транспорт, 1989
12. Гордеев Б.А., Кирюхин А.В., Синёв А.В., Тихонов В.А., Чистяков А.Г., Яковлев В.В. Заводские испытания гидроупругих опор. Статические и динамические характеристики. ПНМН, №6, 2009г., с. 91-95.
13. Асташев В.К., Крупенин В.Л. Продольные колебания тонкого стержня при торцевом соударении с неподвижным ограничителем – Динамика виброударных (сильно нелинейных) систем. Труды XV симпозиума. Москва - Звенигород. 2006. С. 13-19.

*Поступила: 12.02.12.*