

**УСТРАНЕНИЕ ВИБРАЦИЙ НА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ  
МАШИНАХ С ПОМОЩЬЮ ДИСКРЕТНЫХ РАБОЧИХ СРЕД:  
МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

*М.И.Вольников , канд. техн. наук, доцент  
ФГБОУ ВПО «Пензенская ГСХА», Россия, г. Пенза,  
e-mail: vmi1972@yandex.ru, т: 62-93-90*

*И.А.Прошин докт. техн. наук, профессор  
ФГБОУ ВПО Пензенский ГТУ, Россия г. Пенза  
e-mail: proshin.Ivan@inbox.ru, тел: 49-61-59*

**Аннотация**

Статья посвящена проблеме защиты самоходных машин, тракторов, комбайнов, электроприводов [1] и других конструкций от вибраций. Установка демпферов и вибропоглощающих материалов не позволяет в полной мере устранить вибрационные воздействия. В качестве виброударозащиты предлагается использовать дискретные среды, обладающие хорошими диссипативными свойствами в широком диапазоне частот. Гаситель на дискретных средах является более простым по изготовлению и настройке по сравнению с обычным одномассовым гасителем колебаний.

Рассматривается математическая модель гасителя колебаний на дискретных средах. Даны результаты экспериментальных исследований диссипативных свойств различных дискретных сред. Сравниваются различные варианты применения таких гасителей. Результат использования гасителя на ДРС очевиден: он обладает широкополосностью и стабильностью, обеспечивает надежность и долговечность защищаемой конструкции и при этом имеет значительно меньшую себестоимость по сравнению с пакетными многомассовыми гасителями.

**Ключевые слова:** вибрация, дискретные среды, защита от вибраций, математическая модель, сельскохозяйственные машины

Условия труда в полеводстве в значительной мере определяются уровнем механизации процессов возделывания, выращиваемой культурой, технологией возделывания. Основу механизации этой отрасли составляют тракторы, энергонасыщенные самоходные машины, комплексы навесных и прицепных машин и механизмов, обеспечивающих выполнение рабочих операций по механизированному возделыванию сельскохозяйственных культур [2].

Одним из основных неблагоприятных факторов при работе на тракторах являются вибрации. Кабина трактора позволяет защитить механизатора от непосредственного воздействия высоких и низких температур, воздействия осадков, но не обеспечивает достаточной изоляции от вибрационного воздействия, источниками которого в основном являются ходовая часть и двигатель. Вибрация через раму, коробку передач, систему креплений передается на рабочее место – пол кабины, сиденье, органы управления, создавая дискомфорт.

Установка демпферов и вибропоглощающих материалов не позволяет в полной мере устранить вибрационные воздействия, т.к. они работают в узком диапазоне частот и устраняют лишь колебания первых гармоник [3, 4, 5]. Применение пружинных, маятниковых, катковых и других гасителей колебаний предполагает наличие на машинах дополнительных элементов в виде пружин с грузами, маятников и т.п., для которых требуется дополнительное место в кабине или за ее пределами, что требует изменения конструкции машины или создает трудности в их установке [5, 6, 7].

Выход из сложившейся ситуации – применение в качестве виброзащиты динамического гасителя колебаний с использованием дискретных рабочих сред (ДРС) в виде гранул, шариков и т.п. из материалов (полистирол, металлические окатыши), обладающих большими диссипативными свойствами [4, 8, 9]. ДРС можно расположить в полостях конструкции тракторов или других самоходных

машин в специальных контейнерах, или они могут быть добавлены между вибропоглощающими материалами, предусмотренными конструкцией машин.

Кроме использования в целях устранения вибраций на самоходных машинах ДРС применимы в качестве виброзащиты балочных, консольных, ферменных и других конструкций. В сельском хозяйстве к таким конструкциям можно отнести семяпроводы комбайнов, передвижные сеялки и т.п.

Гаситель на ДРС по эффективности не уступает обычному одномассовому гасителю колебаний. Характерной особенностью гасителей на ДРС является способность создавать локальную область сгущения собственных частот в окрестности резонансной частоты колебаний защищаемого объекта. В этом случае все элементы ДРС эффективно участвуют в гашении колебаний, повышая эффективность гашения.

Исследования [10] показали, что при большом числе частиц среды оптимальному демпфированию соответствует уровень конструкционного трения в связях, что делает гаситель на ДРС более простым по изготовлению и настройке по сравнению с одномассовым, в котором при изменении внешних условий демпфирования требуется вносить в конструкцию сложные конструктивные изменения. Кроме того, гасители на ДРС менее чувствительны к случайным отклонениям частоты внешнего воздействия, что делает их более стабильными.

В отличие от пакетных многомассовых гасителей [4, 7, 10], в которых с увеличением числа звеньев усложняется конструкция, гаситель на ДРС лишен этого недостатка, так как каждую гранулу ДРС, находящуюся в общей оболочке или контейнере, можно представить отдельным готовым звеном пакетного гасителя. Гаситель на ДРС также обладает широкополосностью и стабильностью, обеспечивает надежность и долговечность защищаемой конструкции, и при этом имеет значительно меньшую себестоимость по сравнению с пакетными многомассовыми гасителями.

Для описания поведения дискретных рабочих сред (ДРС), выполняющих роль элементов, демпфирующих колебания основной системы, необходимо выбрать модель, которая бы с достаточной степенью точности описывала движение ДРС при различных условиях вибрационного воздействия [11].

В качестве расчетной схемы динамического гасителя колебаний на дискретных рабочих средах (ДРС) можно принять модель пакетного многомассового динамического гасителя (рис. 1) [10]. Дискретная среда представлена в виде отдельных масс  $m_i$ , соединенных между собой упругими и демпфирующими связями.

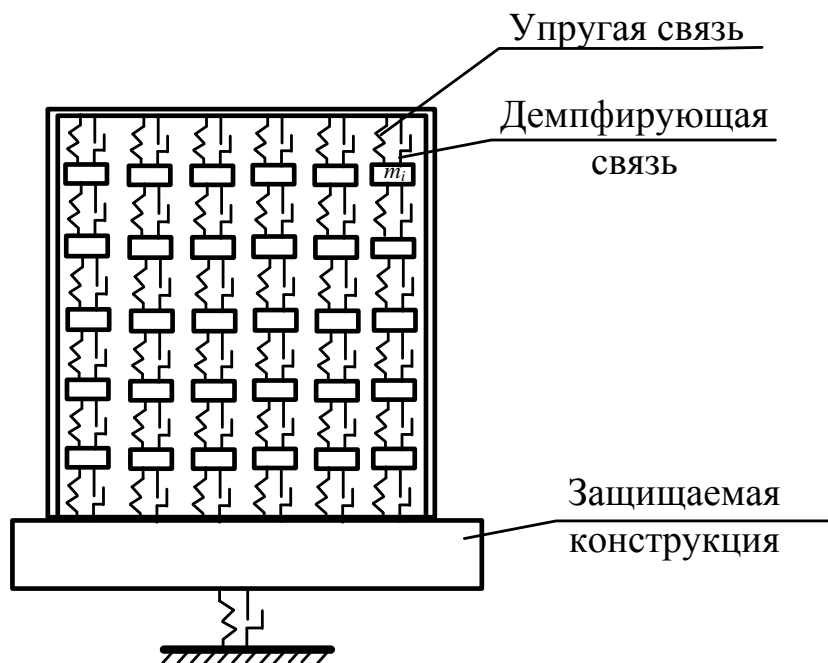


Рис. 1. Модель пакетного многомассового динамического гасителя

В качестве математического описания конструкций вполне пригодна модель одномассового динамического гасителя колебаний с демпфированием, в котором роль присоединенной массы выполняет суммарная масса ДРС, а вязкоупругая связь представлена как результат действия упругих и демпфирующих связей всех звеньев ДРС.

Уравнения движения системы [12,13]:

$$M \frac{\partial^2 y_1}{\partial t^2} + c_1 \frac{\partial y_1}{\partial t} + k_1 y_1 + m \left( \frac{\partial^2 y_1}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 y_2}{\partial t^2} \right) = P_0 \sin \omega t ,$$

$$m \frac{\partial^2 \acute{o}_1}{\acute{a}t^2} + \frac{\acute{a}^2 \acute{o}_2}{\acute{a}t^2} + k_2 \acute{o}_2 + c_2 \frac{\acute{a}\acute{o}_2}{\acute{a}t} = 0,$$

где  $y_1$  – абсолютное смещение защищаемой конструкции;  $y_2$  – относительное смещение массы ДРС;  $k_1$  и  $k_2$  – жесткость защищаемой конструкции и

приведенная жесткость ДРС;  $c_2$  – коэффициент демпфирования гасителя на ДРС;  $c_1$  – коэффициент демпфирования защищаемой конструкции;  $P_0 \sin \omega t$  – возмущающая сила;  $\omega$  – частота возмущающей силы.

Проведенные экспериментальные исследования с использованием ДРС в качестве демпфирующего элемента подтвердили применимость математической модели одномассового гасителя для описания ДРС.

В качестве примера на рис. 2 показана экспериментальная зависимость относительной амплитуды колебания защищаемой конструкции  $\frac{y_1}{P_0}$ , с гасителем колебаний на ДРС (в качестве ДРС использовался вспененный полистирол), от отношения  $\frac{\omega}{\omega_0} = g$ , где  $\omega_0$  – резонансная частота конструкции. На рис. 3 показана та же зависимость, но полученная с помощью математического моделирования. Настраечные коэффициенты для ДРС были получены экспериментально [4].

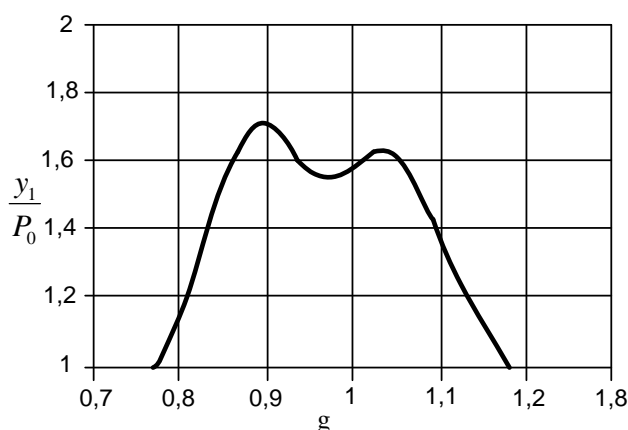


Рис. 2. Экспериментальная зависимость

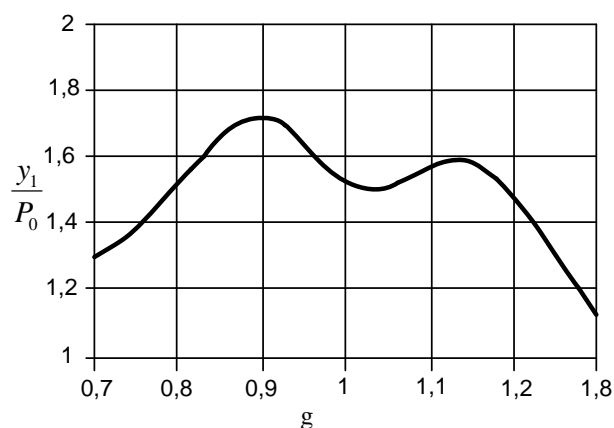


Рис. 3. Зависимость, полученная с помощью математического моделирования

Дискретные рабочие среды применимы и для гашения колебаний балочных конструкций, в частности консольных балок. Математическая модель балочной конструкции с гасителем колебаний на ДРС и методика расчета подробно рассматриваются в [4, 14, 15].

Эффективность гашения колебаний консоли при использовании различных ДРС можно продемонстрировать при помощи диаграмм, представленных на рисунках 4, 5. На диаграмме представлены кривые, полученные

экспериментально при закреплении на конце консоли контейнера, полностью заполненного различными ДРС. Размеры контейнера во всех случаях оставались одни и те же, но отличалась масса заполняющей среды. (Так как собственные частоты системы при использовании различных ДРС не совпадают, по оси абсцисс отложены значения частот в абсолютных величинах.)

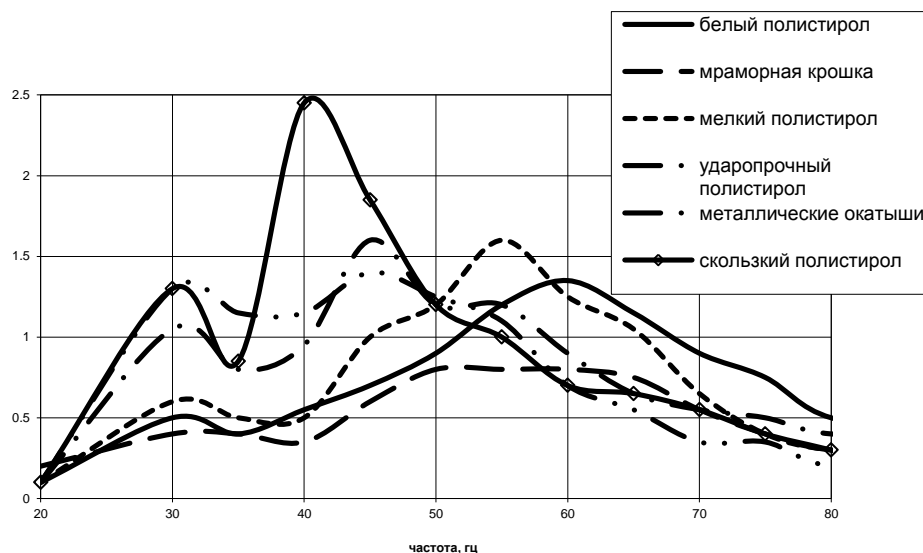


Рис. 4. Полный контейнер на конце консоли

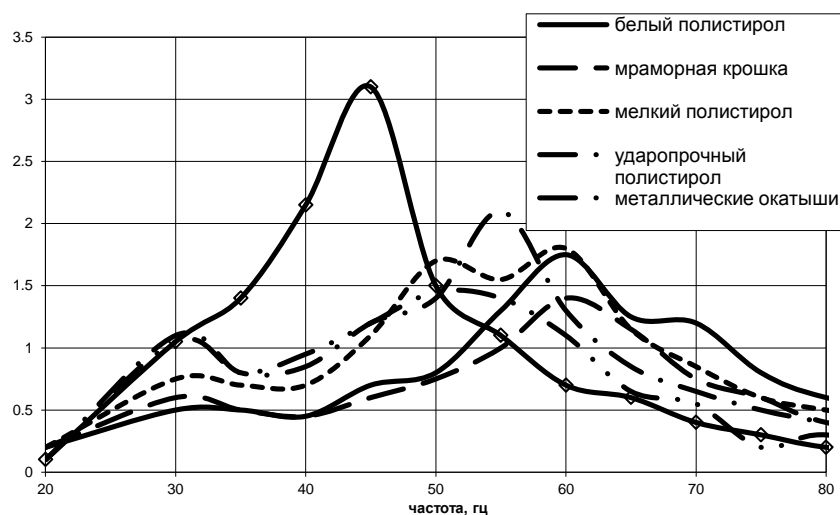


Рис. 5. Наполовину заполненный контейнер на конце консоли

При анализе графиков можно заключить, что при одинаковом объеме заполнения средой контейнера наиболее эффективно в качестве гасящего элемента ведет себя мраморная крошка, обладая по сравнению с другими ДРС наибольшими диссипативными свойствами.

Сравнивая поведение экспериментальных кривых, полученных при полном и наполовину заполненном различными дискретными средами контейнерах, прослеживается однозначная картина. При полном наполнении на графиках четко вырисовываются два «горба», соответствующие двум резонансным пикам, возникающим в результате раздвоения резонансной частоты, при использовании модели динамического гасителя колебаний, с оптимальной настройкой.

При заполнении контейнера ДРС наполовину происходит также снижение резонансных колебаний, но при этом АЧХ консоли с гасителем на ДРС ведет себя как динамический гаситель колебаний, настроенный на резонансную частоту. В результате на частотах до и после резонансных амплитуда изменяется плавно. Но при совпадении собственной частоты системы и частоты вынуждающего воздействия изменяется более резко и имеет значения, превышающие при использовании контейнера полностью заполненного дискретной рабочей средой. Этот факт полностью подтверждается теорией динамического гасителя колебаний, настроенного на резонансную частоту [4, 16].

Полученная картина подтверждает теорию [16], согласно которой поведение ДРС зависит от амплитуды воздействия и качества взаимодействия между частицами среды. При полном заполнении сцепление между гранулами ДРС весьма хорошее и моделирует диссипацию энергии в среде за счет вязкоупругого трения (коэффициент затухания). При заполнении контейнера меньшим объемом при достижении значительных амплитуд колебаний консоли связи между частицами нарушаются, и коэффициент затухания уменьшается, тем самым изменяя настройку гасителя колебаний на дискретных рабочих средах.

Проведем сравнительный анализ зависимости уменьшения амплитуды колебаний консоли с прикрепленным контейнером с ДРС при различном расположении контейнера на оси консоли.

Необходимость такого исследования обусловлена тем, что при резонансных колебаниях гармоники, выше основной частоты колебаний будут вносить изменения в значение амплитуды колебаний конца балки.

При расположении контейнера на конце балки он будет действовать в основном на снижение амплитуды основной формы колебаний. Но вместе с тем

будут присутствовать формы колебаний более высоких частот. Для их устранения необходимо расположить контейнер с ДРС ближе к середине балки. Тогда ДРС будет устранять резонансные амплитуды не только основной частоты, но и других, более высоких частот колебаний консольной балки.

На рисунках 6 – 9 показаны экспериментальные графики зависимости относительной амплитуды колебаний конца консоли от частоты возмущающей силы при различном расположении контейнера с ДРС и его заполнении.

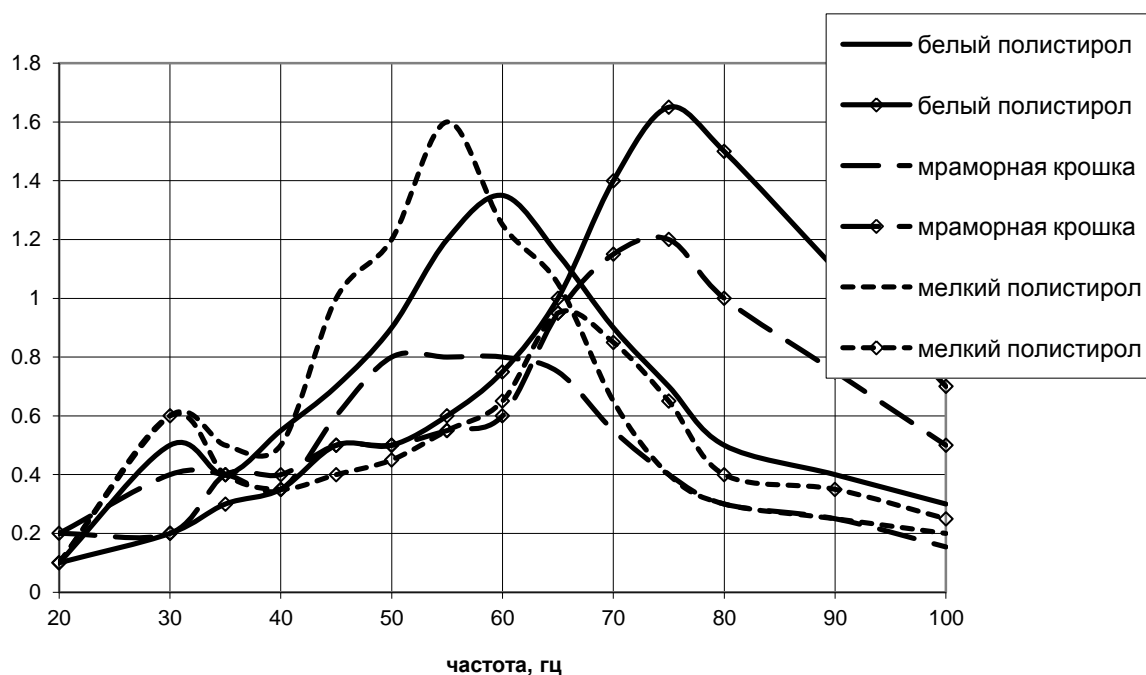


Рис. 6. Полный контейнер при различном расположении



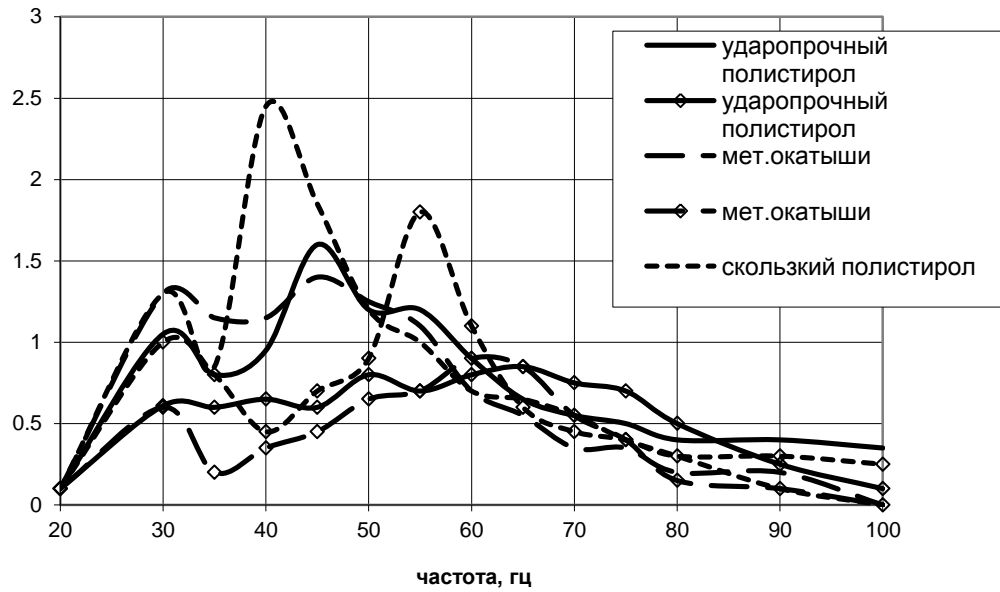


Рис. 7. Полный контейнер при различном расположении

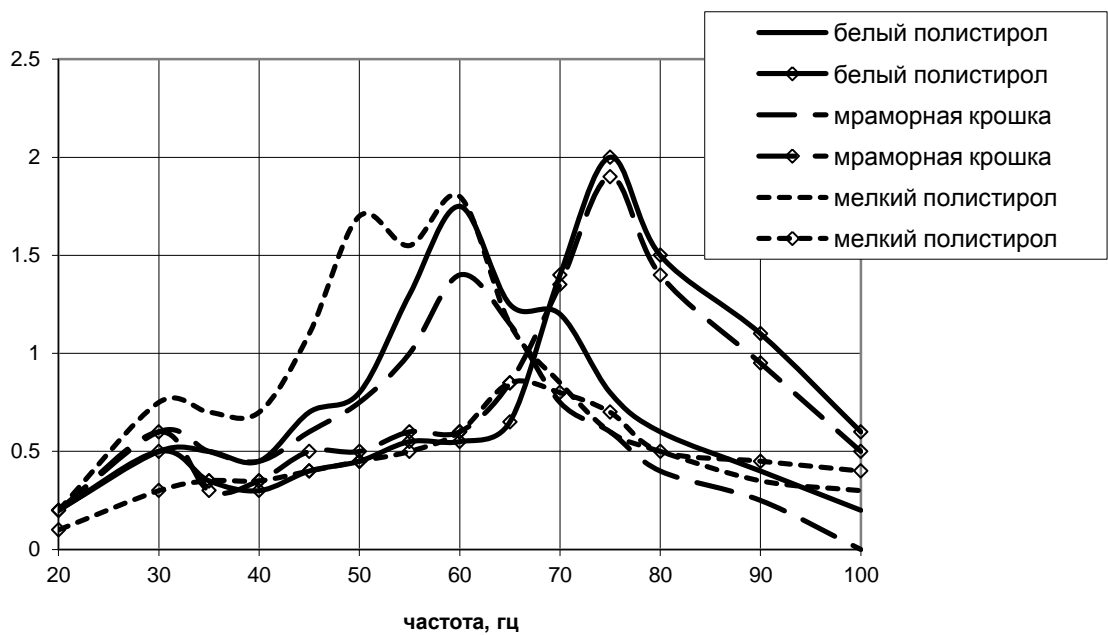


Рис. 8. Наполовину заполненный контейнер при различном расположении

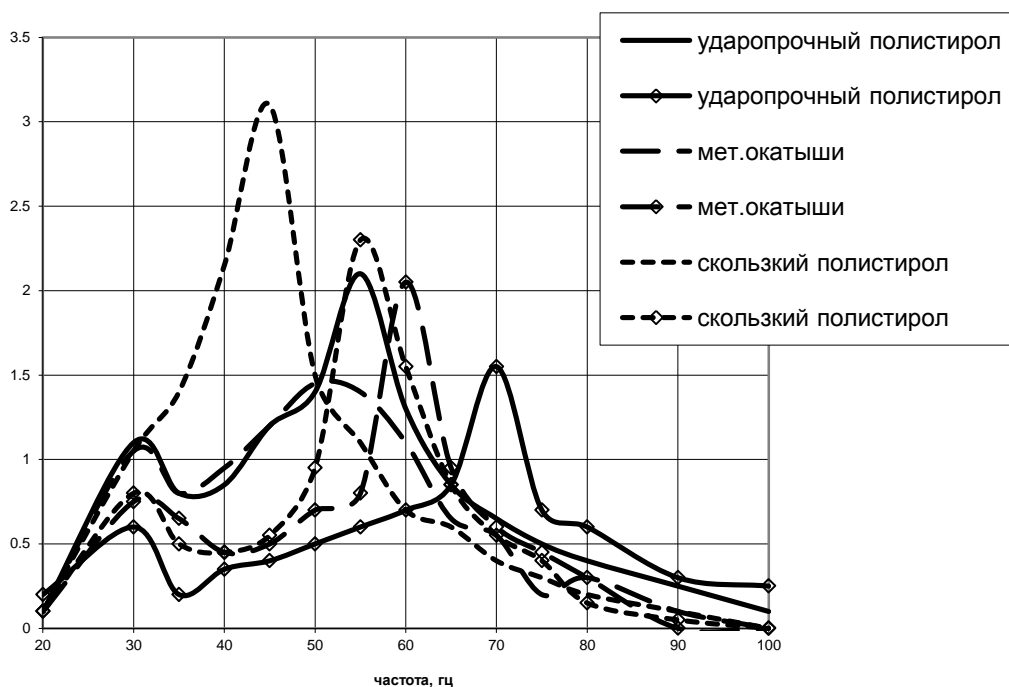


Рис. 9. Наполовину заполненный контейнер при различном расположении

Как видно из эксперимента, эффект гашения колебаний выражен более значительно при расположении контейнера в сечении, находящемся по центру консоли, для таких ДРС, как мелкий, ударопрочный и скользящий полистиролы. Это обусловлено, во-первых, тем, что при расположении контейнера в сечении по центру консоли он изменяет жесткость колебательной системы, а значит, и амплитуду колебаний при резонансе. Во-вторых, рассеяние энергии в данных материалах ДРС в большей степени происходит за счет внутреннего трения между гранулами, а роль соударения гранул в уменьшении амплитуды колебаний незначительна, так как мелкий, ударопрочный и скользящий полистиролы обладают незначительной плотностью, а соответственно – небольшой массой гранул.

Исходя из сказанного выше, очевидно, что контейнер с ДРС выгодней закреплять в местах, где амплитуда колебаний максимальна, то есть на конце консоли. Тогда гашение колебаний будет более ярко выражено. Это подтверждается экспериментами, результаты которых отображены на графиках.

В свою очередь, располагая контейнер с ДРС в сечении, находящемся на середине консоли, мы получаем эффект от гашения колебаний, соответствующих не только основной частоте, но и другим, более высоким формам. Хотя уменьшение резонансной амплитуды основной частоты несколько снижается.

Таким образом, при выборе материала ДРС следует задаться вопросом: какую из форм колебаний требуется устранить. При значительных амплитудах вынуждающей силы и для устранения резонансных амплитуд, соответствующих основной форме колебаний, эффективнее использовать такие ДРС, как белый полистирол, мраморная крошка, металлические окатыши, и располагать контейнер на конце консоли. Соответственно, при незначительных амплитудах внешнего воздействия, когда эффект ударного гашения выражен слабо, а также для устранения нескольких форм колебаний, контейнер необходимо располагать ближе к центральному сечению балки.

Аналогичная картина будет наблюдаться и при использовании ДРС в качестве засыпки в полости конструкции, вибрацию которой необходимо устранить.

Таким образом, применение ДРС позволяет создать простую виброзащиту объектов, не требующую тщательной настройки, работающую в широком диапазоне частот.

### *Литература*

1. Прошин, И.А. Алгоритм комбинированного управления и метод математического моделирования асинхронного электропривода / И.А. Прошин, М.И. Вольников, Е.Н. Салмов // Нива Поволжья. – 2014. – № 4 (33). – С. 102-110.

2. Информационный портал: Охрана труда и безопасность жизнедеятельности. Режим доступа : <http://ohrana-bgd.narod.ru> , свободный.

3. Смогунов В.В. Динамика гетерогенных структур. Том 3: Виброударозащита гетерогенных структур / В.В. Смогунов, О.А. Вдовикина, М.И. Вольников; под редакцией В.В. Смогунова. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2005. – 497 с.

4. Вольников, М.И. Математическое моделирование динамики гетерогенных стержневых структур: д. канд. техн. наук / М.И. Вольников: Пенза, 2007. – 176 с.

5. Дукарт, А.В. Задачи теории ударных гасителей колебаний: монография / А.В. Дукарт. – М.: Изд-во АСВ, 2006. – 205 с.

6. Вибрации в технике: справочник в 6 томах. Т.6. Защита от вибраций и ударов / под ред. К.В. Фролова. – М.: Машиностроение, 1981. – 456 с.

7. Вольников, М.И. Анализ средств защиты объектов от вибраций / М.И. Вольников, В.В. Смогунов // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». Т. 2. – Пенза: ПензГУ, 2006. – С 178-179.

8. Вольников, М.И. Применение дискретных рабочих сред в качестве вибропоглощающего материала при резонансных колебаниях балочных конструкций // Системный анализ, управление и обработка информации: Науч.-техн. сборник статей. – Пенза: ПензГУ, 2006. – Вып. 1. – С. 13 – 15.

9. Смогунов, В.В. Виброударозащита изделий микросистемной техники на основе гетерогенных структур / В.В. Смогунов, О.А. Вдовикина // Микросистемная техника. – 2002, №2,.

10. Дукарт, А. В. Инженерные проблемы виброзащиты строительных конструкций с помощью модифицированных многомассовых динамических гасителей колебаний / А.В. Дукарт, А.И. Олейник // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2004. – № 7(547). – С. 4 - 11.

11. Вольников, М.И. Моделирование виброударозащиты гетерогенных структур / М.И. Вольников, В.В. Смогунов, О.А. Вдовикина // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. – 2006, №6,., – С. 373 - 379.

12. Ананьев, И.В. Колебания упругих систем в авиационных конструкциях и их демпфирование / И.В. Ананьев, П.Г. Тимофеев. – М.: Машиностроение, 1965.

13. Вольников, М.И. Модели динамических гасителей колебаний на дискретных средах / М.И. Вольников, В.В. Смогунов, О.А. Вдовикина // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион.– 2007. №3. – С. 94 - 98.

14. Вольников, М.И. Анализ гашения колебаний при помощи ДРС с использованием метода конечных разностей / М.И. Вольников, А.И. Шеин //

Актуальные проблемы современного строительства: труды междунар. научно-техн. конф. (22-25 апреля 2007 г.). – Пенза: ПГУАС, 2007. – С. 95 - 99.

15. Вольников, М.И. Математическое моделирование динамики гетерогенных стержневых структур: автореф. дис. работы канд. техн. наук. / М.И. Вольников. – Пенза, 2007. – 21 с.

16. Вольников, М.И. Динамические процессы в дискретных рабочих средах под воздействием колебаний / М.И. Вольников // Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов: материалы 1-й международной Казахстанско-Российско-Японской научной конференции и 6-го Российско-Японского семинара (24 – 25 июня 2008 г.). – Усть-Каменогорск: ВКГТУ, 2008. – С. 685 - 689.

UDK.62-752.2

## **ELIMINATION OF VIBRATIONS ON AGRICULTURAL MACHINES USING DISCRETE ENVIRONMENTS: MODELLING AND EXPERIMENTAL STUDIES**

***Mikhail Volnikov***

*Candidate of Technical Sciences., Associate Professor of «Physics  
and Mathematics» department of Penza State Agricultural Academy*

***E-mail: vmi1972@yandex.ru, tel: +7-927-365-17-72***

***Ivan Proshin***

*Doctor of Technical Sciences, Head of "Automation and Control" department,  
professor of Penza State Technological University, Penza*

***E-mail: proshin.Ivan@inbox.ru, tel: 49-61-59***

### **Annotation**

The article is devoted to the problem of protection of self-propelled vehicles, tractors, harvesters and other structures from vibration. Installation of dampers and vibration damping materials cannot completely eliminate vibration exposure. As

protection encouraged to use the discrete medium with good dissipative properties in a wide frequency range. The damper on discrete environments is more simple in manufacturing and tuning in comparison with the usual one-mass of the vibration damper.

Reviewed the mathematical model of vibration damper on discrete environments. Given the results of experimental studies of dissipative properties of the various discrete environments. Comparison of different combinations of absorbers. The result of the use of a damper on discrete environments obvious: he has broadband and stability, provides reliability and durability of the protected structure, and has a lower prime cost compared to batch multimass absorbers.

**Keywords:** vibration, discrete environment, protection of vibration, mathematical model, agricultural machines.

### **References:**

1. Proshin, I.A. Algorithm of combined control and method of mathematical modeling of asynchronous electric drive techniques and software complex for multilinked electric drive modeling / I.A Proshin, M.I. Volnikov, E.N. Salmov // Niva Povolzhya. – 2014. No. 4 (33). – P. 102-110.

2. Information portal: labour Protection and life safety. Mode of access : <http://ohrana-bgd.narod.ru>, free.

3. Dynamics of heterogeneous structures. Vol. 3. Protection from vibration and impacts heterogeneous structures / V.V. Smogulov, O.A. Vdovkina, M.I. Volnikov; edited by V.V. Smogunov. - Penza: Publishing house of Pens. state University, 2005.- 497 p.

4. Volnikov, M.I. Mathematical modeling of dynamics of heterogeneous structures / M.I. Volnikov // The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical Sciences, Penza 2007. - 176 p.

5. Dukart, A.V. Problems of the theory of shock absorbers: Monograph / AV Dukart. - M: Publishing house of the ASV, 2006. - 205 p.

6. Vibrations in engineering: A handbook: in 6 volumes. V.6: Protection from vibration and impacts / Ed. by K.V. Frolov. - M: machine-building, 1981. - 456 p.

7. Volnikov, M.I. Analysis of the means of protection of objects from vibration / M.I. Volnikov, V.V. Smogulov // Proceedings of international Symposium "Reliability and quality" - T2. - Penza: PenzGU, 2006. - P. 178-179.

8. Volnikov, M.I. Use of discrete environments as vibration-absorbing material at the resonant oscillations of a beam structure // System analysis, management and processing of information: Scientific - technical. collection of articles. - Penza: PenzGU, 2006. - Issue 1. - P. 13-15.

9. Smogunov, V.V. Protection from vibration and impacts products Microsystem technology on the basis of heterogeneous structures / V.V. Smogunov, O.A. Vdovikina // Microsystems engineering, 2002.

10. Dukart, A. V., Oleinik, A. I. Engineering problems of vibration protection of building structures with the help of modified multibody dynamic vibration dampers / A.V. Dukart, A. I Oleinik // Izvestia of higher schools. The construction. - 2004. - №7(547). - P. 4-11.

11. Volnikov, M.I. Modeling of fibroadenosis heterogeneous structures / M.I. Volnikov, V.V. Smogunov, O.A. Vdovikina // Izvestia of higher schools. The Volga region.- №6, 2006. - P. 373 - 379.

12. Anan'ev, I.V. Vibrations of elastic systems in aircraft structures and their damping / I.V. Ananyev, P. G. Timofeev. - M., Engineering, 1965.

13. Volnikov, M.I. Model of dynamic absorbers on discrete structures / M.I. Volnikov, V.V. Smogunov, O.A. Vdovikina // Izvestia of higher schools. The Volga region.- №3, 2007. - P. 94 - 98.

14. Volnikov, M.I. Analysis of vibration damping using DWS using the method of finite difference / M.I. Volnikov, A.I. Shein // Actual problems of modern construction: Proceedings of the Intern. scientific-technical. Conf. (April 22-25, 2007). - Penza: PGWS, 2007. - P. 95 - 99.

15. Volnikov, M.I. Mathematical modeling of dynamics of heterogeneous structures / M.I. Volnikov // abstract of the dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical Sciences, Penza 2007. - 21 P.

16. Volnikov, M.I. Dynamic processes in discrete environments influenced by vibration / M.I. Volnikov // Perspective technologies, equipment, and analytical systems

for materials science and nanomaterials: proceedings of the 1st international Kazakh-Russian-Japanese scientific conference and the 6th Russian-Japanese seminar (24 - 25 June 2008). - Ust-Kamenogorsk: VKGTU, 2008. - P. 685 - 689.