

УДК 624.042

*А.А. Локтев, С.С. Левшеков***МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАСИТЕЛЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ**

Приведена модель гасителя динамических воздействий, устанавливаемого на конструкцию или ее элемент, на который возможно действие ударной, вибрационной или другой динамической нагрузки. Гаситель состоит из вязких и упругих элементов, соединенных параллельно и последовательно. Исследовано влияние параметров вязкости и упругости гасителя на нормальное перемещение точек защищаемой конструкции и на нормальное ускорение, которое передается непосредственно от гасителя нижерасположенным элементам.

*Ключевые слова:* вязкоупругий элемент, вынужденные колебания, нормальное перемещение, ускорение защищаемой конструкции.

*A.A. Loktev, S.S. Levshakov***DYNAMIC LOAD DAMPER MODELING**

The authors present their findings associated with their modeling of a dynamic load damper. According to the authors, the damper is to be installed onto a structure or its element that may be exposed to impact, vibration or any other dynamic loading. The damper is composed of paralleled or consecutively connected viscous and elastic elements. The authors study the influence of viscosity and elasticity parameters of the damper produced onto the regular displacement of points of the structure to be protected and onto the regular acceleration transmitted immediately from the damper to the elements positioned below it.

*Key words:* viscoelastic element, forced oscillations, regular displacement, acceleration, structure to be protected.

Наиболее интересными в теоретической механике и ее инженерно-технических приложениях являются динамические задачи, в т.ч. связанные с колебаниями тел под действием внешних сил. Такие задачи актуальны как с точки зрения развития фундаментальных разработок по механике, так и с точки зрения практического применения результатов их решения. С подобными задачами сталкиваются в автомобилестроении при расчете автомобиля на столкновение с другим автомобилем или с неподвижным препятствием. Потребности инженерной практики заставляют совершенствовать реологические модели тел, более детально описывать характер воздействия на них нагрузки, что в свою очередь приводит к созданию более совершенных средств противоударной защиты конструкций и их элементов, к выявлению таких управляемых параметров, изменение которых будет сказываться на конечных характеристиках динамического контакта [1—3]. Учет вязкоупругих свойств рассматриваемого тела или демпфера, посредством которого на него передается нагрузка от внешнего воздействия, обуславливает более точное представление о характере протекания данного процесса.

Актуальной является также проблема создания достаточно простого устройства для уменьшения силы взаимодействия, передаваемой от внешнего воздействия к месту водителя и пассажиров, которое могло бы использоваться инженерами при создании современного автомобильного транспорта [2, 3].

В работе рассматривается механическая система (рис. 1) из защищаемой конструкции и вязкоупругого буфера, расположенного перед конструкцией в месте действия динамической силы [4]. Предполагается, что точки буфера могут двигаться прямолинейно вдоль одной и той же прямой [5].

Рассмотрим случай, когда на систему действует восстанавливающая сила, силы сопротивления и возмущающая сила.

Движение нижней точки буфера описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$m\ddot{x} = -cx + \mu\dot{x} + p_0 \sin(pt). \quad (1)$$

Уравнение (1) представляет собой неоднородное дифференциальное уравнение второго порядка с линейными коэффициентами.

Решение этого неоднородного уравнения имеет вид

$$x = x_1 + x_2;$$

где  $x_1$  — общее решение соответствующего однородного уравнения;  $x_2$  — частное решение неоднородного дифференциального уравнения.

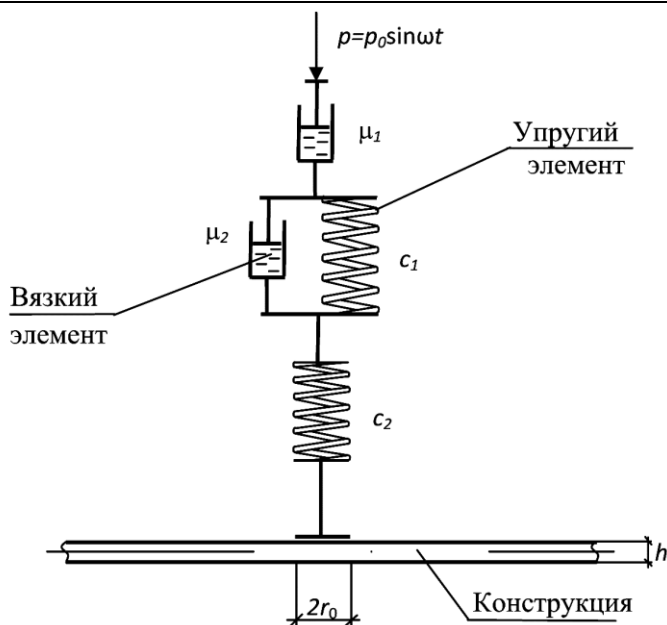


Рис. 1. Схема динамического воздействия на защищаемую конструкцию гармонической силы через вязкоупругий буфер

Предполагается, что в начальный момент времени  $t = 0$  крайняя точка противоударного изолятора и область мишени под изолятором (контактная область) покоятся, т.е. уравнение (1) рассматривается при начальных условиях [5, 6]:

$$x(t=0) = 0, \dot{x}(t=0) = 0. \quad (2)$$

Ускорение  $\ddot{x}(t)$  характеризует внешнее воздействие, приложенное к верхней точке изолятора, и считается заданной функцией времени [7, 8]. В качестве критериев работы изолятора могут быть приняты такие величины, как сила, действующая на мишень под изолятором

$$I_1 = \max_{t \in [0, \infty]} P(t), \quad (3)$$

максимальное смещение мишени

$$I_2 = \max_{t \in [0, \infty]} y(t), \quad (4)$$

ускорение, которое получают точки защищаемой от ударного воздействия конструкции

$$I_3 = \max_{t \in [0, \infty]} \ddot{y}(t). \quad (5)$$

Таким образом, имеются три характеристики, одна из которых — силовая [5], вторая — геометрическая [8], третья — кинематическая [9]. Для полного решения задачи противоударной изоляции и для выбора закона изменения управляемой силой  $F$  и способа ее генерации (пиропатрон, магнитная жидкость и т.д.) необходимо определить все три критерия изолятора. Подобная задача решалась в [1] для изолятора с вязкоупругим элементом Кельвина — Фойгта и для случая, когда контактная сила изменяется мгновенно (мгновенный удар), т.е.  $\ddot{x}(t) = -V_0 \delta(t)$ , где  $\delta(t)$  — дельта-функция Дирака.

Для анализа полученных зависимостей и установления влияния параметров буфера на конечные характеристики динамического воздействия построим графики для нормального перемещения контактной области (части конструкции под буфером), ее ускорения [10—12]. Выявление этих зависимостей также в будущем поможет правильно определить характеристики, вычисляемые по формулам (3) — (5).

На рис. 2, 3 приведены графические зависимости нормального перемещения и ускорения точек мишени под областью контакта от времени для различных значений упругой и вязкой составляющей буфера. Кривая 1 получена для случая  $c_1 = c_2 = 10^3$  Н/м,  $\mu_1 = \mu_2 = 10^6$  Нс/м, кривая 2 соответствует значениям

$c_1 = c_2 = 10^3$  Н/м,  $\mu_1 = \mu_2 = 10^3$  Нс/м, а кривая 3 —  $c_1 = c_2 = 10^6$  Н/м,  $\mu_1 = \mu_2 = 10^3$  Нс/м. Тип профиля защищаемой конструкции — двутавр № 20.

На рис. 2 видно, каким образом увеличивается максимум перемещения при увеличении соотношения упругих и вязких характеристик буфера, как меняется время, в течение которого перемещение остается положительным, также можно обратить внимание на то, что время появления максимума перемещения увеличивается с увеличением упругих параметров. Также на рис. 2 обращает внимание то, что зависимости для разных соотношений упругих и вязких характеристик начинают отличаться уже на начальном этапе воздействия динамической силы. Из сравнения графических зависимостей для ускорения точек мишени в области взаимодействия тел (рис. 3) следует, что абсолютные значения максимальных ускорений мишени соответствуют буферу с наибольшими параметрами упругости, кроме того, время их возникновения существенно меньше, при увеличении характеристик вязкости появляются разнонаправленные величины ускорения, но их абсолютные значения уменьшаются, а также увеличивается время их появления.

Приведенные на рис. 3, 4 зависимости позволяют воспользоваться качественными параметрами, вычисляемыми по формулам (5) — (6), и сделать вывод о том, что буфер с вязкоупругими элементами позволяет существенно регулировать перемещения и ускорения конструкции, на которую воздействует гармоническая сила. В зависимости от соотношения упругих и вязких характеристик меняется характер вязкоупругих деформаций как до достижения своего максимума, так и после него. Для буфера с приведенным сочетанием упругих и вязких элементов необходимо подобрать значения параметров упругости и вязкости таким образом, чтобы деформации этих элементов примерно совпадали, в противном случае такой элемент будет вести себя либо как отдельный упругий элемент, либо как чисто вязкий элемент. Также работа представленного вязкоупругого элемента существенно зависит от времени приложения нагрузки: в случае кратковременной динамической нагрузки (ударное взаимодействие) деформации не успевают развиться и изолятор ведет себя достаточно жестко, а деформации нарастают и после приложения нагрузки. При проектировании реальных противоударных изоляторов имеет смысл использовать эти элементы вместе, подбирая параметры вязкости и упругости в зависимости от прогнозируемых характеристик удара, эффективность конструктивного решения при этом будет зависеть от времени ударного взаимодействия, от повторяемости динамической нагрузки и от способа восстановления первоначальной формы изолятора после первого воздействия.

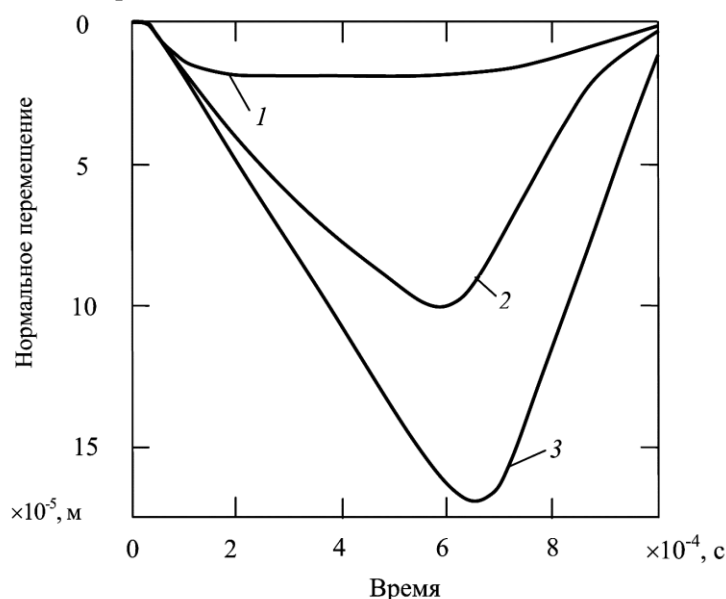


Рис. 2. Зависимость нормального перемещения от времени для различных значений упругих и вязких характеристик изолятора

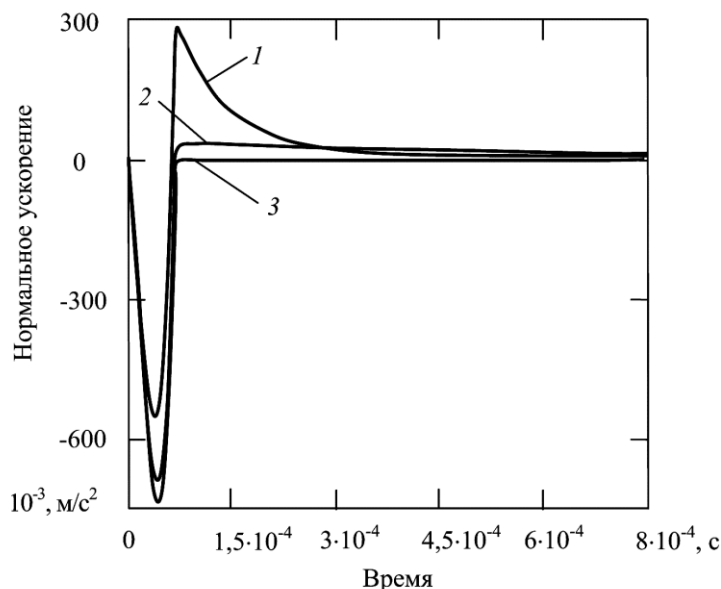


Рис. 3. Зависимость нормального ускорения от времени для различных значений упругих и вязких характеристик изолятора

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баландин Д.В., Болотник Н.Н. Предельные возможности противоударной изоляции системы с двумя степенями свободы // Известия РАН. МТТ. 2001. № 6. С. 52—62.
2. Баландин Д.В., Болотник Н.Н. Оптимизация параметров противоударных изоляторов для системы с двумя степенями свободы // Известия РАН. МТТ. 2003. № 3. С. 57—74.
3. Balandin D.V., Bolotnik N.N., Pilkey W.D., Purtsekov S.V., Shaw C.G. Concept of a platform-based impact isolation system for protection of wheelchair occupants from injuries in vehicle crashes // Medical Engineering and Physics. 2008. № 30. Pp. 258—267.
4. Rossikhin Yu.A., Shitikova M.V. A ray method of solving problems connected with a shock interaction // Acta Mechanica, 1994. V. 102. № 1—4. Pp. 103—121.
5. Локтев А.А. Ударное взаимодействие твердого тела и упругой ортотропной пластинки // Механика композиционных материалов и конструкций. 2005. Т. 11. № 4. С. 478—492.
6. Бирюков Д.Г., Кадомцев И.Г. Уругоупругий неосесимметричный удар параболического тела по сферической оболочке // Прикладная механика и техническая физика. 2005. Т. 46. № 1. С. 181—186.
7. Локтев А.А. Динамический контакт ударника и упругой ортотропной пластинки при наличии распространяющихся термоупругих волн // Прикладная математика и механика. 2008. Т. 72. В. 4. С. 652—658.
8. Rossikhin Yu.A., Shitikova M.V. The ray method for solving boundary problems of wave dynamics for bodies having curvilinear anisotropy // Acta Mechanica. 1995. Vol. 109, № 1—4. Pp. 49—64.
9. Olsson R., Donadon M.V., Falzon B.G. Delamination threshold load for dynamic impact on plates // International Journal of Solids and Structures, 2006, V. 43. Pp. 3124—3141.
10. Al-Mousawi M.M. On experimental studies of longitudinal and flexural wave propagations: an annotated bibliography // Applied Mechanics Reviews. 1986. Vol. 39, № 6. Pp. 853—864.
11. Karagiozova D. Dynamic buckling of elastic-plastic square tubes under axial impact – I: stress wave propagation phenomenon // International Journal of Impact Engineering. 2004. Vol. 30. Pp. 143—166.
12. Olsson R. Mass criterion for wave controlled impact response of composite plates // Composites Part A. 2000. Vol. 31. Pp. 879—887.

#### REFERENCES

1. Balandin D.V., Bolotnik N.N. Predel'nye vozmozhnosti protivoudarnoy izolyatsii sistemy s dvumya stepenyami svobody [Limit Capabilities of Shockproof Insulation of a System Having Two Degrees of Freedom]. *Izv. RAN. MTT*. [News of the Russian Academy of Sciences. Mechanics of Rigid Body.] 2001, no. 6, pp. 52-62.
2. Balandin D.V., Bolotnik N.N. Optimizatsiya parametrov protivoudarnykh izolyatorov dlya sistemy s dvumya stepenyami svobody [Optimization of Parameters of Shockproof Isolators for a System with Two Degrees of Freedom]. *Izv. RAN. MTT*. [News of the Russian Academy of Sciences. Mechanics of Rigid Body.] 2003, no. 3, pp. 57-74.

for a System Having Two Degrees of Freedom]. *Izv. RAN. MTT*. [News of the Russian Academy of Sciences. Mechanics of Rigid Body]. 2003, no. 3, pp. 57-74.

3. Balandin D.V., Bolotnik N.N., Pilkey W.D., Purtsezov S.V., Shaw C.G. Concept of a Platform-based Impact Isolation System for Protection of Wheelchair Occupants from Injuries in Vehicle Crashes. *Medical Engineering and Physics*. 2008, no. 30, pp. 258—267.

4. Rossikhin Yu.A., Shitikova M.V. A Ray Method of Solving Problems Connected with a Shock Interaction. *Acta Mechanica*, 1994, vol. 102, no. 1-4, pp. 103—121.

5. Loktev A.A. Udarное vzaimodeystvie tverdogo tela i uprugoy ortotropnoy plastinki [Impact Interaction of a Rigid Body and an Elastic Orthotropic Plate]. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktsiy* [Mechanics of Composite Materials and Structures]. 2005, vol. 11, no. 4, pp. 478—492.

6. Biryukov D.G., Kadomtsev I.G. Uprugoplasticheskiy neosesimmetrichnyy udar parabolicheskogo tela po sfericheskoy obolochke [Elastoplastic Non-axisymmetric Impact of a Parabolic Body with a Spherical Shell]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika* [Applied Mechanics and Applied Physics]. 2005, vol. 46, no. 1, pp. 181—186.

7. Loktev A.A. Dinamicheskiy kontakt udarnika i uprugoy ortotropnoy plastinki pri nalichii rasprostranyayushchikhsya termouprugikh voln [Dynamic Contact between Striker and Elastic Orthotropic Plate in the Presence of Propagating Thermo-elastic Waves]. *Prikladnaya matematika i mekhanika* [Applied Mathematics and Mechanics]. 2008, vol. 72, Part 4, pp. 652—658.

8. Rossikhin Yu.A., Shitikova M.V. The Ray Method for Solving Boundary Problems of Wave Dynamics for Bodies Having Curvilinear Anisotropy. *Acta Mechanica*. 1995, vol. 109, no. 1-4, pp. 49—64.

9. Olsson R., Donadon M.V., Falzon B.G. Delamination Threshold Load for Dynamic Impact on Plates. *International Journal of Solids and Structures*, 2006, vol. 43, pp. 3124—3141.

10. Al-Mousawi M.M. On Experimental Studies of Longitudinal and Flexural Wave Propagations: an Annotated Bibliography. *Applied Mechanics Reviews*. 1986, vol. 39, no. 6, pp. 853—864.

11. Karagiozova D. Dynamic Buckling of Elastic-plastic Square Tubes under Axial Impact – I: Stress Wave Propagation Phenomenon. *International Journal of Impact Engineering*. 2004, vol. 30, pp. 143—166.

12. Olsson R. Mass Criterion for Wave Controlled Impact Response of Composite Plates. *Composites Part A*. 2000, vol. 31, pp. 879—887.

Поступила в редакцию в феврале 2012 г.

Об авторах: **Алексей Алексеевич Локтев** — доктор физико-математических наук, доцент, доцент кафедры теоретической механики и аэродинамики, **ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет» (ФГБОУ ВПО «МГСУ»)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, aaloktev@yandex.ru

**Сергей Сергеевич Левшеков** — студент, Институт строительства и архитектуры, **ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет» (ФГБОУ ВПО «МГСУ»)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, theormech@mgsu.ru

About the authors: **Loktev Aleksey Alekseevich**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor, Department of Theoretical Mechanics and Aerodynamics, **Moscow State University of Civil Engineering (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; aaloktev@yandex.ru; +7 (499) 183-24-01; **Levshekov Sergey Sergeevich**, student, Institute of Civil Engineering and Architecture, **Moscow State University of Civil Engineering (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; theormech@mgsu.ru

Для цитирования:

*Локтев А.А., Левшеков С.С.* Моделирование гасителя динамической нагрузки [Электронный ресурс] // Строительство: наука и образование. 2013. Вып. 1. Ст. 3. Режим доступа: <http://www.nso-journal.ru>.

For citation:

Loktev A.A., Levshekov S.S. Modelirovanie gasitelya dinamicheskoy nagruzki [Dynamic Load Damper Modeling] // *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education], 2013, no. 1, paper 3. Available at: <http://www.nso-journal.ru>