

**ОЦЕНКА ЭНЕРГОПОГЛОЩАЮЩИХ СВОЙСТВ ЭЛЕМЕНТОВ  
СИСТЕМЫ ПАССИВНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ  
ЭКИПАЖЕЙ ПРИ АВАРИЙНЫХ СТОЛКНОВЕНИЯХ С ПРЕПЯТСТВИЕМ**

Определены основные принципы разработки энергопоглощающих элементов системы пассивной безопасности железнодорожных экипажей при аварийных столкновениях. В качестве элемента пассивной защиты, позволяющего организовать последовательное ступенчатое поглощение кинетической энергии удара, предложено использовать короб в форме усеченной пирамиды, содержащий трехслойный сотовый блок. Проведено конечно-элементное моделирование нелинейного динамического деформирования расматриваемой защитной конструкции при ударе и дана оценка возможного уровня энергопоглощения.

Визначено основні принципи розробки енергопоглинаючих елементів системи пасивної безпеки залізничних екіпажів при аварійних зіткненнях. Як елемент пасивного захисту, що дозволяє організувати послідовне ступінчасте поглинання кінетичної енергії удару, запропоновано використовувати короб у формі усеченої піраміди, що містить тришаровий стільниковий блок. Проведено скінченно-елементне моделювання нелінійного динамічного деформування розглянутої захисної конструкції при ударі, і дано оцінку можливого рівня енергопоглинання.

The basic principles of the development of the energy-absorbing elements of the passive safety system of railway carriages at emergency collisions are defined. A box in the form of the truncated pyramid which contains the three-layered honeycomb block is suggested to apply as an element of a passive protection with a consequent successive step absorption of the impact kinetic energy. The finite-element simulation of a nonlinear dynamic deformation of the examined protective construction at impact is made. A possible level of the energy absorption is estimated.

Важнейшими вопросами, возникающими при организации скоростного и высокоскоростного движения пассажирских поездов на железных дорогах колеи 1520 мм, являются вопросы разработки и создания железнодорожных экипажей нового поколения с эффективными системами активной и пассивной безопасности. Первая из этих систем направлена на предотвращение аварий на железной дороге, а вторая предназначена для уменьшения тяжести последствий аварийных столкновений, которые по разным причинам оказались неизбежными. Система пассивной безопасности представляет собой совокупность конструктивных мер, специальных энергопоглощающих устройств и технических решений, которые в случае аварийного столкновения поезда с препятствием позволяют без активного участия машиниста обеспечить условия для защиты жизни и здоровья пассажиров и обслуживающего персонала, снизить риск их травмирования, а также предотвратить значительные повреждения конструкций железнодорожных экипажей.

В настоящее время в странах ЕС обеспечение пассивной безопасности железнодорожного экипажа скоростного и высокоскоростного поезда является обязательным и регламентируется европейским стандартом EN 15227:2008 "Railway applications – Crashworthiness requirements for railway vehicle bodies" («Требования стойкости к ударным нагрузкам кузовов железнодорожного подвижного состава») [1]. Этот стандарт, введенный в действие в 2008 г., стал мощным стимулом и примером для создания нормативной базы, регламентирующей пассивную безопасность железнодорожного подвижного состава колеи 1520 мм. В Российской Федерации, ориентируясь на этот стандарт, по распоряжению ОАО "Российские железные дороги" № 640р от 31.08.2008 г. уже разрабатывается проект технических требований к системе пассивной безопасности локомотивов и пассажирского подвижного состава

© М.Б. Соболевская, И.Б. Теличко, С.А. Сирота,  
И.К.Хрущ, Д.В. Горобец, Ю.А. Клык, 2009

железных дорог колеи 1520 мм. После принятия данного проекта его требования станут обязательными для вновь проектируемого подвижного состава. Введение скоростного движения на отечественных железных дорогах, которое планируется осуществить до 2020 г., требует решения аналогичных задач, связанных с необходимостью пассивной защиты железнодорожных экипажей нового поколения от сверхнормативных ударных воздействий в аварийной ситуации. Следует отметить, что созданные для зарубежных железных дорог новые перспективные конструкции подвижного состава, оборудованные эффективными системами пассивной безопасности, не могут быть использованы на железных дорогах Украины из-за ряда существенных отличий в ходовых частях, межвагонных соединениях и т.д. Поэтому, в первую очередь, опираясь на накопленный мировой опыт и уже существующую европейскую нормативную базу, необходимо разработать нормативные требования по пассивной безопасности отечественных железнодорожных экипажей, предназначенных для скоростного движения. При этом должны быть учтены их конструктивные особенности, специфика эксплуатации. Нормативные расчетные сценарии ударного нагружения должны быть выбраны с учетом анализа наиболее распространенных аварийных столкновений на железных дорогах Украины.

Одними из главных элементов системы пассивной безопасности являются энергопоглощающие устройства, устанавливаемые в концевых частях конструкции железнодорожного экипажа. В процессе его эксплуатации эти устройства должны быть в постоянной готовности, но срабатывают они только в случае аварийного столкновения. При этом они разрушаются по заданному сценарию и рассеивают энергию удара. Поэтому важными требованиями, предъявляемыми к таким устройствам пассивной безопасности, являются следующие: отсутствие необходимости их обслуживания, простота замены отслуживших элементов, использование съемных энергопоглощающих модулей. С этой точки зрения использование в качестве средств пассивной защиты различных противоударных элементов, содержащих вязкие жидкости, сжиженные газы или газы под давлением, не представляется целесообразным.

Работа системы пассивной безопасности должна обеспечить плавную амортизацию удара в результате последовательного, многоступенчатого поглощения кинетической энергии при аварийном столкновении. В результате этого должны быть существенно снижены продольные динамические нагрузки и ускорения, действующие на элементы конструкции экипажа, а также на пассажиров и обслуживающий персонал. Для стабильного и прогнозируемого деформирования энергопоглощающих устройств системы пассивной безопасности в аварийной ситуации, необходимо, чтобы центральная часть конструкции экипажа (рамы и кузова) при сверхнормативном ударе деформировалась в последнюю очередь, служа упором энергопоглощающим элементам. Эта центральная часть конструкции экипажа является так называемой зоной безопасности, обеспечивающей возможность выживания и эвакуации людей при аварии.

Результаты проведенного патентно-библиографического поиска существующих средств защиты транспортных конструкций от ударных нагрузок свидетельствуют о том, что наиболее рациональным является использование принципа превращения кинетической энергии удара в контролируемую рабо-

ту, связанную с упругопластическим деформированием и разрушением специальных элементов системы пассивной безопасности, которые намеренно приносятся в жертву при аварийных столкновениях. При этом имеет смысл для организации пошагового энергопоглощения в систему пассивной безопасности включать элементы с последовательно нарастающей продольной жесткостью.

Основным показателем эффективности работы таких элементов системы пассивной безопасности при ударе является их энергопоглощение. Его величина определяется площадью под кривой на графике, характеризующем зависимость силы сопротивления таких элементов при ударе от допустимого хода. Идеальный противоударный демпфер имеет постоянную силу сопротивления на всем участке деформации. Поэтому при разработке конструкции энергопоглощающих устройств необходимо стремиться к тому, чтобы силовая характеристика их упругопластического деформирования описывалась кривой, имеющей практически постоянный участок, без явно выраженных провалов и больших пиковых значений.

Важными ограничениями при создании системы пассивной безопасности являются ее габариты и масса, технология изготовления, использование доступных материалов, и, в конечном итоге, окончательная стоимость.

Учитывая случайный характер возможного аварийного столкновения, система пассивной безопасности должна обеспечивать в случае скошенного удара центрирование нагрузки, передаваемой на входящие в нее энергопоглощающие элементы, для организации заданного характера их деформирования.

В настоящее время существует большое количество, в том числе запатентованных, технических решений по защите железнодорожных экипажей при столкновениях. В качестве энергопоглощающих элементов используются:

- двухступенчатые буферные устройства [2 – 4];
- коробчатые конструкции [5 – 8];
- сотовые структуры [9];
- сминаемые полые профили из гофрированных металлических листов [10];
- деформируемые балочные конструкции, дополненные инициаторами деформации [11, 12];
- продавливаемые трубчатые структуры [13, 14];
- устройства, содержащие срезаемые при ударе детали [15, 16].

Большое значение при разработке энергопоглощающих элементов имеет применение новых материалов и современных технологий, которые позволяют изготавливать более легкие и в то же время энергоемкие конструкции. В этом смысле перспективу использования имеют, например, высокопрочные пластичные нержавеющие стали, алюминиевые сплавы и композитные материалы. В качестве новых облегченных энергопоглощающих материалов целесообразно использовать сочетание алюминиевых конструкций со вспененными материалами, а также композитные синтетические материалы, полимерные сотовые структуры (сотопласты) и усиленные волокнами синтетические материалы [17]. Перспективным направлением является использование в одной энергопоглощающей конструкции сталей разных марок, позволяющих оптимизировать процесс ее плавного последовательного упругопластического деформирования без трещин и разрывов.

Многообразие существующих конструкций энергопоглощающих элементов свидетельствует о большом интересе в мире к проблеме пассивной защиты подвижного состава железных дорог при аварийных столкновениях и о различных инженерных подходах к решению этой проблемы.

В данной статье в качестве энергопоглощающего элемента пассивной безопасности рассмотрен полый короб в форме усеченной пирамиды с прямоугольным основанием. Большее основание короба предполагается крепить на упоре, который, в свою очередь может быть деформируемым. Предполагается, что центрированный удар происходит со стороны меньшего основания короба. Форма короба позволяет обеспечить плавное увеличение его продольной жесткости, что важно для организации его последовательного складывания при ударе. Прямоугольная, а не квадратная форма поперечного сечения короба выбрана из соображений большей устойчивости конструкции в случае слегка скошенного удара.

Диаграмма деформирования коробчатых конструкций, в том числе содержащих внутренние диафрагмы, как показали выполненные ранее теоретические и экспериментальные исследования, характеризуется глубокими провалами [18, 19]. Они вызваны общей потерей устойчивости конструкции и являются нежелательными с точки зрения низкого уровня поглощаемой при этом энергии. Для повышения энергопоглощающих свойств коробчатого элемента внутри короба установлен трехслойный сотовый блок. Геометрическая модель рассматриваемого энергопоглощающего элемента, построенная с использованием средств автоматизированного компьютерного конструирования, приведена на рис. 1 (размеры на рис. 1 указаны в миллиметрах).

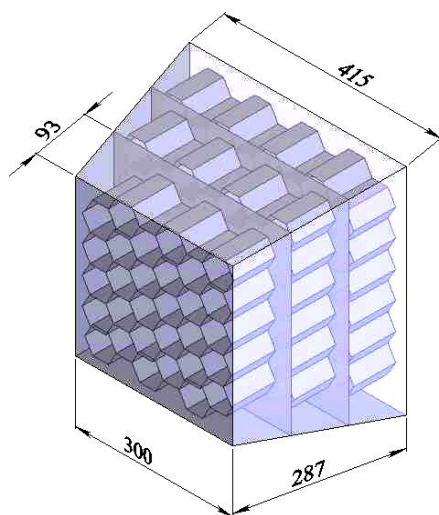


Рис. 1

Толщины стенок короба – 1 мм, внутренних диафрагм – 1,5 мм, сотовых ячеек – 0,8 мм. Данный энергопоглощающий элемент выполнен из листовой высокопластичной малоуглеродистой стали, имеющей следующие характеристики: плотность  $\rho=7,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ; модуль упругости  $E=2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ ; коэффициент Пуассона  $\mu=0,3$ ; соответственно статический предел текучести  $\sigma_T=270 \text{ МПа}$  и предел прочности  $\sigma_B=470 \text{ МПа}$ .

Для оценки энергопоглощающих свойств рассматриваемой защитной конструкции при центрированном ударе выбрана расчетная схема ударного взаимодействия, приведенная на рис. 2, где цифрой 1 обозначен подвижный боек, а цифрой 2 – исследуемая конструкция элемента пассивной защиты. Боек представляет собой плиту массой 100 т, движущуюся со скоростью  $V = 10 \text{ м/с} = 36 \text{ км/ч}$ .

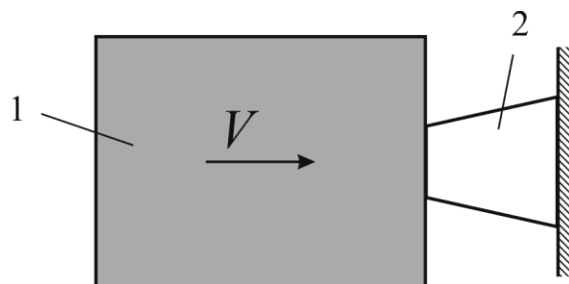


Рис. 2

Для решения нелинейной динамической задачи использован метод конечных элементов. Математическое моделирование процесса нелинейного деформирования конструкции при ударе выполнено с учетом возникновения больших пластических деформаций (физической нелинейности материала и геометрической нелинейности самой конструкции); зависимости предела текучести материала от скорости деформации; контактного взаимодействия между элементами конструкции; возможности разрушения отдельных элементов конструкции.

Конечно-элементные расчетные схемы рассматриваемой конструкции короба (рис. 3, а) и расположенного внутри него трехслойного сотового блока (рис. 3, б), построены на основе разработанной геометрической модели с использованием специальных пластинчатых элементов с четырьмя узлами, каждый из которых имеет по три линейных и угловых перемещения, скорости и ускорения относительно осей узловой системы координат элемента. Эти элементы позволяют учитывать большие мембранные и изгибные пластические деформации.

Для описания упругопластических свойств материала использована нелинейная модель, характеризующая билинейную зависимость напряжений от деформаций с учетом кинематического упрочнения. Точка перелома такой двухзвенной кусочно-линейной кривой соответствует динамическому пределу текучести, который зависит от скорости деформации. Для вычисления динамического предела текучести материала используется зависимость Саймондса – Купера

$$\sigma_d = \sigma_T \left( 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{P}} \right) = k \sigma_T ,$$

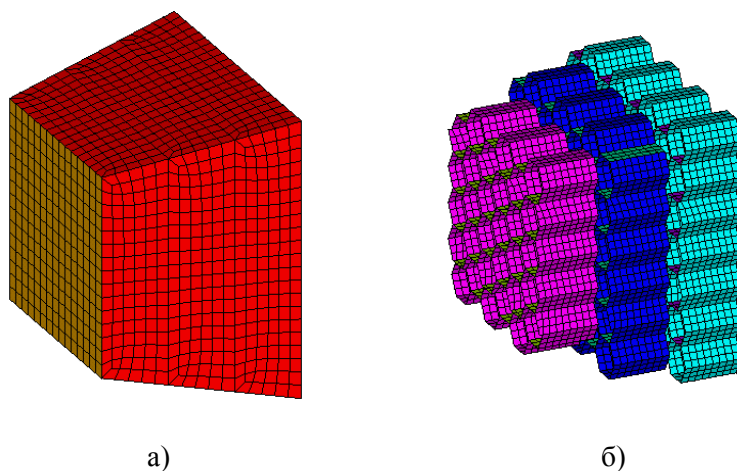


Рис. 3

где  $C$  и  $P$  – коэффициенты упрочнения стали;  $\sigma_T$  и  $\sigma_d$  – статический и динамический предел текучести;  $\dot{\epsilon}$  – скорость деформации при динамическом

нагружении;  $k = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C}\right)^P$  – динамический коэффициент упрочнения стали.

В качестве условия разрушения принято условие достижения заданного значения предельной пластической деформации при разрыве.

Граничными условиями является жесткое закрепление заднего торцового сечения конструкции элемента пассивной защиты.

В качестве начальных условий задана скорость центра масс бойка, которая в момент времени  $t = 0$  с равна 36 км/ч (10 м/с).

Боек моделировался объемными конечными элементами с четырьмя узлами, имеющими по три линейных перемещения, скорости и ускорения.

Между соприкасающимися поверхностями бойка и исследуемой защитной конструкции, а также между элементами самой защитной конструкции учитывалась возможность контакта и трения.

На рис. 4 показано деформированное состояние защитного короба с сотовым блоком при ударе в зависимости от значения продольного перемещения  $u$  бойка. На рис. 5 приведены диаграмма деформирования трехслойного сотового блока (линия 1) и диаграмма совместного деформирования короба с сотовым блоком (линия 2) при ударе. Приведенные диаграммы характеризуют зависимости контактных сил между бойком и исследуемой конструкцией от перемещения центра масс бойка.

Как видно из рис. 5, характер деформирования рассмотренной конструкции соответствует требованию о последовательном ступенчатом поглощении кинетической энергии удара. Полученные диаграммы деформирования не имеют больших пиковых значений и провалов. Установлено, что рассмотренная конструкция элемента пассивной защиты позволяет поглотить примерно 0,3 МДж кинетической энергии удара при сжатии на 0,2 м. Средняя сила, при которой происходит деформирование первого сотового слоя – 900 кН, второго – 1500 кН, третьего – 2000 кН.

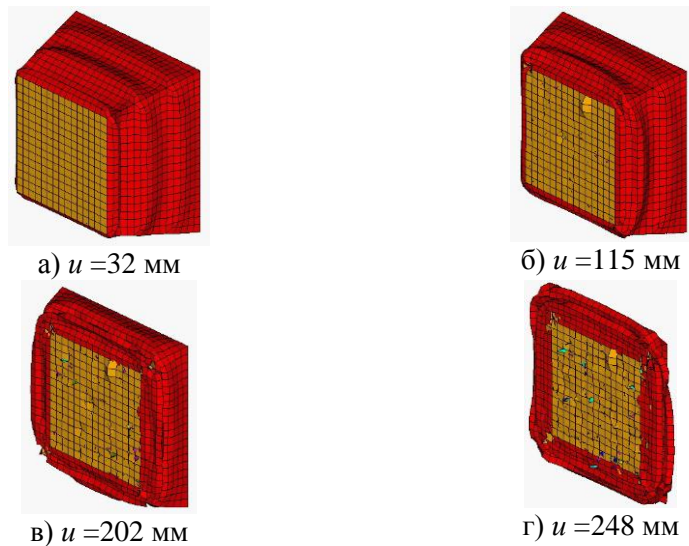


Рис. 4

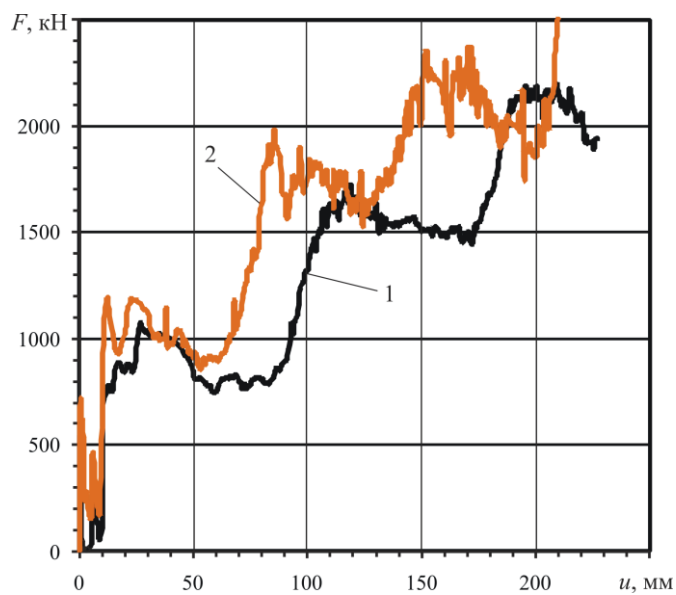


Рис. 5

Таким образом, разработанная методика математического моделирования позволяет не только оценить уровень энергопоглощения рассматриваемой защитной конструкции, но и выбрать ее параметры в зависимости от заданного уровня энергопоглощения.

Предложенная конструкция энергопоглощающего устройства обладает высокой удельной энергоемкостью (отношением поглощаемой энергии к массе устройства), которая составляет  $\approx 15$  кДж/кг. Для сравнения, удельная энергоемкость известного устройства типа DUPLEX G1.A1, разработанного компанией EST Eisenbahn-Systemtechnik [20], составляет  $\approx 3$  кДж/кг. Рассмотренное устройство в тех или иных модификациях может быть использовано при разработке и модернизации железнодорожного подвижного состава.

1. EN 15227. Railway applications – Crashworthiness requirements for railway vehicle bodies. – Brussel : EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2008. – 37с.
2. Пат. 102006043982 Germany, B61G11/16. Side bumper i.e. crash bumper, for vehicle i.e. railway vehicle, has releasing device that releases shifting path so that sleeve sustains deformation and contraction on continuous force level, and spring element that is shifted with tappet / Schneider S. ; заявник і патентоволодар Schneider Sieghard. – DE200610043982 20060919 ; заявл. 19.09.2006 ; опубл. 27.03.2008.
3. Пат. 1740435 European patent office, B61G11/16. Plunger buffer / Schneider S. ; заявник і патентоволодар Schneider Sieghard. – EP20040729619 20040427 ; заявл. 27.07.2004 ; опубл. 01.10.2007.
4. Пат. 1637426 European patent office, B61G11/16. Buffer assembly / Niessner M., Mombour K., Williams T. ; заявник і патентоволодар Keystone Bahntechnik GmbH, Oleo Internat LTD. – EP20050019730 20050910 ; заявл. 09.10.2005 ; опубл. 22.03.2006.
5. Пат. 2008046873 World intellectual property organization, B61D15/06. Energy absorption device for multi-section vehicles / Jaede E. ; заявник і патентоволодар VOITH AG. – WO2007EP61114 20071017 ; заявл. 10.70.2007 ; опубл. 24.04.2008.
6. Пат. 1914144 European patent office, B61G11/16. Energy absorbing element for multiple unit vehicles ; заявник і патентоволодар VOITH TURBO SCHARFENBERG GMBH. – EP20060124641 20061123 ; заявл. 23.11.2006 ; опубл. 23.04.2008.
7. Пат. 2005075256 Japan, B61D17/10. Shock-absorbing structure for rolling stock / Kawasaki T., Nakamura H. ; заявник і патентоволодар HITACHI LTD. – JP20030310948 20030903 ; заявл. 03.09.2003 ; опубл. 24.03.2005.
8. Пат. 2005075255 Japan, B61D17/10. Shock absorbing structural body for railway vehicle / Nakamura H., Kawasaki T. ; заявник і патентоволодар HITACHI LTD. – JP20030310947 20030903 ; заявл. 03.09.2003 ; опубл. 24.03.2005.
9. Пат. 19638739 Germany, B61D15/06. Underframe front part and deformation element on vehicles, especially rail vehicles / Erdmann M., Heidgen K., Scharf S. ; заявник і патентоволодар DEUTSCHE WAGGONBAU AG. – DE19961038739 19960910 ; заявл. 10.09.1996 ; опубл. 16.04.1998.
10. Пат. 20320738U Germany, B61D15/06. Vorrichtung zum umwandeln kinetischer energie bei einem Aufprall eines schienenfahrzeuges auf ein hindernis ; заявник і патентоволодар SIEMENS AG. – DE20032020738U 20030115 ; заявл. 15.01.2003 ; опубл. 13.01.2005.
11. Пат. 5579699 United States of America, B60R19/00. Impact-absorber devices, impact-absorption method, and framework and vehicle including such impact-absorber devices / Dannawi M., Barjolle J., Jeunehomme S. ; заявник і патентоволодар GEC ALSTHOM TRANSPORT SA. – US19940233465 19940426 ; заявл. 26.04.1994 ; опубл. 03.12.1996.
12. Пат. 2694255 France, B61D17/06. Structure for energy absorption, especially for railway vehicles / Dannawi M., Cleon Louis M., Fuchs A., Tritz B., Bich G., Preiss P. ; заявник і патентоволодар DIETRICH & CIE DE. – FR19920009503 19920728 ; заявл. 28.07.1992 ; опубл. 04.02.1994.
13. Пат. 1905661 European patent office, B61G5/02. Coupling bar for transmitting drawing and puffing forces / Nikolaus C. ; заявник і патентоволодар VOITH TURBO SCHARFENBERG GMBH. – EP20060121410 20060928 ; заявл. 28.09.2006 ; опубл. 02.04.2008.
14. Пат. EP1752353 European patent office, B61G9/10. Energy dissipating device with increased response force / Kemper A. ; заявник і патентоволодар VOITH TURBO SCHARFENBERG. – EP20050017411 20050810 ; заявл. 10.08.2005 ; опубл. 14.02.2007.
15. Пат. 2181677 Российская федерация, B61G11/16. Аварийное энергопоглощающее устройство для вагонов железнодорожного транспорта / Малафеев В. А., Гурин С. В., Беляев В. И., Истомин Ю. Н., Баранов Е. Н. ; заявитель и патентообладатель ОАО ВНИИТрансмаш. – RU19990106905 19990331 ; заявл. 31.03.1999 ; опубл. 27.04.2002.
16. Пат. 867746 СССР, B61G11/16. Противоаварийное буферное устройство / Артюх Г. В., Любов В. А., Фурса И. Г., Жуковец А. П., Сушев В. В., Бондарев М. В. ; заявитель и патентообладатель Ждановский металлургический институт. – SU19772536684 19771025 ; заявл. 25.10.1977 ; опубл. 30.09.1981.
17. Прочность подвижного состава при соударении // Железные дороги мира. – 2000. – № 4. – С. 32 – 36.
18. Богомаз Г. И. Экспериментальная отработка жертвенных элементов для защиты пассажирских вагонов в аварийной ситуации / Г. И. Богомаз, В. С. Гудрамович, М. Б. Соболевская, С. А. Сирота, И. К. Хруц, Д. В. Горобец, М. А. Демешко // Вісник Дніпропетровського національного університету. Серія : Механіка. – 2007. – Т. 2, Вип. 11. – С. 19 – 28.
19. Богомаз Г. И. Анализ характера деформирования жертвенных элементов, предназначенных для защиты пассажирских вагонов, при сверхнормативных сжимающих нагрузках / Г. И. Богомаз, М. Б. Кельрих, М. Б. Соболевская, И. К. Хруц, Д. В. Горобец // Транспортні системи і технології : Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. – 2007. – № 12. – С. 12 – 19.
20. Конструкция кузова локомотивов семейства TRAXX // Железные дороги мира. – 2006. – № 3. – С. 26 – 29.

Институт технической механики  
НАН Украины и НКА Украины,  
Днепропетровск

Получено 24.07.09,  
в окончательном варианте 28.10.09