УДК 625.032.4

Н. Е. НАУМЕНКО, М. Б. СОБОЛЕВСКАЯ, С. А. СИРОТА, Д. В. ГОРОБЕЦ

РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ ПАССИВНОЙ ЗАЩИТЫ ВАГОНОВ ПАССАЖИРСКОГО ПОЕЗДА НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ДЛЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ КОЛЕИ 1520 мм

Институт технической механики
Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины,
ул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Днепр, Украина; e-mail: dep7@ukr.net

При проектировании пассажирского вагона нового поколения необходимо предусмотреть наличие интегрированной в его конструкцию системы пассивной безопасности (СПБ), которая должна обеспечить защиту пассажиров и персонала поезда при наиболее вероятных аварийных столкновениях. Цель исследований – разработка устройств поглощения энергии (УПЭ), входящих в СПБ скоростных пассажирских вагонов нового поколения массой 50 – 64 т. В статье в соответствии с требованиями европейского стандарта по пассивной безопасности EN 15227 рассмотрено столкновение со скоростью 18 км/ч эталонного поезда из 4-х пассажирских вагонов с неподвижным половинным вагоном. Исследование динамической нагруженности первого вагона эталонного поезда для определения интегральных параметров УПЭ, в частности его энергоемкости, проведено в рамках дискретно-массовой математической модели. Новизной этой модели является усовершенствование силовой характеристики взаимодействия экипажей с учетом работы поглощающих аппаратов сдвигаемых автосцепных устройств и УПЭ, а также возможности возникновения в конструкциях экипажей пластических деформаций. В статье приведено также описание новой конечно-элементной модели пластического деформирования УПЭ при ударе, с помощью которой разработана конструкция УПЭ с энергоемкостью 0,3 МДж и выбраны ее параметры. Предложенные УПЭ предназначены для установки в концевых частях скоростного пассажирского вагона нового поколения вместо буферов, использовавшихся ранее для выборки зазоров в контуре зацепления сцепок.

При проектуванні пасажирського вагона нового покоління необхідно передбачити наявність інтегрованої в його конструкцію системи пасивної безпеки (СПБ), яка повинна забезпечити захист пасажирів і персоналу поїзда при найбільш ймовірних аварійних зіткненнях. Мета досліджень – розробка пристроїв поглинання енергії (ППЕ), що входять у СПБ швидкісних пасажирських вагонів нового покоління масою 50 – 64 т. У статті відповідно до вимог європейського стандарту з пасивної безпеки EN 15227 розглянуто зіткнення зі швидкістю 18 км/год еталонного поїзда з 4-х пасажирських вагонів з нерухомим половинним вагоном. Дослідження динамічної навантаженості першого вагона еталонного поїзда для визначення інтегральних параметрів ППЕ, зокрема його енергоємності, проведено в рамках дискретно-масової математичної моделі. Новизною цієї моделі є удосконалення силової характеристики взаємодії екіпажів з урахуванням роботи поглинаючих апаратів зсувних автозчепних пристроїв і ППЕ, а також можливості виникнення в конструкціях екіпажів пластичних деформацій. У статті наведено також опис нової скінченно-елементної моделі пластичного деформування ППЕ при ударі, за допомогою якої розроблено конструкцію ППЕ з енергоємністю 0,3 МДж та обрано її параметри. Запропоновані ППЕ призначено для установки в кінцевих частинах швидкісного пасажирського вагона нового покоління замість буферів, що використовувались раніше для вибірки зазорів в контурі зачеплення зчепів.

In the design of a new-generation coach the passive safety systems (PSS) should be integrated into its structure to protect passengers and a train staff at the most likely crash collision. The research purpose is to develop the energy-absorbing devices (EAD) as the PSS elements for the new-generation high-speed coaches with a mass of 50 – 64 tons. The paper deals with a crash collision with a speed of 18 km/h between the reference train consisting of four coaches and a stationary half-coach according to the EN 15227 European standard for passive safety. A mathematical discrete-mass model has been used to study the dynamic response of the first coach of the reference train for finding the EAD integral parameters, in particular its energy consumption. The novelty of this model is the improvement of a power characteristic of interactions between the vehicles taking into accounts the operation of the absorbing devices of the shifted automatic couplers and the EADs and the possibility of plastic deforming the vehicles. The paper also presents a new finite-element model of the EAD plastic deformation at impact. This model has been used to develop the EAD with energy intensity of 0.3 MJ, and its parameters have been selected. These EADs are designed to locate in the end parts of a new-generation high-speed coach instead of the buffers, which were previously used for sampling the gaps in the contour of couplers gearing.

Ключевые слова: *скоростной пассажирский поезд, прицепной вагон, столкновение, система пассивной безопасности, устройство поглощения энергии.*

Введение. В настоящее время в Украине основными тенденциями развития железнодорожного транспорта являются увеличение скоростей движения поездов, ориентация на европейскую интеграцию и европейские стандарты, необходимость обновления подвижного состава, в частности пассажирских вагонов. При проектировании пассажирского вагона нового поколения в его конструкцию необходимо интегрировать систему пассивной безопасности (СПБ). При аварийном столкновении поезда с препятствием в результате контролируемого деформирования входящих в состав СПБ съемных устройств поглощения энергии (УПЭ) происходит снижение продольных усилий и ускорений, что позволяет повысить защиту пассажиров и поездной бригады, уменьшить тяжелые последствия аварии. СПБ должна обеспечить защиту пассажиров и персонала поезда при наиболее вероятных аварийных столкновениях.

В странах ЕС обеспечение пассивной безопасности железнодорожного экипажа скоростного поезда является обязательным и регламентируется с 2008 г. стандартом EN 15227 [1], который стал мощным стимулом и примером для создания нормативной базы в Украине.

В настоящее время пассивная защита большинства европейских пассажирских вагонов поездов локомотивной тяги, оборудованных раздельными ударно-тяговыми устройствами, организована таким образом, что основную часть энергии при столкновениях с железнодорожным подвижным составом поглощают крэш-буфера [2 – 7].

Традиционный тяговый подвижной состав железных дорог с шириной колеи 1520 мм имеет ряд существенных отличий (в ударно-тяговых приборах, нормативных требованиях на его разработку и т. д.) от европейского подвижного состава, для которого уже разработаны эффективные системы пассивной безопасности.

Анализ существующих вариантов пассивной защиты пассажирских вагонов с объединенными ударно-тяговыми приборами показал, что такая защита предполагает использование сдвигаемых автосцепных устройств (push-back coupler), УПЭ и жертвенных зон в концевых частях вагонов [8 – 10].

Проблема безопасности железнодорожных экипажей является актуальной проблемой во всем мире [1 – 10]. Германия, Франция, Япония и США занимают лидирующие позиции в решении этой проблемы. В европейских странах теоретические и экспериментальные исследования по пассивной защите подвижного состава активно проводятся с начала 90-х годов прошлого века. Существенный вклад в решение проблемы пассивной защиты железнодорожных экипажей внесли специалисты компаний Alstom, Bombardier Transportation, Dellner, Siemens, Voith Turbo, Amtrak, PESA и ряда других научных и производственных организаций. В Украине с ориентацией на европейский стандарт EN 15227 разработана концепция пассивной защиты скоростного пассажирского поезда при аварийных столкновениях [11].

В настоящее время на пространстве колеи 1520 мм необходимо разрабатывать методики, позволяющие путем математического моделирования оценить динамическую нагруженность пассажирского вагона с СПБ при аварийных столкновениях, определить интегральные параметры УПЭ, разработать его конструкцию и выбрать ее параметры, которые позволяют обеспечить выполнение сценариев столкновений поездного состава с препятствием.

Постановка задачи. С целью разработки конструкции УПЭ для скоростного пассажирского вагона нового поколения проведены исследования динамической нагруженности вагона при столкновении со скоростью 18 км/ч эталонного поезда с неподвижным половинным вагоном, упирающимся в сплошную стенку. В качестве эталонного поезда используется вагонный состав (сцеп), сформированный из 4-х пассажирских вагонов. Пассажирским вагоном, подлежащим оценке, является первый вагон сцепа.

Рассмотрены два варианта формирования эталонного поезда: состав из вагонов массой 50 т и состав из вагонов массой 64 т. Такой выбор эталонных поездов объясняется тем, что согласно стандарту EN 15227 максимальная масса европейского вагона равна 50 т, но на отечественной железной дороге с шириной колеи 1520 мм, как правило, эксплуатируются вагоны массой 64 т.

Вагоны эталонного поезда оборудованы сдвигаемыми беззазорными сцепными устройствами (БСУ), поглощающими аппаратами Р-5П [12]. Кроме автосцепных устройств, в межвагонном пространстве вместо буферов, предназначавшихся ранее для выборки зазоров в контуре зацепления сцепок, расположены УПЭ. Вагоны массой 50 т оборудованы УПЭ с энергоемкостью 0,25 МДж, средняя сила деформации каждого УПЭ составляет 0,83 МН на ходе 0,3 м. Вагоны массой 64 т оборудованы УПЭ с энергоемкостью 0,3 МДж со средней силой 1 МН и деформацией 0,3 м. Половинный вагон, упирающийся в сплошную стенку, оборудован в зависимости от масс вагонов исследуемого сцепа соответствующими УПЭ. Предполагается, что пластические деформации в конструкции рамы вагона с защитными устройствами возникают при продольном усилии 3 МН [13], которое будем считать допускаемым.

Математическая модель аварийного столкновения эталонного состава с неподвижным половинным вагоном. Для исследования динамической нагруженности конструкций вагонов эталонного поезда при его столкновении с половинным вагоном, упирающимся в сплошную стенку, использована дискретно-массовая модель с силовыми характеристиками межвагонных соединений, учитывающими оборудование вагонов БСУ и УПЭ, возможность возникновения пластических деформаций в конструкциях вагонов [14 – 20]. Сплошная стенка с половинным вагоном имитируется твердым телом большой массы (порядка 8000 т), имеющим два защитных устройства, параметры которых соответствуют выбранным УПЭ для вагонов соответствующей массы. Расчетная схема эталонного поезда и преграды выбрана в виде одномерной цепочки твердых тел, соединенных деформируемыми элементами, и приведена на рис. 1.

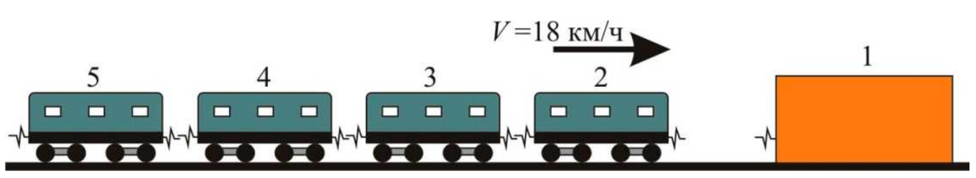


Рис. 1

Новизну составляют полученные результаты по оценке продольных ускорений вагонов и усилий, возникающих в межвагонных соединениях эталонного поезда при его столкновении с преградой, позволяющие рекомендовать оборудование пассажирских вагонов различной массы конструкциями

УПЭ с параметрами, обеспечивающими выполнение требований стандарта EN 15227 по рассмотренному сценарию столкновения.

Результаты исследования динамической нагруженности вагонов с СПБ при столкновении. Максимальные значения усилий, возникающих при столкновении со скоростью 18 км/ч между первым вагоном эталонного поезда и преградой и в межвагонных соединениях, ускорений экипажей при оборудовании вагонов УПЭ с энергоемкостью 0,25 МДж (вариант 1) и 0,3 МДж (вариант 2) приведены в табл. 1.

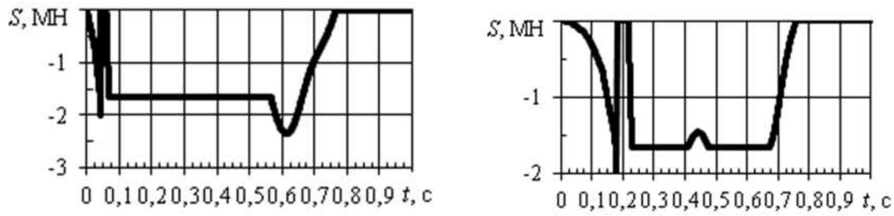
Таблица 1

Номер экипажа, i	Максимальные значения усилий и ускорений					
	(вариант 1)				(вариант 2)	
	Масса вагона 50 т		Масса вагона 64 т		Масса вагона 64 т	
	S_i, МН	$\ddot{x}_i, g$	S_i, МН	$\ddot{x}_i, g$	S_i, МН	$\ddot{x}_i, g$
1	0,00	0,03	0,00	0,04	0,00	0,04
2	-2,34	3,90	-3,20	3,40	-3,09	3,10
3	-2,00	3,40	-3,28	2,70	-2,00	3,10
4	-2,00	2,50	-2,00	2,00	-2,00	2,50
5	-1,08	2,10	-1,01	1,60	-1,54	2,40

В табл. 1 i = 1 соответствует преграде, S_i – значение максимального усилия в i -ом межвагонном соединении эталонного поезда, $\ddot{x}_i$ – ускорение i -го экипажа.

На рис. 2 и рис. 3 приведены графики изменения во времени усилий, действующих на первый вагон сцепа со стороны препятствия (рис. 2,а)) и в соединении первого вагона со вторым (рис. 2,б)) при столкновении, и ускорений первого вагона сцепа (рис. 3). Результаты соответствуют варианту 1, когда масса каждого вагона сцепа равна 50 т и вагоны оборудованы УПЭ с энергоемкостью 0,25 МДж.

Для сцепа, масса вагонов которого составляет 64 т каждого, использование УПЭ с энергоемкостью 0,25 МДж приводит к возникновению сил, значения которых превосходят допускаемый уровень, составляющий 3 МН (табл. 1), и пластических деформаций порядка 0,013 м в конструкциях первого вагона сцепа и 0,018 м второго вагона.



а) б)

Рис. 2

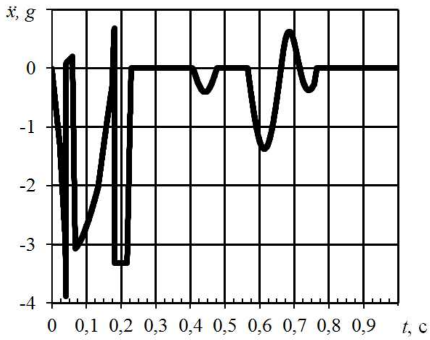
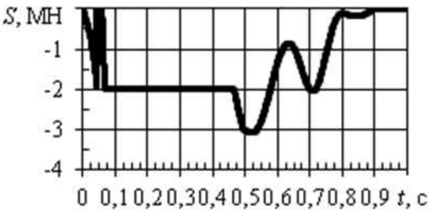


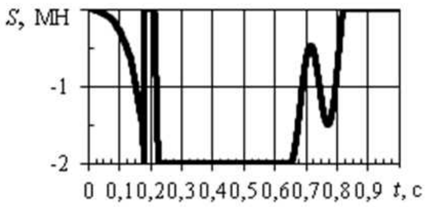
Рис. 3

Так как вагоны скоростных поездов, эксплуатируемых на колее шириной 1520 мм, могут иметь массу больше 64 т, то пассажирские вагоны должны оборудоваться такими УПЭ, чтобы при столкновении сцепа из 4-х вагонов с преградой, представленной большой массой, не возникало продольных усилий, которые превосходят допускаемые и приводят к возникновению пластических деформаций конструкций. Такие условия выполняются при оборудовании пассажирских вагонов, масса которых составляет 64 т и более, устройствами поглощения энергии УПЭ с энергоемкостью 0,3 МДж.

На рис. 4 – 6 показаны результаты, соответствующие варианту 2, когда масса каждого вагона сцепа равна 64 т и вагоны оборудованы УПЭ с энергоемкостью 0,3 МДж.



а)



б)

Рис. 4

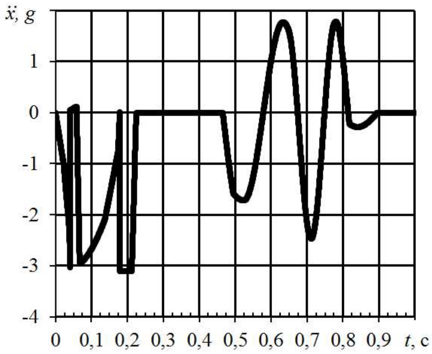


Рис. 5

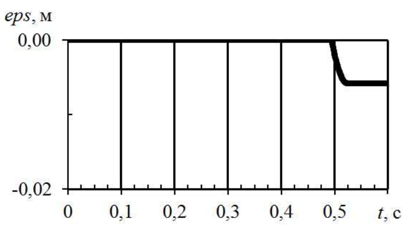


Рис. 6

На рис. 4 и рис. 5 приведены графики изменения во времени усилий, действующих на первый вагон сцепа со стороны препятствия (рис. 4,а)) и в соединении первого вагона со вторым (рис. 4,б)) при столкновении сцепа с преградой, и ускорений первого вагона сцепа (рис. 5).

На рис. 6 показано изменение продольной остаточной деформации eps, возникающей в конструкции первого вагона сцепа, максимальное значение которой составляет 0,006 м. Результаты соответствуют варианту 2, когда масса каждого вагона сцепа равна 64 т и вагоны оборудованы УПЭ с энергоемкостью 0,3 МДж.

Анализ полученных результатов показал, что при столкновении сцепа из четырех вагонов с преградой со скоростью 18 км/ч для всех рассмотренных параметров системы защитные устройства, расположенные на первом вагоне, полностью деформируются.

Значения усилий, действующих на первый вагон сцепа со стороны преграды и в последующих межвагонных соединениях, не превосходят допускаемый уровень, в конструкциях экипажей не возникают пластические деформации, превосходящие 0,05 м [1]. Значения максимальных ускорений как для эталонного поезда, сформированного из вагонов массой 50 т, оборудованных УПЭ с энергоемкостью 0,25 МДж, так и для эталонного поезда, сформированного из вагонов массой 64 т, оборудованных защитными устройствами УПЭ с энергоемкостью 0,3 МДж, не превосходят допускаемого, составляющего 5 g [1]. Таким образом, вагоны массой 50 т могут быть оборудованы с двух сторон защитными устройствами УПЭ с энергоемкостью 0,25 МДж. Вагоны же массой 64 т и более целесообразно оборудовать УПЭ с энергоемкостью 0,3 МДж, чтобы не возникали продольные усилия, значения которых превосходят допускаемые, и пластические деформации конструкций экипажей.

Разработка конструкции УПЭ для пассажирского вагона. Для определения параметров конструкции УПЭ разработана концептуальная диаграмма ее деформирования при ударе вагоном-бойком массой M_b = 80 т со скоростью V_b = 36 км/ч (согласно расчетному сценарию столкновения поезда с грузовым вагоном, который предусмотрен европейским стандартом EN 15227 [1]). Эта диаграмма, т. е. зависимость среднего значения контактного усилия F_{cp}, возникающего между бойком и конструкцией УПЭ, от продольного перемещения u_b центра масс бойка при ударе, показана на рис. 7.

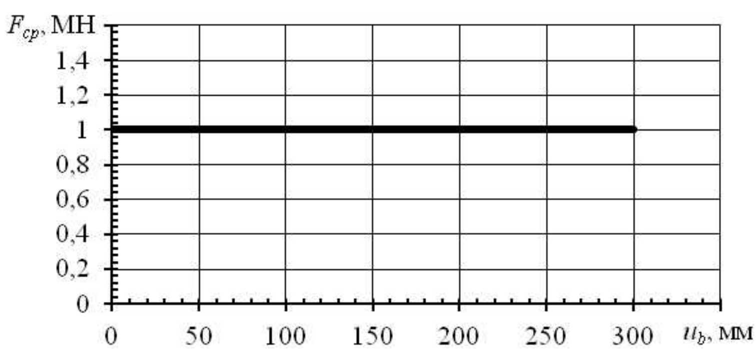


Рис. 7

Как видно из приведенной диаграммы, при деформации УПЭ с энергоемкостью 0,3 МДж средний уровень контактного усилия составляет 1 МН на участке 0 – 300 мм.

Конечно-элементная модель пластического деформирования УПЭ при ударе. Согласно научно-методическому обеспечению [21 – 22] разработана математическая модель пластического деформирования конструкции УПЭ при ударе вагоном-бойком массой M_b = 80 т со скоростью V_b = 36 км/ч.

Схема взаимодействия УПЭ с бойком при ударе показана на рис. 8.

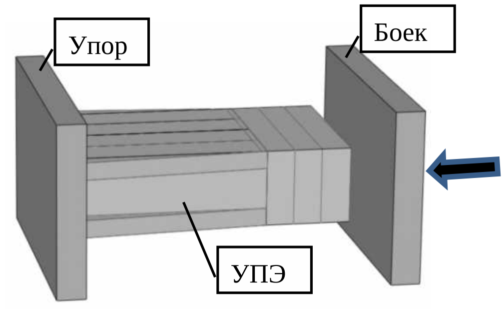


Рис. 8

Конструкция УПЭ расположена между неподвижным упором и подвижным бойком.

Научно-методическое обеспечение включает создание с помощью средств автоматизированного конструирования трехмерной геометрической модели исследуемой конструкции, импортирование геометрической модели в программу для решения с помощью метода конечных элементов, создание и тестирование конечно-элементной математической модели, описывающей процесс пластического деформирования конструкции при ударе, проведение расчетов, построение диаграмм (зависимости контактного усилия F и энергии E от продольного перемещения центра масс бойка u_b). Конечно-элементное моделирование выполняется с учетом геометрической и физической нелинейностей, зависимости предела текучести стали от скорости деформации, переменного контактного взаимодействия между элементами рассматриваемой механической системы соударяющихся тел.

Для моделирования деформирования конструкции УПЭ при ударе разработана геометрическая модель, общий вид которой приведен на рис. 9 (размеры даны в мм), и ее конечно-элементная схема (рис. 10).

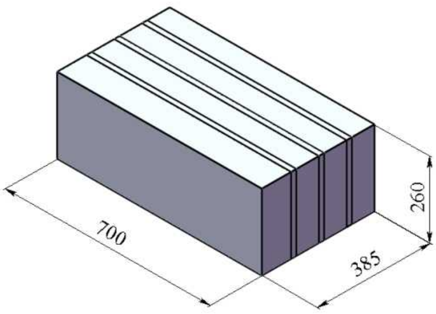


Рис. 9

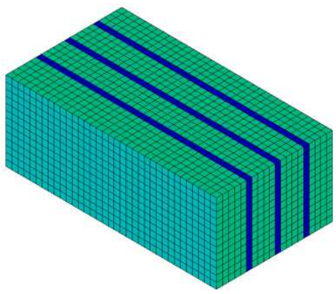


Рис. 10

Конструкция УПЭ состоит из короба в виде параллелепипеда с четырехслойным сотовым пакетом внутри. Каждый слой сотового пакета, состоящий из сот переменной высоты с шестигранными ячейками, установлен на диафрагмах, прикрепленных к коробу. Толщины стенок короба, передней и задней торцевых пластин, диафрагм – 2 мм. Сотовый пакет состоит из сот переменной длины с шестигранными ячейками. Он содержит 63 ячейки, из которых 33 ячейки имеют длину 80 мм, а 30 – длину 90 мм. Длина стороны шестигранной сотовой ячейки – 30 мм. Толщина пластин, формирующих шестигранные сотовые ячейки – 0,7 мм. Между сотовым пакетом и передней торцевой пластиной предусмотрен зазор – 5 мм.

Материал конструкции УПЭ – сталь 08Ю. Физико-механические параметры материала конструкции УПЭ: плотность материала $\rho = 7{,}8 \cdot 10^3$ кг/м^3; модуль Юнга $E_e = 2{,}03 \cdot 10^5$ МПа; предел текучести $\sigma_T = 175$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0{,}3$; тангенциальный модуль на участке пластического деформирования $E_T = 589$ МПа; коэффициенты упрочнения стали $C = 205$ и $P = 4{,}59$; предельная пластическая деформация $\varepsilon_p = 0{,}4$.

Боек и упор представляют собой параллелипипеды, размеры которых соответственно 1500×680×1000 мм и 1000×400×400 мм. Физико-механические параметры материала бойка и упора: плотность материала $\rho = 7{,}8 \cdot 10^3$ кг/м^3; модуль Юнга $E_e = 2{,}1 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0{,}3$.

Конечно-элементная схема механической системы из двух соударяющихся тел “УПЭ – боек” состоит из 17039 элементов и 16910 узлов. Конечно-элементная схема конструкции УПЭ содержит 15075 элементов и 14976 узлов. Размер конечных элементов при моделировании сотовых пакетов с шестигранными ячейками – 15 мм, остальных частей УПЭ – 20 мм. Упор моделируется 1280 элементами, общее количество узлов в его схеме – 1701.

Граничные условия: нулевые перемещения всех узлов неподвижного упора.

Начальные условия: скорость перемещения узлов бойка массой 80 т в начальный момент времени равна 36 км/ч.

Деформированное состояние конструкции УПЭ при разных значениях продольного перемещения u_b центра масс бойка показано на рис. 11.

Полученная в результате расчета диаграмма, характеризующая зависимость контактного усилия F от продольного перемещения u_b, показана на рис. 12, а диаграмма зависимости энергии E, поглощаемой при деформировании конструкции УПЭ, от продольного перемещения u_b показана на рис. 13.

При построении диаграммы деформирования используется фильтр нижних частот с частотой среза 180 Гц [23]. Применение такого фильтра согласуется с требованиями стандарта EN 15227 [1].

Как видно из диаграммы, приведенной на рис. 13, при выбранных параметрах конструкции УПЭ ее энергоемкость составляет 0,3 МДж при рабочем ходе 300 мм. Согласно рис. 12, средний уровень контактного усилия при $0 \le u_b \le 300$ мм равен 1 МН, что соответствует концептуальной диаграмме деформирования конструкции УПЭ при ударе (рис. 7).

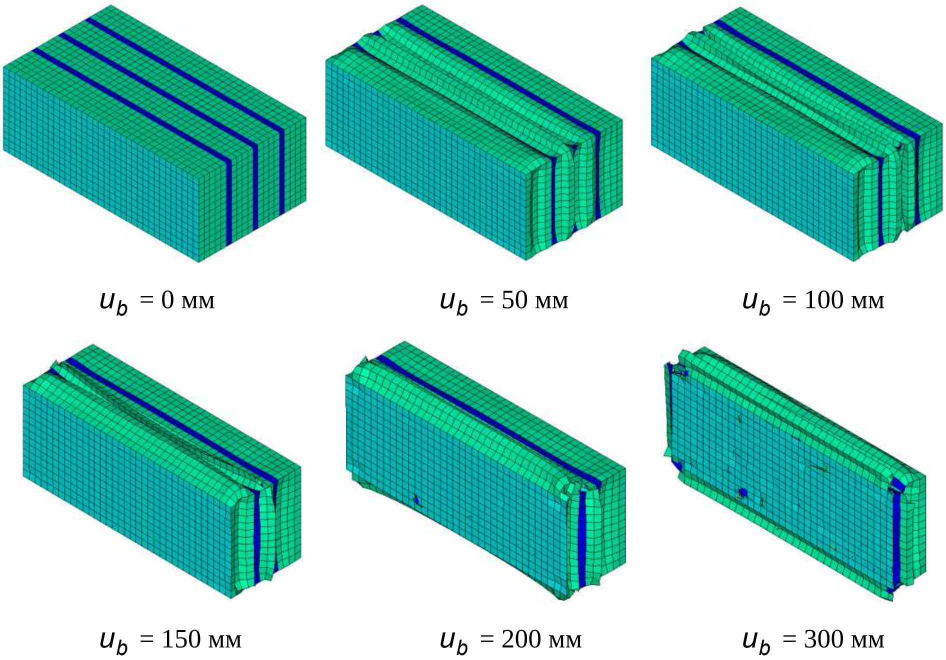

u_b = 0 мм
u_b = 50 мм
u_b = 100 мм
u_b = 150 мм
u_b = 200 мм
u_b = 300 мм

Рис. 11

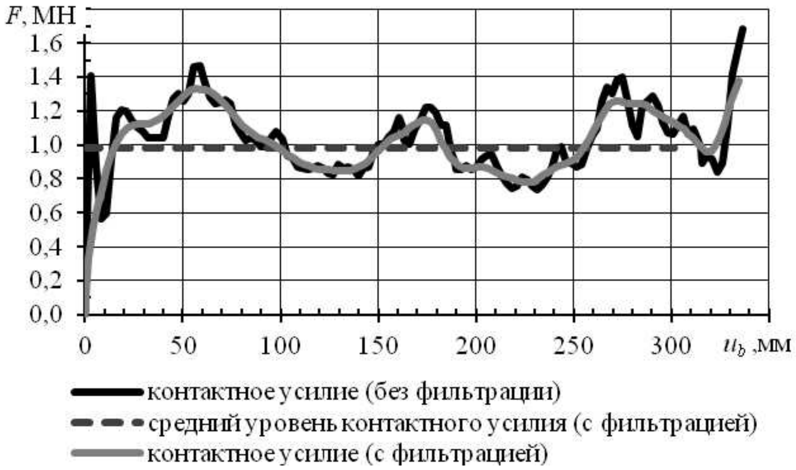

F, МН
1,6
1,4
1,2
1,0
0,8
0,6
0,4
0,2
0,0
0
50
100
150
200
250
300
u_b ,мм
контактное усилие (без фильтрации)
средний уровень контактного усилия (с фильтрацией)
контактное усилие (с фильтрацией)

Рис. 12

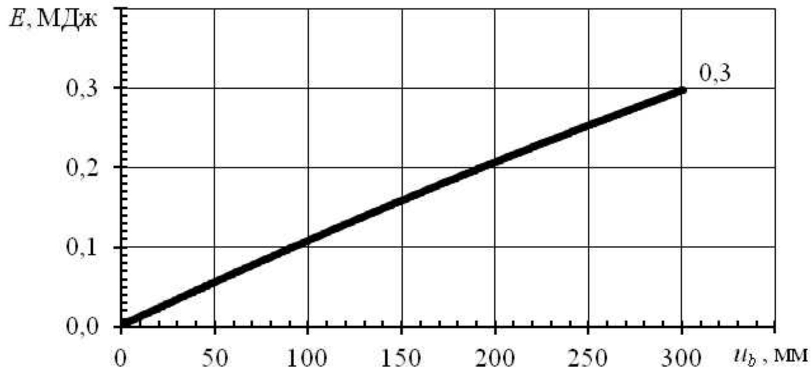


Рис. 13

Максимальный уровень контактного усилия с учетом фильтрации не превышает 1,3 МН. Таким образом, при деформации двух УПЭ, установленных на концевой части рамы вагона, может быть поглощена энергия 0,6 МДж. Максимальная сила, передающаяся на раму вагона, составляет 2,6 МН, то есть не превышает допустимого значения 3 МН.

Выводы. Дана оценка динамической нагруженности пассажирских вагонов нового поколения с системой пассивной безопасности при столкновении эталонного поезда из 4-х пассажирских вагонов с половинным вагоном, упирающимся в сплошную стенку. Проведенные исследования показали, что для выполнения требований стандарта EN 15227 рекомендуется пассажирские вагоны массой 50 т оборудовать с двух сторон двумя защитными устройствами с энергоемкостью 0,25 – 0,3 МДж, а вагоны массой 64 т – защитными устройствами с энергоемкостью 0,3 МДж.

Разработана конечно-элементная модель пластического деформирования устройства поглощения энергии, содержащего сотовые блоки, при ударе для определения параметров конструкции УПЭ с требуемой энергоемкостью. Согласно расчетному сценарию столкновения поезда с грузовым вагоном, который предусмотрен европейским стандартом EN 15227 [1], рассмотрен удар вагоном массой M_b = 80 т со скоростью V_b = 36 км/ч.

На основе полученных результатов конечно-элементного моделирования разработана конструкция УПЭ с энергоемкостью 0,3 МДж и определены ее параметры. Предложенные УПЭ предназначены для установки в концевых частях скоростного пассажирского вагона нового поколения с системой пассивной безопасности вместо буферов, использовавшихся ранее для выборки зазоров в контуре зацепления сцепок.

1. EN 15227. Railway applications – Crashworthiness requirements for railway vehicle bodies. Brussels: European committee for standardization, 2008. 37 p.
2. The EST crash buffer (EST крэш буфер). URL: http://www.crashbuffer.com/index.htm (Last accessed: 15.05.2017).
3. Сцепление и защита. Сцепные устройства и системы для передней части состава. URL: http://resource.voith.com/vt/publications/downloads/1994_r_g1712_rus_2013-03.pdf (Last accessed: 15.05.2017).
4. *Jade E.* Development process of a side bumper crash device. Passive Safety of Rail Vehicles. Innovation in passive safety and interior design. Proceedings of the 7th International Symposium (20–21 November 2008, Berlin). Berlin, 2008. P. 71 – 80.
5. *Wasilewski L.* Evolution of crash absorbing systems according to EN 15227 and according to real operation conditions. Passive Safety 2013 – Passive Safety of Rail Vehicles and Safe Interiors. Proceedings of the 9th International Symposium (21–22 February 2013, Berlin). Berlin, 2013. P. 211 – 218.

6. Axtone is the supplier of the largest crash buffers in Europe. URL: http://www.crashtechnology.eu/news/task,item/id,10/ (Last accessed: 15.05.2017).
7. Innova Systems & Technologies. Railway technologies & crash buffers. URL: http://www.innova-systech.com/ (Last accessed: 15.05.2017).
8. *Tyrell D., Martinez E., Jacobsen K., Parent D., Severson K., Priante M., Perlman A. B.* Overview of a Crash Energy Management Specification for Passenger Rail Equipment. American Society of Mechanical Engineers. 2006. № RC2006-94044. P. 38 – 48.
9. *Carolan M., Perlman B., Tyrell D.* Alternative Occupied Volume Integrity (OVI) Tests and Analyses. Volpe National Transportation Systems Center. 2013. 134 p. URL: http://ntl.bts.gov/lib/48000/48300/48366/TR_Alternative_OVI_Testing_Report_edited_20131024_FINAL_1_.pdf (Last accessed: 15.05.2017).
10. *Tyrell D., Llana P.* Locomotive crashworthiness research // Volpe National Transportation Systems Center. – 2015. – 14 p. URL: http://ntl.bts.gov/lib/60000/60000/60019/IMECHE_Conf_Locomotive_crashworthiness_research.pdf (Last accessed: 15.05.2017).
11. *Соболевская М. Б., Сирота С. А.* Основные положения концепции пассивной защиты скоростного пассажирского поезда при аварийных столкновениях. Техническая механика. 2015. № 1. С. 84 – 96.
12. *Беляев В. И., Ступин Д. А., Малафеев В. А. и др.* Автосцепное устройство нового поколения для пассажирского подвижного состава. Вестник ВНИИЖТ. 2002. № 6. С. 5 – 11.
13. *Кобищанов В. В., Антипин Д. Я.* Исследование безопасности эксплуатации пассажирских вагонов, оборудованных беззазорным сцепным устройством, в поездах постоянного формирования. Вісник Східноукраїнського національного університету імені В. Даля. 2011. № 4 (158), частина 2. С. 46 – 49.
14. *Лазарян В. А.* О переходных режимах движения поездов. Тр. ДИИТ. 1973. Вып. 152. С. 3 – 43.
15. *Блохин Е. П, Манашкин Л. А.* Динамика поезда (нестационарные продольные колебания). М.: Транспорт, 1982. 222 с.
16. *Богомаз Г. И., Науменко Н. Е., Пшинько А. Н. и др.* Нагруженность вагонов-цистерн при переходных режимах движения поездов. Киев: Наук. думка, 2010. 215 с.
17. *Науменко Н. Е., Хижа И. Ю.* Оценка нагруженности конструкций экипажей пассажирского поезда в аварийной ситуации, вызванной его столкновением с преградой // Залізничний транспорт України. 2011. № 2. С. 16 – 18.
18. *Науменко Н. Е., Хижа И. Ю.* Оценка эффективности системы пассивной безопасности локомотива при отработке тестовых сценариев столкновения. Техническая механика. 2012. № 1. С. 3 – 8.
19. *Науменко Н. Е., Соболевская М. Б., Хижа И. Ю. и др.* Моделирование динамики и напряженно-деформированного состояния элементов конструкций железнодорожных экипажей нового поколения при эксплуатационых и сверхнормативных нагрузках. Техническая механика. 2013. № 4. С. 84 – 96.
20. *Науменко Н. Е., Хижа И. Ю.* Моделирование аварийного соударения с преградой пассажирского поезда, оборудованного системой пассивной безопасности. Техническая механика. 2014. № 4. С. 65 – 74.
21. *Sobolevska M., Telychko I.* Passive safety of high-speed passenger trains at accident collisions on 1520 mm gauge railways. Transport problems. 2017. V. 12. Issue 1. P 51 – 62.
22. *Науменко Н. Е., Соболевская М. Б., Горобец Д. В. и др.* Разработка элементов пассивной защиты скоростных пассажирских локомотивов нового поколения при аварийных столкновениях на железных дорогах колеи 1520 мм. Техническая механика. 2017. № 1. С. 72 – 82.
23. *Гоноровский И. С.* Радиотехнические цепи и сигналы: учебник для вузов. М., 1986. 512 с.

Получено 17.05.2017,
в окончательном варианте 07.06.2017