

РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ ПАССИВНОЙ ЗАЩИТЫ СКОРОСТНЫХ ПАССАЖИРСКИХ ЛОКОМОТИВОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ПРИ АВАРИЙНЫХ СТОЛКНОВЕНИЯХ НА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ 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 локомотива 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. В статье рассмотрены сценарии столкновения эталонного поезда и грузового вагона массой 80 т со скоростью 36 км/ч. Эталонный поезд состоит из локомотива, оборудованного СПБ с устройствами поглощения энергии (УПЭ), и грузового вагона массой 80 т. Такой сценарий предусмотрен европейским стандартом EN 15227. Цель исследований – разработка УПЭ для скоростных пассажирских локомотивов нового поколения массой 90 – 123 т. Исследование динамической нагруженности локомотива 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 УПЭ и 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 0,95 МДж и выбраны ее параметры. Показано, что установка двух таких УПЭ в концевых частях локомотива обеспечивает выполнение сценария столкновения эталонного поезда с грузовым вагоном в соответствии с европейским стандартом EN 15227 и разработанной концепцией пассивной безопасности пассажирского подвижного состава железных дорог колеи 1520 мм.

При проектуванні локомотива 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. У статті розглянуто сценарій зіткнення еталонного поїзда і вантажного вагона масою 80 т зі швидкістю 36 км/год. Еталонний поїзд складається з локомотива, обладнаного СПБ з пристроями поглинання енергії (ППЕ), і вантажного вагона масою 80 т. Такий сценарій передбачений європейським стандартом EN 15227. Мета досліджень – розробка ППЕ для швидкісних пасажирських локомотивів нового покоління масою 90 – 123 т. Дослідження динамічної навантаженості локомотива для визначення інтегральних параметрів ППЕ, зокрема його енергоємності, проведено в рамках дискретно-масової математичної моделі. Новизною цієї моделі є удосконалення силових характеристик взаємодії екіпажів з урахуванням роботи поглинаючих апаратів зсувних автосцепних пристроїв і ППЕ, а також можливості виникнення в конструкціях ППЕ та екіпажів пластичних деформацій. У статті наведено також опис нової скінченно-елементної моделі пластичного деформування ППЕ при ударі, за допомогою якої розроблено конструкцію ППЕ заданої енергоємності та обрано її параметри. Показано, що установка двох таких ППЕ в кінцевих частинах локомотива забезпечує виконання сценарію зіткнення еталонного поїзда з вантажним вагоном у відповідності з європейським стандартом EN 15227 і розробленою концепцією пасивної безпеки пасажирського рухомого складу залізниць колії 1520 мм.

In the design of a new-generation locomotive, an integrated passive safety system (PSS) must be considered to protect passengers and a train staff at probable accidental collisions. The paper discusses a scenario of a collision between the reference train and 80-ton freight car at 36 km an hour. The reference train includes the locomotive equipped by SSP with energy absorption devices (EAD), and the 80-ton freight car. This scenario is provided by the European standard EN 15227. The research purpose is to develop the EAD for new-generation passenger 90-123-ton locomotives. To determine the EAD integral parameters, namely the power intensity, a dynamic load of the locomotive is studied using a mathematical discrete-mass model. The novelty of this model is to improve the power characteristic of interactions between vehicles taking into accounts the operation of the absorbing devices of shifted automatic couplers and EAD, as well as the possibility of plastic deformation occurring in the EAD design and 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 the power intensity of 0.95 MJ and to select the EAD parameters. It is shown that the two energy-absorbing device installed at ends of the locomotive can provide the collision scenario in accordance with the requirements of European standard EN 15227 and the developed concept of the passive safety for passenger rolling stock operating on railways with 1520 mm gauge.

Ключевые слова: скоростной пассажирский локомотив, столкновение, система пассивной безопасности, устройство поглощения энергии.

© Н. Е. Науменко, М. Б. Соболевская, Д. В. Горобец, Е. Г. Богомаз, 2017

Техн. механика. – 2017. – № 1.

Введение. Современными тенденциями развития железнодорожного транспорта в Украине являются увеличение скоростей поездов, ориентация на европейскую интеграцию и европейские стандарты, необходимость обновления подвижного состава, в частности скоростных пассажирских локомотивов. При проектировании локомотива нового поколения необходимо предусмотреть наличие интегрированной в его конструкцию системы пассивной безопасности (СПБ). В случае неизбежного аварийного столкновения поезда с препятствием она срабатывает автоматически и в результате контролируемого деформирования входящих в состав СПБ съемных устройств поглощения энергии (УПЭ) и жертвенной зоны кабины машиниста происходит снижение продольных усилий и ускорений, позволяя тем самым снизить угрозу жизням 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]. В Украине требования по пассивной безопасности подвижного состава пока отсутствуют. Однако стандарт EN 15227 стал мощным стимулом и примером для создания нормативной базы в странах СНГ. В 2014 г. Российская Федерация ввела в действие Межгосударственный стандарт “Крэш-системы аварийные железнодорожного подвижного состава для пассажирских перевозок. Технические требования и методы контроля” [2]. Отличительной особенностью Межгосударственного стандарта является учет существенных различий в конструкциях железнодорожного подвижного состава и статистике аварийных столкновений на железных дорогах государств СНГ и ЕС. Но этот стандарт не эквивалентен стандарту EN 15227 и носит рекомендательный характер.

В настоящее время пассивная защита большинства европейских пассажирских локомотивов, оборудованных отдельными ударно-тяговыми устройствами, организована таким образом, что основную часть энергии при столкновениях с железнодорожным подвижным составом поглощают крэш-буфера и расположенные за ними УПЭ нижнего уровня [3 – 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. Главной проблемой является автосцепное устройство СА-3. Его конструкция и крепление на раме локомотива не позволяют обеспечить работу энергопоглощающих элементов СПБ в аварийной ситуации.

Анализ существующих вариантов пассивной защиты локомотивов с объединенными ударно-тяговыми приборами показал, что такая защита предполагает использование сдвигаемых назад автосцепных устройств (push-back coupler), многоуровневой системы УПЭ и жертвенных зон в концевых частях локомотивов [8 – 12].

Проблема безопасности железнодорожных экипажей является актуальной проблемой во всем мире [3 – 9]. 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 [13].

В настоящее время на пространстве колеи 1520 мм необходимо разрабатывать методики, позволяющие путем математического моделирования оценить динамическую нагруженность локомотива 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 локомотива нового поколения проведены исследования динамической нагруженности локомотива при столкновении эталонного поезда с грузовым вагоном массой 80 т со скоростью 36 км/ч. Такой сценарий предусмотрен европейским стандартом EN 15227 и разработанной концепцией пассивной защиты скоростного пассажирского поезда при аварийных столкновениях [13]. Эталонный поезд составлен из локомотива и грузового вагона массой 80 т. Локомотив оборудован с обеих сторон сдвигаемыми автосцепками СА-3 с поглощающими аппаратами Р-5П и двумя УПЭ, которые установлены в концевых частях рамы кузова. Грузовые вагоны оборудованы автосцепками СА-3 с поглощающими аппаратами Р-5П.

Расчетная схема системы “эталонный поезд – грузовой вагон” приведена на рис. 1.

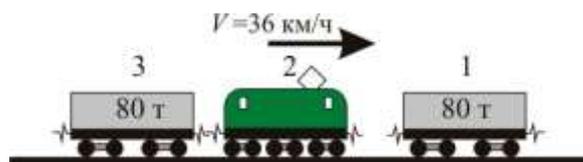


Рис. 1 – Диаграмма деформирования одного УПЭ аппроксимирована кусочно-линейной функцией с четырьмя участками:

- при деформации от 0 до 0,01 м сила изменяется от 0 до F_1 ;
- при деформации от 0,01 м до 0,2 м сила постоянная и равна F_1 ;
- при деформации от 0,2 м до 0,21 м сила изменяется от F_1 до F_2 ;
- при деформации от 0,21 м до 0,7 м сила постоянная и равна F_2 ;

Рассмотрены значения $F_1 = 0,9$ МН и $F_1 = 1,25$ МН, при которых энергоемкость УПЭ составляет соответственно 0,9 МДж и 0,95 МДж. Значение F_2 равно 1,4 МН.

Предполагается, что пластические деформации в конструкции рамы кузова локомотива с указанными УПЭ возникают при продольном усилии 4,2 МН [13], которое считается допусаемым.

Исследования проведены для случаев, когда масса локомотива равна 90 т в соответствии с максимальной массой локомотива согласно стандарту EN 15227 [1] и масса локомотива составляет 123 т, что соответствует массе пассажирских локомотивов, эксплуатируемых на железных дорогах колеи 1520 мм. Исследования проведены также для локомотива с массой 100 т.

Математическая модель аварийного столкновения эталонного состава с грузовым вагоном. Для оценки динамической нагруженности конструкций экипажей при аварийном столкновении эталонного поезда с грузовым вагоном, расположенным на железнодорожном пути, разработана дискретно-массовая модель системы “эталонный поезд – грузовой вагон” с учетом возможности возникновения в конструкциях УПЭ и экипажей пластических деформаций. Новизну в математической модели составляет представление усилия взаимодействия локомотива и грузового вагона силовой характеристикой, учитывающей работу поглощающих аппаратов сдвигаемых автоцепных устройств, конструкций УПЭ и экипажей. Усовершенствованы приведенные в работе [14] аналитические выражения и алгоритм вычисления усилия в соединении локомотива и грузового вагона, расположенного за локомотивом, и усилия взаимодействия локомотива с преградой в виде грузового вагона при столкновении эталонного поезда с грузовым вагоном.

Разработанная модель позволяет исследовать динамические процессы, протекающие в поезде в случае его столкновения с грузовым вагоном, и определить интегральные параметры УПЭ, в частности его энергоемкость.

Результаты исследования динамической нагруженности локомотива с СПБ при столкновении. Проведены исследования динамики столкновения эталонного поезда с грузовым вагоном для локомотивов разной массы, оборудованных УПЭ энергоемкостью 0,9 МДж. Установлено, что значения динамических усилий, действующих на локомотивы с массами 123 т, 100 т и 90 т при столкновении, превосходят допускаемые значения и составляют соответственно 5,31 МН, 4,91 МН и 4,68 МН.

Аналогичные исследования выполнены для локомотивов, оборудованных УПЭ энергоемкостью 0,95 МДж. Полученные результаты представлены в табл. 1 и на рис. 2 – 4.

Таблица 1

Масса локомотива M , т	Усилие взаимодействия локомотива с вагоном S_l , МН	Ускорение локомотива \ddot{x}_l , g	Остаточная деформация ϵ_{ps} м
123	-4,89	4,0	-0,04
100	-4,43	4,4	-0,02
90	-3,70	4,0	0,00

В табл. 1 приведены максимальные значения усилия взаимодействия локомотива с вагоном, ускорения локомотива и остаточной деформации, возникающей в его конструкции.

На рис. 2 – 3 показаны соответственно графики изменения во времени усилия взаимодействия локомотива и ускорений. Результаты, приведенные на рис. 2, а) и 3, а), соответствуют случаю, когда масса локомотива составляет 123 т. Графики рис. 2, б) и 3, б) получены, когда масса локомотива равна 90 т. На рис. 4 приведен график изменения во времени пластической деформации, возникающей в конструкции локомотива массой 123 т.

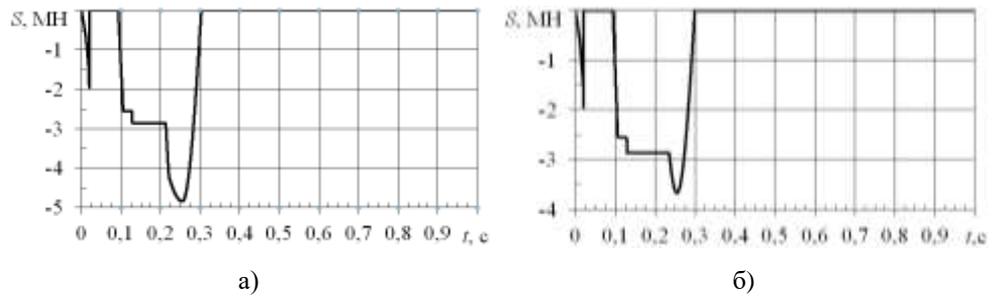


Рис. 2

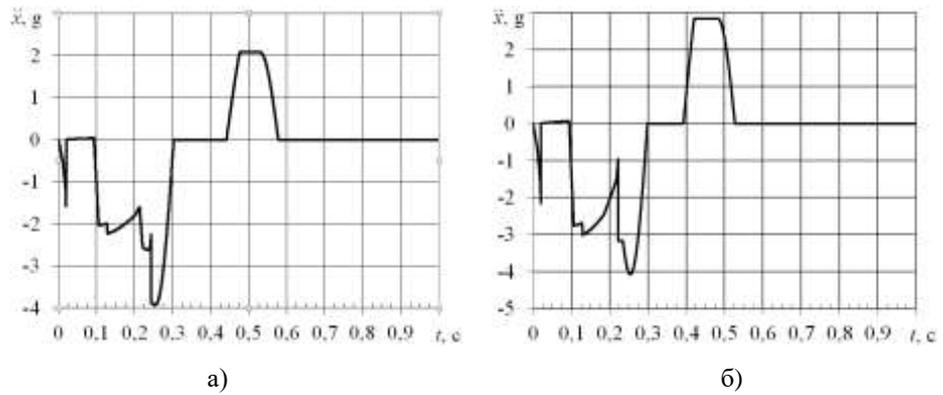


Рис. 3

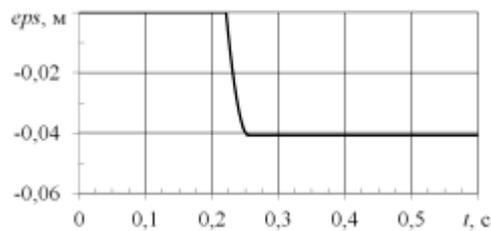


Рис. 4

Анализ полученных результатов показал, что значения максимальных усилий, действующих на локомотивы массами 123 т и 100 т, больше допустимых, но остаточные продольные деформации их конструкций не превосходят 0,05 м [1].

Таким образом, установка в концевых частях рамы кузова локомотива массой 90 т – 123 т двух УПЭ с энергоемкостью 0,95 МДж позволит обеспечить выполнение рассмотренного сценария столкновения в соответствии с требованиями европейского стандарта EN 15227 и разработанной концепцией пассивной безопасности пассажирского подвижного состава железных дорог колеи 1520 мм.

В результате выполненных исследований динамической нагруженности локомотива с СПБ при столкновении эталонного поезда с грузовым вагоном определены интегральные параметры УПЭ, в частности его энергоемкость 0,95 МДж.

Разработка конструкции УПЭ. В Институте технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического

агентства Украины разработано научно-методическое обеспечение [15, 16] для выбора параметров конструкций УПЭ в зависимости от требуемой энергоемкости для обеспечения выполнения сценариев аварийных столкновений.

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 [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. 5.

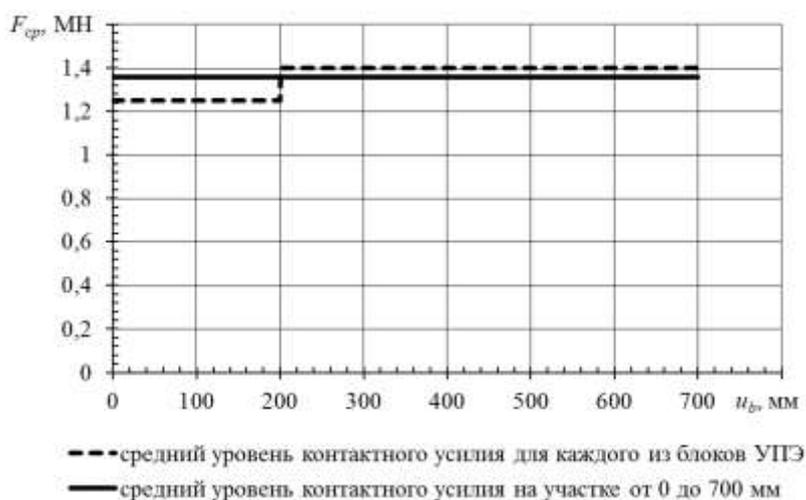


Рис. 5

Как видно из диаграммы, приведенной на рис. 5, при деформации УПЭ средний уровень контактного усилия при $0 \leq u_b \leq 200$ мм равен 1,25 МН, при $200 < u_b \leq 700$ мм – 1,4 МН. Средний уровень контактного усилия на участке рабочего хода при $0 \leq u_b \leq 700$ мм равен 1,36 МН.

Конечно-элементная модель пластического деформирования УПЭ при ударе. Согласно научно-методическому обеспечению [15, 16] 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. 6.

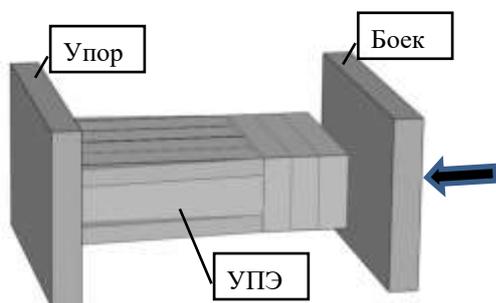


Рис. 6

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 (рис. 7) и конечно-элементная схема (рис. 8).

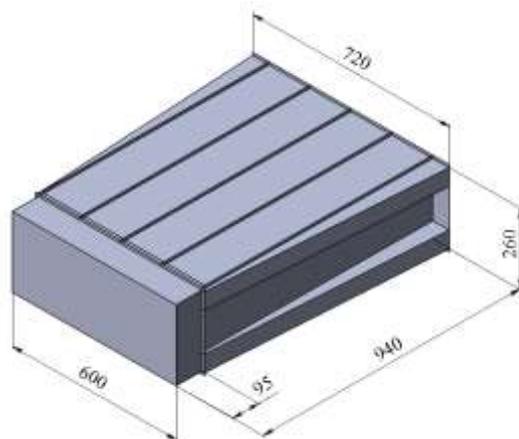


Рис. 7

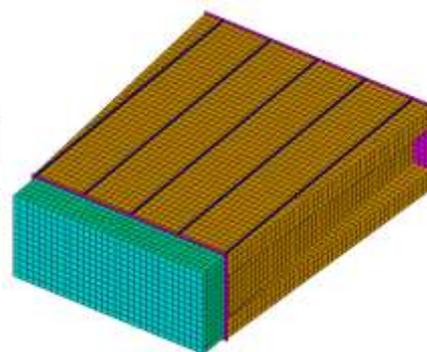


Рис. 8

Конструкция УПЭ состоит из двух частей (блок 1 и блок 2). Блок 1 представляет собой короб в виде параллелепипеда с однослойным сотовым пакетом внутри. Толщина стенок короба – 2 мм, толщина передней торцевой пластины – 4 мм. Сотовый пакет состоит из сот переменной высоты с шестиугольными ячейками. Он содержит 53 ячейки, из которых 18 имеют длину 80 мм, а 35 – длину 85 мм. Длина стороны шестиугольной сотовой ячейки – 30 мм. Толщина пластин, формирующих шестиугольные сотовые ячейки – 0,6 мм. Между сотовым пакетом и передней торцевой пластиной предусмотрен зазор 10 мм.

Блок 2 выполнен в виде усеченной пирамиды и состоит из сот с трехугольными ячейками. Половина пластин, образующих трехугольные ячейки, укорочены на 20 мм со стороны блока 1. Толщина торцевых пластин блока 2 – 8 мм. Толщина пластин, образующих трехугольные ячейки – 2,2 мм. Толщина внешних продольных ребер в конструкции блока 2 – 6,6 мм.

Материал конструкции УПЭ – сталь 08Ю с пределом текучести $\sigma_T = 175$ МПа. Физико-механические параметры материала конструкции УПЭ: плотность материала $\rho = 7,8 \cdot 10^3$ кг/м³; 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 для конструкции блока 1 $\varepsilon_p = 0,4$, для конструкции блока 2 $\varepsilon_p = 0,6$.

Боек и упор представляют собой параллелипипеды, размеры которых соответственно $1500 \times 680 \times 1000$ мм и $1000 \times 400 \times 400$ мм. Физико-механические параметры материала бойка и упора: плотность материала $\rho = 7,8 \cdot 10^3$ кг/м³; 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 19884 элементов и 18406 узлов. Схема конструкции УПЭ содержит 17365 элементов и 16381 узел. Упор моделируется 1280 элементами, общее количество узлов в его схеме – 1701. Размер конечных элементов при моделировании упора составляет 100 – 400 мм, при моделировании бойка – 50 мм, при моделировании сотовых пакетов с шестиугольными ячейками – 15 мм, остальных частей УПЭ – 20 мм.

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.

Результаты конечно-элементного моделирования. Деформированное состояние конструкции УПЭ при разных значениях продольного перемещения u_b показано на рис. 9. Полученная в результате расчета диаграмма, характеризующая зависимость контактного усилия F от продольного перемещения u_b , показана на рис. 10, а диаграмма, характеризующая зависимость энергии E , поглощаемой при деформировании конструкции УПЭ, от продольного перемещения u_b , показана на рис. 11.

При построении диаграммы деформирования используется фильтр нижних частот с частотой среза 180 Гц [17]. Применение такого фильтра согласуется с требованиями стандарта EN 15227 [1].

Как видно из диаграммы, приведенной на рис. 11, при выбранных параметрах конструкции УПЭ ее энергоемкость составляет примерно 0,95 МДж при рабочем ходе 700 мм. Средний уровень контактного усилия при $0 \leq u_b \leq 700$ мм (на участке рабочего хода) составляет 1,36 МН, что соответствует концептуальной диаграмме деформирования конструкции УПЭ при ударе (рис. 5). Максимальный уровень контактного усилия на участке рабочего хода с учетом фильтрации не превышает 1,6 МН.

Таким образом, при деформации двух УПЭ, установленных на концевой части рамы локомотива, может быть поглощена энергия 1,9 МДж. Максимальная сила, передающаяся на раму локомотива, составляет 3,2 МН, то есть не превышает допустимого значения 4,2 МН.

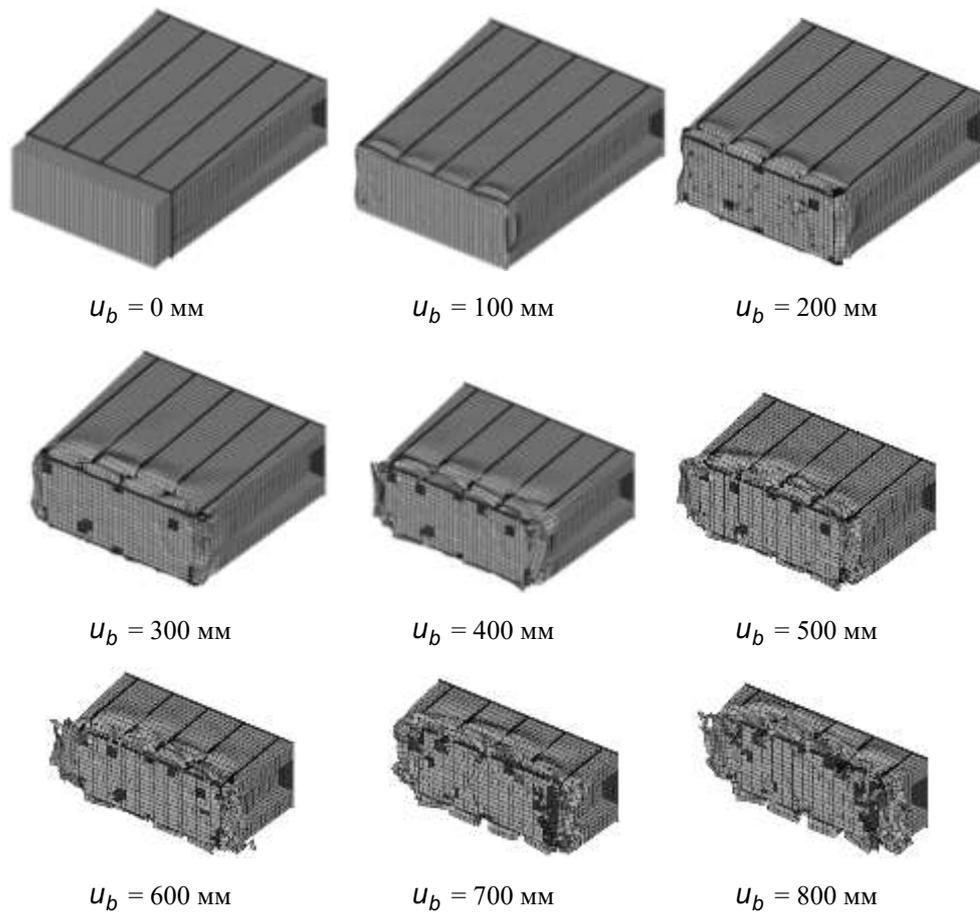


Рис. 9



Рис. 10

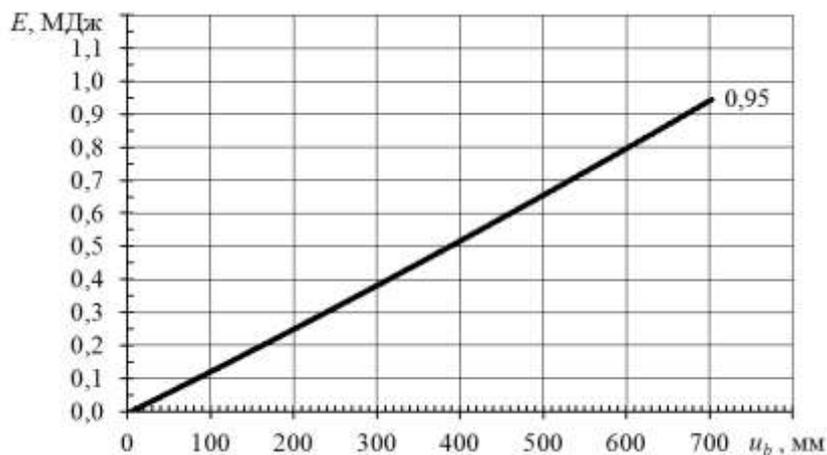


Рис. 11

Выводы. Дана оценка динамической нагруженности пассажирских локомотивов нового поколения с системой пассивной безопасности при столкновении эталонного поезда с грузовым вагоном. Проведенные исследования показали, что для выполнения рассмотренного сценария столкновения рекомендуется локомотивы массой 90 – 123 т оборудовать защитными устройствами УПЭ с энергоемкостью 0,95 МДж.

Разработана конечно-элементная модель пластического деформирования защитного устройства, содержащего сотовые блоки, при ударе для определения параметров конструкции УПЭ с требуемой энергоемкостью.

На основе полученных результатов конечно-элементного моделирования разработана конструкция и определены параметры защитного устройства УПЭ с энергоемкостью 0,95 МДж, предназначенного для установки в концевых частях скоростного пассажирского локомотива нового поколения с системой пассивной безопасности. Предложенные устройства позволяют обеспечить выполнение рассмотренного сценария столкновения в соответствии с требованиями европейского стандарта EN 15227 и разработанной концепцией пассивной безопасности пассажирского подвижного состава железных дорог колеи 1520 мм.

1. EN 15227. Railway applications – Crashworthiness requirements for railway vehicle bodies. Brussels, 2008. 37 p.
2. ГОСТ 32410-2013 (EN 15227 : 2008+A1 : 2010, NEQ). Межгосударственный стандарт. Крэш-системы аварийные железнодорожного подвижного состава для пассажирских перевозок. Технические требования и методы контроля. М., 2014. 11 с.
3. Carl F.B., Schneider S., Wolter W. Development of the crashworthy locomotive platform TRAXX: Operational needs, technical concept and validation procedure. Passive Safety of Rail Vehicles and Safe Interiors. Proceedings of 5th International Symposium (17 – 18 March, 2005, Berlin). Berlin, 2005. P. 42 – 62.
4. Foedtke J., Schneider S., Pfrommer R., Zurheide H. Entwicklung der Kastenstruktur für die Lokomotive Voith Maxima 40CC. Design of the carbody structure for the Voith Maxima 40CC locomotive. ZEVrail Glasers Annalen. 2008. № 132. P. 292 – 303.
5. Prima II – локомотивы нового поколения. Железные дороги мира. 2010. № 12. С. 17 – 25.
6. The EST crash buffer (EST крэш буфер). URL: <http://www.crashbuffer.com/index.htm> (Last accessed: 17.02.2017).
7. 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.
8. Llana P., Stringfellow R. Preliminary development of locomotive crashworthy components. Proceedings of the ASME/ASCE/IEEE 2011 Joint Rail Conference JRC2011, Pueblo, Colorado, USA. 2011. P. 11 – 20.

9. *Llana P., Stringfellow R., Mayville R.* Finite Element Analysis and Full-Scale Testing of Locomotive Crashworthy Components. Volpe National Transportation Systems Center. 2013. 11 p. URL: http://ntl.bts.gov/lib/47000/47400/47410/JRC2013-2546_Loco_CW_Comp_Tests_FINAL.pdf (Last accessed: 17.02.2017).
10. *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: 17.02.2017).
11. *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: 17.02.2017).
12. *Llana P., Tyrell D., Rakoczy P.* Conventional Locomotive Coupling Tests: Test Requirements and Pre-Test Analysis. Volpe National Transportation Systems Center. – 2016. – 7 p. URL: http://ntl.bts.gov/lib/59000/59400/59405/JRC2016-5817_Locomotive_Coupling_Tests.pdf (Last accessed: 17.02.2017).
13. *Соболевская М. Б., Сирота С. А.* Основные положения концепции пассивной защиты скоростного пассажирского поезда при аварийных столкновениях. Техническая механика. 2015. Вып. 1. С. 84 – 96.
14. *Науменко Н. Е., Хижа И. Ю.* Оценка влияния работы устройств системы пассивной безопасности пассажирского локомотива на его динамическую нагруженность при аварийном столкновении с препятствием на железной дороге. Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетр. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. 2013. №1(43). С. 154 – 160.
15. *Соболевская М. Б., Сирота С. А., Горобец Д. В., Теличко И. Б.* Разработка энергопоглощающих устройств для пассивной безопасности подвижного состава железных дорог (численное моделирование и краш тест). Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта. Тезисы докладов 75 Международной научно-практической конференции (14 – 15.05.2015, Днепропетровск). Днепропетровск, 2015. С. 103 – 104.
16. *Sobolevska M., Telychko I.* Passive safety system of an electric locomotive for high-speed operation on the railways with 1520 mm gauge. 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. 63 – 80.
17. *Гоноровский И. С.* Радиотехнические цепи и сигналы: учебник для вузов. М., 1986. 512 с.

Получено 23.02.2017,
в окончательном варианте 16.03.2017