УДК 629.4:62-758.2

М. Б. СОБОЛЕВСКАЯ, С. А. СИРОТА, Д. В. ГОРОБЕЦ, И. Б. ТЕЛИЧКО

НАТУРНЫЕ УДАРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА УСТРОЙСТВА ПОГЛОЩЕНИЯ ЭНЕРГИИ, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ ПАССИВНОЙ ЗАЩИТЫ ЛОКОМОТИВА ПРИ СТОЛКНОВЕНИЯХ

Приоритетным направлением развития железнодорожного транспорта Украины является внедрение скоростного пассажирского движения и обновление подвижного состава. Локомотив нового поколения должен иметь систему пассивной безопасности, которая в случае неизбежного столкновения обеспечивает преобразование энергии удара в механическую работу, связанную с контролируемым пластическим деформированием специальных устройств поглощения энергии (УПЭ), что позволит уменьшить тяжесть последствий аварии и сохранить жизни пассажиров и поездной бригады. Статья посвящена актуальной проблеме разработки УПЭ для скоростного пассажирского локомотива на основе результатов математического моделирования пластического деформирования УПЭ при сверхнормативных ударах и натурных ударных испытаний (крэш-тестов) УПЭ на базе европейского стандарта EN 15227. В статье приведены результаты выполненного в испытательном центре TÜV SÜD Rail GmbH (Герлиц, Германия) крэш-теста опытного образца УПЭ коробчатого типа, содержащего сотовые пакеты. Конструкция УПЭ разработана в сотрудничестве Института технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины с ООО “Проектно-конструкторское производственное предприятие МДС” и запатентована в Украине. Цель крэш-теста – экспериментальное исследование пластического деформирования исследуемой конструкции при ударе, определение характеристики контактного усилия между соударяющимися телами, оценка энергоемкости опытного образца УПЭ. В статье дано описание разработанного научно-методического обеспечения. Приведены результаты конечно-элементного моделирования крэш-теста опытного образца УПЭ. Выполнена верификация разработанной конечно-элементной модели путем сравнения по критериям европейского стандарта EN 15227 результатов, полученных расчетным и экспериментальным путями. Подтверждена достоверность результатов численных расчетов, выполненных с помощью разработанного научно-методического обеспечения.

Пріоритетним напрямком розвитку залізничного транспорту України є впровадження швидкісного пасажирського руху і оновлення рухомого складу. Локомотив нового покоління повинен мати систему пасивної безпеки, яка у випадку неминучого зіткнення забезпечує перетворення енергії удару в механічну роботу, пов’язану з контрольованим пластичним деформуванням спеціальних пристроїв поглинання енергії (ППЕ), що дозволить зменшити тяжкість наслідків аварії і зберегти життя пасажирів і поїзної бригади. Статтю присвячено актуальній проблемі розробки ППЕ для швидкісного пасажирського локомотива на основі результатів математичного моделювання пластичного деформування ППЕ при наднормативних ударах і натурних ударних випробувань (креш-тестів) ППЕ на базі європейського стандарту EN 15227. В статті наведено результати виконаного у випробувальному центрі TÜV SÜD Rail GmbH (Герліц, Німеччина) креш-тесту дослідного зразка ППЕ коробчастого типу, що містить стільникові пакети. Конструкцію ППЕ розроблено у співпраці Інституту технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України з ТОВ “Проектно-конструкторське виробниче підприємство МДС” і запатентовано в Україні. Метою креш-тесту є експериментальне дослідження пластичного деформування досліджуваної конструкції при ударі, визначення характеристики контактного зусилля між тілами, які співударяються, оцінка енергоємності дослідного зразка ППЕ. В статті дано опис розробленого науково-методичного забезпечення та скінченно-елементної моделі пластичного деформування досліджуваної конструкції при ударі. Наведено результати математичного моделювання креш-тесту дослідного зразка УПЕ. Виконано верифікацію розробленої скінченно-елементної моделі шляхом порівняння за критеріями європейського стандарту EN 15227 результатів, отриманих розрахунковим і експериментальним шляхами. Підтверджено достовірність результатів чисельних розрахунків, виконаних за допомогою розробленого науково-методичного забезпечення.

Introduction of high-speed passenger traffic and retrofit of the rolling stock are priority lines of the evolution of railway transport. A newly developed locomotive must have the passive safety system that in case of an unavoidable collision provides the transformation of the impact energy into the mechanical work associated with a plastic controlled deformation of the special energy-absorbing devices (EAD). This enables the crash impact to be mitigated and lives of passengers and the train crew to be protected. The paper deals with the pressing problem of the development of the EAD for a high-speed passenger locomotive based on the results of mathematical modeling the EAD plastic deformation in non-standard impacts and the EAD full-scale impact tests (crash-tests) using the EN 15227 European Standard. The paper presents the results of the crash-test of the prototype of the EAD box type with cell packs conducted in the Test Center of TÜV SÜD Rail GmbH (Gorlitz, Germany). The Institute of Technical Mechanics, NANU&SSAU developed the EAD design in cooperation with the MDS Design Production Enterprise. This EAD design has been patented in Ukraine. The objective of the crash-test is to carry out experimental investigations of a plastic deformation of the design under consideration in the impact, to derive the characteristics of the contact forces between the colliding bodies, to estimate the energy-intensity of the EAD prototype. The paper describes scientific and methodical support developed. The results of a finite-element simulation

of the crash-test of the EAD prototype are reported. The finite-element model developed has been verified by comparison with the predicted and experimental results using the criteria of the EN 15227 European Standard. The accuracy of the results of numerical calculations made by scientific and methodical support developed has been validated.

Ключевые слова: *пассажирский поезд, аварийное столкновение, пассивная безопасность, устройство поглощения энергии, крэш-тест, конечно-элементное моделирование.*

Введение. Одним из главных направлений развития железнодорожного транспорта в Украине, как и на всем пространстве колеи 1520 мм, является внедрение скоростного пассажирского движения и обновление подвижного состава. Вопросы повышения скорости движения поездов неразрывно связаны с проблемами обеспечения безопасности пассажиров и поездной бригады в случае аварийного столкновения поезда с преградой на железнодорожном пути. Подвижной состав нового поколения должен иметь не только эффективные средства активной защиты для предотвращения аварийных столкновений, но и систему пассивной безопасности (СПБ), которая в случае неизбежного столкновения позволит уменьшить тяжесть последствий аварии и сохранить жизни пассажиров, машиниста и поездной бригады. При аварийном столкновении поезда с препятствием первый и наиболее сильный удар испытывает локомотив, поэтому особое внимание должно быть уделено разработке его СПБ. Основная задача СПБ – уменьшение возникающих при аварийном столкновении продольных сил и ускорений в результате превращения кинетической энергии удара в механическую работу, связанную с контролируемым пластическим деформированием специально предназначенных для этого устройств поглощения энергии (УПЭ), расположенных в концевых частях рамы кузова локомотива.

В странах ЕС обеспечение пассивной безопасности железнодорожного экипажа скоростного и высокоскоростного поезда является обязательным и регламентируется с 2008 г. стандартом EN 15227 [1]. В настоящее время пассивная защита большинства европейских пассажирских поездов локомотивной тяги, оборудованных раздельными ударно-тяговыми устройствами, организована таким образом, что основную часть энергии при столкновениях с железнодорожным подвижным составом поглощают крэш-буфера и расположенные за ними УПЭ [2 – 8], установленные в концевых частях рамы кузова локомотива.

В странах ЕС теоретические и экспериментальные исследования по пассивной защите ПС активно проводятся с начала 90-х годов прошлого века. Существенный вклад в решение проблемы пассивной защиты локомотивов внесли специалисты компаний Alstom [4], Bombardier Transportation [2], Siemens [5], Voith Turbo [3] и ряда других научных, производственных организаций и испытательных центров [8].

Подвижной состав железных дорог с шириной колеи 1520 мм имеет ряд существенных отличий (в объединенных ударно-тяговых приборах, нормативных требованиях на его разработку и т. д.) от европейского подвижного состава, для которого уже разработаны эффективные системы пассивной безопасности. Обязательное наличие СПБ в странах СНГ не регламентируется, хотя в 2014 г. в Российской федерации введен межгосударственный стандарт “Крэш-системы аварийные железнодорожного подвижного состава для пас-

сажирских перевозок. Технические требования и методы контроля” [9]. Этот стандарт не эквивалентен стандарту EN 15227, он носит рекомендательный характер, и ни одного ударного испытания УПЭ (крэш-теста) согласно нему не проводилось. В работе [10] обосновано, что требования по пассивной безопасности при аварийных столкновениях на железных дорога колеи 1520 мм должны быть гармонизированы с требованиями EN 15227. Согласно EN 15227 для оценки эффективности работы УПЭ необходимо, наряду с математическим моделированием динамических процессов аварийных столкновений, проводить полноразмерные испытания их отдельных образцов. Такие испытания позволят проверить функционирование УПЭ и провести калибровку численных моделей по результатам испытаний, сравнив результаты испытаний и соответствующего численного моделирования.

В настоящее время актуальной является разработка УПЭ для скоростного пассажирского локомотива с объединенными ударно-тяговыми приборами, предназначенного для эксплуатации на железных дорогах колеи 1520 мм. Такая разработка должна быть научно обоснована результатами математического моделирования пластического деформирования конструкции УПЭ при ударах и крэш-тестов УПЭ.

В результате комплекса проведенных теоретических исследований разработана и запатентована конструкция УПЭ коробчатого типа, содержащая сотовые пакеты [11, 12]. УПЭ предназначено для установки в концевых частях рамы кузова локомотива.

В данной статье приведены результаты крэш-теста опытного образца УПЭ и математического моделирования выполненного крэш-теста.

Основные особенности проведения полноразмерных натурных испытаний УПЭ на базе стандарта EN 15227. Согласно стандарту EN 15227 полноразмерные испытания УПЭ должны соответствовать требованиям по энергопоглощению для случая столкновения двух идентичных составов (сценарий 1) или столкновения поездного состава с грузовым вагоном массой 80 т (сценарий 2). Однако данное требование не предполагает точного воспроизведения фактического сценария в ходе испытаний. Испытания должны быть выполнены для всех имеющихся типов энергопоглощающих устройств, установленных на торцах железнодорожного экипажа. Для однотипных УПЭ проводить отдельные испытания не обязательно. Разрешается проводить отдельные испытания энергопоглощающих устройств, которые функционируют независимо от других компонентов. Все взаимодействующие УПЭ должны быть включены в один крэш-тест. Как правило, в ходе тестов испытуемые УПЭ должны поглощать как минимум 80 % энергии от предельной величины, установленной для таких устройств. Использование более низких значений энергопоглощения должно быть обосновано, при этом величина таких значений не может быть меньше 50 % процентов от требуемого максимального значения.

Испытания должны включать в себя следующее:

– измерение сил, скоростей столкновения, замедлений и деформаций в ходе испытаний с целью проведения сравнений (по уровням поглощенной энергии, деформаций и т. п.) для различных УПЭ;

– измерение линейных размеров УПЭ (до и после испытаний) в предварительно установленных и согласованных зонах;

– применение высокоскоростной видеосъемки, которая позволяет сравнить кинематику теста с результатами соответствующего моделирования;

– измерение скорости столкновения (минимальная точность измерения ± 0,5 км/ч) и массы испытуемой единицы подвижного состава (минимальная точность измерения ± 5 %);

– фильтрацию измеренных сигналов с использованием фильтра низких частот с частотой среза не более 1000 Гц.

Рекомендуется, чтобы основные эталонные значения наиболее значимых показателей: силы, скорости и перемещения подтверждались как минимум двумя независимыми регистрирующими системами. Кроме того, рекомендуется дублировать измерения и некоторых других важных параметров (например, момента соударения, скорости столкновения, ускорения при ударе).

Европейские испытательные центры. Испытательный центр фирмы Bombardier Transportation в Креспине (Франция) [13] расположен в регионе Валансьен (Valenciennes) в г. Креспин (Crespin). Центр выполняет широкий спектр исследований – статические испытания, испытания на усталостную прочность, климатические и вибрационные испытания, проводит крэш-тесты систем пассивной безопасности. В этом испытательном центре были проведены серии крэш-тестов кабин машиниста со всеми энергопоглощающими элементами, обеспечивающими пассивную безопасность поездов Spacium 3.06 [14] и Regio 2N [15]. Комплекс для проведения крэш-тестов включает горку с длиной наклонной части 57 м и горизонтальный участок пути – 75 м. Высота горки позволяет получить максимальную скорость бойка 8,8 м/с (32 км/ч). Упорная стена имеет размеры 4000х5000 мм. Масса ее равна 600 т. Максимальная масса платформы-бойка – 120 т. Максимальная энергия удара – 4560 кДж. Центр оснащен многоканальным оборудованием для измерения всех необходимых параметров и скоростной видеосъемки (до 2000 кадров в секунду) при проведении крэш-испытаний.

Испытательный центр фирмы Alstom расположен на производственной площадке подразделения Alstom Transport в Рейшсхоффане (Франция) [16]. В этом испытательном центре проводятся крэш-тесты кабин машинистов и УПЭ. Особенностью центра является устройство для разгона вагона-бойка. Оно представляет собой “пушку”, которая выстреливает вагон-боек. Скорость и, следовательно, энергия удара регулируется количеством зарядов. Энергия удара достигает значения 5 МДж.

Одним из популярных испытательных полигонов Европы является испытательный полигон железнодорожного института (Польша) в Жмигроде (Żmigród) возле Вроцлава [17, 18]. На полигоне в Жмигроде в соответствии со стандартом EN 15227 проводятся крэш-тесты как отдельных УПЭ, так и полномасштабных моделей кабин машиниста с УПЭ. На полигоне, начиная с середины 90-х годов прошлого века, выполнялись крэш-тесты в рамках европейской программы SAFETRAIN (1.08.1997 – 31.07.2001). Ударные натурные испытания проводили практически все ведущие европейские фирмы, производящие железнодорожный подвижной состав. Для проведения испытаний на полигоне имеются специальные платформы, на которые через силоизмерительные устройства устанавливаются испытываемые объекты. Разгон платформы до нужной скорости осуществляется локомотивом.

Испытательный центр железнодорожной техники фирмы TÜV SÜD Rail GmbH в г. Герлиц (Германия) проводит тестирование и испытания железно-

дорожной техники, в частности крэш-тесты железнодорожных транспортных средств и их элементов [19]. Для испытаний УПЭ в центре используется стенд, включающий прямолинейный участок пути, упирающийся в бетонный блок массой 200 т, на котором установлена стальная плита с силоизмерительным блоком. На этой плите крепится экспериментальный образец. Рядом на безопасном расстоянии расположен пункт управления и обработки результатов испытаний. Услугами сертифицированного испытательного центра TÜV SÜD Rail GmbH пользуются для проведения крэш-тестов практически все европейские фирмы, производящие железнодорожный подвижной состав, крэш-буфера и другие средства пассивной защиты.

Креш-тест УПЭ. В испытательном центре TÜV SÜD Rail GmbH впервые для стран СНГ выполнен крэш-тест опытного образца УПЭ, разработанного в результате сотрудничества Института технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины с ООО “Проектно-конструкторское производственное предприятие МДС” для пассивной защиты скоростного пассажирского локомотива нового поколения при аварийных столкновениях. Опытный образец УПЭ выполнен из малоуглеродистой стали и состоит из двух частей (рис. 1). Размеры конструкции на рис. 1 даны в миллиметрах.

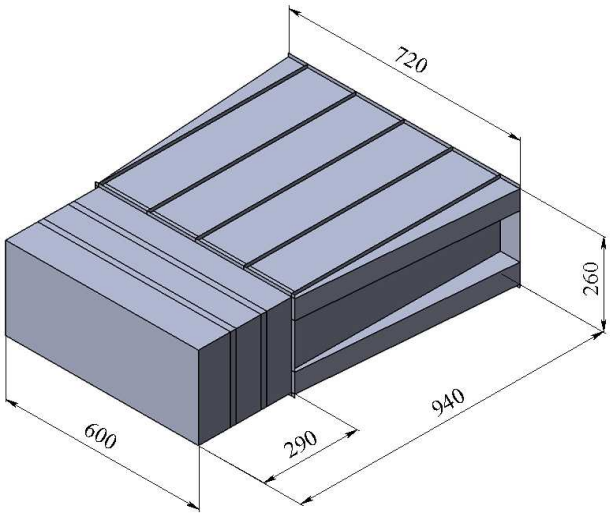
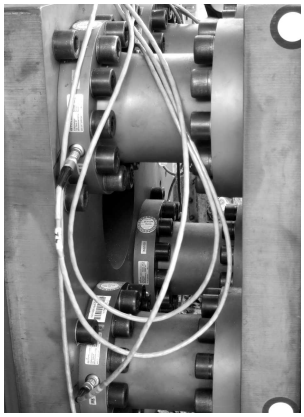


Рис. 1

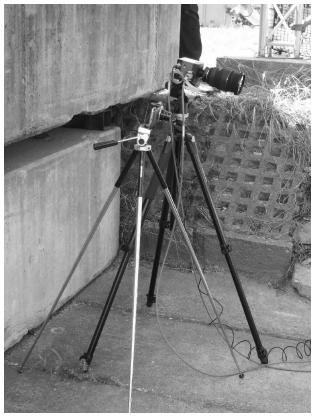
Одна из частей представляет собой короб в виде параллелепипеда с трехслойным сотовым блоком внутри. Каждый сотовый слой, состоящий из сот переменной высоты с шестигранными ячейками, установлен на диафрагме, прикрепленной к коробу. Вторая часть выполнена в виде усеченной пирамиды и состоит из сот переменной высоты с трехгранными ячейками.

При проведении испытаний использовалось оборудование, представленное на рис. 2. Оборудование включало четыре датчика силы серии RF по 1200 кН производства фирмы GTM (Германия), высокоскоростные и обычные видеокамеры, датчики скорости и перемещения. Вагон-боек (рис. 3) представляет собой платформу с грузом соответствующей массы.

Условия проведения креш-теста: масса вагона-бойка M_b = 40,6 т; скорость вагона-бойка при ударе V_b = 24,7 км/ч.

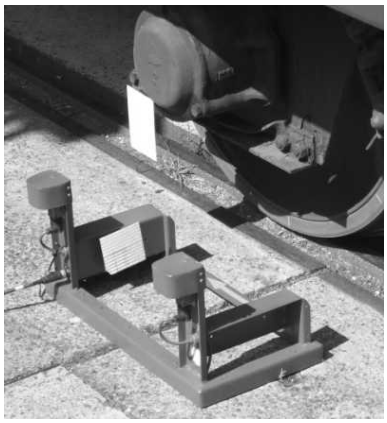


силоизмерительный блок



высокоскоростные камеры

видеокамера GoPro



датчик скорости

датчик перемещения

Рис. 2

Рис. 3

На рис. 4 показаны фрагменты крэш-теста. Вид опытного образца УПЭ после крэш-теста показан на рис. 5. На рис. 6 приведены экспериментальные

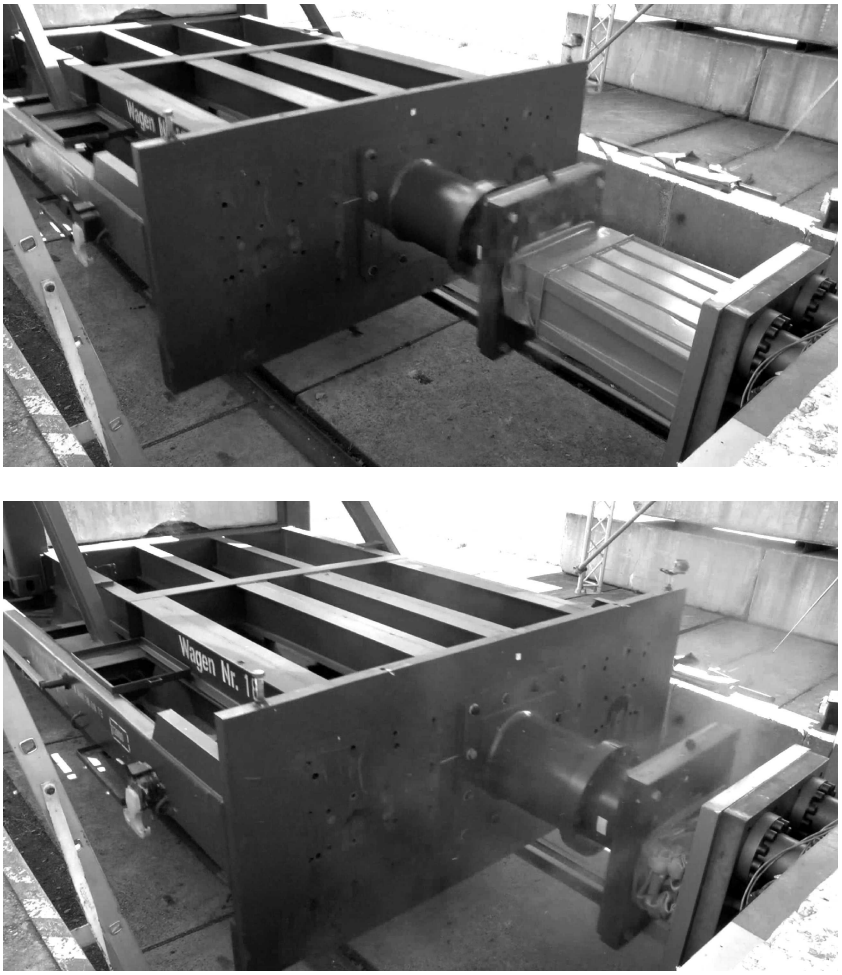


Рис. 4

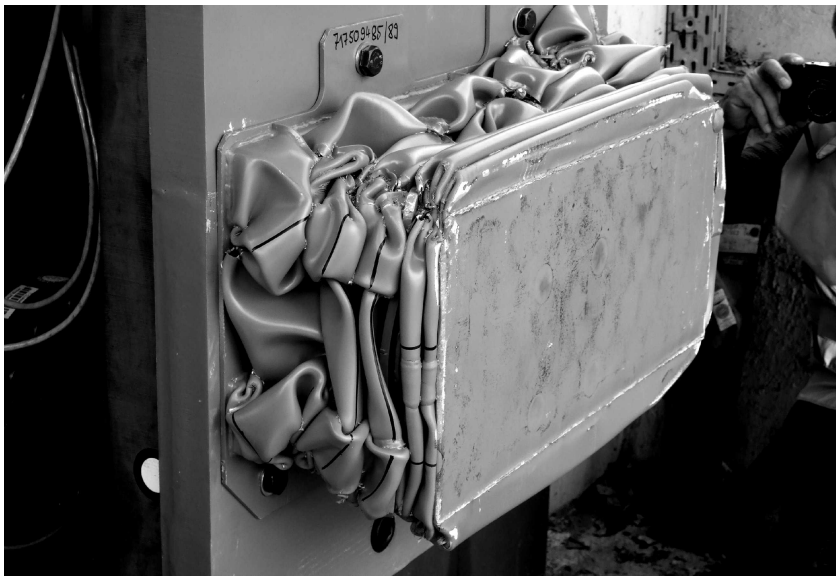


Рис. 5

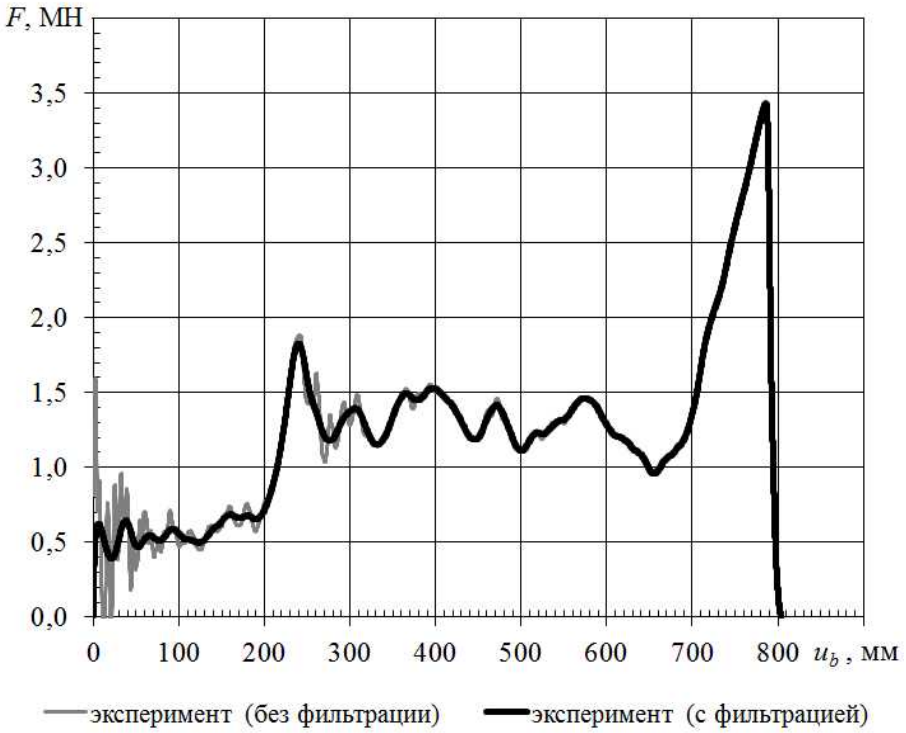


Рис. 6

зависимости от продольного перемещения вагона-бойка u_b контактного усилия F без фильтрации и с использованием фильтра нижних частот Баттерворта 4-го порядка с частотой среза 180 Гц [20]. На рис. 6 видно, что рабочий ход конструкции составляет 700 мм. При дальнейшем ее сжатии происходит резкое возрастание контактного усилия F. Максимальная величина усилия F на участке рабочего хода не превышает 1,9 МН (без фильтрации) и 1,8 МН (с учетом фильтрации). Среднее значение усилия F (с учетом фильтрации) на участке изменения перемещения u_b от 0 до 200 мм составляет 0,6 МН, на участке от 200 до 700 мм – 1,3 МН, на участке от 0 до 700 мм – 1,1 МН.

Экспериментальная диаграмма, характеризующая зависимость энергии E, которая поглощается в процессе деформирования конструкции опытного образца УПЭ, от продольного перемещения u_b приведена на рис. 7. Энергоемкость конструкции опытного образца УПЭ на участке 0 – 700 мм составляет 0,75 МДж. Крэш-тест был завершен при перемещении вагона-бойка u_b = 786 мм. Вся кинетическая энергия удара была израсходована на сжатие опытного образца УПЭ, после чего произошел отскок вагона-бойка. При этом в результате сжатия конструкции опытного образца УПЭ поглощена энергия порядка 0,96 МДж. Максимальное значение усилия F при перемещении u_b от 700 до 786 мм составило 3,4 МН.

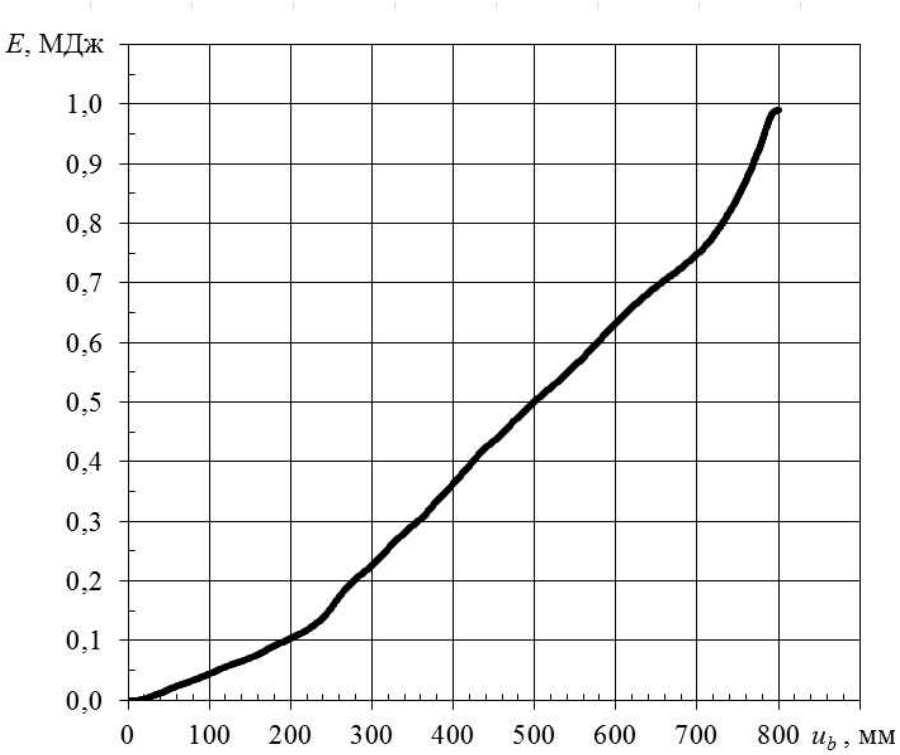


Рис. 7

Научно-методическое обеспечение для анализа пластического деформирования УПЭ при ударе. Конструкция УПЭ расположена между неподвижным упором и подвижным бойком. Схема взаимодействия УПЭ с бойком при ударе показана на рис. 8.

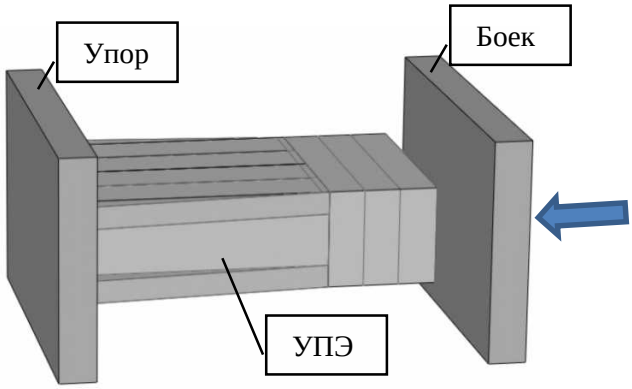


Рис. 8

Разработанное научно-методическое обеспечение для анализа напряженно-деформированного состояния элементов УПЭ при ударе включает создание с помощью средств автоматизированного конструирования трехмерной геометрической модели исследуемой конструкции, импортирование геометрической модели в программу для решения с помощью метода конечных элементов задачи динамики, создание и тестирование конечно-элементной ма-

тематической модели, описывающей процесс пластического деформирования конструкции при ударе, проведение расчетов, построение диаграмм, характеризующих зависимость контактной силы и энергии, поглощаемой в результате деформирования УПЭ, от продольного перемещения бойка.

Конечно-элементное моделирование выполняется с учетом нелинейных соотношений между деформациями и перемещениями, а также между напряжениями и деформациями, зависимости предела текучести стали от скорости деформации, переменного контактного взаимодействия между элементами рассматриваемой механической системы соударяющихся тел.

Для определения начала появления пластических деформаций использован критерий Мизеса с учетом влияния скорости нагружения на физико-механические свойства материалов [21]. Для описания упругопластических свойств материала при ударных воздействиях использована инкрементальная модель пластичности в формулировке Крига и Кея [22, 23], основанная на билинейной аппроксимации истинной диаграммы растяжения с учетом кинематического упрочнения. Точка перелома соответствует истинному динамическому пределу текучести s_d, который зависит от скорости деформации. Для вычисления s_d используется зависимость Саймондса–Купера [24, 25]

$$s_d = s_T \cdot \left(1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C}\right)^{\frac{1}{P}}\right) = k s_T; \qquad k = 1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C}\right)^{\frac{1}{P}}, \tag{1}$$

где s_T – истинный предел текучести при статической нагрузке; C и P – коэффициенты упрочнения стали, определяемые на основе экспериментальных данных; $\dot{\varepsilon}$ – нормализированная скорость деформации при динамическом нагружении (безразмерная величина, которая получается в результате деления размерной величины скорости деформации на 1,0 $с^{-1}$); k – динамический коэффициент упрочнения стали.

Система дифференциальных уравнений движения механической системы в приращениях имеет вид

$$M\Delta\ddot{U} + K_c(\sigma,U)\Delta U = \Delta Q, \tag{2}$$

где M – матрица масс, $K_c(\sigma,U)$ – матрица жесткости с учетом геометрической и физической нелинейностей; ΔU и ΔQ – векторы приращения перемещений и нагрузок (с учетом контактного взаимодействия).

Система уравнений (2) решается с помощью метода последовательных нагружений [26]. В результате решения определяются узловые перемещения, скорости, ускорения, деформации, напряжения, контактное усилие F (интеграл по области контакта от распределенных контактных напряжений) между бойком и исследуемой конструкцией в текущие моменты времени. На основании полученных данных строятся диаграммы, характеризующие зависимости контактного усилия F и энергии E, поглощаемой при пластическом деформировании конструкции, от перемещения u_b. При построении диаграмм используется фильтр нижних частот с частотой среза 180 Гц [27]. Применение такого фильтра согласуется с требованиями стандарта EN 15227.

При разработке конечно-элементной модели для анализа нелинейного деформирования элементов конструкции УПЭ при ударе используются спе-

циальные оболочечные элементы с тремя или 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 мембранные и изгибные пластические деформации. Боек и упор представляют собой параллелепипеды, которые моделируются объемными конечными элементами с четырьмя узлами, имеющими по три линейных перемещения, скорости и ускорения. В узлах, расположенных на дальней от УПЭ грани бойка, равномерно распределяются одинаковые по величине сосредоточенные массы. Масса бойка равняется сумме масс моделирующего боек параллелепипеда и всех сосредоточенных масс. Такой подход позволяет представить боек заданной массой при достаточно небольшом его объеме. Размеры бойка и упора выбираются таким образом, чтобы обеспечить их контактное взаимодействие с УПЭ в процессе деформирования. Схемы контактного взаимодействия между соприкасающимися поверхностями бойка и исследуемой конструкции, между элементами самой исследуемой конструкции, а также между элементами исследуемой конструкции и неподвижного упора приняты в форме “поверхность в поверхность”.

Конечно-элементная схема механической системы из двух соударяющихся тел “опытный образец конструкции УПЭ – боек” состоит из 21782 узлов и 23128 элементов. Размер элементов при моделировании упора составляет 100 – 400 мм, при моделировании бойка – 50 мм, при моделировании сотовых пакетов с шестигранными ячейками – 15 мм, остальных частей УПЭ – 20 мм.

Граничные условия – нулевые перемещения всех узлов неподвижного упора. Начальные условия – узловые скорости бойка в начальный момент времени.

Сравнение результатов математического моделирования и крэш-теста. В соответствии с условиями крэш-теста проведено математическое моделирование упругопластического деформирования конструкции опытного образца УПЭ при ударе вагоном-бойком массой M_b = 40,6 т со скоростью V_b = 24,7 км/ч с использованием разработанного научно-методического обеспечения и конечно-элементной модели.

Согласно стандарту EN 15227 [1] результаты моделирования процесса деформирования УПЭ при ударе считаются приемлемыми, если по итогам сравнения с результатами крэш-теста удовлетворяются следующие критерии:

– величина рабочего хода УПЭ, полученная при моделировании, может отличаться от экспериментально найденного значения максимум на 10 %;

– среднее значение контактного усилия, которое определяется в результате математического моделирования по графику, демонстрирующему зависимость перемещения от величины контактного усилия, может отличаться от среднего значения контактного усилия, найденного экспериментально, максимум на 10 %;

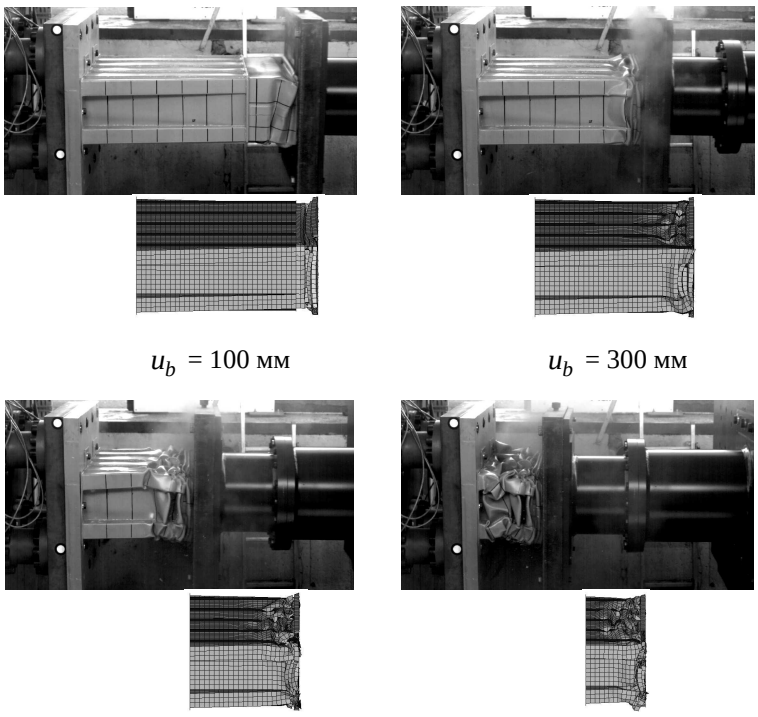
– полученное в результате математического моделирования значение энергии столкновения, которая рассеивается при деформации УПЭ, отличается от значения, найденного экспериментально, не более чем на 10 %;

– кривая, определяющая зависимость контактного усилия от перемещения, полученная в ходе моделирования процесса деформирования УПЭ, имеет те же характеристики, что и соответствующая кривая, полученная экспериментально.

При проведении данного сравнения должен использоваться фильтр нижних частот на 180 Гц, чтобы удалить из выходного сигнала высокочастотные всплески.

Согласно EN 15227 хорошая согласованность экспериментальных результатов и результатов моделирования зависит, главным образом, от качества численной модели. Свойства материалов в математической модели деформирования УПЭ при ударе должны отражать реальное поведение используемых материалов.

По критериям европейского стандарта EN 15227 выполнено сравнение результатов, полученных расчетным и экспериментальным путями на участке рабочего хода (700 мм) опытного образца УПЭ. Фрагменты крэш-теста и его конечно-элементного моделирования при разных значениях перемещения u_b вагона-бойка показаны на рис. 9.



u_b = 100 мм u_b = 300 мм

u_b = 500 мм u_b = 700 мм

Рис. 9.

На рис. 10 приведены теоретические и экспериментальные диаграммы, характеризующие зависимость контактного усилия F от продольного перемещения u_b. Установлено, что расхождение средних значений контактного усилия между УПЭ и вагоном-бойком составляет 7 % (при допустимых 10 %), а расхождение значений энергии, которая поглощается за счет деформации УПЭ при перемещении u_b = 700 мм, составляет 5 % (при допустимых 10 %).

Хорошее согласование результатов расчета и крэш-теста подтверждает достоверность результатов конечно-элементного моделирования с помощью разработанного научно-методического обеспечения.

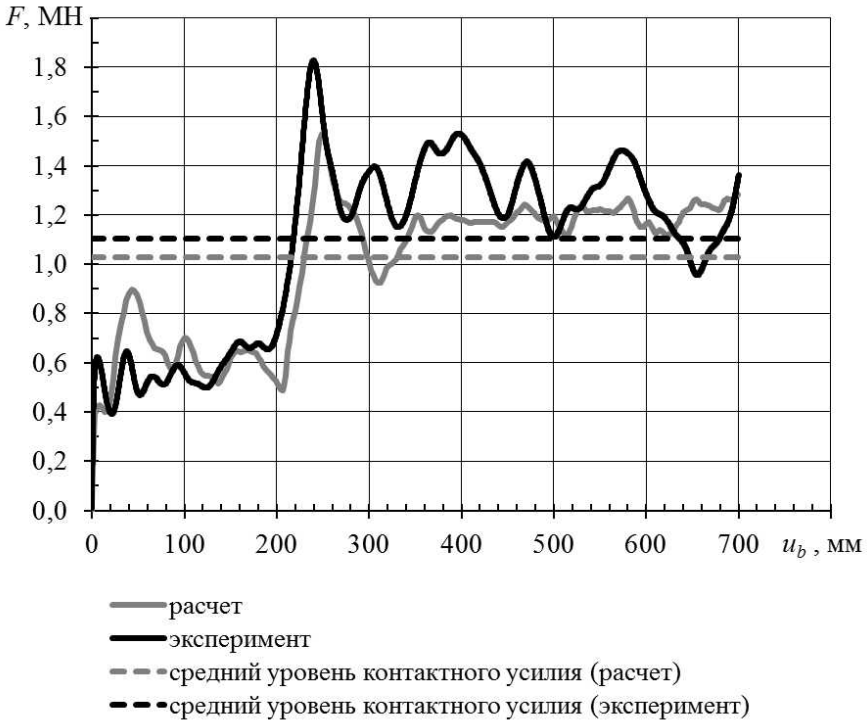


Рис. 10

Выводы. Выполнен анализ особенностей проведения полноразмерных натурных испытаний крэш-элементов на базе европейского стандарта EN 15227. Дано описание европейских испытательных центров, обеспечивающих проведение крэш-тестов железнодорожной техники. Приведено описание и основные результаты выполненного впервые для стран СНГ в испытательном центре TÜV SÜD Rail GmbH (Герлиц, Германия) крэш-теста опытного образца УПЭ, предназначенного для пассивной защиты скоростного пассажирского локомотива нового поколения. Получены экспериментальные диаграммы, характеризующие зависимости контактного усилия и поглощаемой энергии от продольного перемещения вагона-бойка. Установлено, что энергоемкость конструкции опытного образца УПЭ с рабочим ходом 700 мм составляет 0,75 МДж. На участке рабочего хода максимальная величина контактного усилия не превышает 1,8 МН, а его среднее значение равно 1,1 МН.

Разработано научно-методическое обеспечение для определения параметров УПЭ путем решения задачи теории пластичности при заданных начальных и граничных условиях. С использованием разработанных научно-методического обеспечения и конечно-элементной модели проведено математическое моделирование упругопластического деформирования конструкции опытного образца УПЭ при ударе в соответствии с условиями выполненного крэш-теста. По критериям европейского стандарта EN 15227 выполнено сравнение результатов, полученных расчетным и экспериментальным путями на участке рабочего хода (700 мм) опытного образца УПЭ. Установлено, что расхождение средних расчетных и экспериментальных значений контактного усилия составляет 7 % при допустимых 10 %. Расчетное и экспериментальное значения энергии, которая поглощается за счет деформации УПЭ на ра-

бочем ходе 700 мм, совпадают с точностью до 5 %. Хорошая согласованность экспериментальных результатов и результатов моделирования подтверждает адекватность разработанной конечно-элементной модели и достоверность результатов, получаемых с помощью разработанного научно-методического обеспечения.

1. EN 15227. Railway applications – Crashworthmess requirements for railway vehicle bodies. – Brussel : European committee for standardization, 2008. – 37 p.
2. *Carl F. B.* Development of the crashworthy locomotive platform TRAXX: Operational needs, technical concept and validation procedure / *F. B. Carl, S. Schneider, W. Wolter* // Passive Safety of Rail Vehicles 2013 : Railway Research Network Proceedings of the 5th International Symposium “Passive Safety of Rail Vehicles and Safe Interiors” in Berlin on 17 – 18 March 2005. – 2/2005. – Berlin : IFV Bahntechnik e.V. – 2005. – P. 42 – 62.
3. Entwicklung der Kastenstruktur für die Lokomotive Voith Maxima 40CC. Design of the carbody structure for the Voith Maxima 40CC locomotive / *J. Foedtke, S. Schneider, R. Pfrommer and etc.* // ZEVrail Glasers Annalen. – 2008. – № 132. – P. 292 – 303.
4. Prima II – локомотивы нового поколения // Железные дороги мира. – 2010. – № 12. – С. 17 – 25.
5. Vectron – a customer-optimized crash concept (Vectron – оптимизированная под потребителя крэш концепция) [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.mobility.siemens.com/mobility/global/en/interurban-mobility/rail-solutions/locomotives/vectron/technology/modular-locomotive-concept/replaceable-front-end/pages/replaceable-front-end.aspx
6. The EST crash buffer (EST крэш буфер) [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.crashbuffer.com/index.htm
7. *Wasilewski L.* Evolution of crash absorbing systems according to EN 15227 and according to real operation conditions / *L. Wasilewski* // Passive Safety of Rail Vehicles 2013 : Railway Research Network Proceedings of the 9th International Symposium “Passive Safety 2013 – Passive Safety of Rail Vehicles and Safe Interiors” in Berlin on 21 – 22 February 2013. – 43/2013. – Berlin : IFV Bahntechnik e.V. – 2013. – P. 211 – 218.
8. Railway passive safety in Europe (Пассивная безопасность на железнодорожном транспорте Европы) [Электронный ресурс]. – Режим доступа http://www.uic.org/cdrom/2008/02_globalview_india2/presentations/16.PassiveSafety_Europe_Pereira.pdf
9. ГОСТ 32410-2013 Межгосударственный стандарт. Крэш-системы аварийные железнодорожного подвижного состава для пассажирских перевозок. Технические требования и методы контроля. – М. : Стандартинформ, 2014. – 29 с.
10. *Соболевская М. Б.* Основные положения концепции пассивной защиты скоростного пассажирского поезда при аварийных столкновениях / *М. Б. Соболевская, С. А. Сирота* // Техническая механика. – 2015. – № 1. – С. 84 – 96.
11. *Sobolevska M.* Passive safety system of an electric locomotive for high-speed operation on the railways with 1520 mm gauge / *M. Sobolevska, I. Telychko* // Passive Safety of Rail Vehicles 2013 : Railway Research Network Proceedings of the 9th International Symposium “Passive Safety 2013 – Passive Safety of Rail Vehicles and Safe Interiors” in Berlin on 21 – 22 February 2013. – 43/2013. – Berlin : IFV Bahntechnik e.V. – 2013. – P. 63 – 80.
12. Патент на корисну модель 64978 Україна, МПК B 61 G 11/00. Пристрій для поглинання енергії удару / *Ушкалов В. Ф., Науменко Н. Ю., Теличко І. Б. та інш.* – u201104838 ; заявл. 19.04.2011 ; опубл. 25.11.2011, Бюл. № 22/2011. – 6 с.
13. Bombardier transport France Crespin Engineering Tests France (Crespin тест-центр) [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.eurailsafe.net/file.php?id=202
14. Bombardier Successfully Concludes First Passive-Safety Crash Tests on Spacium 3.06 (Успешно завершились первые крэш-тесты Spacium 3.06) [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.marketwired.com/press-release/bombardier-successfully-concludes-first-passive-safety-crash-tests-on-spacium-3o6-ile-tsx-bbd.a-752923.htm
15. Presentation of the first Regio 2N train (Презентация первого поезда Regio 2N) [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.bombardier.com/content/dam/Websites/bombardiercom/Events/Supporting%20Documents/BT/bombardier-transportation-20130924-press-kit-Regio-2N-Crespin-EN.pdf
16. Alstom Film Carte De Visite Reichshoffen (Визит на Alstom в Reichshoffen) [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://www.youtube.com/watch?v=QZkxyGLFbwI&list=PLFSobSthzbUTQtpTvLbt-SyOxG6rVJkXZ&index=51
17. *Sanecki H.* Badania odporności zderzeniowej pojazdów szynowych / *H. Sanecki* // Seminarium, IK Warszawa, 8.05.2012 (Исследования ударопрочности железнодорожных транспортных средств) [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.ikolej.pl/fileadmin/user_upload/wydarzenia/Newsletter_No1.pdf
18. Crash test kabiny V300 Zefiro. Prędkość: 38 km/h. Żmigród (Крэш-тест кабины V300 Zefiro) [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://www.youtube.com/watch?v=M24h1M0VCrc

19. TÜV SÜD Rail New Challenges in Railway Operations (TÜV SÜD Rail новые вызовы в железнодорожных перевозках) [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://www.tuev-sued.de/uploads/images/1417169050321070970779/tuev-sued-rail-new-challenges-in-railway-operations.pdf
20. *Лукас В. А.* Теория автоматического управления / *В. А. Лукас.* – М. : Недра, 1990. – 416 с.
21. Инженерные методы исследований ударных процессов / *Г. С. Батуев, Ю. В. Голубков, А. К. Ефремов и др.* – М. : Машиностроение, 1977. – 240 с.
22. From engineering stress to true stress (От условных напряжений к истинным) [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.dynasupport.com/howtos/material/from-engineering-to-true-strain-true-stress
23. *Krieg R. D.* Implementation of a time independent plasticity theory into structural computer programs / *R. D. Krieg, S. W. Key* // Vol. 20 of Constitutive equations in viscoplasticity: computational and engineering aspects. – New York : ASME, 1976. – P. 125 – 137.
24. *Саймондс П. С.* Динамика неупругих конструкций : пер. с англ. / *П. С. Саймондс.* – М. : Мир, 1982. – 224 с.
25. *Cowper G. R.* Strain Hardening and Strain Rate Effects in the Impact Loading of Cantilever Beams / *G. R. Cowper, P. S. Symonds* // BrownUniv. : Applied Mathematics Report. – 1958. – P. 28.
26. *Оден Д.* Конечные элемнты в механике сплошных сред / *Д. Оден.* – М. : Мир, 1976. – 464 с.
27. *Гоноровский И. С.* Радиотехнические цепи и сигналы : учебник для вузов / *И. С. Гоноровский.* – М. : Радио и связь, 1986. – 512 с.

Институт технической механики
Национальной академии наук Украины и
Государственного космического агентства Украины,
Днепропетровск

ООО “Проектно-конструкторское производственное
предприятие МДС”,
Днепропетровск

Получено 23.05.2016,
в окончательном варианте 06.06.2016.