

АНАЛИЗ ВЗАЙМОДЕЙСТВИЯ ПАССАЖИРСКОГО ПОЕЗДА С СИСТЕМОЙ ПАССИВНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И БОЛЬШОГО ДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА ПРИ СТОЛКНОВЕНИИ

Институт технической механики

*Національної академії наук України і Государственного космического агентства Украины,
ул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Днепр, Украина; e-mail: dep7@ukr.net*

На даний час актуальною проблемою вітчизняного залізничного транспорту є створення швидкісного пасажирського рухомого складу з системами пасивної безпеки (СПБ) при аварійних зіткненнях. З 2016 р. в Україні діє ДСТУ EN 15227:2015 (EN 15227:2008), еквівалентний європейському стандарту EN 15227, що регламентує обов'язкову наявність СПБ у всіх конструкцій пасажирських залізничних екіпажів, що розробляються. Згідно з вимогами EN 15227 системи пасивної безпеки повинні забезпечити захист пасажирів і поїзної бригади, збереження несущих елементів рухомого складу при нормативних сценаріях зіткнення. У стандарті EN 15227 визначено еталонні поїзди, чотири сценарії зіткнення, а також критерії для оцінки відповідності розроблених конструкцій рухомого складу з СПБ вказанним нормативним вимогам. В статті розглядається сценарій 3, який характеризує зіткнення зі швидкістю 110 км/год пасажирського поїзда на переїзді з великим дорожнім транспортним засобом масою 15 т (наприклад, вантажним автомобілем великої вантажопідйомності). У цьому сценарії великий дорожній транспортний засіб є великогабаритно деформованою перешкодою (ВДП) з заданими геометричними розмірами, яка вільно стоїть на переїзді. При проектуванні залізничних екіпажів з СПБ необхідно за допомогою математичного моделювання провести аналіз динаміки зіткнення згідно зі сценарієм 3, оцінити отримані значення середніх поздовжніх прискорень і пластичних деформацій в несущих елементах розглянутих конструкцій за критеріями стандарту EN 15227. При цьому особливу увагу потрібно звернути на коректне моделювання взаємодії поїзда з перешкодою. У даний статті розглядається пасажирський поїзд локомотивної тяги. Мета роботи – визначення силової характеристики взаємодії ВДП і локомотива з СПБ при зіткненні на залізничному переїзді. Для досягнення поставленої мети розглянуто нелінійну динамічну контактну задачу про зіткнення ВДП з передньою частиною локомотива. За великогабаритну деформовану перешкоду прийнято конструкцію, що складається з трьох фрагментів (обшивки, серцевини і нижньої частини), які мають різні матеріали. Параметри конструкції визначені за критерієм EN 15227 в результаті розв'язання задачі про зіткнення зі швидкістю 110 км/год ВДП і недеформованої кулі масою 50 т. За кабіну машиніста локомотива прийнято кабіну, розроблену ТОВ “ПКПП “МДС” для електровоза ЕП20, в конструкцію якого інтегровано елементи СПБ. Каркас кабіни машиніста має посилену лобову стінку, жертовну зону, зону безпеки для виживання і евакуації локомотивної бригади. В кінцевій частині рами кузова локомотива на рівні автозчіпного пристрою встановлено два пристрії поглинання енергії (ППЕ). Науковою новизною статті є розроблені скінченно-елементні моделі пластичного деформування елементів ВДП, ППЕ та каркаса кабіни при зіткненні згідно зі сценарієм 3. В результаті проведених досліджень побудовано залежність контактного зусилля між ВДП і елементами передньої частини локомотива від поздовжнього переміщення центру мас ВДП при зіткненні. Запропонований підхід, науково-методичне забезпечення і розроблені математичні моделі можуть бути використані при проектуванні вітчизняного пасажирського тягового рухомого складу з СПБ.

В настоящее время актуальной проблемой отечественного железнодорожного транспорта является создание скоростного пассажирского подвижного состава с системами пассивной безопасности (СПБ) при аварийных столкновениях. С 2016 г. в Украине действует ДСТУ EN 15227:2015 (EN 15227:2008), который эквивалентен европейскому стандарту EN 15227, регламентирующему обязательное наличие СПБ у всех разрабатываемых конструкций пассажирских железнодорожных экипажей. Согласно требованиям EN 15227 системы пассивной безопасности должны обеспечить защиту пассажиров и поездной бригады, сохранность несущих элементов подвижного состава при нормативных сценариях столкновения. В стандарте EN 15227 определены эталонные поезда, четыре сценария столкновения, а также критерии для оценки соответствия разработанных конструкций подвижного состава с СПБ указанным нормативным требованиям. В статье рассматривается сценарий 3, который характеризует столкновение со скоростью 110 км/ч пассажирского поезда на переезде с большим дорожным транспортным средством массой 15 т (например, грузовым автомобилем большой грузоподъемности). В этом сценарии большое дорожное транспортное средство представляет собой свободно стоящее на переезде крупногабаритное деформируемое препятствие (КДП) с заданными геометрическими размерами. При проектировании железнодорожных экипажей с СПБ необходимо с помощью математического моделирования провести анализ динамики столкновения согласно сценарию 3, оценить полученные значения средних продольных ускорений и пластических деформаций в несущих элементах рассматриваемых конструкций по критериям стандарта EN 15227. При этом особое внимание должно быть обращено на корректное моделирование взаимодействия поезда с препятствием. В данной статье рассматривается пассажирский поезд локомотивной тяги. Цель работы – определение силовой характеристики взаимодействия КДП и локомотива с СПБ при столкновении на железнодорожном переезде. Для достижения поставленной цели рассмотрена нелинейная

© М. Б. Соболевська, Д. В. Горобець, 2019

Техн. механіка. – 2019. – № 1.

динамическая контактная задача о столкновении КДП с передней частью локомотива. В качестве крупногабаритного деформируемого препятствия рассмотрена конструкция, состоящая из трех фрагментов (обшивки, сердцевины и нижней части), имеющих разные материалы. Параметры конструкции определены в соответствии с критерием EN 15227 в результате решения задачи о соударении со скоростью 110 км/ч КДП и недеформируемого шара массой 50 т. В качестве кабины машиниста локомотива рассмотрена кабина, разработанная ООО “ПКПП “МДС” для электровоза ЭП20, в конструкцию которого интегрированы элементы СПБ. Каркас кабины машиниста имеет усиленную лобовую стенку, жертвенную зону, зону безопасности для выживания и эвакуации локомотивной бригады. В концевой части рамы кузова локомотива на уровне автосцепного устройства установлены два устройства поглощения энергии (УПЭ). Научной новизной статьи являются разработанные конечно-элементные модели пластического деформирования элементов КДП, УПЭ и каркаса кабины при столкновении согласно сценарию 3. В результате проведенных исследований построена зависимость контактного усилия между КДП и элементами передней части локомотива от продольного перемещения центра масс КДП при столкновении. Предложенный подход, научно-методическое обеспечение и разработанные математические модели могут быть использованы при проектировании отечественного пассажирского тягового подвижного состава с СПБ.

At present, a topical problem for the Ukrainian railway transport is the development of high-speed passenger rail vehicles with passive safety systems (PSSs) to provide safety in emergency collisions. Since 2016, the Ukrainian State Standard DSTU EN 15227:2015 (EN 15227:2008) has been in force in Ukraine. The standard is equivalent to the European Standard EN 15227, according to which PSSs are mandatory for all passenger railway vehicles under development. According to the EN 15227, PSSs shall protect the passengers and the train crew and provide vehicle load-bearing element safety in normative collision scenarios. The Standard EN 15227 specifies reference trains, four collision scenarios, and criteria for assessing the compliance of the designs of PSS-equipped vehicles with the specified normative requirements. This paper considers scenario 3, which characterizes an impact between a passenger train and a large road vehicle of 15 t (for example, a heavy lorry) at a grade crossing at a speed of 110 km/h. The large road vehicle considered in this scenario is a large-size deformable obstacle (LSDO) with given dimensions standing freely at a grade crossing. When designing PSS-equipped railway vehicles, one has to analyze the collision dynamics by scenario 3 using mathematical simulation and to assess the computed average longitudinal accelerations and plastic deformations in the load-bearing elements of the vehicles under consideration by the criteria of the Standard EN 15227. In doing so, particular attention must be paid to the adequacy of simulation of the train–obstacle interaction. In this paper, a locomotive-hauled passenger train is considered. The aim of this work is to determine the force characteristic of an impact between an LSDO and a PSS-equipped locomotive at a grade crossing. To achieve this aim, the nonlinear dynamic contact problem of an impact between a LSDO and the front part of a locomotive was considered. The LSDO was a structure made up of three fragments (a casing, a core part, and a lower part) having different materials. The parameters of the structure were determined according to the Standard EN 15227 from the solution of the problem of an impact between the LSDO and a rigid ball of 50 t. The driver's cabin was the cab developed by MDS Research-and-Development Manufacturing Enterprise for the EP20 electric locomotive with PSS elements integrated therewith. The frame of the driver's cab has a reinforced front wall, a collapse zone, and a safety zone to save the locomotive crew. Two energy-absorbing devices (EADs) are installed in the end part of the locomotive body frame level with the automatic coupler. The paper presents new finite-element models of the plastic deformation of LSDO, EAD, and cab frame elements in a collision by Scenario 3. As a result of this study, the contact force acting between the LSDO and the locomotive front part was obtained as a function of the longitudinal displacement of the LSDO center of mass in a collision. The proposed approach and methodology and the mathematical models developed may be used in the design of home PSS-equipped passenger locomotives.

Ключевые слова: пассажирский поезд; столкновение на переезде; крупногабаритное деформируемое препятствие; система пассивной безопасности; нелинейная динамическая контактная задача; конечно-элементное моделирование.

Введение. В настоящее время актуальной проблемой отечественного железнодорожного транспорта является создание скоростного пассажирского подвижного состава с системами пассивной безопасности (СПБ) при аварийных столкновениях с различными препятствиями. В аварийной ситуации эти системы срабатывают без активного участия машиниста и обеспечивают снижение продольных усилий и ускорений в результате контролируемого пластического деформирования и разрушения входящих в состав СПБ специальных устройств поглощения энергии (УПЭ) и жертвенных зон в концевых частях железнодорожного экипажа.

С 2016 года в Украине действует ДСТУ EN 15227:2015 (EN 15227:2008) [1], который эквивалентен стандарту EN 15227 [2], регламентирующему пассивную безопасность при столкновениях пассажирских поездов в странах ЕС. В конструкциях отечественного и европейского подвижного состава есть существенные отличия, в частности использование в пассажирских поездах локомотивной тяги сцепных устройств различных типов (объединенных и раздельных ударно-тяговых приборов соответственно). В отделе статистической динамики и динамики многомерных механических систем Института технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины разработана концепция пассивной защиты отечественного скоростного пассажирского поезда при столкновениях [3], которая учитывает указанные различия. Согласно данной концепции пассивная безопасность пассажирского тягового подвижного состава и вагонов с объединенными ударно-тяговыми приборами при столкновениях предполагает использование противоподъемных и сдвигаемых автосцепных устройств, устройств поглощения энергии и жертвенных зон в конструкциях экипажей поезда.

В стандарте EN 15227 определены эталонные поезда, четыре сценария столкновения, требования по пассивной безопасности, а также критерии для оценки соответствия разработанных конструкций подвижного состава с СПБ этим требованиям. Требования EN 15227 по пассивной безопасности при столкновениях регламентируют обязательное наличие в конструкциях экипажей пассажирского поезда систем пассивной безопасности, которые должны обеспечить защиту пассажиров и поездной бригады, сохранность несущих элементов подвижного состава при нормативных сценариях столкновения.

При проектировании и экспериментальной отработке железнодорожных экипажей с СПБ, в частности экипажей пассажирского поезда локомотивной тяги, эталонный поезд состоит из локомотива и четырех вагонов.

В данной статье рассматривается сценарий 3 столкновения со скоростью 110 км/ч эталонного поезда на переезде с большим дорожным транспортным средством типа грузового автомобиля большой грузоподъемности. Этот сценарий является базовым при оценке параметров конструкции кабины машиниста. В сценарии 3 большое дорожное транспортное средство представляет собой свободно стоящее на переезде крупногабаритное деформируемое препятствие (КДП) массой 15 т с заданными геометрическими размерами. В стандарте EN 15227 приведен критерий для определения параметров деформируемого препятствия в результате решения задачи о соударении со скоростью 30 м/с КДП и шара массой 50 т. В статье [4] приведены разработанные геометрическая модель КДП в виде конструкции, состоящей из трех фрагментов (обшивки, сердцевины и нижней части), имеющих разные материалы, и конечно-элементная модель пластического деформирования КДП при ударе шаром, а также выбранные в результате решения задачи параметры препятствия, при которых оно соответствует критерию EN 15227.

В стандарте EN 15227 содержатся следующие критерии для оценки соответствия разработанных конструкций подвижного состава с СПБ указанным требованиям по пассивной безопасности. Пространство для выживания пассажиров и поездной бригады должно сохраняться неповрежденным на протяжении всего времени деформирования устройств поглощения энергии. Местные пластические деформации допускаются при условии, что их обла-

сти ограничены, т. е. такие деформации не приводят к уменьшению пространства для выживания (зоны безопасности). Уменьшение пространства выживания не должно превышать 50 мм на каждые 5 м длины кузова, а изменение линейных размеров по диагоналям дверных и оконных проемов – более 1 % от исходных размеров. В кабине машиниста длина такого пространства должна составлять не менее 750 мм. Допускаются пластические деформации отдельных элементов несущей конструкции кузова единицы подвижного состава (ПС), не приводящие к потере кузовом общей несущей способности. Среднее значение продольного ускорения в зонах безопасности не должно превышать $7,5 \text{ g}$ (g – ускорение свободного падения) для сценария 3.

Проверка выполнения указанных критериев может проводиться путем математического моделирования, компонентных, полноразмерных испытаний, или с использованием сочетания указанных теоретических и экспериментальных методов. Математическое моделирование позволяет провести анализ динамики столкновения согласно нормативным сценариям, оценить полученные значения средних продольных ускорений и пластических деформаций в несущих элементах рассматриваемых конструкций по критериям стандарта EN 15227.

При разработке на основе ДСТУ EN 15227:2015 (EN 15227:2008) отечественных экипажей скоростного пассажирского поезда локомотивной тяги может быть использована вышеуказанная концепция пассивной безопасности пассажирского подвижного состава при столкновениях. Для исследования динамики эталонного поездного состава с СПБ при столкновении с КДП на переезде согласно сценарию 3 разработана математическая модель [5]. Эта модель позволяет учесть особенности взаимодействия поезда с препятствием, совместную работу объединенных сдвигаемых ударно-тяговых приборов, противоподъемных устройств, устройств поглощения энергии и конструкций экипажей, а также возможности возникновения пластических деформаций в элементах конструкций УПЭ, локомотива и вагонов. Для оценки выполнения критериев EN 15227 при столкновении эталонного поездного состава с КДП согласно сценарию 3 необходимо определить силовую характеристику взаимодействия крупногабаритного деформируемого препятствия и локомотива с СПБ.

Постановка задачи. Цель работы – определение силовой характеристики взаимодействия крупногабаритного деформируемого препятствия и локомотива с СПБ при столкновении на железнодорожном переезде. Для достижения поставленной цели рассмотрена нелинейная динамическая контактная задача о столкновении со скоростью 110 км/ч КДП массой 15 т с передней частью локомотива. В качестве кабины машиниста локомотива рассмотрена кабина, разработанная ООО “ПКПП “МДС” для электровоза ЭП20, в конструкцию которого интегрированы элементы СПБ. Поскольку интерес представляет процесс пластического деформирования соударяющихся объектов, предполагается, что движется КДП, а кабина машиниста с двумя УПЭ является неподвижной.

Расчетная схема для анализа процесса взаимодействия передней части локомотива с крупногабаритным деформируемым препятствием при столкновении на переезде приведена на рис. 1. Конструкция каркаса кабины [6] включает усиленную лобовую стенку, последовательно расположенные жертвенную зо-

ну и зону безопасности, продольные размеры которых соответственно составляют 893 мм и 1290 мм. Жесткое закрепление имеет задняя стенка каркаса кабины и рама кузова по контуру, показанному пунктиром на рис. 1.



Рис. 1

В передней части рамы кузова локомотива установлены два УПЭ с энергиемостью каждого устройства 0,95 МДж [7]. Конструкция УПЭ состоит из двух блоков, содержащих соты переменной высоты. Блок 1 представляет собой короб в виде параллелепипеда с однослойным сотовым пакетом внутри, который состоит из сот с шестиугольными ячейками. Блок 2 выполнен в виде усеченной пирамиды и состоит из сот с трехугольными ячейками. Конструкция УПЭ с геометрическими размерами в миллиметрах показана на рис. 2.

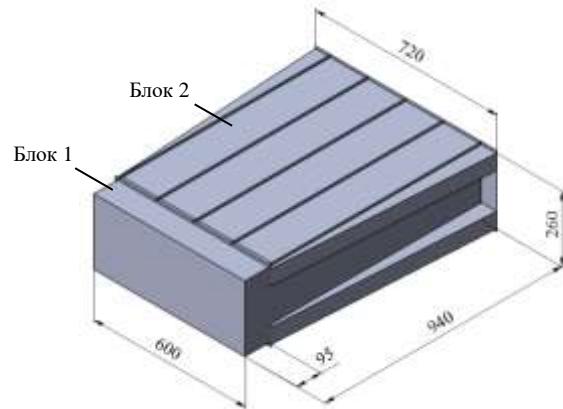


Рис. 2

Конечно-элементное моделирование. Для решения поставленной задачи разработано научно-методическое обеспечение [6]. Оно включает создание трехмерных геометрических моделей соударяющихся конструкций, создание и тестирование конечно-элементной математической модели, описывающей процесс пластического деформирования конструкций при ударе, проведение расчетов, построение зависимости контактной силы от перемещения центра масс КДП при ударе. Конечно-элементная модель рассматриваемого столкновения разработана с учетом нелинейных соотношений между деформациями и перемещениями, а также между напряжениями и деформа-

циями, зависимостями физико-механических свойств материала от скорости удара, переменного контактного взаимодействия между элементами механической системы соударяющихся тел. Для описания упругопластических свойств материалов рассматриваемых конструкций при ударных воздействиях использована инкрементальная модель пластичности в формулировке Крига и Кея [8], основанная на билинейной аппроксимации истинной диаграммы растяжения с учетом кинематического упрочнения. Точка перелома такой двухзвенной кусочно-линейной кривой соответствует динамическому пределу текучести, для вычисления которого используется зависимость Саймонса–Купера [9, 10]. Полученная конечно-элементная модель представляет собой систему дифференциальных уравнений движения при заданной начальной скорости соударения и решается с помощью метода последовательных нагрузений [11]. В результате решения рассматриваемой задачи определяется зависимость контактной силы (интеграла по области контакта от распределенных контактных напряжений) между соударяющимися конструкциями в текущие моменты времени от перемещения центра масс КДП.

При разработке конечно-элементной модели для анализа нелинейного деформирования элементов рассматриваемых конструкций при ударе используются специальные оболочные 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.

Предложен следующий подход к решению поставленной задачи. С целью уменьшения размерности общей конечно-элементной модели “КДП – два УПЭ – каркас кабины машиниста” решение разделено на два этапа. На первом этапе рассмотрена задача взаимодействия КДП с каркасом кабины при столкновении со скоростью 110 км/ч, а на втором этапе – аналогичная задача взаимодействия КДП с двумя УПЭ, закрепленными на раме кузова локомотива. Общее решение является суперпозицией решений, полученных на первом и втором этапах.

Результаты исследований. Рассмотрим первый этап решения задачи. Для определения силовой характеристики взаимодействия КДП и каркаса кабины разработана математическая модель с использованием конечно-элементной схемы, показанной на рис. 3.

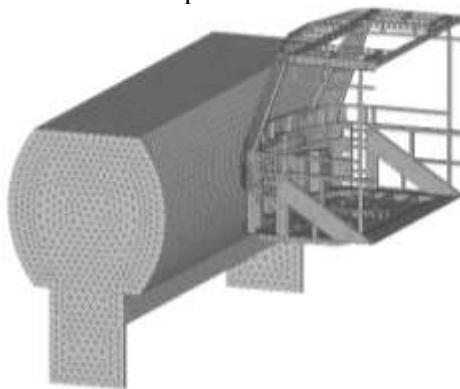


Рис. 3

Разработанная конечно-элементная схема механической системы из двух соударяющихся тел “КДП – каркас кабины машиниста” состоит из 226020 оболочных элементов и 60861 узла.

Деформированное состояние конструкции каркаса кабины при столкновении с КДП в разные моменты времени показаны на рис. 4.

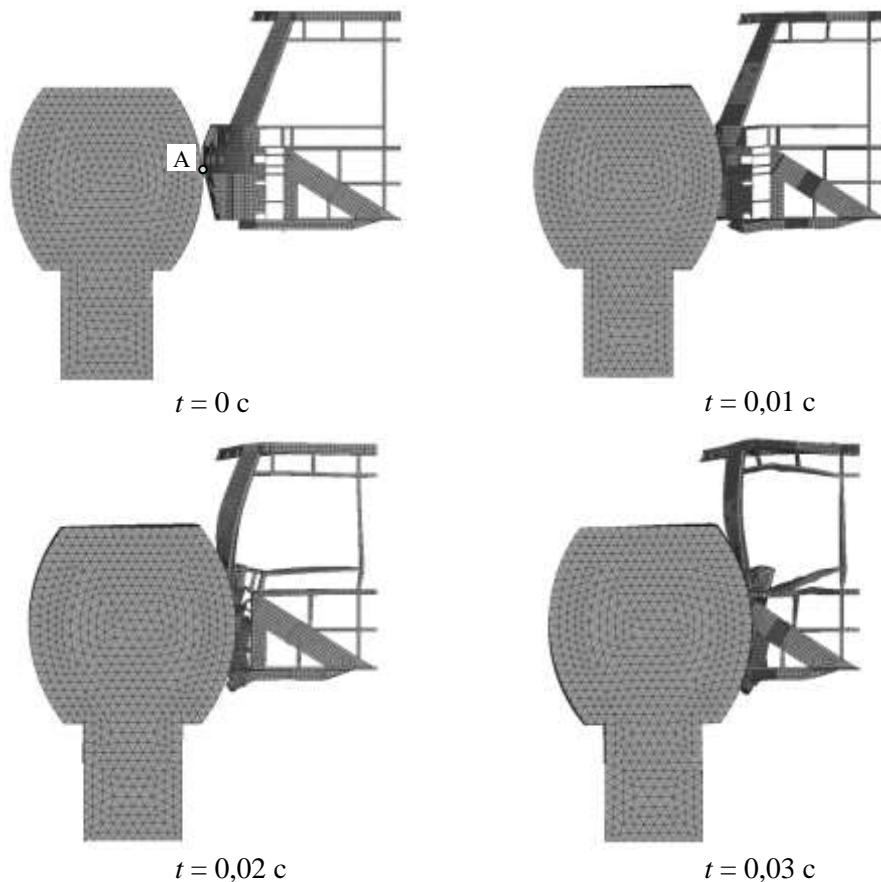


Рис. 4

Диаграмма деформирования, которая характеризует зависимость контактного усилия F от продольного перемещения центра масс КДП x , представлена на рис. 5.

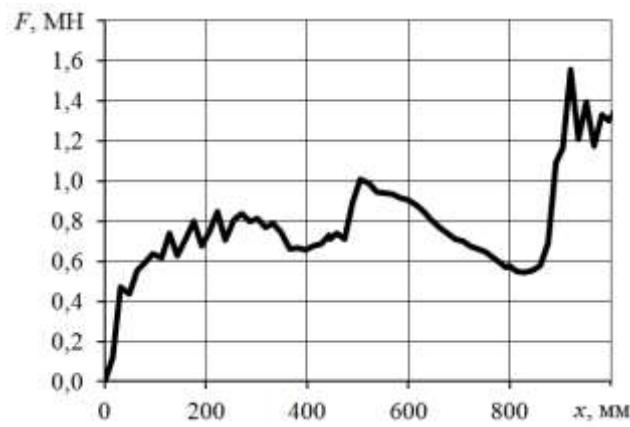


Рис. 5

На рис. 6 показано деформированное состояние каркаса кабины (рис. 6, а)) и КДП (рис. 6, б)) в момент времени $t = 0,03 \text{ с}$.

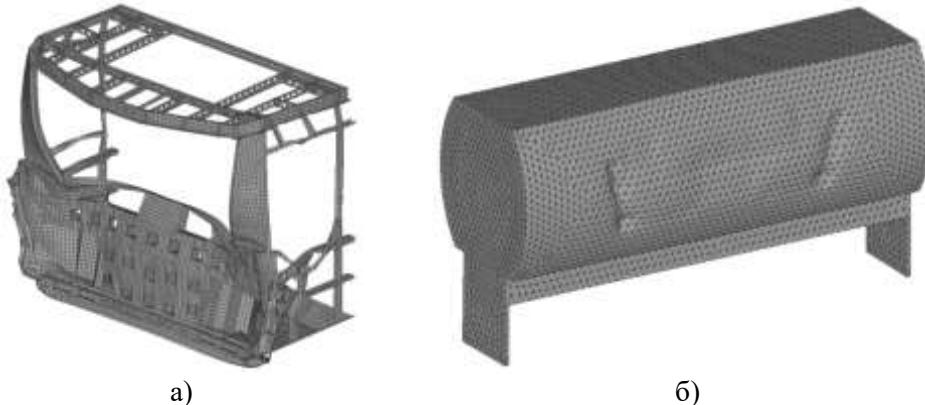


Рис. 6

Анализ результатов расчета показал, что каркас кабины имеет большие деформации, чем КДП. Как видно на рис. 5, в момент времени $t = 0,03$ с при перемещении центра масс КДП на 890 мм контактное усилие резко возрастает, что связано с полной деформацией жертвенной зоны каркаса, выступающей за пределы рамы кузова. При значении контактного усилия между КДП и каркасом 1,09 МН точка А (см. рис. 4), расположенная в продольно-вертикальной плоскости симметрии КДП, получает продольное перемещение 921 мм. Поскольку длина жертвенной зоны каркаса составляет 893 мм, точка А попадает в зону безопасности каркаса, однако при этом в указанной зоне сохраняется пространство длиной 1262 мм при минимальной допускаемой длине 750 мм. В процессе столкновения конструкция КДП получила небольшие деформации (рис. 6, б)), в основном, происходила деформация конструкции каркаса кабины (рис. 6, а)).

Рассмотрим второй этап решения задачи. Ввиду большой размерности системы нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих процесс столкновения КДП и двух УПЭ, рассмотрена возможность замены коробчатых УПЭ их твердотельными аналогами. Для этого решена вспомогательная задача взаимодействия КДП с одним УПЭ при столкновении со скоростью 110 км/ч. Конечно-элементные схемы КДП и УПЭ приведены на рис. 7. Торцевое сечение УПЭ со стороны рамы имеет жесткую заделку.

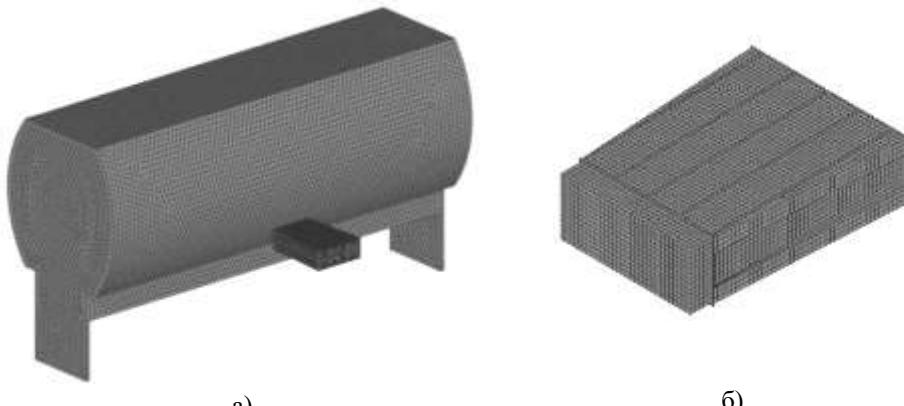


Рис. 7

Как видно на рис. 7, УПЭ расположено таким образом, что его продольно-вертикальная плоскость симметрии совпадает с продольно-вертикальной плоскостью симметрии КДП. При этом вертикальное смещение относительно исходного расположения УПЭ (см. рис. 1) отсутствует. Построенная конечно-элементная схема содержит 468230 оболочечных элементов и 97088 узлов.

Результаты расчета представлены на рис. 8.

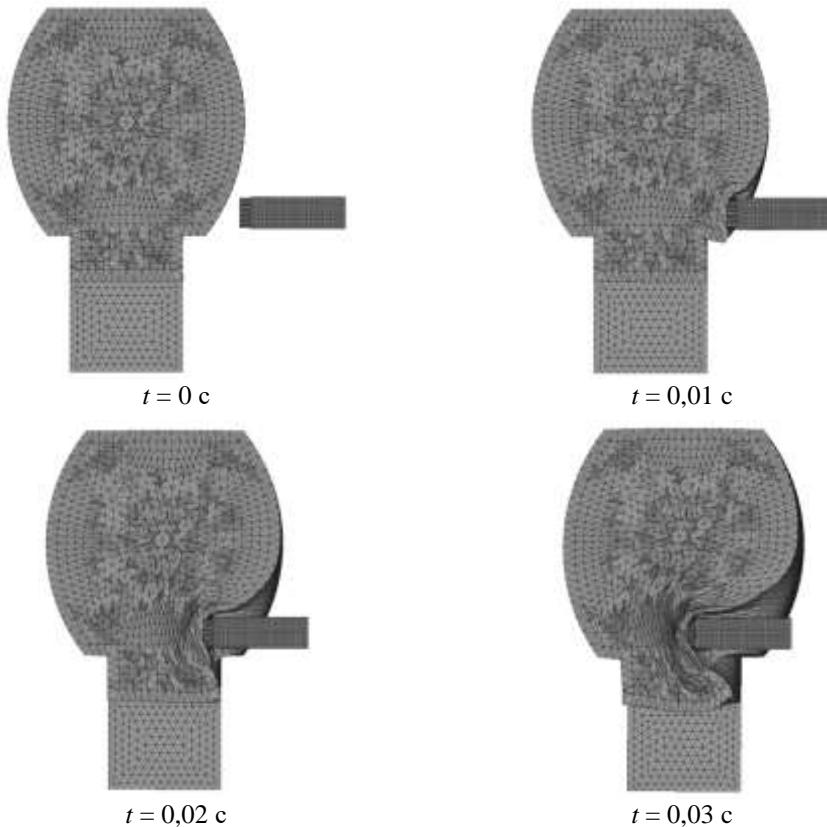


Рис. 8

Установлено, что при столкновении в основном происходила деформация КДП, в то время как незначительные деформации УПЭ наблюдались только в передней части, где расположены соты с шестиугранными ячейками.

Для обоснования возможности использования вместо УПЭ его твердотельного аналога, имеющего те же самые геометрические размеры, рассмотрена задача, аналогичная вышеописанной, но вместо УПЭ, представленного оболочечными конечно-элементами, использован его твердотельный аналог, который моделируется объемными конечно-элементами. На рис. 9 приведены зависимости контактных усилий, полученных в результате решения задачи столкновения со скоростью 110 км/ч КДП с УПЭ и аналогичной задачи столкновения КДП с твердотельным аналогом УПЭ, от перемещений центра масс КДП. На рис. 10, а) показано деформированное состояние КДП при столкновении с УПЭ в момент времени $t = 0,03$ с, а на рис. 10, б) – деформированное состояние КДП при столкновении с его твердотельным аналогом в тот же момент времени. Путем сравнения результатов решения двух рассмотренных задач доказана допустимость замены коробчатого УПЭ его твердотельным аналогом.

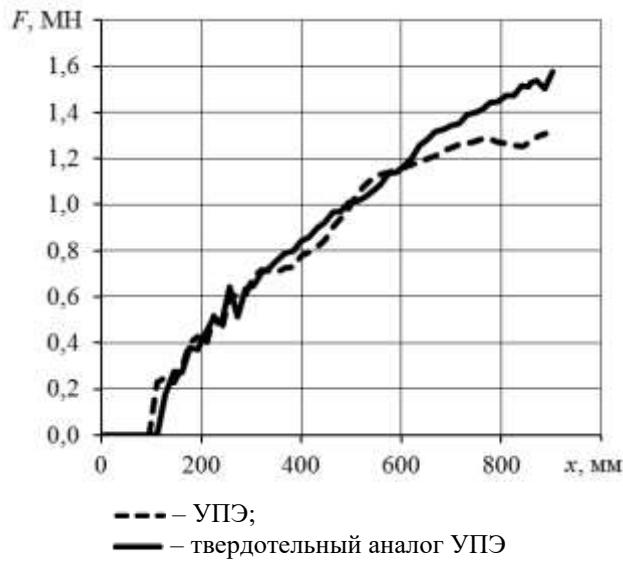


Рис. 9

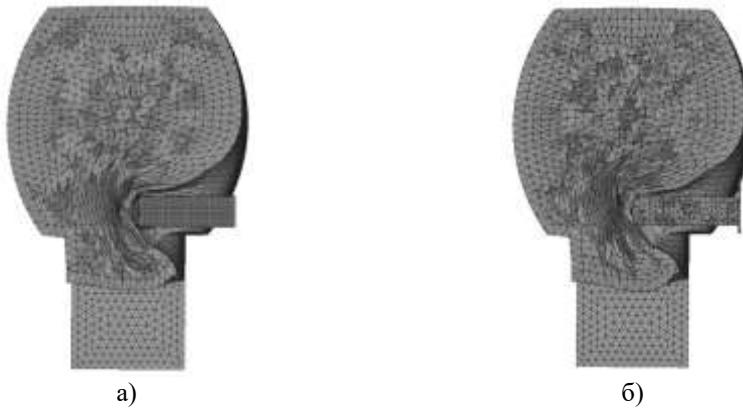
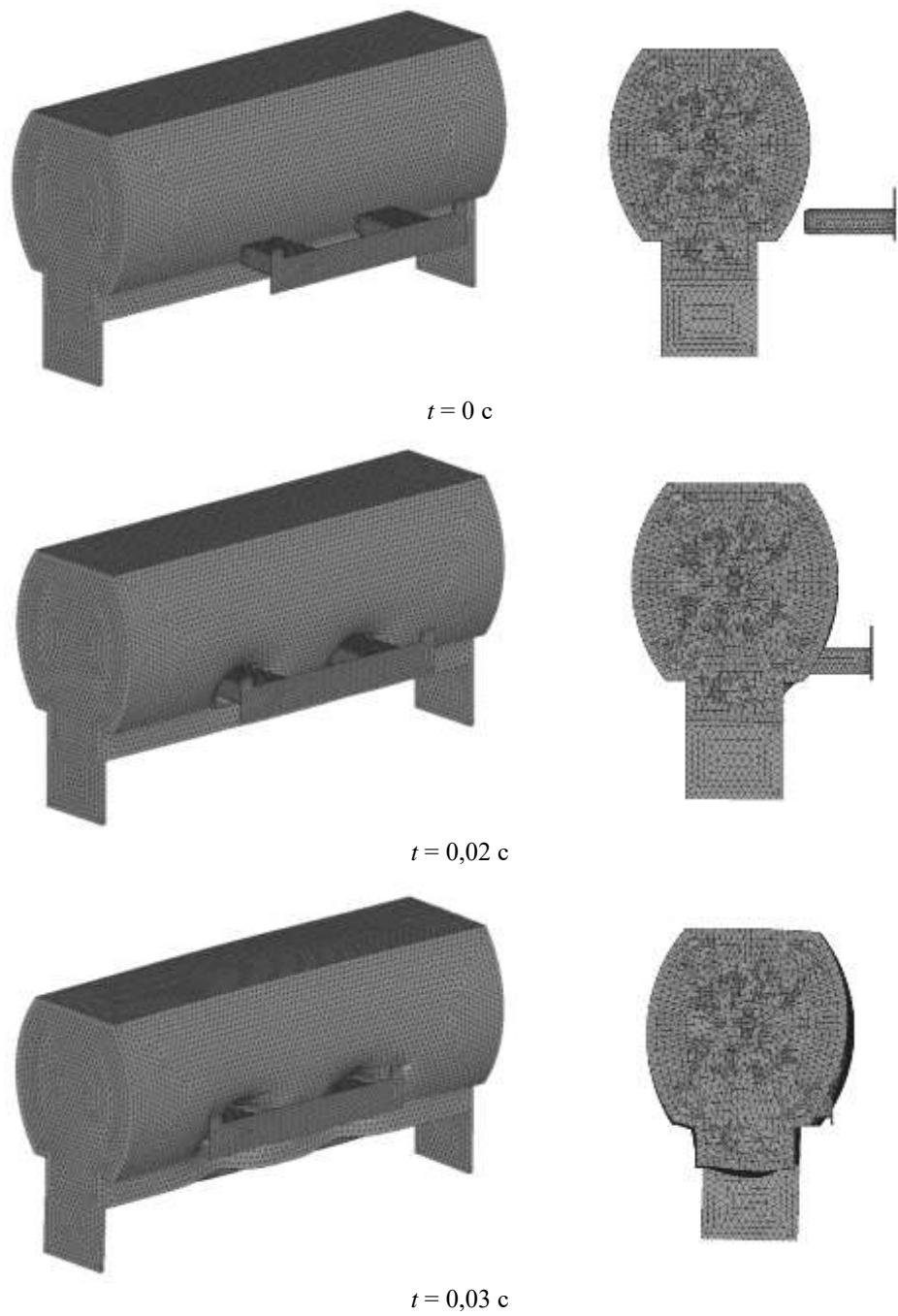


Рис. 10

Разработана конечно-элементная модель для определения силовой характеристики взаимодействия КДП с двумя твердотельными аналогами УПЭ при столкновении со скоростью 110 км/ч. Она построена с использованием объемных и оболочечных конечных элементов. Конечно-элементная схема системы “КДП – два твердотельных аналога УПЭ с контактной поверхностью рамы” составлена из 475000 элементов и содержит 86302 узла. Контактная поверхность рамы имеет жесткую заделку.

Результаты расчета приведены на рис. 11–12. На рис. 11 показаны фрагменты деформации КДП при столкновении с двумя твердотельными аналогами УПЭ в разные моменты времени. На рис. 12 приведена зависимость контактного усилия от перемещения центра масс КДП при столкновении со скоростью 110 км/ч КДП с двумя твердотельными аналогами УПЭ.

С использованием диаграмм, приведенных на рис. 5 и рис. 12, построена зависимость (рис. 13) контактного усилия F между КДП и элементами передней части локомотива от продольного перемещения центра масс КДП при столкновении со скоростью 110 км/ч.



$t = 0,03 \text{ c}$

Рис. 11

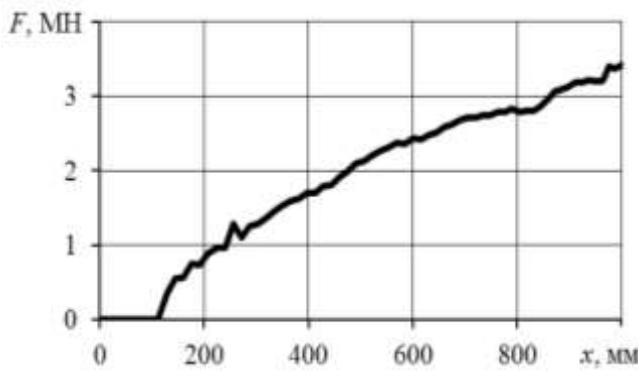


Рис. 12

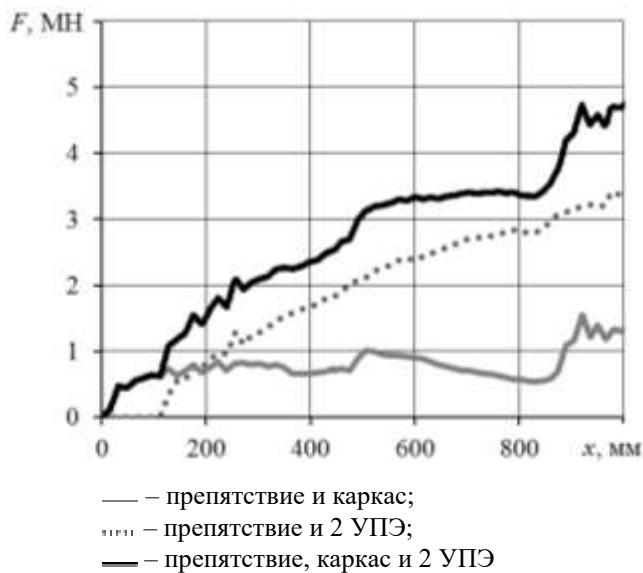


Рис. 13

Выводы. Предложен подход, научно-методическое обеспечение и разработаны конечно-элементные математические модели для решения нелинейной динамической контактной задачи о столкновении со скоростью 110 км/ч локомотива, в конструкцию которого интегрированы элементы системы пассивной безопасности, с крупногабаритным деформируемым препятствием массой 15 т на переезде согласно сценарию 3 стандарта EN 15227. Проведены исследования взаимодействия препятствия с элементами передней части локомотива при столкновении. В результате проведенных исследований построена зависимость контактного усилия между препятствием и элементами передней части локомотива от продольного перемещения центра масс КДП при столкновении. Указанная силовая характеристика может быть использована для оценки выполнения критериев EN 15227 при столкновении эталонного поездного состава с препятствием согласно сценарию 3. Предложенный подход, научно-методическое обеспечение и разработанные математические модели могут быть использованы при проектировании отечественного пассажирского тягового подвижного состава с СПБ.

- ДСТУ EN 15227:2015 (EN 15227:2008+A1:2010, IDT). Залізничний транспорт. Вимоги до ударостійкості рейкових транспортних засобів. URL: http://document.ua/zaliznichnii-transport_-vymogi-do-udarostiinosti-reikovih-tr-std32262.html (Last accessed: 28.01.2019).
- EN 15227. Railway applications – Crashworthiness requirements for railway vehicle bodies. Brussels, 2008. 37 p.
- Соболевская М. Б., Сирота С. А.* Основные положения концепции пассивной защиты скоростного пассажирского поезда при аварийных столкновениях. Техническая механика. 2015. № 1. С. 84–96.
- Соболевская М. Б., Горобец Д. В., Сирота С. А.* Определение характеристик препятствий для нормативных сценариев столкновений пассажирских поездов. Техническая механика. 2018. № 2. С. 90–103.
- Науменко Н. Е., Соболевская М. Б., Горобец Д. В., Маркова О. М., Ковтун Е. Н., Малый В. В., Сирота С. А.* Разработка решений по обеспечению безопасности железнодорожных перевозок и пассивной защите пассажирского поезда при аварийных столкновениях. Техническая механика. 2018. № 3. С. 98–111.
- 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.
- Науменко Н. Е., Соболевская М. Б., Горобец Д. В., Богомаз Е. Г.* Разработка элементов пассивной защиты скоростных пассажирских локомотивов нового поколения при аварийных столкновениях на железных дорогах колен 1520 мм. Техническая механика. 2017. № 1. С. 72–82.
- Krieg R. D., Key S. W.* Implementation of a time independent plasticity theory into structural computer programs. Vol. 20 of Constitutive equations in viscoplasticity: computational and engineering aspects. New York: ASME, 1976. P. 125–137.
- Саймондс П. С.* Динамика неупругих конструкций. М.: Мир, 1982. 224 с.
- Cowper G. R., Symonds P. S.* Strain Hardening and Strain Rate Effects in the Impact Loading of Cantilever Beams. Providence: Brown University, 1958. P. 46.
- Оден Д.* Конечные элементы в механике сплошных сред. М.: Мир, 1976. 464 с.

Получено 08.02.2019,
в окончательном варианте 01.03.2019