УДК 629.4:62-758.2

Н. Е. НАУМЕНКО, М. Б. СОБОЛЕВСКАЯ

ОЦЕНКА ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЖЕННОСТИ ЭКИПАЖЕЙ ПОЕЗДА С ЭЛЕМЕНТАМИ СИСТЕМЫ ПАССИВНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ СТОЛКНОВЕНИИ С ПРЕПЯТСТВИЕМ

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

Актуальною проблемою вітчизняного залізничного транспорту є заміна морально і фізично застарілих пасажирських поїздів локомотивної тяги новими швидкісними поїздами з ефективними засобами активного захисту і системами пасивної безпеки (СПБ) при аварійних зіткненнях з різними перешкодами. СПБ призначено для захисту пасажирів і персоналу поїзда, збереження несучих конструкцій залізничних екіпажів, скорочення витрат на ліквідацію наслідків зіткнень. В аварійній ситуації в результаті контрольованого пластичного деформування елементів СПБ відбувається поглинання кінетичної енергії удару, зниження поздовжніх зусиль в міжвагонних з’єднаннях і прискорень екіпажів. Пасивну безпеку при зіткненнях пасажирських поїздів в країнах ЕС регламентує стандарт EN 15227, який в 2016 р. був введений в дію в Україні як ДСТУ EN 15227:2015. У ньому визначено еталонні поїзди, чотири сценарії зіткнення, вимоги з пасивної безпеки і критерії для оцінки відповідності розроблених конструкцій рухомого складу цим вимогам. У статті розглядається сценарій 3, який характеризує зіткнення зі швидкістю 110 км/год пасажирського поїзда з великим дорожнім транспортним засобом масою 15 т, що представляє собою великогабаритну перешкоду, яка вільно стоїть на переїзді та може деформуватися (ВДП). Мета роботи – оцінка динамічної навантаженості екіпажів пасажирського поїзда локомотивної тяги, обладнаних СПБ, при зіткненні з ВДП згідно зі сценарієм 3. Науковою новизною статті є удосконалена математична модель для розв’язання нелінійної динамічної задачі про зіткнення еталонного поїзда з ВДП на переїзді з урахуванням роботи поглинаючих апаратів автозчепних пристроїв, можливості зсуву об’єднаних ударно-тягових пристроїв у підвагонний простір, пластичного деформування пристроїв поглинання енергії (ППЕ), можливості виникнення пластичних деформацій в конструкціях локомотивів і вагонів, а також взаємодії ВДП і елементів передньої частини локомотива. Вказана математична модель дозволяє отримати середні значення прискорень екіпажів і пластичних деформацій їх конструкцій для порівняння з допустимими значеннями. В результаті проведених досліджень встановлено, що вимоги стандарту ДСТУ EN 15227:2015 для сценарію 3 виконуються, якщо локомотив масою 123 т має в передній частині каркаса кабіни жертовну зону енергоємністю 0,3 МДж і обладнаний з двох сторін двома ППЕ з енергоємністю кожного 0,95 МДж, а пасажирські вагони масою 64 т обладнані з двох боків двома ППЕ з енергоємністю кожного 0,3 МДж. Запропонована математична модель і результати виконаних досліджень можуть бути використані при проектуванні залізничних екіпажів вітчизняного пасажирського поїзда локомотивної тяги з урахуванням вимог ДСТУ EN 15227:2015.

Актуальной проблемой отечественного железнодорожного транспорта является замена морально и физически устаревших пассажирских поездов локомотивной тяги новыми скоростными поездами с эффективными средствами активной защиты и системами пассивной безопасности (СПБ) при аварийных столкновениях с различными препятствиями. СПБ предназначены для защиты пассажиров и персонала поезда, сохранения несущих конструкций железнодорожных экипажей, сокращения затрат на ликвидацию последствий столкновений. В аварийной ситуации в результате контролируемого пластического деформирования элементов СПБ происходит поглощение кинетической энергии удара, снижение продольных усилий в межвагонных соединениях и ускорений экипажей. Пассивную безопасность при столкновениях пассажирских поездов в странах ЕС регламентирует стандарт EN 15227, который в 2016 г. введен в действие в Украине как ДСТУ EN 15227:2015. В нем определены эталонные поезда, четыре сценария столкновения, требования по пассивной безопасности и критерии для оценки соответствия разработанных конструкций подвижного состава этим требованиям. В статье рассматривается сценарий 3, который характеризует столкновение со скоростью 110 км/ч пассажирского поезда с большим дорожным транспортным средством массой 15 т, представляющим собой свободно стоящее на переезде крупногабаритное деформируемое препятствие (КДП). Цель работы – оценка динамической нагруженности экипажей пассажирского поезда локомотивной тяги, оборудованных СПБ, при столкновении с КДП согласно сценарию 3. Научной новизной статьи является усовершенствованная математическая модель для решения нелинейной динамической задачи о столкновении эталонного поезда с КДП на переезде с учетом работы поглощающих аппаратов автосцепных устройств, возможности сдвига объединенных ударно-тяговых устройств в подвагонное пространство, пластического деформирования устройств поглощения энергии (УПЭ), возможности возникновения пластических деформаций в конструкциях локомотивов и вагонов, а также взаимодействия КДП и элементов передней части локомотива. Указанная математическая модель позволяет получить средние значения ускорений экипажей и пластических деформаций их конструкций для сравнения с допускаемыми значениями. В результате проведенных исследований установлено, что требования стандарта ДСТУ EN 15227:2015 для сценария 3 выполняются, если локомотив массой 123 т имеет в передней части каркаса кабины жертвенную зону энергоемкостью 0,3 МДж и оборудован с двух сторон двумя УПЭ с энергоемкостью каждого 0,95 МДж, а пассажирские вагоны массой 64 т оборудованы с двух сторон двумя УПЭ с энергоемкостью каждого 0,3 МДж. Предложенная математическая модель и результаты выполненных исследований могут быть использованы при проектировании железнодорожных экипажей отечественного пассажирского поезда локомотивной тяги с учетом требований ДСТУ EN 15227:2015.

A topical problem for the Ukrainian railway transport is replacement of obsolete and outdated locomotive-hauled passenger trains with new high-speed trains equipped with active protection means and passive safety systems (PSSs) to provide safety in emergency collisions with various obstacles. PSSs serve to protect the passengers and the train crew, provide vehicle load-bearing structure safety, and reduce the cost of recovery work. In an emergency collision, the controlled plastic deformation of the PSS elements absorbs the kinetic energy of the impact and reduces the longitudinal forces in the intercar couplers and the car accelerations. In the EU countries, the passive safety of passenger trains in collisions is regulated by the European Standard EN 15227, which since 2016 has been in force in Ukraine as the Ukrainian State Standard DSTU EN 15227:2015. The Standard EN 15227 specifies reference trains, four collision scenarios, passive safety requirements, and criteria for assessing the compliance of the designs of PSS-equipped vehicles with the specified requirements. This paper considers Scenario 3, which characterizes an impact between a passenger train moving at a speed of 110 km/h and a large road vehicle of 15 t, which is a large-size deformable obstacle (LSDO) standing freely at a grade crossing. The aim of this work is to estimate dynamic loads on the PSS-equipped vehicles of a locomotive-hauled passenger train in a collision with an LSDO at a grade crossing. The paper presents a new refined mathematical model for the solution of the nonlinear dynamic problem of a reference train – LSDO collision at a grade crossing with account for the operation of the center coupler draft gears, the possibility of the draw-buffing gears shifting into the undercar space, the plastic deformation of energy-absorbing devices, the possibility of plastic deformations in the locomotive and car structures, and the interaction of the LSDO with the front part of the locomotive. The model gives the average values of the vehicle accelerations and plastic deformations to compare them with their permissible values. As shown by the studies conducted, the DSTU EN 15227:2015 requirements are met if a 123 t locomotive has a collapse zone of capacity 0.3 MJ in the front part of the cab frame and is equipped on both sides with two energy absorbing devices of capacity 0.95 MJ each, and 64 t passenger cars are equipped on both sides with two energy-absorbing devices of capacity 0.3 MJ each. The proposed mathematical model and the results obtained may be used in the design of home railway vehicles for locomotive-hauled passenger trains according to the DSTU EN 15227:2015 requirements.

Ключевые слова: *пассажирский поезд, столкновение на переезде, крупногабаритное деформируемое препятствие, система пассивной безопасности.*

Введение. Актуальной проблемой отечественного железнодорожного транспорта является обновление морально и физически устаревшего пассажирского подвижного состава, создание нового поколения скоростных пассажирских поездов локомотивной тяги, в конструкции которых интегрированы эффективные средства активной защиты и системы пассивной безопасности (СПБ) при аварийных столкновениях с препятствиями на железнодорожном пути. Эти системы предназначены для защиты пассажиров и персонала поезда, сохранения несущих конструкций железнодорожных экипажей, сокращения затрат на ликвидацию последствий столкновений. В аварийной ситуации в результате контролируемого пластического деформирования элементов СПБ происходит поглощение кинетической энергии удара, снижение продольных усилий в межвагонных соединениях и ускорений экипажей.

Пассивную безопасность при столкновениях пассажирских поездов в странах ЕС регламентирует стандарт EN 15227 [1], который в 2016 г. введен в действие в Украине как ДСТУ EN 15227:2015 [2]. В нем определены эталонные поезда, нормативные сценарии столкновений, требования по пассивной безопасности и критерии для оценки соответствия разработанных конструкций подвижного состава с СПБ этим требованиям. Проверка выполнения критериев ДСТУ EN 15227:2015 проводится путем математического моделирования динамики столкновений эталонного поезда с препятствиями согласно нормативным сценариям столкновений и сравнения полученных средних значений продольных ускорений и пластических деформаций в несущих элементах проектируемых конструкций с допускаемыми значениями.

При проектировании с использованием ДСТУ EN 15227:2015 отечественных экипажей скоростного пассажирского поезда локомотивной тяги может быть использована разработанная в отделе статистической динамики и динамики многомерных механических систем Института технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины концепция пассивной защиты отечественного скоростного пассажирского поезда при столкновениях [3], которая учитывает существенные отличия в межвагонных соединениях отечественного и европейского подвижного состава. Согласно данной концепции пассивная безопасность отечественных пассажирских экипажей с объединенными ударно-тяговыми приборами предполагает использование сдвигаемых автосцепных устройств, противоподъемных устройств, устройств поглощения энергии (УПЭ) и организацию жертвенных зон в концевых частях локомотивов. Разработана математическая модель, которая описывает процесс лобового столкновения двух идентичных скоростных пассажирских поездов локомотивной тяги на прямолинейном участке пути с учетом работы сдвигаемых автосцепных устройств при эксплуатационных и аварийных воздействиях, работы элементов СПБ локомотива и вагонов, возможности возникновения пластических деформаций в конструкциях экипажей поезда [4 – 5]. Указанная математическая модель использована для анализа столкновения со скоростью 36 км/ч идентичных поездов (сценарий 1) и для исследования столкновения со скоростью 36 км/ч эталонного поезда с грузовым вагоном массой 80 т (сценарий 2) [6]. В статье [6] приведены результаты исследования динамической нагруженности экипажей пассажирского эталонного поезда, составленного из локомотива (массой 90 т или 123 т) и четырех вагонов (массами 50 т или 64 т), оборудованных сзади и спереди двумя УПЭ соответствующей энергоемкости, при столкновениях согласно сценариям 1 и 2. Проведенные исследования показали, что требования стандарта ДСТУ EN 15227:2015 и разработанной концепции пассивной безопасности пассажирского подвижного состава железных дорог колеи 1520 мм для рассмотренных сценариев столкновения выполняются при оборудовании локомотивов массой 90 т и 123 т УПЭ с энергоемкостью 0,95 МДж и вагонов массой 50 т УПЭ с энергоемкостью 0,25 МДж, вагонов массой 64 т УПЭ с энергоемкостью 0,3 МДж. На основе полученных результатов разработаны конструкции УПЭ для пассивной защиты пассажирских локомотивов [7] и прицепных вагонов [8] нового поколения при аварийных столкновениях на железных дорогах колеи 1520 мм.

В данной статье рассматривается сценарий 3 стандарта ДСТУ EN 15227:2015, который характеризует столкновение со скоростью 110 км/ч эталонного поезда с большим дорожным транспортным средством, представляющим собой свободно стоящее на переезде крупногабаритное деформируемое препятствие (КДП) массой 15 т. В статье [9] приведены разработанная геометрическая модель КДП и выбранные в результате конечно-элементного моделирования пластического деформирования КДП при ударе параметры препятствия, при которых оно соответствует стандарту ДСТУ EN 15227:2015.

Постановка задачи. Цель работы – оценка динамической нагруженности экипажей скоростного пассажирского поезда локомотивной тяги, оборудованных СПБ, при столкновении с КДП согласно сценарию 3 ДСТУ EN 15227:2015. Рассматривается эталонный поезд локомотивной тяги, который состоит из локомотива массой 123 т и четырёх прицепных вагонов массой 64 т. Все экипажи поезда оборудованы СПБ, в состав которых входят УПЭ разной энергоемкости. В концевых частях рамы кузова рассматриваемого локомотива установлены по два УПЭ с энергоемкостью каждого по 0,95 МДж [7]. Конструкция УПЭ состоит из двух блоков, содержащих шестигранные и трехгранные соты переменной высоты. В качестве кабины машиниста использованы разработанная совместно с ООО “ПКПП “МДС” кабина, каркас которой включает усиленную лобовую стенку, последовательно расположенные жертвенную зону с энергоемкостью 0,3 МДж и зону безопасности [10]. В концевых частях рам кузовов прицепных вагонов с каждой стороны расположены по два УПЭ с энергоемкостью каждого по 0,3 МДж [8]. Конструкция УПЭ представляет собой короб в виде параллелепипеда, содержащий четырехслойный блок сот с шестигранными ячейками [8]. Расчетная силовая характеристика взаимодействия крупногабаритного деформируемого препятствия и локомотива с СПБ при столкновении на железнодорожном переезде приведена в статье [11].

Расчетная схема столкновения со скоростью 110 км/ч эталонного поезда с крупногабаритным деформируемым препятствием массой 15 т на переезде приведена на рис. 1.

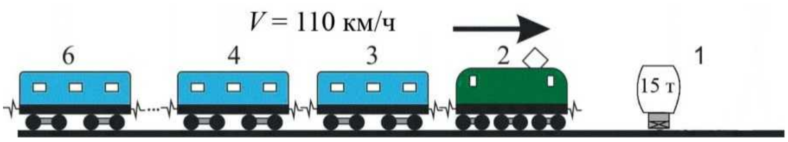

Рис. 1

Согласно критериям стандарта ДСТУ EN 15227:2015 при столкновениях, соответствующих принятым нормативным сценариям, пространство для выживания пассажиров и поездной бригады должно сохраняться неповрежденным на протяжении всего времени деформирования устройств поглощения энергии. Локальные пластические деформации допускаются при условии, что они 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, не приводящие к потере кузовом общей несущей способности. Среднее значение продольного ускорения в зонах безопасности не должно превышать 7,5 g (g – ускорение свободного падения) для сценария 3.

Математическое моделирование. Усовершенствована математическая модель и доработаны программные модули для решения нелинейной динамической задачи о столкновении эталонного пассажирского поезда с КДП на переезде согласно сценарию 3 стандарта ДСТУ EN 15227:2015. Эталонный поезд рассматривается как цепочка твердых тел, соединенных между собой существенно нелинейными деформируемыми элементами. Силовая характеристика межвагонного соединения учитывает работу поглощающих аппаратов автосцепных устройств, возможность сдвига объединенных ударно-тяговых устройств в подвагонное пространство, пластическое деформирование устройств поглощения энергии, возможность возникновения пластических деформаций в конструкциях локомотивов и вагонов, а также взаимодействие КДП и элементов передней части локомотива. Усовершенствованная математическая модель позволяет получить средние значения ускорений экипажей и пластических деформаций их конструкций для сравнения с допускаемыми значениями.

Расчетные зависимости контактного усилия F между КДП и элементами передней части локомотива от продольного перемещения центра масс КДП при столкновении со скоростью 110 км/ч на железнодорожном переезде [11] приведены на рис. 2.

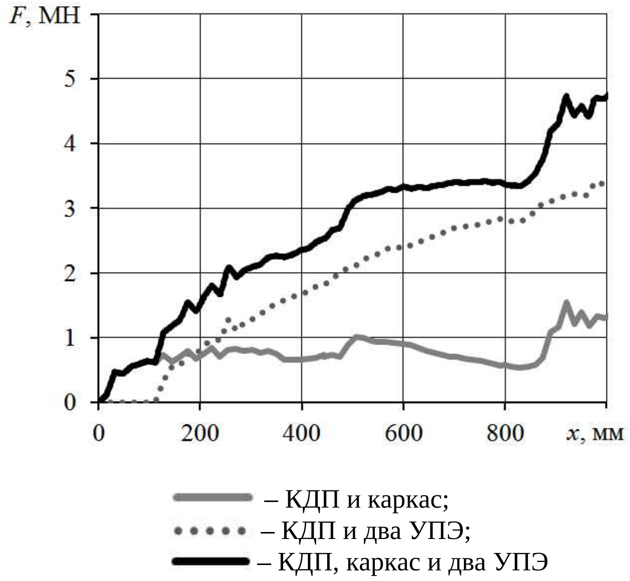

Рис. 2

Для проведения расчетов столкновения эталонного поезда с КДП на переезде выполнена кусочно-линейная аппроксимация полученных силовых характеристик. Характеристики взаимодействия КДП с жертвенной зоной каркаса кабины машиниста, КДП с двумя УПЭ, КДП с жертвенной зоной кабины машиниста и двумя УПЭ приведены соответственно на рис. 3 – рис. 5.

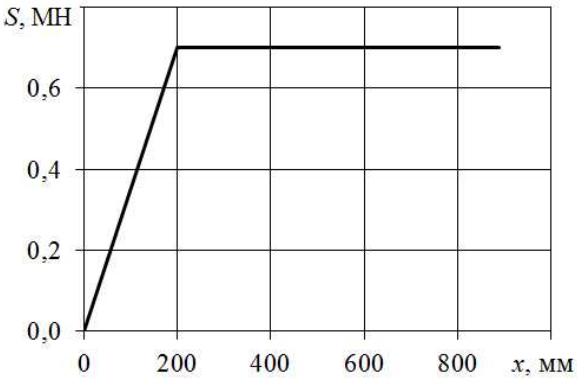

Рис. 3

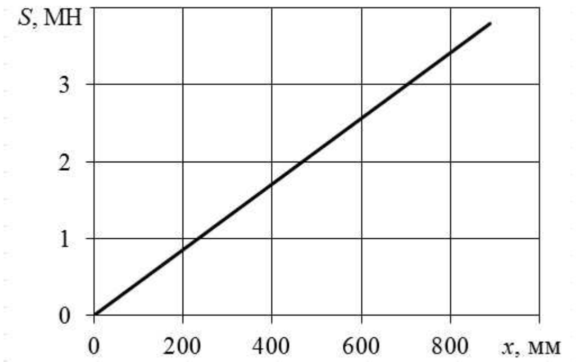

Рис. 4

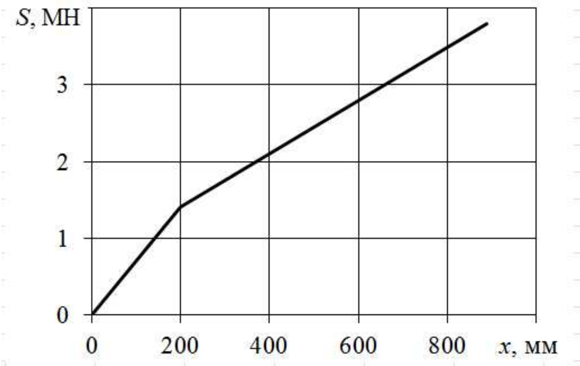

Рис. 5

Результаты исследований. Вначале дана оценка динамической нагруженности экипажей эталонного поезда при столкновении с жесткой преградой со скоростью 110 км/ч. Рассмотрены следующие варианты:

– вариант 1 – локомотив имеет в передней части каркаса кабины жертвенную зону с энергоемкостью 0,3 МДж;

– вариант 2 – локомотив оборудован с двух сторон двумя УПЭ с энергоемкостью каждого по 0,95 МДж;

– вариант 3 – локомотив имеет в передней части каркаса кабины жертвенную зону энергоемкостью 0,3 МДж и оборудован с двух сторон двумя УПЭ с энергоемкостью каждого по 0,95 МДж.

Результаты расчетов аварийного столкновения эталонного поезда с жесткой преградой на переезде для указанных вариантов приведены в табл. 1.

Как видно из приведенных результатов, для варианта 1 сила, действующая на локомотив при столкновении, составляет 12,3 МН, продольное ускорение – 9,7 g, абсолютное значение продольной остаточной деформации конструкции локомотива – 0,52 м.

Для варианта 2 максимальное значение сжимающего усилия, действующего на конструкцию локомотива, составляет 10,4 МН, ускорение локомотива – 8,1 g, абсолютное значение продольной остаточной деформации конструкции локомотива – 0,40 м.

Для варианта 3 максимальное значение сжимающего усилия, действующего на конструкцию локомотива, равно 10,3 МН, ускорение локомотива составляет 8,0 g и абсолютное значение продольной остаточной деформации его конструкции – 0,39 м.

Таблица 1

Номер экипажа, i	Максимальные значения сжимающих продольных усилий, действующих на экипажи эталонного поезда и преграду, и максимальных ускорений экипажей и преграды для вариантов расчета					
	вариант 1		вариант 2		вариант 3	
	S_i, МН	$\ddot{x}_i$, g	S_i, МН	$\ddot{x}_i$, g	S_i, МН	$\ddot{x}_i$, g
1	0,00	82,00	0,00	69,00	0,00	69,00
2	12,30	9,70	10,4	8,00	10,30	8,10
3	2,00	3,10	2,00	3,10	2,00	3,10
4	2,00	2,70	2,00	2,60	2,00	2,60
5	1,57	1,60	1,40	1,40	1,40	1,40
6	1,14	1,80	1,00	1,60	1,04	1,60

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

Выполнено моделирование столкновения со скоростью 110 км/ч эталонного поезда с КДП на переезде. Результаты расчета аварийного столкновения для варианта 1 с учетом характеристики (рис. 3) взаимодействия КДП и жертвенной зоны каркаса кабины машиниста приведены в табл. 2.

Таблица 2

Номер экипажа, i	Максимальные значения сжимающих продольных усилий, действующих на экипажи эталонного поезда и преграду, и максимальных ускорений экипажей и преграды	
	S_i, МН	$\ddot{x}_i$, g
1	0,00	80,0
2	12,10	9,60
3	2,00	3,10
4	2,00	2,60
5	1,54	1,60
6	1,12	1,80

Примечание: i = 1 соответствует КДП, S_i – значение максимального усилия в i-ом межвагонном соединении эталонного поезда, $\ddot{x}_i$ – ускорение i-го экипажа

Абсолютное значение продольной остаточной деформации конструкции локомотива составляет 0,51 м.

Результаты расчета столкновения для варианта 2 с учетом характеристики (рис. 4) взаимодействия КДП и двух УПЭ с энергоемкостью 0,95 МДж каждый приведены в табл. 3. Абсолютное значение продольной остаточной деформации конструкции локомотива составляет 0,46 м.

Результаты расчета столкновения для варианта 3 с учетом характеристики (рис. 5) взаимодействия КДП с жертвенной зоной каркаса кабины машиниста и 2-мя УПЭ приведены в табл. 4. Абсолютное значение продольной остаточной деформации конструкции локомотива составляет 0,43 м.

Таблица 3

Номер экипажа, i	Максимальные значения сжимающих продольных усилий, действующих на экипажи эталонного поезда и преграду, и максимальных ускорений экипажей и преграды	
	S_i, МН	$\ddot{x}_i$, g
1	0,00	76,0
2	11,40	8,90
3	2,00	3,10
4	2,00	2,60
5	1,50	1,50
6	1,10	1,70
Примечание: i = 1 соответствует КДП, S_i – значение максимального усилия в i-ом межвагонном соединении эталонного поезда, $\ddot{x}_i$ – ускорение i-го экипажа		

Таблица 4

Номер экипажа, i	Максимальные значения сжимающих продольных усилий, действующих на экипажи эталонного поезда и преграду, и максимальных ускорений экипажей и преграды	
	S_i, МН	$\ddot{x}_i$, g
1	0,00	72,0
2	10,80	8,50
3	2,00	3,10
4	2,00	2,60
5	1,46	1,50
6	1,10	1,70
Примечание: i = 1 соответствует КДП, S_i – значение максимального усилия в i-ом межвагонном соединении эталонного поезда, $\ddot{x}_i$ – ускорение i-го экипажа		

Средние значения ускорений локомотива при столкновении с КДП для рассмотренных вариантов соответственно составляют:

– для варианта 1 – 4,75 g;
– для варианта 2 – 4,72 g;
– для варианта 3 – 4,65 g.

Средние значения сжимающих продольных усилий, действующих на конструкцию локомотива при столкновении эталонного поезда с КДП на переезде, составляют:

– для варианта 1 – 6,1 МН;
– для варианта 2 – 6,1 МН;
– для варианта 3 – 6 МН.

Для варианта 3 на рис. 6 приведены графики изменения во времени усилия, действующего на конструкцию локомотива со стороны КДП. Изменения во времени усилия, возникающего в соединении локомотива и следующего за ним вагона, а также усилия в следующем межвагонном соединении (между первым и вторым пассажирскими вагонами эталонного поезда) показаны соответственно на рис. 7 и рис. 8.

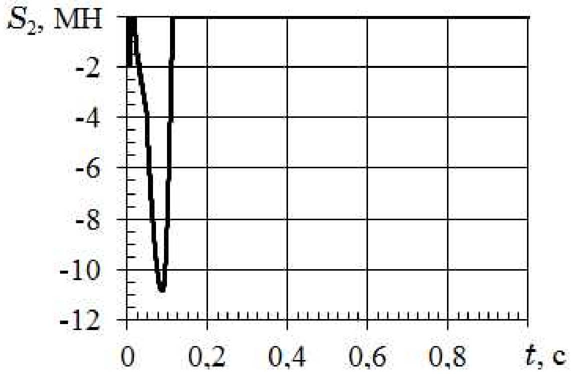

Рис. 6

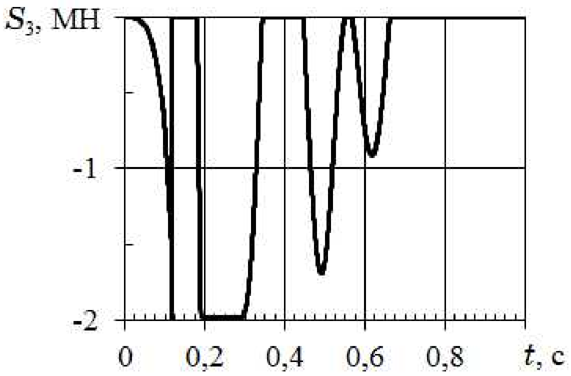

Рис. 7

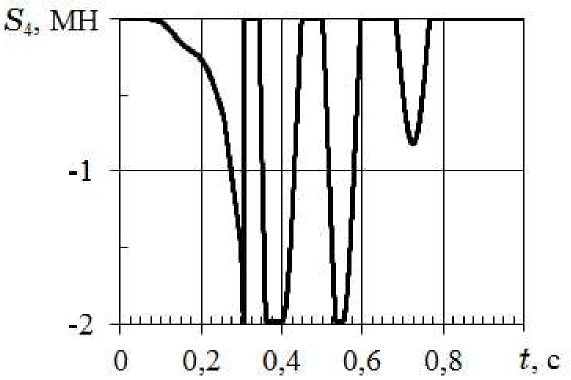

Рис. 8

Графики изменения во времени ускорений локомотива и следующего за ним вагона приведены на рис. 9 и рис. 10. Изменение абсолютной пластической продольной деформации конструкции локомотива дано на рис. 11.

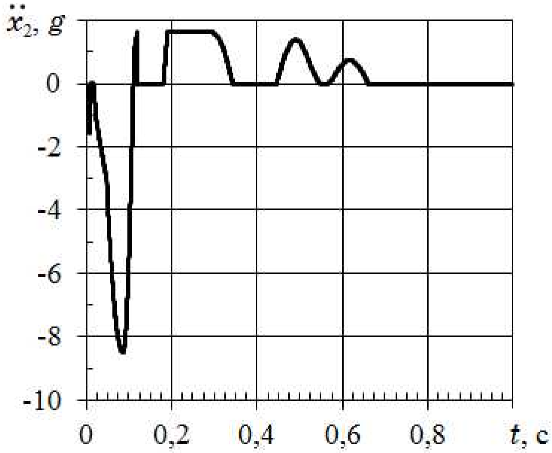

Рис. 9

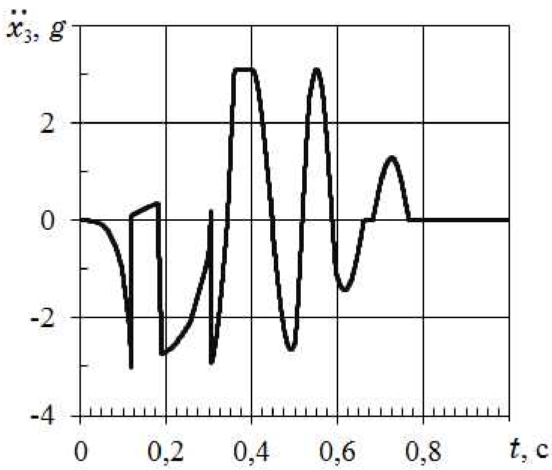

Рис. 10

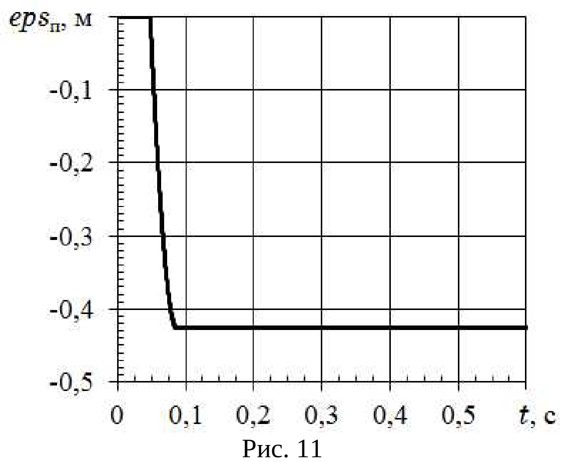

Рис. 11

Анализ полученных результатов показал, что во всех рассмотренных вариантах в результате взаимодействия эталонного поезда с КДП на конструкцию локомотива действуют значительные локальные продольные усилия и ускорения на промежутке времени, составляющем порядка 0,06 с. При этом в конструкции локомотива возникают значительные локальные продольные остаточные деформации. Средние значения усилий и ускорений составляют величины порядка 6 МН и 4,7 g соответственно. Расположение кабины машиниста локомотива и КДП при столкновении на переезде показано на рис. 12.

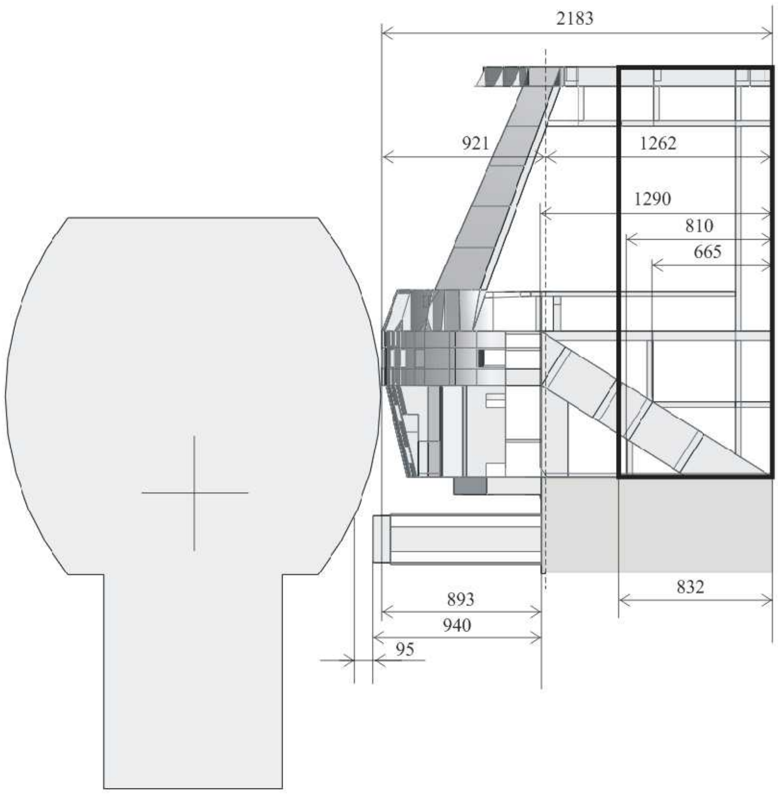

Рис. 12

На рис. 12 все размеры даны в миллиметрах. Жирным черным контуром отмечено пространство, оставшееся в зоне безопасности после разрушения жертвенной зоны. В результате столкновения эталонного поездного состава с КДП на переезде длина зоны безопасности в кабине машиниста уменьшается до 832 мм. Это значение превышает минимально допускаемое значение 750 мм согласно требованиям стандарта ДСТУ EN 15227:2015. На конструкции пассажирских вагонов, входящих в состав эталонного поезда, действуют усилия, значения которых не превышают допускаемых, составляющих 3 МН. Значения средних значений ускорений вагонов меньше допускаемого значения 7,5 g .

Таким образом, требования стандарта ДСТУ EN 15227:2015 для сценария 3 столкновения эталонного поездного состава с крупногабаритным препятствием на переезде выполняются, если локомотив массой 123 т имеет в передней части каркаса кабины жертвенную зону энергоемкостью 0,3 МДж и оборудован с двух сторон двумя УПЭ с энергоемкостью каждого по 0,95 МДж, а четыре пассажирских вагона массой 64 т оборудованы с двух сторон двумя УПЭ с энергоемкостью каждого по 0,3 МДж.

Выводы. Усовершенствована математическая модель и программные модули для решения нелинейной динамической задачи о столкновении эталонного пассажирского поезда с крупногабаритным деформируемым препятствием на переезде согласно сценарию 3 стандарта ДСТУ EN 15227:2015. Эталонный поезд рассматривается как цепочка твердых тел, соединенных между собой существенно нелинейными деформируемыми элементами. Силовая характеристика межвагонного соединения учитывает работу поглощающих аппаратов автосцепных устройств, возможность сдвига объединенных ударно-тяговых устройств в подвагонное пространство, пластическое деформирование устройств поглощения энергии, возможность возникновения пластических деформаций в конструкциях локомотивов и вагонов, а также взаимодействие крупногабаритного деформируемого препятствия и элементов передней части локомотива, включая устройства поглощения энергии, расположенные на уровне сцепного устройства, и жертвенную зону каркаса. Предложенная математическая модель позволяет получить средние значения ускорений экипажей и пластических деформаций их конструкций для сравнения с допускаемыми значениями.

Проведены исследования динамической нагруженности экипажей поезда с элементами системы пассивной безопасности при столкновении со скоростью 110 км/ч с крупногабаритным препятствием массой 15 т на переезде. Установлено, что требования стандарта ДСТУ EN 15227:2015 для сценария 3 столкновения эталонного поезда с крупногабаритным деформируемым препятствием на переезде выполняются, если локомотив массой 123 т имеет в передней части каркаса кабины жертвенную зону энергоемкостью 0,3 МДж и оборудован с двух сторон двумя УПЭ с энергоемкостью каждого 0,95 МДж, а пассажирские вагоны массой 64 т оборудованы с двух сторон двумя УПЭ с энергоемкостью каждого 0,3 МДж.

Предложенная математическая модель и результаты выполненных исследований могут быть использованы при проектировании железнодорожных экипажей нового поколения для отечественного пассажирского поезда локомотивной тяги с учетом требований ДСТУ EN 15227:2015 по пассивной безопасности при столкновении на переезде.

1. EN 15227. Railway applications – Crashworthiness requirements for railway vehicle bodies. Brussels, 2008. 37 p.
2. ДСТУ EN 15227:2015 (EN 15227:2008+A1:2010, IDT). Залізничний транспорт. Вимоги до ударостійкості рейкових транспортних засобів. URL: http://document.ua/zaliznichnii-transport_-vimogi-do-udarostiikosti-reikovih-tr-std32262.html (Last accessed: 28.01.2019).
3. *Соболевская М. Б., Сирота С. А.* Основные положения концепции пассивной защиты скоростного пассажирского поезда при аварийных столкновениях. Техническая механика. 2015. № 1. С. 84–96.
4. *Науменко Н. Ю., Хижа И. Ю.* Моделирование взаимодействия экипажей пассажирского поезда, оборудованного системой пассивной безопасности, при аварийном столкновении с препятствием. Наука та прогрес транспорту. 2015. Вип. 4(58). С. 163–174.
5. *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.
6. *Науменко Н. Ю., Соболевська М. Б., Хижа И. Ю.* Оценка динамической нагруженности эталонного поезда с системой пассивной безопасности при его столкновениях с идентичным составом и грузовым вагоном. Техническая механика. 2017. № 3. С. 72–83.

7. *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 колеи 1520 мм. Техническая механика. 2017. № 1. С. 72–82.
8. *Науменко Н. Ю., Соболевська М. Б., Сирота С. А., Горобець Д. В.* Розробка елементів пасивного захисту вагонів пасажирського поїзда нового покоління для залізниць колії 1520 мм. Технічна механіка. 2017. № 2. С. 73–83.
9. *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.
10. *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.
11. *Соболевская М. Б., Горобец Д В., Сирота С. А.* Анализ взаимодействия пассажирского поезда с системой пассивной безопасности и большого дорожного транспортного средства при столкновении. Техническая механика. 2019. № 1. С. 90–106.

Получено 25.04.2019
в окончательном варианте 14.05.2019