УДК 625.032.4

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

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПРЕПЯТСТВИЙ ДЛЯ НОРМАТИВНЫХ СЦЕНАРИЕВ СТОЛКНОВЕНИЙ ПАССАЖИРСКИХ ПОЕЗДОВ

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

На теперішній час актуальними тенденціями розвитку вітчизняного залізничного транспорту є оновлення пасажирського рухомого складу, збільшення швидкостей руху поїздів, орієнтація на європейські стандарти. В конструкції екіпажів швидкісного пасажирського поїзда нового покоління повинні бути інтегровані системи пасивної безпеки (СПБ), які спрацьовують в момент аварійного зіткнення, дозволяють погасити кінетичну енергію удару, зберегти життя пасажирів і поїзної бригади, мінімізувати наслідки аварії. У 2016 році Україна методом підтвердження прийняла стандарт ДСТУ EN 15227:2015 (EN 15227:2008), що відповідає європейському стандарту EN 15227, який регламентує пасивну безпеку пасажирських поїздів при зіткненнях. У цьому стандарті визначено чотири сценарії зіткнень еталонного поїзда, які використовуються при проектуванні і експериментальному відпрацюванні залізничних екіпажів з СПБ. Мета досліджень – визначення характеристик еталонних перешкод в сценаріях зіткнень з урахуванням відмінностей вітчизняного пасажирського рухомого складу від європейського (об’єднані ударно-тягові прилади, різні габаритні і масові обмеження, інші нормативні вимоги та інше). Особливу увагу в статті приділено визначенню характеристик перешкод в сценарії 2 – зіткнення з вантажним вагоном, обладнаним об’єднаними ударно-тяговими пристроями, а також в сценарії 3, який характеризує зіткнення з вантажним автомобілем на залізничному переїзді і є базовим при оцінці параметрів конструкції кабіни машиніста з СПБ. У цьому сценарії вантажний автомобіль є вільно розташованою на залізничному переїзді перешкодою з заданими геометричними параметрами, що може деформуватися. У стандарті EN 15227 наведено критерій для розробки моделі перешкоди, що може деформуватися. Розробка такої моделі передбачає створення геометричної моделі перешкоди, побудову її скінченно-елементної схеми і визначення фізико-механічних параметрів. У статті запропоновано геометричну модель перешкоди у вигляді конструкції, що складається з трьох фрагментів (обшивки, серцевини та нижньої частини). Новизною роботи є твердотільна скінченно-елементна модель пластичного деформування перешкоди при ударі кулею. Виконано комплекс досліджень впливу фізико-механічних параметрів перешкоди на характеристику контактної сили. Розроблено модель перешкоди, що відповідає критерію стандарту EN 15227. Вона може бути використана при проектуванні кабін машиніста з СПБ і для оцінки виконання вимог стандарту EN 15227 при аварійних зіткненнях еталонних поїздів відповідно до сценарію 3.

В настоящее время основными тенденциями развития отечественного железнодорожного транспорта являются: обновление пассажирского подвижного состава, увеличение скоростей движения поездов, ориентация на европейские стандарты. В конструкции экипажей скоростного пассажирского поезда нового поколения должны быть интегрированы системы пассивной безопасности (СПБ), которые срабатывают в момент аварийного столкновения, позволяют погасить кинетическую энергию удара, сохранить жизни пассажиров и поездной бригады, минимизировать последствия аварии. В 2016 году Украина методом подтверждения приняла стандарт ДСТУ EN 15227:2015 (EN 15227:2008), соответствующий европейскому стандарту EN 15227, регламентирующему пассивную безопасность пассажирских поездов при столкновениях. В этом стандарте определены четыре сценария столкновений эталонного поезда, которые используются при проектировании и экспериментальной отработке железнодорожных экипажей с СПБ. Цель исследований – определение характеристик препятствий в сценариях столкновений с учетом отличий отечественного пассажирского подвижного состава от европейского (объединенные ударно-тяговые приборы, разные габаритные и массовые ограничения, другие нормативные требования и т. д.). Особое внимание в статье уделено определению характеристик препятствия в сценарии 2 столкновения с грузовым вагоном, оборудованным объединенными ударно-тяговыми устройствами, а также в сценарии 3, который характеризует столкновение с грузовым автомобилем на железнодорожном переезде и является базовым при оценке параметров конструкции кабины машиниста с СПБ. В сценарии 3 грузовой автомобиль представляет собой свободно стоящее на железнодорожном переезде деформируемое препятствие с заданными геометрическими параметрами. В стандарте EN 15227 приведен критерий для разработки модели деформируемого препятствия. Разработка такой модели предполагает создание геометрической модели препятствия, построение его конечно-элементной схемы и определение физико-механических параметров. В статье предложена геометрическая модель препятствия в виде конструкции, состоящей из трех фрагментов (обшивки, сердцевины и нижней части). Новизной работы является твердотельная конечно-элементная модель пластического деформирования препятствия при ударе шаром. Выполнен комплекс исследований влияния физико-механических параметров препятствия на характеристику контактной силы. Разработана модель препятствия, соответствующая критерию стандарта EN 15227. Она может быть использована при проектировании кабин машиниста с СПБ и для оценки выполнения требований стандарта EN 15227 при аварийных столкновениях эталонных поездов согласно сценарию 3.

At present, the main trends in the development of the Ukrainian railway transport are passenger car renewal, a train speed increase, and an orientation to European standards. An integral part of all high-speed passenger cars of new generation must be passive safety systems (PSSs), which operate in an emergency collision with the aim to absorb the kinetic energy of the impact, save the lives of the passengers and the train crew, and minimize the consequences of the accident. In 2016, Ukraine adopted by approval Ukrainian State Standard EN 15227:2015 (EN 15227:2008), which corresponds to European Standard EN 15227 on passenger train crashworthiness. The standard specifies four crash scenarios for a reference train, which are used in the design and experimental development of PSS-equipped railway vehicles. The aim of this work is to determine the characteristics of obstacles in the crash scenarios with account for the features of the Ukrainian rail vehicles (combined draw-and-buffer gears, different overall dimension and mass limitations, other normative requirements, etc.). Emphasis is on the determination of the obstacle characteristics in Scenario 2 (impact on a freight car equipped with combined draw-and-buffer gears) and on Scenario 3 (impact on a lorry at a grade crossing), which is the basic scenario in assessing the design parameters of a PSS-equipped driver cabin. The lorry in Scenario 3 is a deformable obstacle with given geometric parameters which stands free at a grade crossing. Standard EN 15227 formulates a criterion for the development of a deformable obstacle model. The development of such a model envisages the construction of a geometrical model of the obstacle and of its finite-element scheme and the determination of its physical and mechanical parameters. This paper proposes a geometrical model of obstacle that consists of three components (a casing, a core part, and a lower part). The novelty of this work is a solid finite-element model of obstacle plastic deformation on impact with a ball. A comprehensive study of the effect of the physical and mechanical obstacle parameters on the contact force characteristics was conducted. An obstacle model meeting the criterion of Standard EN 15227 was developed. The model may be used in designing PSS-equipped driver cabins and in assessing compliance with the requirements of Standard EN 15227 in emergency collisions of reference trains by Scenario 3.

Ключевые слова: *скоростной пассажирский поезд, грузовой автомобиль, столкновение на железнодорожном переезде, конечно-элементное моделирование, модель деформируемого препятствия.*

Введение. В настоящее время актуальной задачей отечественного железнодорожного транспорта является организация скоростного движения, обновление пассажирского подвижного состава, обеспечение его безопасной эксплуатации и пассивной защиты при аварийных столкновениях. В принятой в 2017 году программе обновления подвижного состава ПАТ “Украинская железная дорога” на период до 2021 г. [1] отмечено, что потенциальными изготовителями продукции для железнодорожной отрасли будут преимущественно украинские предприятия, которые должны ориентироваться на европейский опыт и евростандарты, но с учетом отличий отечественного пассажирского подвижного состава от европейского (объединенные ударно-тяговые приборы, разные габаритные и массовые ограничения, другие нормативные требования и т. д.). В отделе статистической динамики и динамики многомерных механических систем Института технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины (ИТМ НАНУ и ГКАУ) выполнен анализ аварийных столкновений на железных дорогах Европы и стран постсоветского пространства, проанализирован характер повреждений конструкций железнодорожных экипажей и препятствий, дана оценка последствий столкновений в случаях отсутствия или наличия средств пассивной защиты. Проведен также анализ нормативных требований по пассивной безопасности при столкновениях железнодорожного подвижного состава для пассажирских перевозок в странах ЕС и СНГ [2, 3]. Установлено, что при проектировании отечественного пассажирского подвижного состава нового поколения целесообразно ориентироваться на европейский стандарт EN 15227 [2], который с 2008 года в странах ЕС регламентирует обязательное наличие в конструкциях экипажей пассажирского поезда систем пассивной безопасности (СПБ). Эти системы срабатывают в момент аварийного столкновения, позволяют погасить кинетическую энергию удара, сохранить жизни пассажиров и поездной бригады, минимизировать последствия аварии. СПБ должны обеспечить защиту подвижного состава в типичных часто возникающих случаях столкновений, а в более тяжелых случаях – смягчить последствия аварий. В стандарте EN 15227, который используется при проектировании и экспериментальной отработке железнодорожных экипажей с СПБ, определены эталонные поезда и четыре сценария столкновения:

– сценарий 1 – лобовое столкновение двух идентичных поездных составов со скоростью 36 км/ч;

– сценарий 2 – лобовое столкновение со скоростью 36 км/ч поездного состава с грузовым вагоном массой 80 т;

– сценарий 3 – лобовое столкновение со скоростью 110 км/ч поездного состава с крупногабаритным дорожным транспортным средством массой 15 т на переезде;

– сценарий 4 – столкновение поездного состава с невысоким препятствием (легковой автомобиль, животное, мусор) на железнодорожном переезде.

Основными характеристиками сценариев столкновений являются скорость столкновения, тип и массы участвующих в нем объектов.

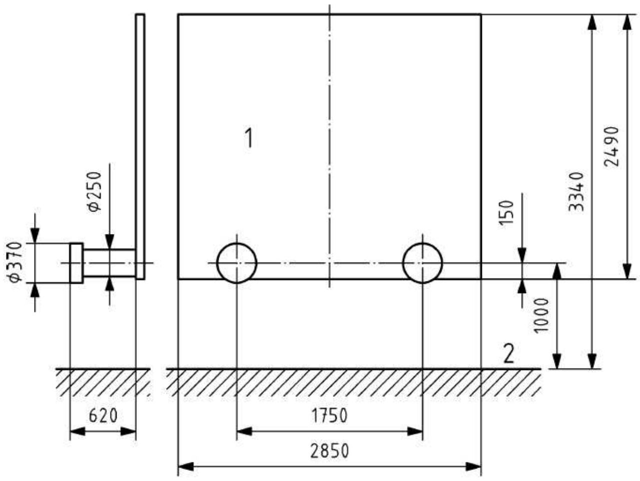
В стандарте EN 15227 определены эталонные препятствия, а также критерии для оценки соответствия разработанных конструкций подвижного состава требованиям по пассивной безопасности при столкновениях. Сценарий 1 подразумевает идентичность соударяющихся поездных составов, в качестве которых рассматривается локомотив или головной вагон и четыре пассажирских вагона. Предполагается наличие СПБ у всех экипажей эталонного поездного состава. В сценарии 2 препятствие в виде грузового вагона, оснащенного боковыми буферами, моделируется телом массой 80 т, которое имеет одну степень свободы и заданную геометрию торца (жёсткая торцевая стенка). Сценарий 3 характеризует столкновение пассажирского поезда на переезде с большим дорожным транспортным средством массой 15 т. Таким средством может быть грузовой автомобиль большой грузоподъемности, самосвал, автоцистерна, фура. Сценарий 4 является определяющим для расчета конструкции путеочистителя по заданным статическим нагрузкам.

В 2016 году Украина методом подтверждения приняла стандарт ДСТУ EN 15227:2015 (EN 15227:2008) [4], соответствующий европейскому стандарту EN 15227, однако открытым остался вопрос учета существенных отличий в конструкциях отечественного и европейского подвижного состава. Сценарии столкновений EN 15227 адекватно характеризуют условия наиболее типичных и вероятных столкновений на железных дорогах стран ЕС, Украины и СНГ. При проектировании отечественного железнодорожного пассажирского состава нового поколения с СПБ стандарт [4] может быть использован при условии, что вместо раздельных тягово-сцепных устройств (винтовых стяжек) и ударных приборов (буферов) в межвагонных соединениях установлены сдвигаемые объединенные ударно-тяговые приборы. При этом препятствие в сценарии 1 не требует доработки. В сценарии 2 необходима коррекция препятствия с учетом оборудования грузового вагона объединенными ударно-тяговыми приборами в виде автосцепки СА-3. В сценарии 3 [2] свободностоящее крупногабаритное деформируемое препятствие на переезде представлено специальной моделью с заданными геометрическими параметрами. В стандарте [2] приведен критерий для разработки модели деформируемого препятствия. Эта модель разрабатывается путем решения задачи о соударении со скоростью 30 м/с препятствия с монолитным однородным шаром диаметром 3000 мм и массой 50 т. Разработка модели деформируемого препятствия предполагает создание его геометрической модели, построение конечно-элементной схемы и определение физико-механических параметров.

Постановка задачи. Рассматривается задача определения характеристик эталонных препятствий в сценариях 2 и 3 столкновений поездного состава соответственно с грузовым вагоном и с грузовым автомобилем на переезде с учетом специфики отечественного пассажирского подвижного состава.

Препятствие в виде грузового вагона для сценария 2. Анализ столкновений пассажирских поездов без СПБ с грузовыми вагонами на железных дорогах постсоветского пространства показал, что наибольшие повреждения получают передняя часть рамы локомотива (или головного вагона) с автосцепным устройством и кабина машиниста [5].

В стандарте EN 15227 [2] приведена схема препятствия в виде грузового вагона, оснащенного буферами (рис. 1, размеры на рис. 1 приведены в миллиметрах).



1 – торец грузового вагона, оснащенного буферами;
2 – уровень головки рельсов

Рис. 1

В ГОСТе 3475–81 [3] препятствие в виде грузового вагона представляет собой перпендикулярную оси движения поезда плоскую вертикальную стенку шириною 3200 мм, нижняя кромка которой расположена на высоте 900 мм от уровня головки рельсов (УГР), верхняя кромка – на высоте 1500 мм от УГР (рис. 2, все размеры на рис. 2 приведены в миллиметрах).

Препятствие считается абсолютно твердым телом, допускающим свободное перемещение только в направлении оси движения поезда. Препятствие снабжено автосцепным устройством типа СА-3 без поглощающего аппарата. Автосцепное устройство моделируют в виде абсолютно твердого прямоугольного параллелепипеда с размерами 610 мм × 430 мм × 570 мм. Допускается автосцепное устройство, которым оснащено препятствие, моделировать в соответствии с размерами по ГОСТ 3475 [6], контуром зацепления по

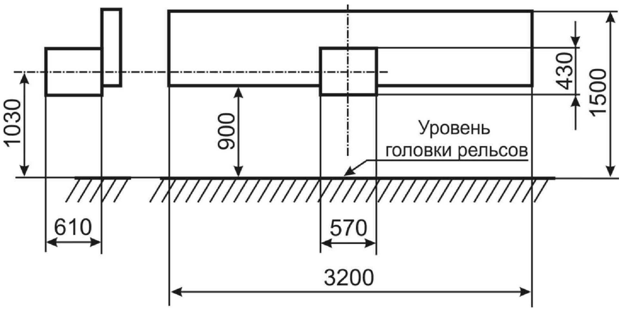


Рис. 2

ГОСТ 21447 [7], без поглощающего аппарата. При этом расстояние от оси зацепления автосцепного устройства до вертикальной стенки, представляющей препятствие, принимают равным 610 мм, а расстояние от уровня головки рельсов до оси автосцепного устройства принимают равным 1030 мм. В ГОСТе 3475–81 [3] препятствие в виде грузового вагона описано не совсем корректно. Работа СПБ предполагает наличие сдвигаемого автосцепного устройства в концевых частях локомотива или головного вагона. При аварийном столкновении в результате сдвига автосцепного устройства может произойти взаимодействие торцевой стенки грузового вагона с кабиной машиниста на высоте более 1500 мм от УГР. Об этом же свидетельствуют и результаты реальных аварийных столкновений локомотивов с грузовыми вагонами, в частности вагонами-цистернами [5].

На основе анализа описанных в [2, 3] моделей препятствия типа грузовой вагон для отечественных нормативных требований [4] по пассивной безопасности пассажирского подвижного состава разработана модель грузового вагона в виде плоской вертикальной стенки с твердым телом, моделирующим автосцепное устройство (рис. 3, все размеры на рис. 3 приведены в миллиметрах). Верхняя кромка препятствия находится на высоте 4000 мм от УГР.

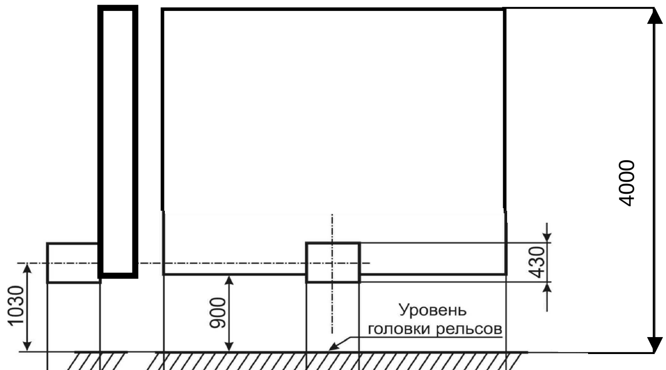


Рис. 3

Препятствие на переезде для сценария 3. Сценарий 3 актуален для Украины. Согласно официальной статистике большинство аварийных столкновений пассажирских поездов на отечественных железных дорогах происходит на переездах [8]. Например, в 2017 году произошло 86 дорожнотранспортных происшествий (из них 80 – на переездах), в результате которых – 20 погибших и 30 травмированных [8]. Основными препятствиями, которые встречаются на переездах, являются легковые автомобили, автобусы, грузовики, крупногабаритные фуры, тяжелые самосвалы, комбайны, трактора, бетоновозы и другие. Самыми тяжелыми из столкновений на переезде являются столкновения с грузовым автомобилем большой грузоподъемности [9 – 12]. При этом основная часть энергии столкновения приходится на деформацию грузового автомобиля. Рама грузового автомобиля в поперечном направлении не очень жесткая, поэтому в результате столкновения возможны следующие варианты:

– препятствие отбрасывается в сторону;

– поезд подминает препятствие под себя;

– автосцепка и рама локомотива (головного вагона), практически не деформируясь, въезжают под препятствие, которое ударяет в кабину машиниста и может разрушить ее.

В ГОСТе 3475–81 [3] препятствие массой 10 т на переезде имеет вид плоской вертикальной недеформируемой стенки высотой всего 1300 мм, нижняя кромка которой расположена на высоте 900 мм от УГР (рис. 4, все размеры на рис. 4 приведены в миллиметрах).

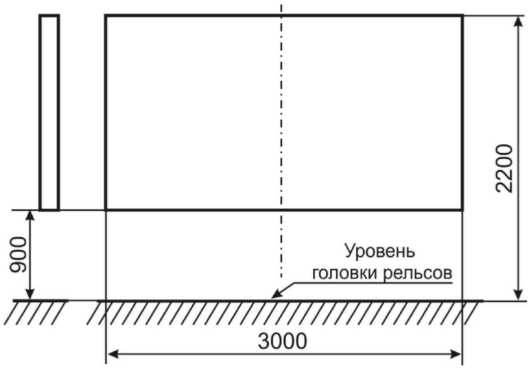


Рис. 4

При столкновении поезда с таким препятствием основной удар приходится в нижнюю часть лобовой стенки кабины машиниста. Следует отметить, что высота препятствия до 2200 мм характерна для преград в виде легковых автомобилей, микроавтобусов типа “газель”, но их масса не более 5 т. Столкновения на переезде с такими препятствиями являются менее опасными для железнодорожного подвижного состава, чем столкновения с грузовыми автомобилями большой грузоподъемности (5 – 20) т, которые имеют высоту порядка 3200 мм. Поэтому целесообразно рассматривать столкновения на переезде с невысоким препятствием, например, легковым автомобилем, животным, мусором, используя сценарий 4 стандарта EN 15227 [2], а для анализа столкновения на переезде с грузовым автомобилем большой грузоподъемности – сценарий 3 EN 15227. В отличие от стандарта EN 15227, в отечественных нормативных требованиях [4] по пассивной безопасности пассажирского подвижного состава при расчете столкновения на переезде согласно сценарию 3 автосцепное устройство на локомотиве или головном вагоне должно быть учтено.

Для сценария 3 EN 15227 [2] в качестве большого дорожного средства на переезде принято свободно стоящее деформируемое препятствие (рис. 5), геометрические параметры которого показаны на рис. 6. Все размеры на рис. 6 приведены в миллиметрах. Модель деформируемого препятствия по сценарию 3 разрабатывается путем решения задачи о соударении со скоростью 30 м/с шара массой 50 т с препятствием массой 15 т. Шар имеет одну степень свободы в направлении оси X. Центр масс препятствия должен быть расположен на высоте 1750 мм от УГР, а центр масс шара – на высоте 1500 мм от УГР. Допускается, что части A и B (рис. 6) могут быть смоделированы с использованием обшивочных листов или без них, но с учетом непрерывной осевой однородности по плотности и жесткости. Величина силы трения относительно земли равна нулю. Коэффициент трения между поверхностями препятствия и шара равен 0,2. Для получения модели препятствия с требуемыми свойствами допускается изменение ее плотности по оси Z и жесткости по оси X . Параметры жесткости препятствия выбираются так, чтобы полученная в результате расчета кривая, характеризующая зависимость контактной силы F от перемещения x центра масс шара, располагалась выше минимального уровня, который определяется кривой, представленной на рис. 7. Зависимость контактной силы F от перемещения x определяется с использованием фильтра низких частот на 60 Гц.

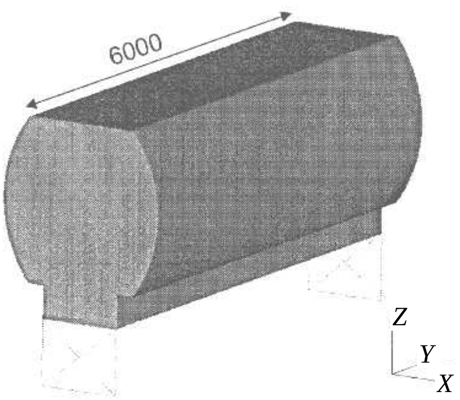
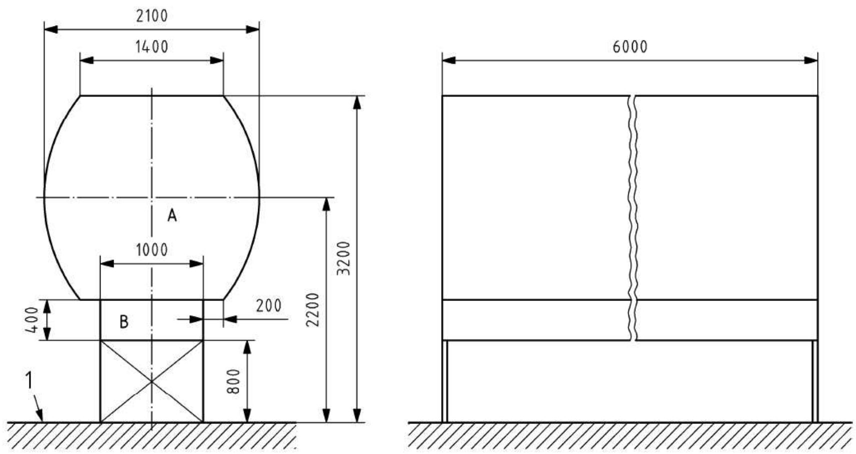


Рис. 5



1 – головка рельсов;
A, B – части препятствия

Рис. 6

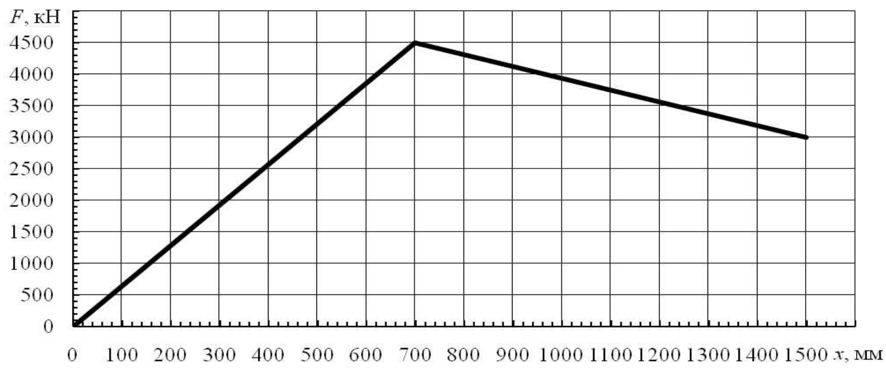
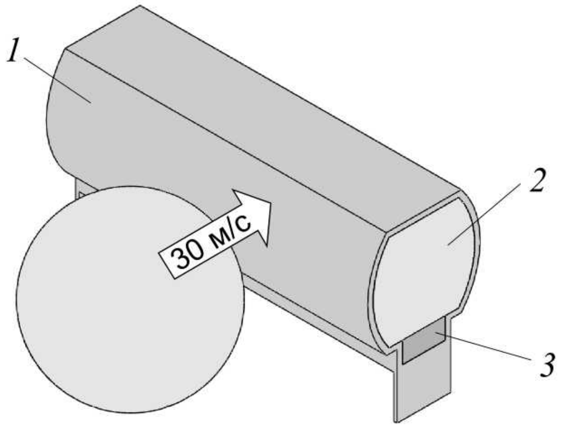


Рис. 7

Предложена геометрическая модель препятствия в виде конструкции, состоящей из трех фрагментов (обшивки, сердцевины и нижней части). Схема взаимодействия шара с препятствием при ударе приведена на рис. 8.



1 – обшивка (фрагмент 1);
2 – сердцевина (фрагмент 2);
3 – нижняя часть препятствия (фрагмент 3)

Рис. 8

В качестве исходной модели препятствия выбрана однородная по физико-механическим характеристикам конструкция, состоящая из трех фрагментов (рис. 8). Параметры модели препятствия приведены в табл. 1.

Таблица 1

Номер фрагмента модели i	Объем фрагмента модели V_i, м^3	Высота центра масс фрагмента модели над УГР z_{ci}, мм	Плотность ρ_i, т/м^3
1	4,65	1998	0,60
2	18,46	2200	0,36
3	1,92	1100	2,93

Общий объем конструкции V = 25,03 м^3. Толщина ее обшивочной части 100 мм. Материал конструкции является условным. Плотности фрагментов исходной модели препятствия определялись из условия, что центр масс препятствия расположен на высоте 1750 мм от УГР.

Математическое моделирование. Разработана твердотельная конечно-элементная модель пластического деформирования препятствия при ударе шаром. Для описания упругопластических свойств материала рассматриваемой конструкции при ударных воздействиях использована инкрементальная модель пластичности в формулировке Крига и Кея [13], 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 Саймондса–Купера [14, 15].

При разработке конечно-элементной модели для анализа нелинейного деформирования элементов конструкции препятствия при ударе использованы тетраэдральные элементы с 10-ю узлами, каждый из которых имеет по три линейных и угловых перемещения, скорости и ускорения относительно осей узловой системы координат элемента. Такими же объемными конечными элементами представлен и ударяющий шар (боек).

Схемы контактного взаимодействия между соприкасающимися поверхностями сферы и исследуемой конструкции приняты в форме “поверхность в поверхность”. Коэффициент трения на поверхности препятствия равен 0,2.

Напряженно-деформированное состояние (НДС) элементов конструкции при ударе описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений, решение которой сводится к численному интегрированию при заданных начальных и граничных условиях. В качестве граничных условий для всех узлов в конечно-элементной схеме шара задаются нулевые значения перемещений по всем направлениям, кроме направления вдоль оси X .

В качестве начальных условий задается скорость 30 м/с узловых точек элементов, моделирующих шар, в начальный момент времени.

Полученная в результате конечно-элементной дискретизации система дифференциальных уравнений движения решается с помощью метода последовательных нагружений [16], основанного на сочетании численного интегрирования с итерационной корректировкой результатов после каждого шага по времени. В результате решения рассматриваемой задачи определяется НДС элементов конечно-элементной системы при заданной начальной скорости соударения. На основе полученных значений перемещения центра масс бойка и соответствующих значений контактной силы (интеграла по области контакта от распределенных контактных напряжений) между бойком и исследуемой конструкцией в текущие моменты времени строится зависимость контактной силы от перемещения центра масс бойка.

При построении зависимости контактной силы F от перемещения x применяется фильтр Чебышева I-го рода 2-го порядка с частотой среза 60 Гц [17] в соответствии с требованиями EN 15227 [2].

Конечно-элементные схемы препятствия и шара приведены на рис. 9.

Конечно-элементная схема механической системы из двух соударяющихся тел состоит из 5593 узлов и 27549 элементов. При этом схема препятствия содержит 26182 элемента с 5258 узлами. Характерный размер ребра конечного элемента для моделирования препятствия составляет 200 мм, а для моделирования шара – 400 мм. Физико-механические параметры материала

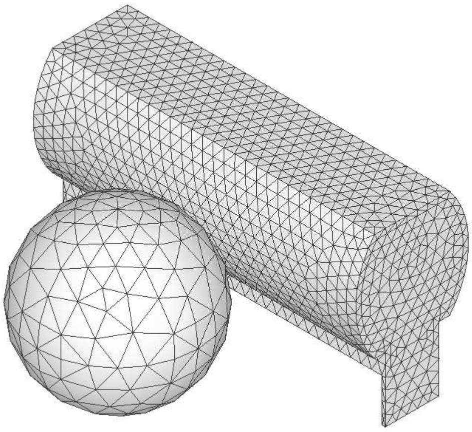


Рис. 9

исходной конструкции препятствия имеют следующие значения: модуль Юнга E = 5000 МПа; коэффициент Пуассона μ = 0,3; условный предел текучести σ_T = 10 МПа; тангенциальный модуль на участке пластического деформирования E_T = 10 МПа. Физико-механические параметры материала шара: модуль Юнга E_{sh} = 2,04·10^5 МПа; коэффициент Пуассона μ_{sh} = 0,3.

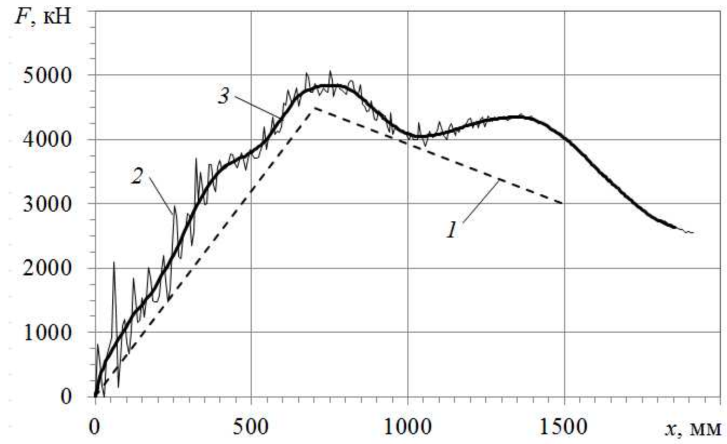
Результаты исследования. Выполнен анализ влияния на зависимость контактной силы F от перемещения x центра масс шара таких параметров, как пределы текучести для материалов обшивки σ_T^o и сердцевины σ_T^c, модули Юнга для материалов обшивки E^o и сердцевины E^c, тангенциальный модуль на участке пластического деформирования для материалов обшивки E_T^o и сердцевины E_T^c. На основе выполненных исследований были выбраны параметры деформируемого препятствия в соответствии с требованиями стандарта EN 15227. Выбранные параметры препятствия приведены в табл. 2.

Таблица 2

Обозначение параметра, размерность	σ_T^o, МПа	σ_T^c, МПа	E^o, ГПа	E^c, ГПа	E_T^o, МПа	E_T^c, МПа
Значение параметра	4	0,5	1,2	0,02	8	0,1

Зависимости контактной силы F от перемещения x центра масс шара для разработанного деформируемого препятствия приведены на рис. 10.

Процесс деформации препятствия показан на рис. 11. Как видно на рис. 11, до момента перемещения шара на 1000 мм наблюдаются большие деформации конструкции препятствия в месте контакта с шаром.



1 – нормативная зависимость согласно стандарту EN 15227;
2 – расчетная зависимость до фильтрации;
3 – расчетная зависимость после фильтрации

Рис. 10

Поперечный изгиб конструкции препятствия становится заметным после перемещения центра масс шара на 1250 мм. Энергия, которая поглощается в результате деформации конструкции препятствия с выбранными параметрами при перемещении центра масс шара на 1500 мм, составляет 3,4 МДж.

Выводы. Выполнен анализ аварийных столкновений пассажирских поездов с различными препятствиями на железных дорогах Европы и стран постсоветского пространства, а также действующих в странах ЕС и СНГ нормативных требований по пассивной безопасности при столкновениях. Установлено, что в качестве сценариев столкновения в отечественных требованиях по пассивной безопасности целесообразно рассматривать сценарии стандарта EN 15227 при условии, что вместо раздельных ударно-тяговых устройств (винтовых стяжек) в межвагонных соединениях будут использоваться сдвигаемые объединенные ударно-тяговые приборы. При этом препятствие в сценарии 1 не требует доработки.

Для сценария столкновения 2 поездного состава с грузовым вагоном разработано эталонное препятствие с учетом наличия у грузового вагона объединенных ударно-тяговых приборов.

Для разработки модели деформируемого препятствия в сценарии 3 столкновения поездного состава на железнодорожном переезде рассмотрена в соответствии с требованиями стандарта EN 15227 задача о соударении со скоростью 30 м/с препятствия массой 15 т с шаром массой 50 т. Предложена геометрическая модель препятствия в виде конструкции, состоящей из трех фрагментов (обшивки, сердцевины и нижней части). Разработана конечно-элементная модель нелинейного деформирования крупногабаритного препятствия при ударе с учетом геометрической и физической нелинейностей, а также переменного контактного взаимодействия элементов механической системы соударяющихся тел. Выполнен анализ влияния на характеристику контактной силы различных параметров препятствия и определены параметры, при которых деформируемое препятствие соответствует требованиям стандарта EN 15227.

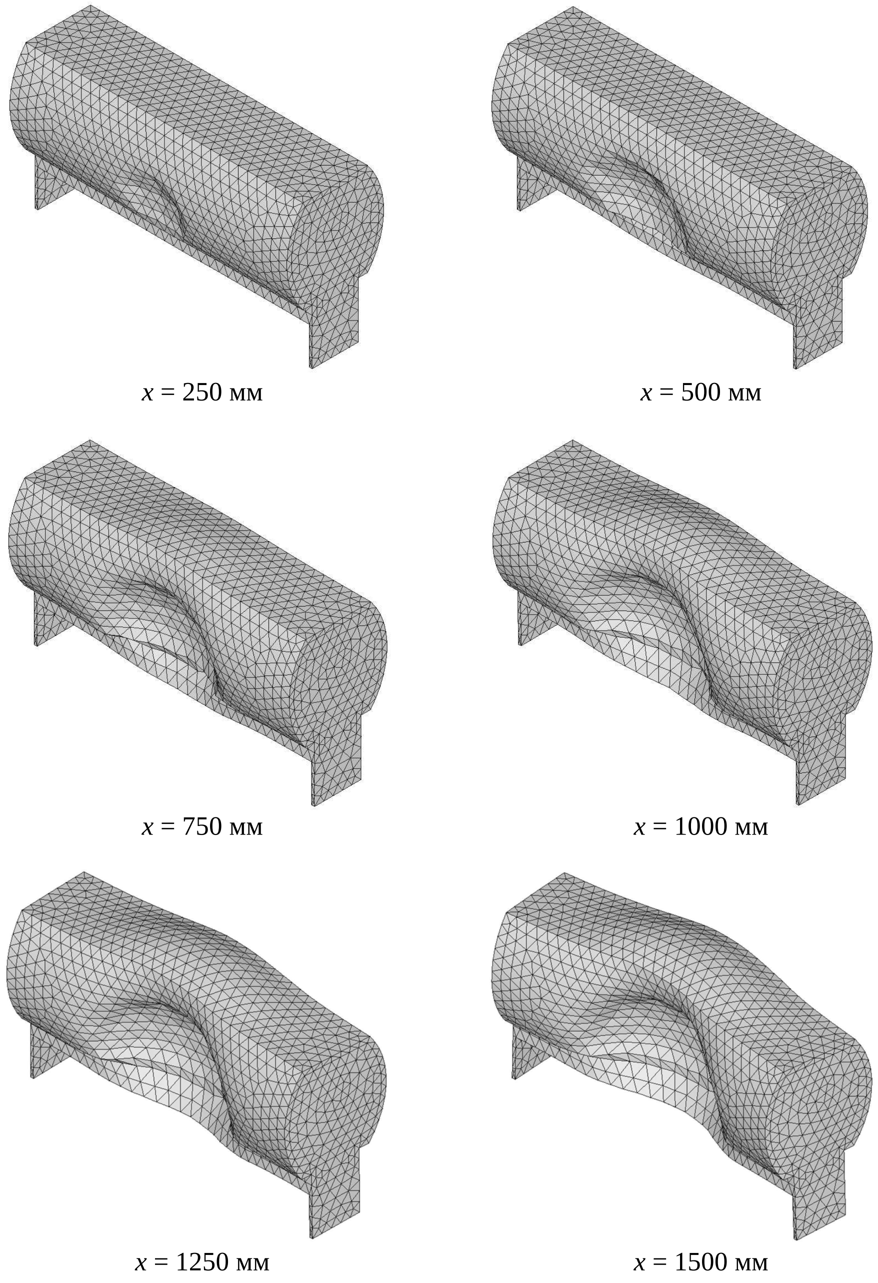


Рис. 11

На основе результатов выполненного исследования определены характеристики эталонных препятствий для рассмотренных сценариев столкновений.

1. Програма (прогнозна) оновлення рухомого складу ПАТ "Укрзалізниця" на період до 2021 року та її виконання у 2017 році. URL: http://eurotrain.railway-publish.com/assets/files/pdf/1.pdf (Last accessed: 15.09.2017).
2. EN 15227. Railway applications – Crashworthiness requirements for railway vehicle bodies. Brussels, 2008. 37 p.
3. ГОСТ 32410-2013 Крэш-системы аварийные железнодорожного подвижного состава для пассажирских перевозок. Технические требования и методы контроля. М.: Стандартинформ, 2014. 29 с.

4. Каталог нормативних документів. URL: http://uas.org.ua/ua/natsionalniy-fond-normativnih-dokumentiv/katalog-normativnih-dokumentiv-2/ (Last accessed: 24.04.2018).
5. Железная дорога – Крушения и аварии: сайт-справочник. URL: http://ru-railway.livejournal.com/602638.html?thread=6195726 (Last accessed: 24.04.2018).
6. ГОСТ 3475–81. Устройство автосцепное подвижного состава железных дорог колеи 1520 (1524) мм. Установочные размеры. М.: ИПК издательство стандартов, 1981. 6 с.
7. ГОСТ 21447–75. Контур зацепления автосцепки. Размеры. М.: Государственный комитет стандартов Совета Министров СССР, 1975. 4 с.
8. Кількість ДТП на переїздах і коліях Укрзалізниці у 2017 р. URL: https://info.uz.ua/photo-video/kilkist-dtp-na-pereizdakh-i-koliyakh-ukrzaliznitsi-u-2017-r (Last accessed: 24.04.2018).
9. Проігнорував світлофора: на Львівщині вантажівка ГАЗ зіткнулася з електричкою – 3 постраждалих. URL: https://www.5.ua/regiony/proihnoruvav-svitlofora-na-lvivshchyni-vantazhivka-haz-zitknulasia-z-elektrychkoiu-3-postrazhdalykh-156313.html (Last accessed: 24.04.2018).
10. Водій вантажівки спричинив ДТП на залізничному переїзді. URL: http://odz.gov.ua/?news=1219 (Last accessed: 24.04.2018).
11. На Донеччині поїзд на переїзді протаранив вантажівку. URL: https://dn.depo.ua/ukr/donetsk/na-donechchini-poyizd-na-pereyizdi-protaraniv-vantazhivku-foto-20180419761978 (Last accessed: 24.04.2018).
12. У Вінницькій обл. на переїзді "КАМАЗ" врізався у потяг, водій вантажівки загинув. URL: https://ua.112.ua/avarii-np/u-vinnytskii-obl-na-pereizdi-kamaz-vrizavsia-u-potiah-vodii-vantazhivky-zahynuv-274317.html (Last accessed: 24.04.2018).
13. *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.
14. *Саймондс П. С.* Динамика неупругих конструкций. М.: Мир, 1982. 224 с.
15. *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.
16. *Оден Д.* Конечные элементы в механике сплошных сред. М.: Мир, 1976. 464 с.
17. *Гоноровский И. С.* Радиотехнические цепи и сигналы: учебник для вузов. М.: Радио и связь, 1986. 512 с.

Получено 03.05.2018
в окончательном варианте 25.05.2018