

**РАЗРАБОТКА РЕШЕНИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ БЕЗОПАСНОСТИ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПЕРЕВОЗОК
И ПАССИВНОЙ ЗАЩИТЕ ПАССАЖИРСКОГО ПОЕЗДА ПРИ
АВАРИЙНЫХ СТОЛКНОВЕНИЯХ***Институт технической механики**Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины,
ул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Днепр, Украина; e-mail: dep7@ukr.net*

Пріоритетними завданнями вітчизняного залізничного транспорту є підвищення швидкостей руху поїздів, оновлення пасажирського рухомого складу, забезпечення його безпечної експлуатації і пасивного захисту при аварійних зіткненнях з перешкодами. В конструкції екіпажів швидкісного пасажирського поїзда нового покоління повинні бути інтегровані системи пасивної безпеки (СПБ), які спрацьовують в момент зіткнення. В результаті контрольованого деформування пристроїв поглинання енергії (ППЕ), які входять до складу СПБ, відбувається зниження поздовжніх зусиль і прискорень, що дозволяє зберегти життя пасажирів і поїзної бригади, зменшити пошкодження рухомого складу, мінімізувати наслідки аварії. В країнах ЄС обов'язкова наявність СПБ регламентується стандартом EN 15227. Аналогічний стандарт діє і в Україні, не дивлячись на істотні відмінності в конструкціях зчіпних пристроїв вітчизняного та європейського рухомого складу. У статті розглядається задача створення наукової бази для розробки СПБ екіпажів вітчизняного швидкісного пасажирського поїзда при зіткненнях, а також проблема визначення чинників, що впливають на сход коліс екіпажів з рейок. Розроблено алгоритм, науково-методичне забезпечення і скінченно-елементні моделі, які можуть бути використані для вибору параметрів конструкцій ППЕ, що підтверджено результатами виконаного креш-тесту дослідного зразка ППЕ, створеного для локомотива. Розроблено математичну модель для дослідження динаміки поїзних складів з СПБ, визначення навантаженості конструкцій екіпажів в поздовжньому і вертикальному напрямках, а також для оцінки необхідного рівня енергоємності ППЕ при відпрацюванні нормативних сценаріїв зіткнень. В результаті виконаного комплексу досліджень розроблено конструкції ППЕ для тягового рухомого складу та причіпних вагонів. Окремою проблемою при розгляді зіткнення пасажирського поїзда з перешкодою є визначення факторів, що призводять до сходу колісних пар локомотива і вагонів з рейок. Такі дослідження проведені з використанням розробленої математичної моделі просторових коливань рухомого потягу, локомотив якого обладнано системою пасивної безпеки і протипідйомними пристроями. При зіткненні з перешкодою поїзда, що рухається по реальному рейковому шляху з нерівностями різного типу, виникають поперечні сили взаємодії екіпажів. Це в свою чергу призводить до появи поперечних сил взаємодії їх коліс і рейок, що робить істотний вплив на стійкість колісних пар локомотива від сходу з рейок. Проведені розрахунки показали, що ймовірність сходження коліс локомотива з рейок тим більше, чим важче екіпаж-перешкода, чим вище швидкість руху поїзда в момент зіткнення, чим вище рівень нерівностей рейкової колії. Результати виконаних досліджень можуть бути використані при проектуванні швидкісних пасажирських поїздів нового покоління.

Приоритетными задачами отечественного железнодорожного транспорта являются повышение скоростей движения поездов, обновление пассажирского подвижного состава, обеспечение его безопасной эксплуатации и пассивной защиты при аварийных столкновениях с препятствиями. В конструкции экипажей скоростного пассажирского поезда нового поколения должны быть интегрированы системы пассивной безопасности (СПБ), которые срабатывают в момент столкновения. В результате контролируемого деформирования входящих в состав СПБ устройств поглощения энергии (УПЭ) происходит снижение продольных усилий и ускорений, что позволяет сохранить жизни пассажиров и поездной бригады, уменьшить повреждения подвижного состава, минимизировать последствия аварии. В странах ЕС обязательное наличие СПБ регламентируется стандартом EN 15227. Аналогичный стандарт действует и в Украине, несмотря на существенные отличия в конструкциях сцепных устройств отечественного и европейского подвижного состава. В статье рассматривается задача создания научной базы для разработки СПБ экипажей отечественного скоростного пассажирского поезда при столкновениях, а также проблема определения факторов, влияющих на сход колес сталкивающихся экипажей с рельсов. Разработан алгоритм, научно-методическое обеспечение и конечно-элементные модели, которые могут быть использованы для выбора параметров конструкций УПЭ, что подтверждено результатами выполненного креш-теста опытного образца УПЭ, созданного для локомотива. Разработана математическая модель для исследования динамики поездных составов с СПБ, для определения нагруженности конструкций экипажей в продольном и вертикальном направлениях, а также для оценки необходимого уровня энергоёмкости УПЭ при отработке нормативных сценариев столкновений. В результате выполненного комплекса исследований разработаны конструкции УПЭ для тягового подвижного состава и причёпных вагонов. Отдельной проблемой при рассмотрении столкновения пассажирского поезда с преградой является определение факто-

© Н. Е. Науменко, М. Б. Соболевская, О. М. Маркова, Е. Н. Ковтун,
Д. В. Горобец, В. В. Малый, С. А. Сирота, 2018

ров, приводящих к сходу колесных пар локомотива и вагонов с рельсов. Такие исследования проведены с использованием разработанной математической модели пространственных колебаний движущегося поезда, локомотив которого оборудован системой пассивной безопасности и противоподъемными устройствами. При столкновении с преградой поезда, движущегося по реальному рельсовому пути с неровностями разного типа, возникают поперечные силы взаимодействия сталкивающихся экипажей. Это в свою очередь приводит к появлению поперечных сил взаимодействия их колес и рельсов, что оказывает существенное влияние на устойчивость колесных пар локомотива от схода с рельсов. Проведенные расчеты показали, что вероятность схода колес локомотива с рельсов тем больше, чем тяжелее экипаж-преграда, чем выше скорость движения поезда в момент столкновения и чем выше уровень неровностей рельсовой колеи. Результаты выполненных исследований могут быть использованы при проектировании скоростных пассажирских поездов нового поколения.

The priority tasks of the Ukrainian railway transport are a train speed increase, passenger car renewal and safe operation, and the passive protection of passenger trains in their emergency collisions with obstacles. An integral part of high-speed passenger cars of new generation must be passive safety systems (PSSs), which operate in an emergency collision. The controllable deformation of the PSS energy-absorbing devices (EADs) reduces the longitudinal forces and accelerations, which makes it possible to save the lives of the passengers and the train crew, reduce damage to the cars, and minimize the consequences of the accident. In the EU countries, the mandatory installation of PSSs is required by Standard EN 15227. A similar standard is adopted in Ukraine, too, despite the fact that the couplers used in Ukraine differ considerably in design from those used in the EU countries. This paper addresses the problem of elaboration of a scientific basis for the development of collision PSSs for the cars of high-speed passenger trains operating on the Ukrainian railways and the problem of determination of factors that affect car derailment in a collision. An algorithm, methods, and finite-element models for choosing the EAD design parameters were developed and validated by a crash test of a prototype locomotive EAD. A mathematical model was developed to study the dynamics of PSS-equipped trains, to determine longitudinal and vertical loads on the car structures, and to assess the required EAD energy absorption capacity in normative collision scenarios. Comprehensive investigations were conducted, as a result of which locomotive and car EADs were designed. When considering a passenger train – obstacle collision, a separate problem is the determination of factors causing locomotive and car derailment. Such investigations were conducted using a mathematical model developed to describe the spatial oscillations of a moving train whose locomotive is equipped with a passive safety system and anti-climbing devices. When a train moving on a real track with irregularities of different types collides with the obstacle, lateral forces of car-car interaction are produced. This, in its turn, results in lateral forces of wheel-rail interaction, thus considerably affecting the locomotive derailment stability. The calculations conducted by the model showed that the locomotive derailment probability increases with the mass of the obstacle rail vehicle, the train speed at the collision instant, and the level of rail irregularities. The results of the investigations conducted may be used in designing a new generation of high-speed passenger trains.

Ключевые слова: *безопасность железнодорожного движения, столкновение пассажирского поезда с препятствием, система пассивной безопасности, устройство поглощения энергии, математическое моделирование, пространственные колебания, сход с рельсов.*

Введение. Приоритетными задачами отечественного железнодорожного транспорта являются обновление пассажирского подвижного состава, обеспечение его безопасной эксплуатации и пассивной защиты пассажиров, поездной бригады и несущих конструкций экипажей поезда при аварийных столкновениях с ориентацией на евростандарты.

Разработкой научно обоснованных решений по обеспечению безопасности железнодорожных перевозок и пассивной защите пассажирского поезда при его аварийном столкновении с препятствием занимаются специалисты отдела статистической динамики и динамики многомерных механических систем Института технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины. Выполнен обзор типичных случаев столкновений пассажирских поездов с различными препятствиями на железных дорогах мира, проанализированы характер повреждений в конструкциях экипажей и препятствий, а также последствия столкновений в случаях отсутствия или наличия средств пассивной защиты. Проведен анализ нормативных требований по пассивной безопасности при столкновениях пассажирских поездов на дорогах Европы и стран постсоветского пространства. Установлено, что при проектировании отечественного

скоростного пассажирского подвижного состава нового поколения целесообразно интегрировать в конструкции экипажей поезда системы пассивной безопасности (СПБ). При столкновении поезда с препятствием 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. Обязательное наличие СПБ у всех вновь создаваемых пассажирских поездов в странах ЕС регламентирует европейский стандарт EN 15227 [1], который разработан на основе выполнения комплекса научных исследований, подтвержден серией крэш-тестов и с 2008 года применяется на практике при проектировании и экспериментальной отработке железнодорожных экипажей с СПБ. В 2016 году Украина методом подтверждения приняла стандарт ДСТУ EN 15227:2015 (EN 15227:2008) [2]. При этом открытым остался вопрос учета существенных отличий в конструкциях отечественного и европейского подвижного состава (объединенные ударно-тяговые приборы, разные габаритные и массовые ограничения, другие нормативные требования и т. д.).

СПБ предназначены для защиты подвижного состава при столкновениях, сценарии которых определены нормативными требованиями по пассивной безопасности. В стандарте EN 15227 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.

В результате выполненных в отделе исследований обосновано, что сценарии столкновений, определенные стандартом EN 15227, адекватно характеризуют условия наиболее типичных и вероятных столкновений на железных дорогах не только стран ЕС, но и стран постсоветского пространства.

Патентно-библиографические исследования существующих средств защиты экипажей скоростных пассажирских поездов при аварийных столкновениях позволили установить, что пассивная защита европейских пассажирских поездов локомотивной тяги, оборудованных отдельными ударно-тяговыми устройствами, организована таким образом, что основную часть энергии аварийного столкновения поглощают крэш-буфера и расположенные за ними устройства поглощения энергии локомотива. Промежуточные вагоны, как правило, оборудуются только крэш-буферами. На локомотиве и вагонах устанавливаются противоподъемные устройства. При аварийном столкновении энергия поглощается в результате разрыва, срезания или развальцовки элементов крэш-буфера и пластической деформации расположенного за ним устройства поглощения энергии, как правило, коробчатого или трубчатого типа.

Проведенный анализ существующих вариантов пассивной защиты локомотивов и прицепных вагонов с объединенными ударно-тяговыми приборами показал, что такая защита предполагает использование сдвигаемых автосцепных устройств, многоуровневой системы устройств поглощения энергии и жертвенных зон в концевых частях экипажей поезда.

Пассивная защита европейского моторвагонного подвижного состава организована таким образом, что основную часть энергии аварийного столкновения поглощают устройства поглощения энергии, установленные на головных вагонах. Головной вагон оборудуется многоуровневой системой устройств поглощения энергии, которые, как правило, вынесены за пределы кабины машиниста. Каркас кабины является усиленной зоной безопасности для выживания и эвакуации машиниста при столкновении. Промежуточные вагоны оборудуются сцепными и противоподъемными устройствами, в том числе содержащими энергопоглощающие элементы.

Анализ существующих технических решений по ударно-тяговым и противоподъемным устройствам, которые обеспечивают работу элементов пассивной защиты пассажирских поездов в аварийной ситуации, показал, что система пассивной безопасности отечественного пассажирского поезда нового поколения должна включать автосцепные устройства, которые при аварийном столкновении сдвигаются в подвагонное пространство, а также противоподъемные устройства для защиты от напоязания экипажей друг на друга. Сдвигаемые автосцепные устройства целесообразно создавать на основе автосцепных устройств СА-3 и беззачерных сцепных устройств с использованием американского опыта разработки сдвигаемой автосцепки Volpe Центра национальных транспортных систем Отделения транспорта США и опыта создания автосцепных устройств типа Шарфенберга. При этом противоподъемные устройства целесообразно выполнять в виде пластин с горизонтальными ребрами и устанавливать на коробчатых конструкциях устройств поглощения энергии, которыми оборудуются концевые части железнодорожных экипажей. Геометрия ребер противоподъемных устройств должна быть нормирована для обеспечения надежного зацепления идентичных и неидентичных экипажей поезда состава при аварийных столкновениях с препятствием на железнодорожном пути.

На основе анализа мирового опыта по пассивной защите пассажирских поездов при столкновениях разработаны основные положения концепции пассивной защиты отечественного скоростного пассажирского поезда нового поколения при аварийных столкновениях с препятствиями [3] и определены рациональные схемы размещения систем пассивной безопасности в пассажирских поездах разного назначения.

Отдельной проблемой при рассмотрении столкновения пассажирского поезда с преградой является определение факторов, приводящих к сходу колесных пар локомотива и вагонов с рельсов. Такие исследования проведены с использованием разработанной математической модели пространственных колебаний движущегося поезда, локомотив которого оборудован системой пассивной безопасности и противоподъемными устройствами. При движении поезда по реальному рельсовому пути с неровностями разного типа имеют место колебания экипажей в процессе движения, что приводит к появлению изменяющегося во времени угла поворота кузова локомотива относительно вертикальной оси в горизонтальной плоскости. В такой ситуации при столк-

новении с преградой возникают поперечные силы взаимодействия сталкивающихся экипажей. Это в свою очередь приводит к появлению поперечных сил взаимодействия их колес и рельсов, что оказывает существенное влияние на устойчивость колесных пар локомотива от схода с рельсов.

Постановка задачи. Рассматривается задача создания научной базы для разработки системы пассивной безопасности экипажей отечественного скоростного пассажирского поезда с объединенными ударно-тяговыми приборами при аварийных столкновениях, сценарии которых соответствуют стандарту EN 15227, а также проблема определения факторов, влияющих на сход колес сталкивающихся экипажей с рельсов.

Алгоритм определения параметров УПЭ. В соответствии с предложенной концепцией пассивной защиты отечественного скоростного пассажирского поезда нового поколения при аварийных столкновениях с препятствием разработан алгоритм для определения параметров устройств поглощения энергии, входящих в СПБ. Алгоритм включает:

- определение допустимых воздействий на конструкцию железнодорожного экипажа при тестовых сценариях столкновений и габаритных ограничений для установки УПЭ;
- разработку требований к УПЭ на основе анализа особенностей его работы при эксплуатационных и аварийных воздействиях;
- выбор формы и материала конструкции УПЭ;
- определение критической нагрузки потери устойчивости устройства поглощения энергии до появления пластических деформаций;
- разработку концептуальной диаграммы деформирования УПЭ при ударе;
- определение интегральных параметров УПЭ, в частности их энергоемкостей, в результате математического моделирования динамики эталонных поездных составов с СПБ при аварийных столкновениях, сценарии которых соответствуют стандарту EN 15227, и уточнение концептуальной диаграммы деформирования;
- выбор параметров конструкции УПЭ с требуемой энергоемкостью с помощью конечно-элементного моделирования пластического деформирования УПЭ при ударе с использованием разработанного научно-методического обеспечения;
- создание опытного образца конструкции УПЭ и проведение его крэш-теста;
- верификацию разработанной конечно-элементной модели деформирования УПЭ при ударе по итогам крэш-теста согласно критериям стандарта EN 15227;
- выбор параметров УПЭ заданной энергоемкости с использованием конечно-элементной модели, уточненной с учетом результатов выполненного крэш-теста.

Научно-методическое обеспечение для определения параметров УПЭ. Разработано научно-методическое обеспечение для определения параметров устройств поглощения энергии путем решения задачи теории пластичности при заданных начальных и граничных условиях [4 – 6]. Оно включает создание с помощью средств автоматизированного конструирования трехмерной геометрической модели исследуемой конструкции, импортирование геометрической модели в программу для решения задачи динамики с

помощью метода конечных элементов, создание и тестирование конечно-элементной математической модели, описывающей процесс пластического деформирования конструкции УПЭ при ударе, проведение расчетов, построение зависимости контактной силы и энергии, поглощаемой в процессе деформирования конструкции, от перемещения центра масс бойка при ударе.

Конечно-элементные модели пластического деформирования конструкций УПЭ разработаны с учетом нелинейных соотношений между деформациями и перемещениями, а также между напряжениями и деформациями, зависимости физико-механических свойств материала от скорости удара, переменного контактного взаимодействия между элементами механической системы соударяющихся тел. Для описания упругопластических свойств материала рассматриваемой конструкции при ударных воздействиях использована инкрементальная модель пластичности в формулировке Крига и Кея [7], 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 [8, 9].

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. Полученная в результате конечно-элементной дискретизации система дифференциальных уравнений движения решается с помощью метода последовательных нагружений [10], 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.

Построены концептуальные диаграммы и разработаны конечно-элементные модели пластического деформирования защитных устройств, содержащих сотовые блоки, при ударе для определения параметров конструкций УПЭ с требуемой энергоемкостью.

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 [11]. 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.

Натурные ударные испытания (крэш-тест) опытного образца УПЭ. В испытательном центре TÜV SÜD Rail GmbH (г. Герлиц, Германия) выполнен крэш-тест опытного образца УПЭ, разработанного для пассивной защиты скоростного пассажирского локомотива нового поколения [12]. Получены экспериментальные диаграммы деформирования конструкции опытного образца устройства поглощения энергии при ударе и энергопоглощения в ре-

зультате ее деформирования. Установлено, что энергоемкость конструкции опытного образца УПЭ с рабочим ходом 700 мм составляет 0,75 МДж. С использованием разработанных научно-методического обеспечения и конечно-элементной модели проведено математическое моделирование упругопластического деформирования конструкции опытного образца устройства поглощения энергии при ударе вагоном-бойком массой $M_b = 40,6$ т со скоростью $V_b = 24,7$ км/ч в соответствии с условиями выполненного крэш-теста. По критериям европейского стандарта EN 15227 выполнено сравнение расчетных и экспериментальных диаграмм деформирования опытного образца устройства поглощения энергии при ударе, а также соответствующих диаграмм энергопоглощения. Установлено, что расхождение средних расчетных и экспериментальных значений контактного усилия составляет 7 % при допускаемых 10 %. Расчетные и экспериментальные значения энергии, которая поглощается за счет деформации УПЭ на рабочем ходе 700 мм, совпадают с точностью до 5 %. Хорошая согласованность экспериментальных результатов и результатов моделирования подтверждает адекватность разработанной конечно-элементной модели и достоверность результатов, получаемых с помощью разработанного научно-методического обеспечения. Показано, что при проектировании пассажирских экипажей нового поколения с системами пассивной безопасности разработанные алгоритм и научно-методическое обеспечение могут быть использованы для выбора параметров конструкций устройств поглощения энергии в зависимости от требуемой энергоемкости для обеспечения выполнения тестовых расчетных сценариев аварийных столкновений согласно стандарту EN 15227.

Математическая модель для исследования динамики пассажирского поезда с СПБ при столкновениях. Разработана математическая модель для исследования динамики эталонных поездных составов с системами пассивной безопасности при аварийных столкновениях, сценарии которых соответствуют стандарту EN 15227. Используемые расчетные схемы приведены на рис. 1.

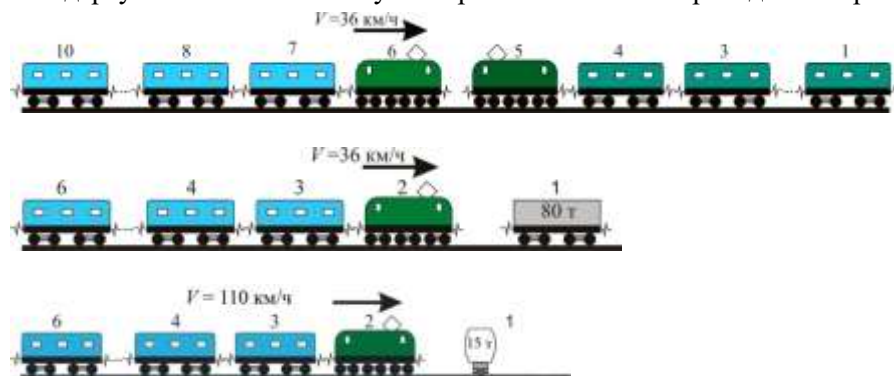


Рис. 1

Эта модель разработана с учетом совместной работы 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 [13].

Разработаны программные модули для определения нагруженности конструкции локомотива и вагонов пассажирского поезда с системами пассив-

ной безопасности в продольном и вертикальном направлениях, а также для оценки необходимого уровня энергоемкости устройств пассивной защиты при отработке сценариев столкновений в соответствии с европейским стандартом EN 15227.

Результаты исследований. Выполнен анализ влияния на зависимость контактной силы от перемещения центра масс бойка различных параметров препятствия и определены параметры, при которых деформируемое препятствие соответствует требованиям стандарта EN 15227 [11]. Получена силовая характеристика взаимодействия препятствия, соответствующего крупногабаритному транспортному средству, и локомотива эталонного поезда при столкновении на железнодорожном переезде. Расчетная схема для анализа

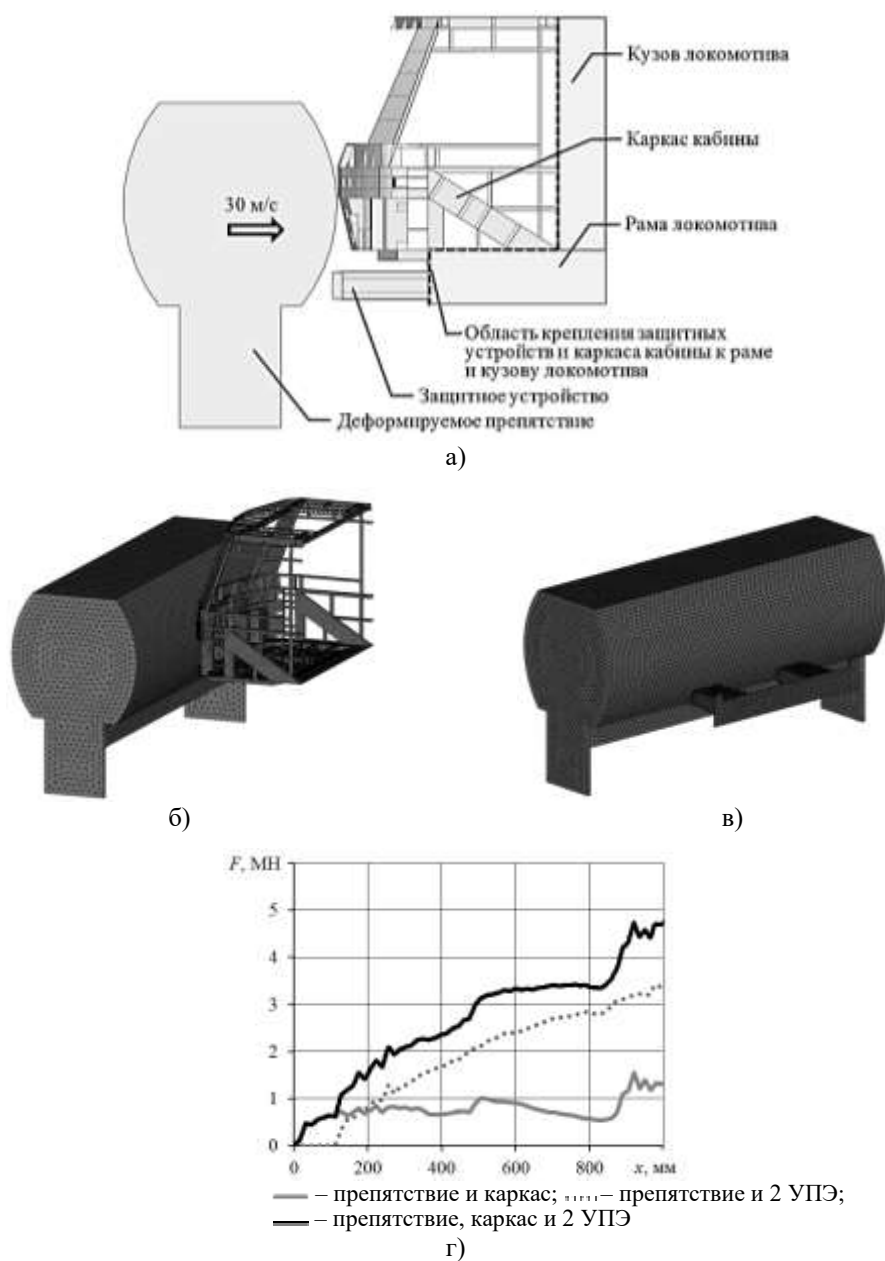


Рис. 2

взаимодействия передней части локомотива с препятствием приведена на рис. 2, а), конечно-элементные схемы для исследования пластического деформирования конструкций препятствия, каркаса кабины машиниста и двух УПЭ показаны соответственно на рис. 2, б) и 2, в), зависимость контактного усилия от перемещения центра масс препятствия при столкновении приведена на рис. 2, г).

Дана оценка динамической нагруженности локомотива с СПБ при столкновениях поездного состава в виде локомотива и грузового вагона с препятствием в виде грузового вагона [14] согласно требованиям стандарта EN 15227. Определены энергоемкости устройств поглощения энергии для локомотивов массой от 90 т до 123 т.

Проведены исследования динамической нагруженности пассажирского вагона с СПБ при столкновениях поездного состава в виде четырех вагонов с препятствием в виде неподвижного половинного вагона [15] согласно требованиям стандарта EN 15227. Определены энергоемкости устройств поглощения энергии для вагонов массой 50 т и 64 т.

Проведены исследования динамической нагруженности экипажей поезда с элементами СПБ при столкновении с идентичным поездным составом, с грузовым вагоном, с крупногабаритным препятствием на переезде согласно тестовым сценариям столкновения, приведенным в стандарте EN 15227. Установлено, что для выполнения требований стандарта EN 15227 рекомендуется оборудовать локомотивы массой от 90 т до 123 т устройствами с энергоемкостью 0,95 МДж; вагоны массой 50 т – УПЭ с энергоемкостью 0,25 МДж или 0,3 МДж; вагоны массой 64 т – УПЭ с энергоемкостью 0,3 МДж.

С использованием разработанных алгоритма, научно-методического обеспечения и конечно-элементных моделей выбраны параметры устройств поглощения энергии для тягового подвижного состава и прицепных вагонов.

На основе испытанной конструкции опытного образца УПЭ для локомотива разработаны конструкции устройств поглощения энергии четырех типов для пассивной защиты экипажей пассажирского поезда при аварийных столкновениях (рис. 3).

УПЭ 1 (рис 3, а)) состоит из двух частей, одна из которых представляет собой короб, содержащий трехслойный блок сот с шестигранными ячейками, а вторая – блок сот с трехгранными ячейками. УПЭ 2 (рис 3, б)) представляет собой короб в виде параллелепипеда, содержащий четырехслойный блок сот с шестигранными ячейками, УПЭ 3 (рис 3, в)) – сотовый блок в виде усеченной пирамиды (соты с трехгранными ячейками), УПЭ 4 (рис 3, г)) представляет собой короб с однослойным пакетом шестигранных сот и блок трехгранных сот в виде усеченной пирамиды.

УПЭ 1 с энергоемкостью 0,9 МДж и УПЭ 4 с энергоемкостью 0,95 МДж могут быть использованы в качестве основных энергопоглощающих элементов нижнего уровня (уровня расположения сцепных устройств) для пассивной защиты тягового подвижного состава. УПЭ 3 с энергоемкостью 1,1 МДж могут быть использованы для пассивной защиты головных вагонов моторвагонного поезда при аварийных столкновениях с железнодорожными экипажами, в частности с грузовыми вагонами. УПЭ 2 с энергоемкостями 0,25 МДж и 0,3 МДж могут быть использованы для пассивной защиты прицепных вагонов как основные энергопоглощающие элементы нижнего уров-

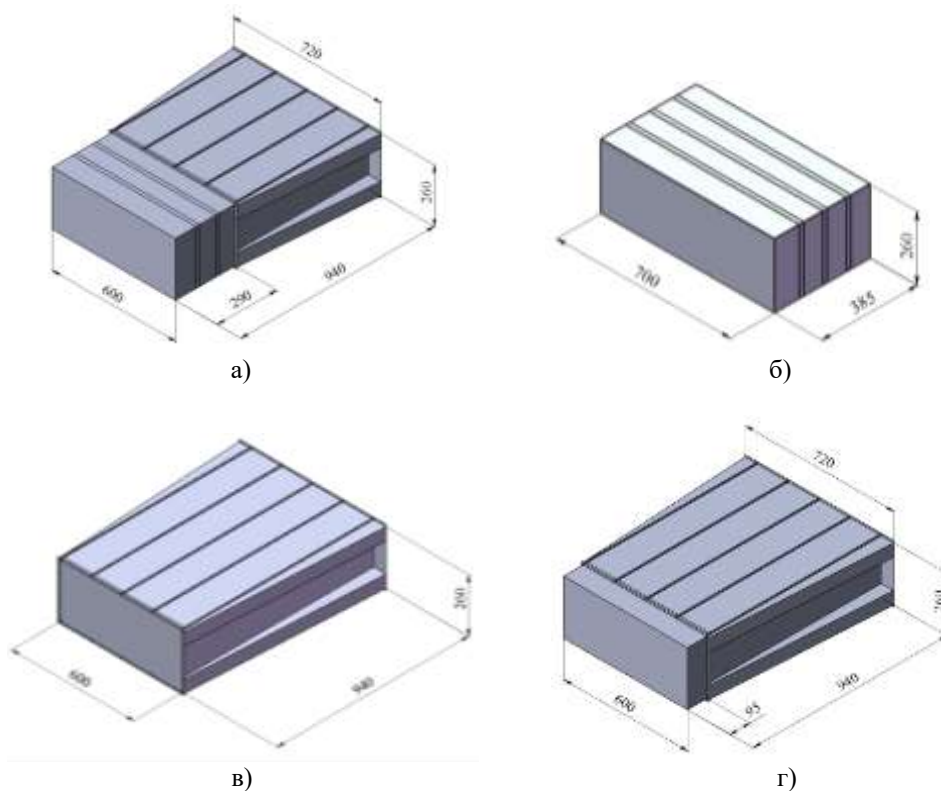


Рис. 3

ня. Кроме того, УПЭ 2 могут применяться в составе СПБ головного вагона как элементы защиты верхнего уровня (в подоконной части кабины машиниста) в случае столкновения поезда с крупногабаритным препятствием на железнодорожном переезде.

Определение факторов, влияющих на сход колесных пар экипажей с рельсов при столкновениях поезда с препятствием. Для решения поставленной задачи использованы разработанная математическая модель пространственных колебаний шестиосного локомотива, оборудованного системой пассивной безопасности и противоподъемными устройствами, и компьютерная программа, позволяющая проводить расчеты для исследования динамических процессов, протекающих при движении поезда и отдельного железнодорожного экипажа как в стандартных условиях, так и в аварийной ситуации [16]. Математические выражения для определения сил взаимодействия, возникающих при столкновении локомотива с разными видами препятствий, подробно описаны в работе [13].

При исследовании движения поезда колебания рассматриваемого локомотива анализируются с использованием пространственной расчетной схемы. Точки касания автосцепного устройства и элементов пассивной безопасности с преградой определяются их перемещениями в пространстве:

$$q = \sqrt{q_x^2 + q_y^2 + q_z^2},$$

где q_x, q_y, q_z – перемещения кузова локомотива в точках контакта с преградой в продольном, горизонтальном поперечном и вертикальном направлениях соответственно.

Перемещения кузова локомотива при соприкосновении с автосцепкой определяются следующим образом:

$$\begin{aligned}q_x &= v(t - t^*) + x_f + h_1 \varphi_f ; \\q_y &= y_f + l \psi_f - h_1 \theta_f ; \\q_z &= z_f - l \varphi_f ,\end{aligned}$$

где v – скорость движения локомотива; t – текущее время; t^* – время, при котором произошло столкновение; x_f, y_f, z_f – поступательные перемещения (подергивание, боковой относ и подпрыгивание) кузова локомотива; $\psi_f, \theta_f, \varphi_f$ – углы виляния, боковой качки и галопирования кузова локомотива соответственно; $2l$ – база локомотива; h_1 – расстояние от центра масс кузова до места крепления автосцепки в вертикальном направлении.

Перемещения кузова локомотива в местах крепления энергопоглощающих устройств имеют вид:

$$\begin{aligned}q_{x1} &= v(t - t^*) + x_f + b_1 \psi_f - h_2 \varphi_f ; \\q_{x2} &= v(t - t^*) + x_f - b_1 \psi_f - h_2 \varphi_f ; \\q_{y1} &= q_{y2} = y_f + l \psi_f + h_2 \theta_f ; \\q_{z1} &= z_f - l \varphi_f - b_1 \theta_f ; \\q_{z2} &= z_f - l \varphi_f + b_1 \theta_f ,\end{aligned}$$

где $2b_1$ – расстояние между энергопоглощающими устройствами в поперечном направлении; h_2 – расстояние от центра масс кузова до энергопоглощающих устройств в вертикальном направлении.

Система уравнений, описывающих вынужденные колебания шестиосного пассажирского локомотива при его движении по прямолинейным участкам пути, представляет собой систему нелинейных дифференциальных уравнений 120-го порядка.

При движении поезда по железнодорожному пути вследствие наличия неровностей рельсов разного типа (просадки, уширение колеи, перекосы) имеют место колебания, что приводит к появлению изменяющегося во времени угла поворота кузова локомотива относительно вертикальной оси в горизонтальной плоскости (угол виляния). В такой ситуации при столкновении с преградой силовое взаимодействие экипажей не ограничивается действием только продольных сил, возникают также поперечные силы взаимодействия сталкивающихся экипажей, что в свою очередь приводит к росту поперечных сил взаимодействия колес и рельсов. Значения этих сил зависят от величины угла виляния кузова локомотива в момент столкновения. Было проведено моделирование столкновения движущегося локомотива с различными значениями углов виляния кузова в момент аварии. Значения углов виляния кузова локомотива получены в зависимости от технического состояния рельсового пути, которому соответствуют разные среднеквадратичные значения амплитуд случайных неровностей рельсовой колеи. Рассматривались варианты наезда локомотива на аналогичный локомотив, груженный грузовой поезд и одиночный порожний грузовой вагон. При этом экипажи-преграды

находились в положении, когда продольная ось кузова соответствующего локомотива или вагона оставалась параллельной продольной оси пути.

Проведенные исследования показали, что в момент столкновения в зависимости от значения угла виляния кузова локомотива, его скорости движения и массы экипажа-преграды существенно изменяются динамические показатели экипажа, характеризующие устойчивость его движения по рельсовой колее. В большинстве случаев величины этих показателей находятся в зоне недопустимых значений и, в ряде случаев, имеет место потеря устойчивости и сход колесных пар локомотива с рельсов.

Для иллюстрации описанных выше условий столкновения экипажа с преградой на рис. 4 – 5 показаны графики изменения коэффициентов устойчивости от схода колесных пар с рельсов (K_{st}) в зависимости от времени для случаев, когда локомотив, двигаясь со скоростью 36 км/ч, наезжает на аналогичный локомотив. При этом характеристики, приведенные на рис. 4, соответствуют случаю, когда угол виляния в момент столкновения составлял 0,0349 рад., а на рис. 5 – 0,1396 рад. Как видно при увеличении угла виляния до 0,1396 рад. (рис. 5) происходит потеря устойчивости (коэффициент устойчивости резко падает, допустимое значение $K_{st}=1,4$) и колесные пары локомотива сходят с рельсов.

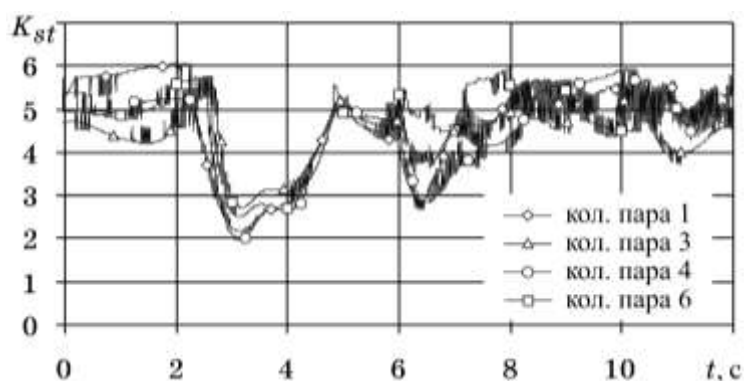


Рис. 4

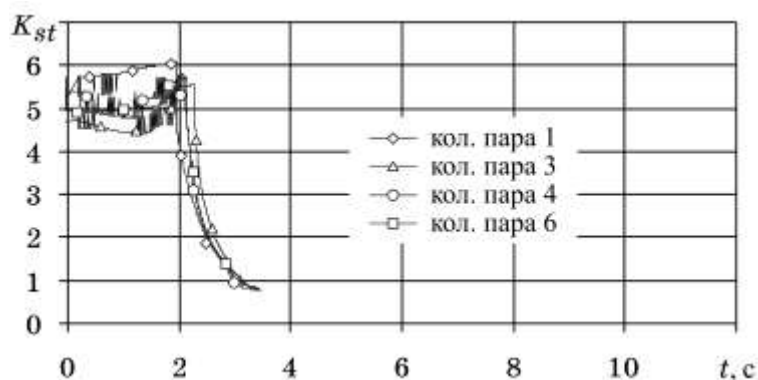


Рис. 5

Проведенные расчеты показали, что чем тяжелее экипаж-преграда и чем выше скорость движения поезда в момент столкновения, тем больше вероятность схода колес локомотива с рельсов. Минимальные значения углов виля-

ния локомотива, наезжающего на экипаж-преграду, при которых коэффициенты устойчивости его колесных пар от схода с рельсов уменьшались до значений, соответствующих всползанию головки колеса на рельс, и, соответственно, сходу колесной пары экипажа с рельсов, приведены на рис. 6.

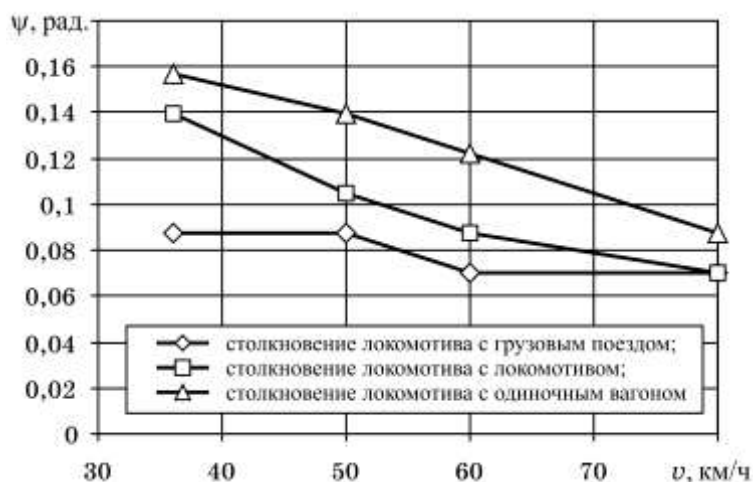


Рис. 6

Как видно из приведенных результатов, наличие даже небольших по величине значений углов виляния кузова локомотива приводит к появлению недопустимых значений рассматриваемого динамического показателя.

Таким образом, при движении локомотива по реальному железнодорожному пути при столкновении с препятствием может иметь место не только напользание вагонов друг на друга, но и сход колесных пар экипажей с рельсов.

Проведенные исследования также показали, что устойчивость движения локомотива, оборудованного элементами пассивной защиты, против схода колесных пар с рельсов при аварийных столкновениях в значительной мере зависит от технического состояния железнодорожной колеи [17]. Чем выше уровень неровностей рельсовой колеи, тем больше вероятность схода экипажа с рельсов.

Выводы. Разработана концепция пассивной защиты отечественного скоростного пассажирского поезда при столкновениях. Разработаны алгоритм, научно-методическое обеспечение и конечно-элементные модели, которые могут быть использованы для выбора параметров конструкций УПЭ, что подтверждено результатами выполненного крэш-теста опытного образца УПЭ, созданного для локомотива. Разработана математическая модель для исследования динамики эталонных поездных составов с СПБ, определения нагруженности конструкций экипажей в продольном и вертикальном направлениях, а также для оценки необходимого уровня энергоемкости УПЭ при отработке нормативных сценариев столкновений. В результате выполненного комплекса исследований разработаны конструкции УПЭ для тягового подвижного состава и прицепных вагонов.

Проведены исследования по определению условий, обеспечивающих устойчивость колесных пар локомотива от схода с рельсов. Рассмотрено поведение поезда при его столкновении с подвижной преградой, находящейся на железнодорожной колее. В качестве преграды рассмотрены экипажи различной массы: грузовой поезд, локомотив и порожний грузовой вагон. В ре-

зультате выполненных исследований определены факторы, приводящие к сходу колесных пар локомотива и вагонов с рельсов. Проведенные расчеты показали, что чем тяжелее экипаж-преграда и чем выше скорость движения поезда в момент столкновения, тем больше вероятность схода колес локомотива с рельсов. Устойчивость движения локомотива, оборудованного элементами пассивной защиты, против схода колесных пар с рельсов при аварийных столкновениях в значительной мере зависит также от технического состояния железнодорожной колеи. Показано, что чем выше уровень неровностей рельсовой колеи, тем больше вероятность схода экипажа с рельсов.

1. EN 15227. Railway applications – Crashworthiness requirements for railway vehicle bodies. Brussels, 2008. 37 p.
2. Каталог нормативних документів. URL: <http://uas.org.ua/ua/natsionalniy-fond-normativnih-dokumentiv/katalog-normativnih-dokumentiv-2/> (Last accessed: 24.04.2018).
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. Соболевская М. Б., Теличко И. Б., Сирота С. А., Хрущ И. К., Горобец Д. В., Клык Ю. А. Математическое моделирование упругопластического деформирования энергопоглощающих элементов системы пассивной безопасности локомотива при аварийном столкновении с препятствием. *Техническая механика*. 2010. № 4. С. 75–85.
5. Sobolevska M., Telychko I. Passive safety system of an electric locomotive for high-speed operation on the railways with 1520 mm gauge. *Passive Safety 2013 – Passive Safety of Rail Vehicles and Safe Interiors. Proceedings of the 9th International Symposium* (21 – 22 February 2013, Berlin). Berlin, 2013. P. 63–80.
6. 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.
7. 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.
8. Саймондс П. С. Динамика неупругих конструкций. М.: Мир, 1982. 224 с.
9. 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.
10. Оден Д. Конечные элементы в механике сплошных сред. М.: Мир, 1976. 464 с.
11. 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.
12. Соболевская М. Б., Сирота С. А., Горобец Д. В., Теличко И. Б. Натурные ударные испытания опытного образца устройства поглощения энергии, предназначенного для пассивной защиты локомотива при столкновениях. *Техническая механика*. 2016. № 2. С. 91–105.
13. Науменко Н. Е., Соболевская 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.
14. 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.
15. Науменко Н. Е., Соболевская М. Б., Сирота С. А., Горобец Д. В. Разработка элементов пассивной защиты вагонов пассажирского поезда нового поколения для железных дорог колеи 1520 мм. *Техническая механика*. 2017. № 2. С. 73–83.
16. Markova O., Kovtun H., Maliy V. Modelling train motion along arbitrary shaped track in transient regimes. *IMechE Part F: J. Rail and Rapid Transit*. 2015. № 229(1). P. 97–105.
17. Маркова О. М., Ковтун Е. Н., Малий В. В. Определение условий устойчивости локомотива от схода с рельсов при аварийных столкновениях. *Техническая механика*. № 2. 2018. С. 103–112.

Получено 07.08.2018
в окончательном варианте 25.09.2018