

Раздел 3. БЕЗОПАСНОСТЬ

УДК 629.4.023.14

Э. М. Рязанов, А. Э. Павлюков

Уральский государственный университет путей сообщения

МОДЕЛИРОВАНИЕ АВАРИЙНОГО СТОЛКНОВЕНИЯ ПОЕЗДА НА МАГНИТНОЙ ПОДУШКЕ С ПРЕПЯТСТВИЕМ

Дата поступления 18.07.2015

Решение о публикации 01.08.2015

Дата публикации 21.10.2015

Аннотация: В течение последних десятилетий большое внимание было сосредоточено на повышении пассивной безопасности автомобильных, авиационных, железнодорожных и судостроительных транспортных средств за счет разработки специальных устройств поглощения энергии (УПЭ). Принцип действия таких устройств заключается в поглощении кинетической энергии соударения с препятствием путем контролируемой необратимой деформации собственной конструкции [1]. В статье предлагается внедрить данные устройства системы пассивной безопасности и провести оценку их эффективности. Решение такой задачи осуществлялось посредством разработанной авторами методики численного моделирования аварийного столкновения подвижного состава с препятствием [2–4]. В статье представлен проект аварийной крэш-системы пассажирского поезда на магнитной подушке. Она состоит из торцевого и подвагонного крэш-модулей. Первый устанавливается на торцевую часть головного вагона поезда для поглощения энергии столкновения с крупным препятствием в случае аварии. Второй предназначен для снижения последствий столкновения с препятствиями относительно малых размеров, способных пробить пол или повредить подвагонное оборудование при высокой скорости движения. Различные виды конструкций и материалов изготовления УПЭ были теоретически исследованы с применением разработанной модели аварийного столкновения. В результате была произведена оценка работоспособности спроектированной аварийной крэш-системы в соответствии с существующими нормативными требованиями по безопасности движения.

Ключевые слова: аварийное столкновение; устройства поглощения энергии; метод конечных элементов; поезд на магнитной подушке.

Eldar M. Ryazanov, Alexander Ed. Pavlyukov

Ural State University of Railway Transport

SIMULATION OF EMERGENCY COLLISION OF A MAGNETIC LEVITATION TRAIN WITH AN OBSTACLE

Abstract: In the last decades much attention has been focused on improving the passive safety of automobile, aviation, railway and shipbuilding vehicles by means of development of special energy-absorbing devices (EAD). The operation principle of such devices is to absorb the kinetic energy of the collision with the obstacle by means of the controlled irreversible deformation of its own design [1]. The article proposes to implement these devices and passive safety systems to assess their effectiveness. The solution of this issue was carried out by the authors' methods of numerical simulation of emergency collision of a rolling stock with an obstacle [2–4]. The article demonstrates the simulated emergency crash system of the passenger magnetic levitation train. It consists of a front and undercar crash-modules. The first is mounted on the end part of the head car of the train to absorb the collision energy with a large obstacle in case of an accident. The second is designed to reduce the consequences of collisions with obstacles of relatively small sizes, able to break the floor or damage undercar equipment at high speed. Various designs and materials used for manufacturing of EAD were theoretically investigated using the developed model of emergency collision. In the result the assessment of work effectiveness of the designed emergency crash-system in accordance with the existing regulatory requirements for traffic safety was carried out.

Keywords: emergency collision; energy-absorbing devices; finite element method; magnetic levitation train.

Введение

Магнитолевитационный транспорт является одним из наиболее безопасных видов транспорта в мире. В отличие от железнодорожного подвижного состава, поезд на магнитной подушке фактически не может сойти с направляющих рельсов, благодаря левитации и конструкции тележки, расположенной по периметру путевой структуры. Тем не менее аварийные столкновения представляют серьезную угрозу для пассажиров и персонала любого транспортного средства. Они могут возникать вследствие нарушения правил движения, внезапных отказов и явлений непреодолимой силы. Так, 22 сентября 2006 года на севере Германии поезд «Трансрапид» на магнитной подушке, совершавший экспериментальный пробег, столкнулся с ремонтной платформой по обслуживанию пути на скорости свыше 200 км/ч [5]. После почти годичного расследования было выявлено, что причиной аварии послужил человеческий фактор. Авария, повлекшая за собой гибель 21 человека и ранение еще 10, послужила фактором, значительно уменьшающим вероятность коммерческого успеха проекта.

Совокупность устройств и технических решений в конструкции железнодорожного подвижного состава, называемая системой пассивной безопасности, может обеспечить снижение рисков нанесения ущерба здоро-

вью для пассажиров и персонала поезда в случае аварийного столкновения. К этой системе относят аварийную крэш-систему, которая в случае столкновения подвижного состава с препятствием уменьшает ускорение объектов столкновения за счет поглощения кинетической энергии путем контролируемой необратимой деформации УПЭ, входящих в ее состав.

В статье представлена спроектированная авторами аварийная крэш-система магнитолевитационного поезда и проанализирована эффективность данной системы при аварийном столкновении с использованием разработанной методики моделирования аварийного столкновения подвижного состава с препятствием.

1. Объект исследования

В качестве объекта исследования выбран условный пассажирский поезд на магнитной подушке. Конструкция остова кузова головного вагона поезда, представлена на рис. 1. Она состоит из алюминиевых пресованных профилей, а также алюминиевых пластин, которые образуют конструктивные узлы: нижнюю раму, боковую и торцевую стенки и крышу. Продольные несущие балки и боковые стенки проходят до передних боковых стоек кузова, расположенных рядом с кабиной машиниста. К нижней раме кузова крепятся несущие части тележек, аналогичные тележкам поезда «Трансрапид».

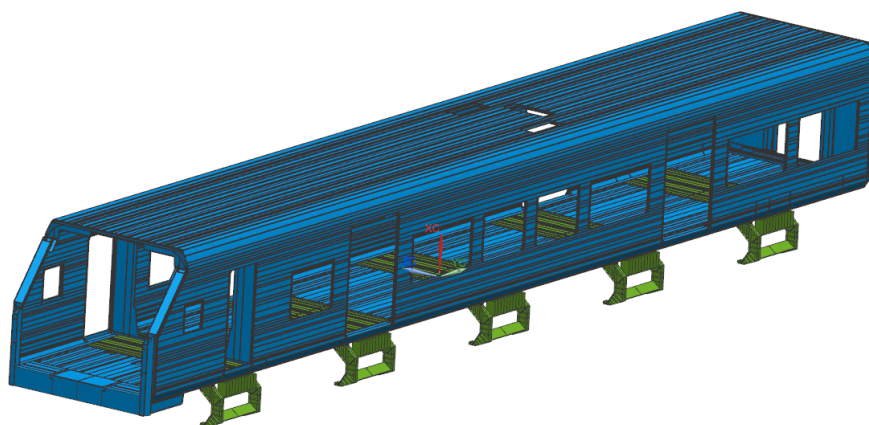


Рис. 1. Модель остова кузова и тележек поезда на магнитной подушке

Столкновение поезда на магнитной подушке с другим крупногабаритным объектом, например, деревом, крупным животным или другим транспортным средством придется на торцевую часть головного вагона. Негативные последствия такого столкновения способен уменьшить крэш-модуль, установленный на передние стойки остова кузова, как показано на рис. 2-а. В статье рассмотрено два варианта исполнения крэш-модуля: пер-

вый, состоящий из исключительно тонкостенной стальной конструкции (рис. 2-б), а второй – с добавлением ячеистой структуры (рис. 2-в). Конструкция УПЭ состоит из корпуса 1, переднего блока 2, воспринимающего на начальном этапе нагрузку аварийного столкновения, диафрагм 3, обеспечивающих стабильное деформирование крэш-модуля и ячеистых структур 4, повышающих энергоемкость устройства.

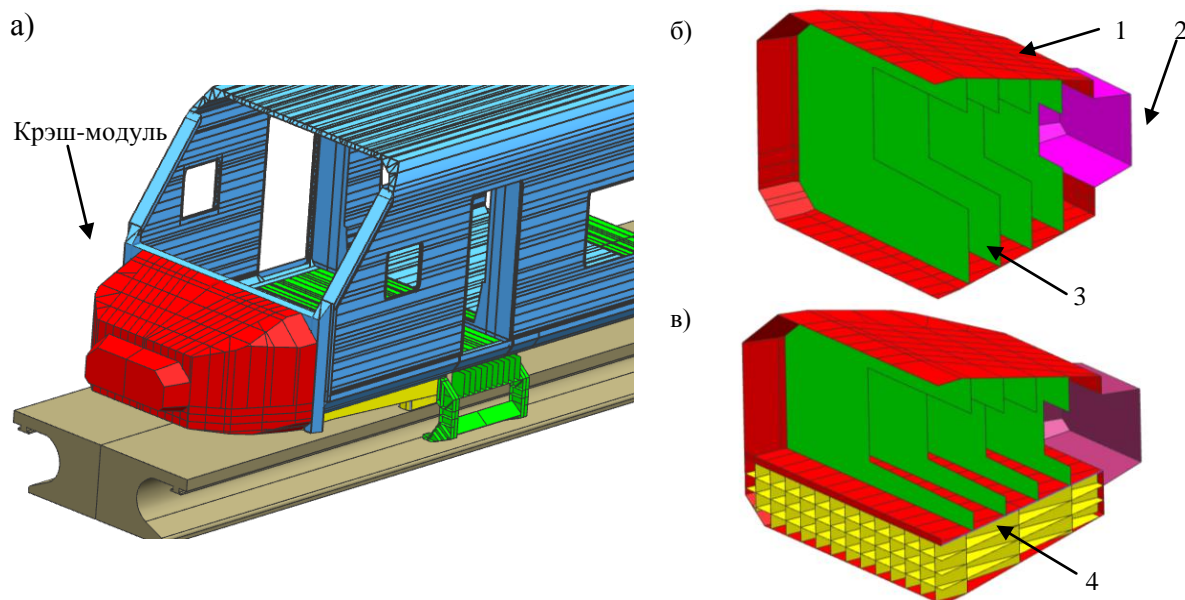


Рис. 2. Торцевой крэш-модуль:
а – расположение в вагоне; *б* – первое исполнение; *в* – второе исполнение
1 – корпус; *2* – передний блок; *3* – диафрагмы; *4* – ячеистая структура

На данный момент требования к подобным устройствам на магнитолевитационном транспорте не нормированы, поэтому оценка работоспособности торцевого крэш-модуля производилась по европейскому стандарту EN 15227:2008 [6], содержащему требования к пассивной безопасности железнодорожного транспорта. В данных нормативных требованиях ограничиваются значения ускорений единиц подвижного состава, которые не должны превышать $7,5 g$ (g – ускорение свободного падения), и величины деформации кузовов вагонов. Оценка выполнения заданных требований аварийной крэш-системы выполняется по определенному расчетному случаю аварийного столкновения. В статье за основу выбран случай столкновения, аналогичный столкновению подвижного состава с грузовым вагоном массой 80 т. В сравнении со сценарием, установленным стандартом EN 15227:2008, взятый за основу аварийный случай имеет следующие отличия: скорость подвижного состава на момент столкновения имеет значение не 36 км/ч, а 110 км/ч, препятствие не имеет буферов и не может деформироваться при ударе.

Если объекты столкновения по размеру малые, но имеют значительный вес, например камни, то они могут проникнуть через зазор между транспорт-

ным средством и путевой структурой и при высокой скорости движения могут пробить пол или повредить подвагонное оборудование. Для такого случая предлагается использовать крэш-модуль, расположенный под вагоном, как показано на рис. 3-а. Разработанный крэш-модуль аналогичен УПЭ, установленному в поезде «Трансрапид» [7]; он состоит из корпуса (1), выполненного из алюминиевых листов, путеочистителя (2) и энергопоглощающего материала (3). В отличие от типового крэш-модуля, используемого в подвижном составе поезда «Трансрапид», энергопоглощающий материал выполнен не из алюминиевой сотовой конструкции, а из вспененного алюминия. Такой материал обладает высокой удельной прочностью и эффективно поглощает энергию удара.

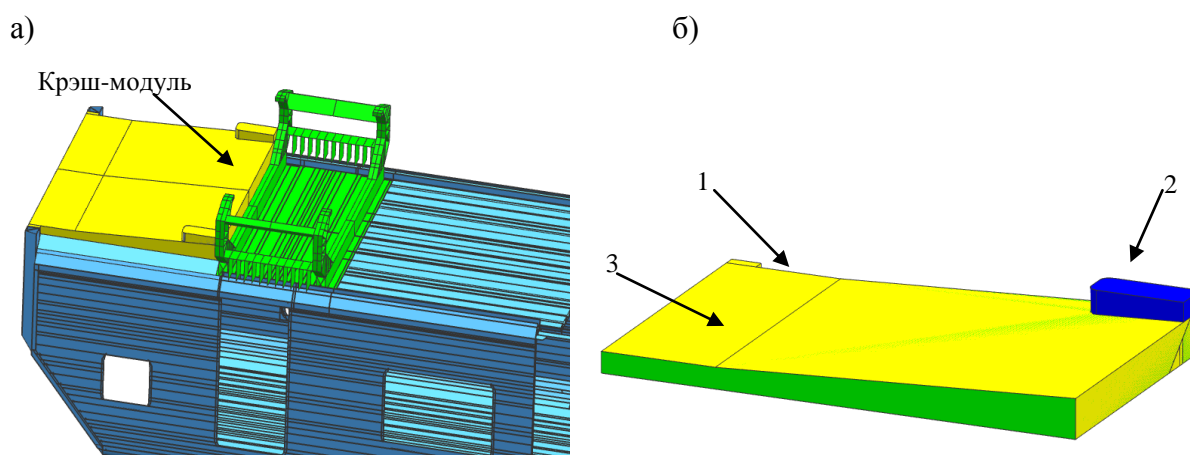


Рис. 3. Подвагонный крэш-модуль:

а – расположение в вагоне; *б* – составные элементы

1 – корпус; *2* – путеочиститель; *3* – энергопоглощающий материал

Технические требования по безопасности поезда на магнитной подушке при столкновении с малогабаритными объектами определяются нормами безопасности высокоскоростных магнитолевитационных поездов [8] и приведены ниже:

- максимальные средние ускорения в салоне вагона при скорости движения 500 км/ч не должны превышать 15 м/с^2 ;
- не допускается отцепление каких-либо компонентов оборудования поезда при столкновении;
- не допускается отрыв магнитов от конструкции транспортного средства;
- не допускается повреждение кабельных каналов, способных привести к нарушению функций безопасности магнитолевитационного транспортного средства;
- деформации при соударении должны быть ограничены головной частью транспортного средства;

– после столкновения магнитолевитационного поезда он должен доставить людей до ближайшей станции и направиться в сервисный центр для осмотра, ремонта или замены поврежденных компонентов.

В качестве расчетного сценария столкновения в статье был использован аварийный случай, применяемый разработчиками поезда «Трансприпид» при проектировании аварийной крэш-системы. Этот сценарий подразумевает столкновение транспортного средства со сферическим объектом массой 50 кг на скорости 500 км/ч.

2. Модель аварийного столкновения поезда на магнитной подушке с препятствием

Моделирование аварийного соударения подвижного состава является задачей динамического нелинейного процесса ударно-контактного взаимодействия. Решение такой задачи осуществлялось при помощи метода конечных элементов с явной схемой интегрирования по времени в программном комплексе LS-DYNA [9].

Для решения трехмерной нестационарной задачи необходимы пространственная и временная дискретизации. Временная дискретизация выполняется центральным разностным методом. Петля интегрирования по времени дифференциальных уравнений включает следующие операции: вычисление узловых нагрузок, ускорений, скоростей, приращений перемещений, деформаций в элементах и напряжений в элементах.

Пространственная дискретизация модели реализовывается методом конечных элементов. Конечно-элементная модель транспортного средства строилась в сетке Лагранжа. В табл. 1 представлены типы конечных элементов, количество и применение в модели. На рис. 4 представлена конечно-элементная модель при моделировании сценария столкновения магнитолевитационного транспортного средства с крупногабаритным препятствием.

Таблица 1. Параметры конечно-элементной модели

Тип элемента	Применение элемента	Число элементов
Оболочка типа Shell	Кузов вагона; крэш-модуль; тележки, путь	183357
Объемный элемент типа Solid	Энергопоглощающий материал из пеноалюминия	41958
Точечный элемент сосредоточенной массы Mass	Добавочная масса недостающих вагонов состава; масса оборудования и пассажиров	164

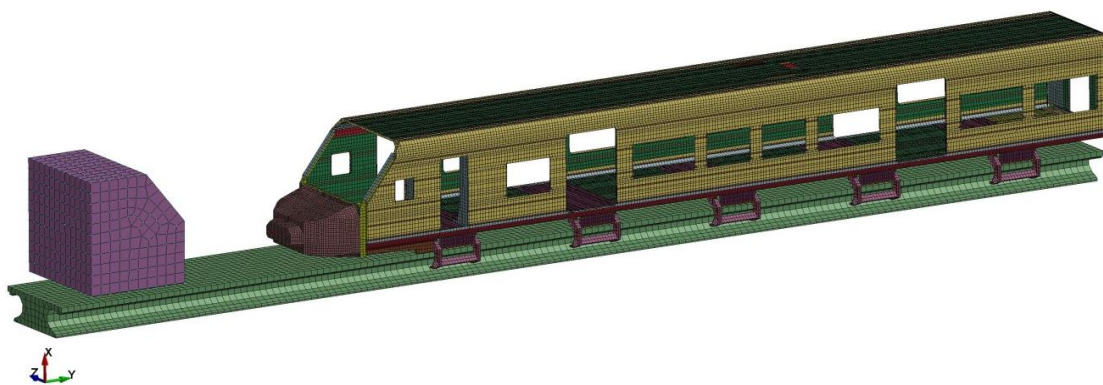


Рис. 4. Конечно-элементная модель магнитолевитационного транспортного средства

При постановке задачи задавались начальные условия в соответствии с расчетными сценариями; предполагается, что материал поезда в начальный момент не деформирован, все узлы поезда движутся с одинаковой скоростью в одном направлении, а узлы препятствия находятся в покое. В сценарии столкновения с крупногабаритным объектом препятствие имеет только одну степень свободы – вдоль направления движения. Кроме того, задавались ограничения на поверхностях несущей конструкции тележек в зоне предполагаемого расположения магнитов.

На взаимодействующих поверхностях модели задавались условия контакта: граничные условия на поверхностях накладывают ограничения на скорость движения и напряженное состояние контактных точек. Для реализации данного условия в программе LS-DYNA был использован специальный контактный алгоритм, который автоматически определяет контактные поверхности.

Модели материалов препятствия и пути задавались как абсолютно жесткие. Поведение материалов остова кузова, тележек и торцевого крэш-модуля определялось по теории пластического течения, в которой предполагается, что приращения деформаций складываются из упругих и пластических составляющих. Наступление стадии пластичности материала осуществлялось при условии, что эквивалентные напряжения превышают динамический предел текучести. Энергопоглощающий материал из пеноалюминия моделировался физической моделью Дешпанде-Флека (Deshpande-Fleck) [10]. Модель идентифицировалась в соответствии со свойствами материала пеноалюминия марки FOAMI-NAL с плотностью 450 кг/м^3 . Параметры модели были определены эмпирическим способом в статье [11].

3. Результаты моделирования

Результаты моделирования аварийных столкновений выявили величины необратимых деформаций, возникающих в головном вагоне поезда на магнитной подушке, и значения средних ускорений внутри салона.

На рис. 5 и 6 представлены разрушения вагона при моделировании сценария столкновения с крупногабаритным препятствием. Анализ величин необратимых деформаций показал, что применение крэш-модуля первого исполнения является недостаточным для обеспечения безопасности пассажиров и поездной бригады. Так, их величина превышает допустимые значения, регламентируемые европейским стандартом EN 15227:2008, в то время как применение крэш-модуля с ячеистой структурой обеспечивает допустимые величины деформаций кузова вагона. Энергоемкость крэш-модуля первого исполнения составила 4,5 МДж, а второго – 8,2 МДж.



Рис. 5. Разрушения модели поезда при использовании крэш-модуля первого исполнения



Рис. 6. Разрушения модели поезда при использовании крэш-модуля второго исполнения

На рис. 7 и 8 представлено изменение скорости движения поезда и препятствия в процессе столкновения для разных исполнений крэш-модуля. По этим диаграммам были определены величины перегрузок внутри салона. Оказалось, что при использовании крэш-модуля первого исполнения ускорения внутри салона равны 3,7 g, при этом средние ускорения внутри салона для крэш-модуля с ячеистой структурой оказались равны 5,3 g, что несколько выше показателей первого случая. Это можно объяснить увеличением жесткости крэш-модуля с ячеистой структурой, в результате чего большее количество энергии удара, не погашенной за счет пластического деформирования, передается в салон кузова в виде ускорений. Тем не менее оба варианта исполнения удовлетворяют требованиям по допустимым ускорениям нормативных документов.

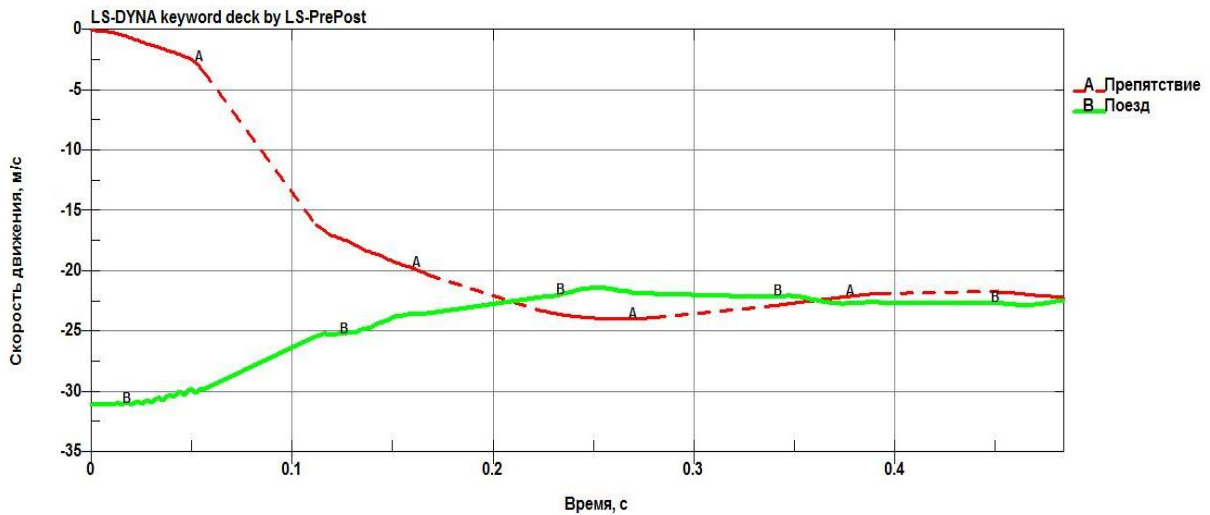


Рис. 7. Диаграмма изменения скорости движения поезда и препятствия для первого исполнения крэш-модуля

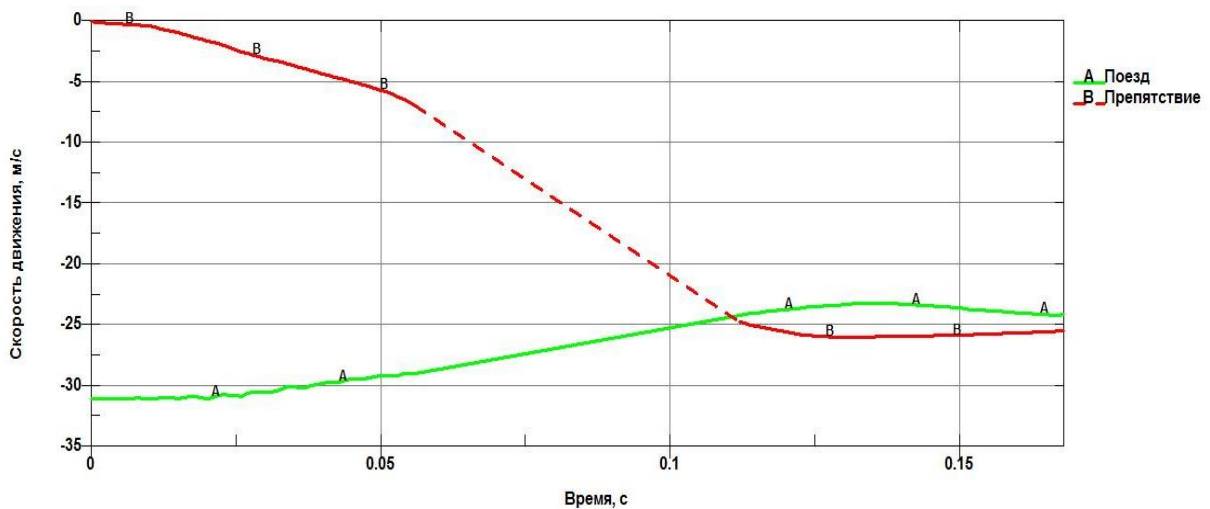


Рис. 8. Диаграмма изменения скорости движения поезда и препятствия для второго исполнения крэш-модуля

На рис. 9 представлено разрушение подвагонного крэш-модуля при попадании на путь малогабаритного предмета. Анализ повреждений показал, что остов кузова при таком столкновении остается неповрежденным. По диаграмме изменения скорости движения поезда и препятствия, представленной на рис. 10, видно, что через 0,05 с после столкновения, скорость движения препятствия сравняется со скоростью поезда, при этом скорость движения поезда практически не изменилась.

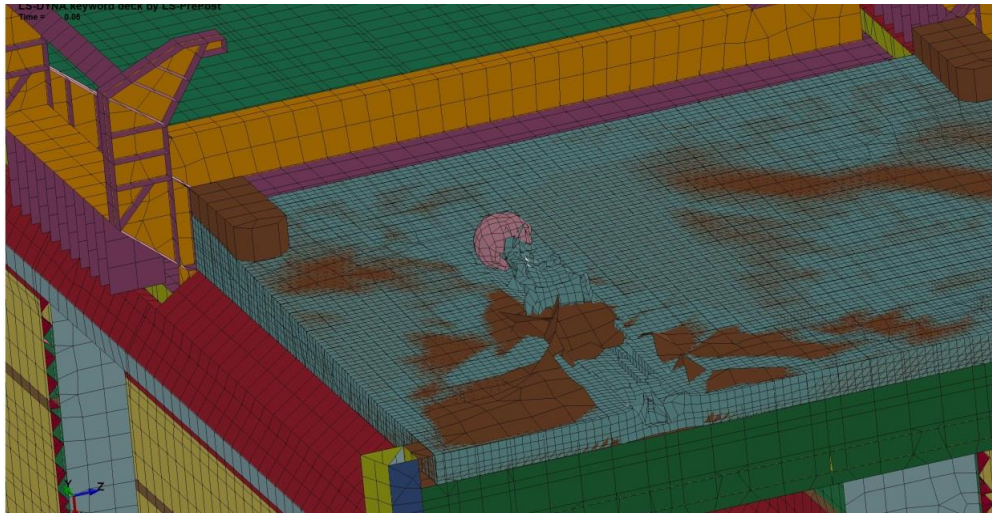


Рис. 9. Разрушение подвагонного крэш-модуля

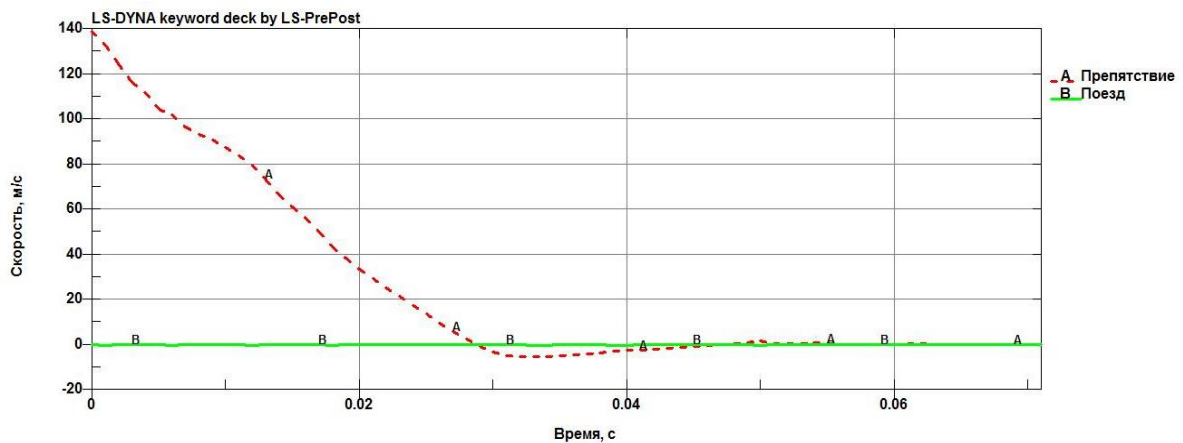


Рис. 10. Диаграмма изменения скорости движения поезда и препятствия

Заключение

Применение разработанной методики численного моделирования аварийного столкновения подвижного состава с препятствием позволило учесть:

- пространственный характер нагрузки с возможностью оценки напряженного состояния;
- геометрию и конструктивные особенности объекта исследования;
- упруго-пластическую физическую модель металлических конструкций;
- физическую модель Дешпанде-Флека для пенометаллов.

Благодаря перечисленным выше особенностям компьютерная модель позволила определить уровень необратимых деформаций при аварийном

столкновении, энергоемкость УПЭ и диаграмму изменения скорости движения поезда на магнитной подушке в процессе аварийного столкновения.

По результатам моделирования аварийного столкновения подвижного состава с крупногабаритным препятствием было выявлено, что применение ячеистой структуры в конструкции крэш-модуля увеличивает энергоемкость крэш-модуля на 82 %, и в результате предотвращает значительные деформации в остове кузова. Однако увеличение жесткости УПЭ повышает значение продольных ускорений внутри салона и может привести к нежелательным результатам.

Результаты моделирования аварийного столкновения подвижного состава с малогабаритным препятствием подтвердили эффективность применения вспененного алюминия в качестве энергопоглощающего материала для подвагонного крэш-модуля.

Библиографический список

1. ГОСТ 32410–2013 «Крэш-системы аварийные железнодорожного подвижного состава для пассажирских перевозок. Технические требования и методы контроля»; Москва : Стандартинформ 2013 – 26 с.

2. Рязанов Э. М. Моделирование работоспособности крэш-системы электропоезда при аварийных столкновениях / Э. М. Рязанов, М. В. Жуйков, А. Э. Павлюков // Транспорт Урала, 2014. – № 4 (43). – С. 44–49.

3. Рязанов Э. М. Применение устройств поглощения энергии в сцепных устройствах для обеспечения пассивной безопасности электропоездов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока, 2014. – № 4. – С. 97–100.

4. Рязанов Э. М. Применение комплекса LS-DYNA для анализа нелинейных динамических процессов в железнодорожном подвижном составе при нештатных ситуациях / Э. М. Рязанов, А. Э. Павлюков // Международное научное объединение «Prospero», 2015. – № 1. – С. 50–54.

5. Крушение поезда потрясло Германию [Электронный ресурс] // BBC Русская служба. URL: http://news.bbc.co.uk/hi/russian/international/newsid_5372000/5372978.stm (дата обращения 05.06.2015).

6. Standard EN 15227:2008 Railway applications – Crashworthiness requirements for railway vehicle bodies; Brussels 2010. – 38 p.

7. Liu X. et al. Crash Safety System of the Maglev Vehicle // MAGLEV'2006: The 19th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives. – 2006.

8. High speed maglev Trains: German safety requirements, report No. Dot/FRA/ORD-92/01, Translation of: Magnetschnellbahn, sicherheitstechnische Anforderungen (RW MSB). TÜV Rheinland, Köln, Ausgabe 1, März 1991.

9. LSTC. «LS-DYNA Keyword User's Manual, Volume 1». Livermore Software Technology Corporation (LSTC) 2009 – 1384 p.

10. Deshpande V. S., Fleck N. A. Isotropic constitutive models for metallic foams //Journal of the Mechanics and Physics of Solids. – 2000. – T. 48. – № 6. – P. 1253–1283.

11. Hanssen A. G. et al. Optimisation of energy absorption of an A-pillar by metal foam insert //International Journal of Crashworthiness. – 2006. – T. 11. – № 3. – P. 231–242.

References

1. GOST 32410-2013 Krehsh-sistemy avarijnye zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava dlya passazhirskih perezovok. Tekhnicheskie trebovaniya i metody kontrolya [GOST 32410–2013. Emergency crash system of railway rolling stock for passenger transport. Technical requirements and control methods]. Moscow, Standartinform, 2013. 26 p.

2. Ryazanov E. M., Zhuykov M. V., Pavlyukov A. E. *Transport Urala – Transport Urala*, 2014, no. 4 (43), pp. 44–49.

3. Ryazanov E. M. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dalnego vostoka – Scientific problems of transport Siberia and Far East*, 2014, no. 4, pp. 97–100.

4. Ryazanov E. M., Pavlyukov A. E. *Mezhdunarodnoe nauchnoe obedinenie “Prospero” – International Scientific Association “Prospero”*, 2015, no.1, pp. 50-54.

5. *BBC Russkaya sluzhba* (BBC Russian service). URL: [http://news.bbc.co.uk/hi/russian/international/newsid_5372000/5372978.stm\(05/06/2015\)](http://news.bbc.co.uk/hi/russian/international/newsid_5372000/5372978.stm(05/06/2015)).

6. Standard EN 15227:2008 Railway applications – Crashworthiness requirements for railway vehicle bodies. Brussels, 2010. 38 p.

7. Liu X. Crash Safety System of the Maglev Vehicle. The 19th Int. Conf. on “Magnetically Levitated Systems and Linear Drives”, 2006.

8. *German safety requirements, report no. Dot/FRA/ORD-92/01, Magnetschnellbahn, sicherheitstechnische Anforderungen (RW MSB). TÜV Rheinland, Köln, Ausgabe 01/03/1991*[German safety requirements, Report no. Dot / FRA / ORD-92/01, maglev, safety requirements (RW MSB). TÜV Rheinland, Cologne, Issue 01/03/1991].

9. LSTC. "LS-DYNA Keyword User's Manual, Volume 1". Livermore Software Technology Corporation (LSTC) 2009. 1384 p.

10. Deshpande V. S., Fleck N. A. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2000, vol. 48, no. 6, pp. 1253–1283.

11. Hanssen A. G. *Int. Journal of Crashworthiness*, 2006, vol. 11, no. 3, pp. 231–242.

Сведения об авторах:

Эльдар Михайлович РЯЗАНОВ, аспирант Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, E-mail: emryazanov@yandex.ru

Александр Эдуардович ПАВЛЮКОВ, д-р техн. наук; профессор кафедры «Вагоны» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, E-mail: apavlukov@usurt.ru

Information about authors:

Eldar M. RYAZANOV, graduate student, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, E-mail: emryazanov@yandex.ru

Alexander Ed. PAVLYUKOV, DSc in Engineering, Professor, Department of Railway Cars, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, E-mail: apavlukov@usurt.ru