

УДК 629.46:004.94

DOI: 10.52531/1682-1696-2024-24-1-75-83

Научная статья

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА НА ОСНОВЕ УЧЕТА ДЕФОРМИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТИРУЕМОГО ГРУЗА

А.В. Путятю¹,
А.О. Шимановский²,
М.Г. Гегедеш²,
П.М. Афанаськов²

¹ГОМЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ П.О. СУХОГО, г. Гомель, Республика Беларусь

²БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА, г. Гомель, Республика Беларусь

Рассматриваются особенности решения задач о динамике и прочности конструкций железнодорожного подвижного состава в случаях высокой деформативности транспортируемого груза на основе компьютерного моделирования в инженерных пакетах твердотельного и конечноэлементного анализа. Представлены результаты анализа крепления рельсов при их транспортировке на сцепе железнодорожных платформ. Исследованы напряжения и деформации в контейнере-цистерне C11N17 T11, возникающие при ударном воздействии на нее. Приведен анализ влияния когезии сыпучего груза на силы, действующие на кузов вагона при его соударении. Полученные результаты позволяют анализировать безопасность перевозки и прогнозировать сохранность грузов с различными геометрическими и физическими характеристиками при транспортировке железнодорожным транспортом.

Ключевые слова: железнодорожный подвижной состав, деформируемость грузов, компьютерное моделирование, напряженно-деформируемое состояние, крепление грузов, цистерна, сыпучий груз

ВВЕДЕНИЕ

К перевозке различными видами транспорта часто предъявляются грузы, которые в процессе транспортировки значительно деформируются под действием динамических нагрузок различного происхождения, продолжительности и характера. К числу таких грузов относятся жидкие, сыпучие, а также длинномерные,

Original article

IMPROVMENT OF THE RAILWAY ROLLING STOCK DESIGN ON THE BASE OF TRANSPORTED CARGO DEFORMATION CONSIDERATION

A.V. PUTSIATA¹, A.O. SHIMANOVSKY²,
M.G. GEGEDESH², P.M. AFANASKOU²

¹SUKHOI STATE TECHNICAL UNIVERSITY OF GOMEL, GOMEL, REPUBLIC OF BELARUS

²BELARUSIAN STATE UNIVERSITY OF TRANSPORT, GOMEL, REPUBLIC OF BELARUS

The features of solving problems on the railway rolling stock design dynamics and strength on the basis of computer modeling in engineering packages of solid-state and finite element analysis are considered taking into account high deformability of the transported cargo. There are demonstrated the results of the analysis of rails fastening dynamics for the case of rails transportation on the coupling of railway platforms. The stresses and deformations in the C11N17 T11 tank container at the longitudinal impact of cars are investigated. There is presented the analysis of the bulk cargo cohesion influence on the forces acting the car body at the collision of cars. The obtained results make it possible to analyze the transportation safety and to predict the safety of cargo with various geometric and physical characteristics during rail transportation.

KEYWORDS: railway rolling stock, deformability of cargo, computer modeling, stress-strain state, cargo fastening, tank, bulk cargo

которые перевозятся на сцепках платформ и полувагонов. Для выявления особенностей их динамического поведения возникает необходимость решения междисциплинарных задач о взаимодействии с элементами крепления и конструкцией транспортного средства, в частности, о нахождении относительного смещения частей грузов либо их центров масс, если речь идет о перевозках наливных и сыпучих грузов. Для повышения безопасности транспортировки грузов необходим полный учет всех этих явлений на основе использования аналитических и численных методов

© 2024, А.В. Путятю, А.О. Шимановский, М.Г. Гегедеш, П.М. Афанаськов

Поступила в редакцию 04.11.2023

механики твердого и деформируемого тел, сплошной среды, жидкостей и газов с учетом особенностей организации перевозочной и маневровой работы.

Нормативными документами регламентируется крепление грузов в вагонах без учета возможности их деформирования. Исследователями стран СНГ и дальнего зарубежья неоднократно выполнялись работы по моделированию транспортировки железнодорожным транспортом твердотельных стандартных [15, 31] и длинномерных [4], грузов. Существует лишь относительно небольшое число публикаций, в которых при расчетах размещения и крепления длинномерных грузов и транспортировке жидкостей железнодорожным транспортом принимается во внимание деформируемость перевозимых грузов жидких [8, 18, 23] и насыпных [22], а также средств их крепления [3, 20]. Как показывает практика, учет деформаций грузов в таких случаях позволяет выявить причины повреждения подвижного состава, а также средств крепления, которые не могут быть предсказаны при рассмотрении грузов как абсолютно твердых тел.

Цель представленной работы заключается в анализе возможностей инженерных программных продуктов для прогнозирования сохранности перевозки грузов, обладающих невысокой жесткостью, железнодорожным транспортом и повышения безопасности перевозочного процесса.

1 ТРАНСПОРТИРОВКА ДЛИННОМЕРНЫХ ГРУЗОВ

На Белорусской железной дороге достаточно часто возникает необходимость перевозки рельсов Р65 длины 25 м без болтовых соединений, которые грузятся, как правило, на сцеп из двух платформ, имеющих базу 9,72 м. Еще с 50-х годов XX в. [2] установлено, что наиболее простой с технической точки зрения является перевозка рельсов на сцепках платформ и на платформах сочлененного типа [16]. На железных дорогах колеи 1520 мм размещение и крепление рельсов на платформах осуществляется попарно в соответствии с [14] с помощью подкладок, брусьев, проволочных растяжек и обвязок.

Практика перевозки рельсов показывает, что через некоторое время после начала транспортировки такого груза может наблюдаться разрыв подкладочного бруса с одной из сторон нижнего яруса. В результате деформируются проволочные обвязки, ярусы рельсов выходят из состояния равновесия и распадаются. Это приводит к необходимости повторного закрепления груза, что требует использования подъемно-транспортного оборудования и занимает достаточно много времени.

Для анализа динамики сцепа платформ с погруженными на них рельсами были созданы компьютерные модели в среде MSC ADAMS. В них предусматривалось, что рельсы укладываются на сцеп из двух платформ 13–401 с базой 9720 мм в соответствии с

А.В. ПУТЯТО, А.О. ШИМАНОВСКИЙ,
М.Г. ГЕГЕДЕШ, П.М. АФАНАСЬКОВ
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА
НА ОСНОВЕ УЧЕТА ДЕФОРМИРОВАНИЯ
ТРАНСПОРТИРУЕМОГО ГРУЗА

главой 3 частью 1 Приложения 14 к [14] (рис. 1). При этом производилось жесткое закрепление одного конца нижнего яруса, для другого предусматривалась возможность свободного перемещения в продольном направлении. Отдельно нижний ярус закреплялся с использованием растяжек и обвязок, а остальные ярусы связаны между собой и с нижним при помощи обвязок.

Выполнен анализ движения сцепа по прямолинейной траектории и при входе сцепа в кривую малого (350 м) радиуса при скорости 5 м/с. Результаты расчетов показали, что при исследовании движения такого сцепа вдоль пути транспортируемые рельсы, имеющие сложную геометрию, можно заменить при моделировании упрощенными геометрическими телами (параллелепипедами) соответствующей массы.

При моделировании движения в кривой определено максимальное смещение нижнего яруса рельсов в сравнении с первоначальным его положением, т. е. максимальное отклонение продольной оси нижнего яруса рельсов от продольной оси платформы, которое составило 115 мм. То есть на практике при размещении костылей в деревянных подкладках на таком расстоянии от нижнего яруса с каждой стороны, целостность подкладки от удара рельсов о костыли нарушаться не должна. Однако следует предусмотреть замену костылей на другие приспособления, ограничивающие свободу перемещения нижнего яруса в продольном направлении, поскольку в деревянных подкладках возникают области повышенного напряжения и микротрещины, которые при малейшем несоблюдении требований, предъявляемых к перевозке рельсов, приводит к разрыву подкладки и возможному разрушению ярусов.

При рассмотренном смещении костыля расстояние между ним и концом деревянной подкладки уменьшается, а это может привести к образованию трещин и разрыва подкладки. Для выявления особенностей взаимодействия элементов системы «деревянный брусок – костыль» в среде ANSYS создана конечно-элементная модель. Она включала деревянный брусок, рассматривающийся как ортотропный материал, ко-

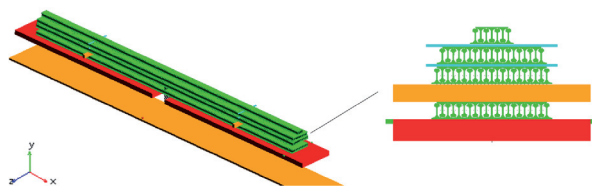


РИС. 1.

Компьютерная модель перевозки рельсов на сцепе из двух платформ 13–401 в инженерном пакете MSC ADAMS

торый в средней части имеет трещину с размещенным в ней стальным костылем.

При моделировании использованы 10-узловые тетраэдральные объемные конечные элементы. С целью обеспечения наилучшей аппроксимации перемещений и напряжений в области контакта сгущалась сетка конечных элементов. Области возможного соприкосновения поверхности древесины с костылем промоделированы плоскими контактными элементами. На рисунке 2 приведен фрагмент полученной конечноэлементной модели.

На рисунке 3 приведена эпюра распределения эквивалентных по Мизесу напряжений в исследуемой системе по плоскости сечения, нормальной к продольной оси костыля. Анализ результатов расчета позволил зафиксировать раскрытие трещины по волокнам древесины и показал наличие высоких значений контактных напряжений в граничных областях между деревянной поверхностью и костылем.

Полученные результаты позволили выработать рекомендации по совершенствованию способов крепления длинномерных грузов на сцепе вагонов.

Одним из перспективных направлений развития железнодорожного транспорта во всех регионах является строительство и эксплуатация высокоскоростных магистралей, для которых используются рельсовые плети различной длины для формирования бесстыкового пути. Сварка рельсов может осуществляться непосредственно на перегоне, однако для достижения более высокого качества ее целесообразно производить в стационарных условиях. В работе [1] исследуется транспортировка готовых рельсовых плетей длиной 100 м, авторы патента [7] предлагают устройство для перевозки рельсов, имеющих длину до 250 м. На территории стран СНГ используются рельсовые плети длиной до 800 м [10], которые, как показывает опыт американских компаний, могут также транспортироваться в готовом к укладке на специальных устройствах, уложенных на железнодорожные платформы. Обоснование максимальной безопасной

скорости такой перевозки связано с необходимостью определения поперечных сил, возникающих при изгибе перевозимых рельсовых плетей, и нахождению условий устойчивости движения вагонов по перегону. Решение данной комплексной задачи возможно только на основе компьютерного моделирования процесса транспортировки.

ПЕРЕВОЗКА НАЛИВНЫХ ГРУЗОВ

Главной особенностью перевозки наливных грузов является возможность перемещения груза относительно резервуара, которое может привести к возникновению значительных давлений на корпус резервуара. Задачей данной части работы является разработка способов, позволяющих определять характеристики напряженно-деформированного состояния железнодорожных цистерн при нестационарных движениях на основе компьютерного моделирования.

Значительное число исследований отечественных и зарубежных авторов, приведенных, например, в [24, 25, 27, 30], посвящено анализу динамики и прочности железнодорожных вагонов-цистерн. В то же время достаточно большой объем перевозки жидких грузов осуществляется с использованием контейнеро-цистерн, требования к прочности которых отличаются ввиду того, что они могут перевозиться как железнодорожным, так и другими видами транспорта. Конструкция такой цистерны может повредиться вследствие сильных ударных воздействий, вызванных соударением вагонов, а также иных динамических процессов, обусловленных изменением кривизны железнодорожного пути в плане и профиле, состоянием железнодорожного полотна и пути, резким изменением тяговых или тормозных сил, в том числе приводящих к возникновению волновых процессов в транспортируемом наливном грузе. Кроме того, при разработке конструкций резервуаров контейнеро-цистерн следует учитывать особенности их динамического нагружения, характерные для условий движения и по автомобильным дорогам.

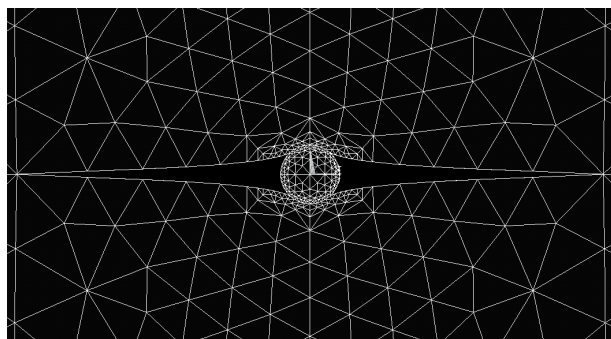


Рис. 2.

Фрагмент конечноэлементной модели в ANSYS

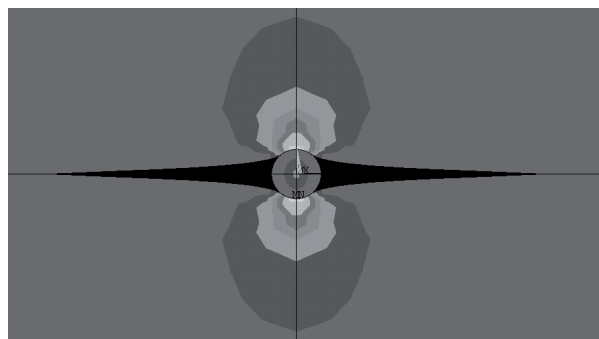


Рис. 3.

Распределение напряжений (кПа) в поперечной плоскости

В работе [28] авторами получены значения горизонтальных сил, действующих на днище перевозимой на платформе цистерны с водой, для случая соударения вагонов и определено, что зависимость от времени сил, действующих на торцевую стенку резервуара со стороны жидкости, имеет колебательный характер, что, в свою очередь, существенно влияет на устойчивость и прочность цистерны, а также на напряжения, возникающие в средствах крепления.

При разработке новых контейнеров, предназначенных для транспортировки на железнодорожном открытом подвижном составе, их необходимо испытывать на динамический удар в продольном направлении. Процедура проведения испытаний регламентируется руководством [13]. В ходе испытаний проверяется прочность конструкции, которую также можно исследовать на основе компьютерного моделирования.

Рассмотрен случай ударного воздействия на контейнер-цистерну типа C11N17 T11 [9]. На рисунке 4 представлен танк-контейнер и его модель в ANSYS. На рисунке 5 приведены некоторые результаты исследования прочности и жесткости конструкции при ударном воздействии, при котором величина перегрузки согласно [5] составляет $4g$. К торцевой стенке по ходу движения поезда прикладывалось давление, обусловленное гидродинамическим ударом транспортируемого жидкого груза, которое рассчитывалось в соответствии с [5] и составило 352,147 кПа. Также в расчетной схеме учитывался вес жидкости и общий вес брутто танк-контейнера с грузом, равный 353,16 кН.

Результаты расчетов показали, что при единичном ударном воздействии максимальные деформации возникают в верхней части каркасной рамы и не превышают 1 мм, максимальные напряжения в продольном направлении составили 63,276 МПа, максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу – 83,68 МПа, максимальные деформации – 0,58 мм. Таким образом, теоретически установлено, что напряжения в материале не превышают допустимых значений. Результаты проведенных испытаний подтвердили правильность представленного вывода.

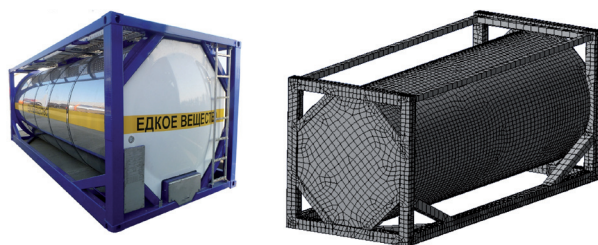


РИС. 4.

Общий вид и конечно-элементная модель контейнера-цистерны типа C11N17 T11

Однако результаты анализа усталостных явлений по эквивалентным напряжениям, рассчитанным в соответствии с [5] на основе компьютерного моделирования показали, что наиболее нагруженные области конструкции контейнера-цистерны способны выдержать не более 1650 ударных воздействий, то есть при частой эксплуатации таких резервуаров в ударных режимах значительно снижается срок безаварийной эксплуатации контейнера-цистерны.

ТРАНСПОРТИРОВКА СЫПУЧИХ ГРУЗОВ

Номенклатура перевозимых сыпучих грузов достаточно широка, а их характеристики (угол внутреннего трения, плотность, напряжение когезии и т.п.) существенно различаются. Применяемый в ГОСТ 33211 подход для определения нагруженности элементов кузовов вагонов от сыпучего груза, основанный на применении теории Кулона, не учитывает некоторые физико-механические свойства материала, например, связанные с наличием когезии. Значение ее напряжения может изменяться в широком диапазоне: так для идеального сыпучего песка она стремится к нулю, для сухого глинистого песка составляет 5 – 7 кПа, а для суглинка может достигать 90 кПа [29]. В работах различных исследователей проводился анализ нагруженности кузова при перевозке сыпучего груза для стандартного [6, 12, 17, 26], а также увеличенного объема загрузки [19]. Однако оценка нагруженности кузова вагона, в частности, торцевой стены при изменении когезионных свойств перевозимого сыпучего груза не осуществлялась.

Задача оценки нагруженности торцевой стены полувагона решалась в плоской постановке в программном комплексе ANSYS, а деформирование материала описывалось теорией Друккера-Прагера [21]. Использован 4-х узловой конечный элемент PLANE42. Свойства материала сыпучего груза представлены следующими характеристиками: плотность $\gamma = 1300 \text{ кг/м}^3$; угол естественного откоса $\varphi = 30^\circ$; модуль упругости $E = 10^6 \text{ Н/м}^2$; коэффициент Пуассона $\mu = 0,27$. Стены кузова вагона выполнены из стали. Для анализа взаимодействия груза со стенами решалась контактная задача. Геометрия сыпучего груза в продольной плоскости представлена прямоугольником со сторонами $h = 2 \text{ м}$, $L = 10 \text{ м}$ (рис. 6). Для моделирования изменения объема груза и оценки возможности разгрузки торцевой стены предусмотрена установка сплошной поперечной перегородки высотой h_p на расстоянии $0 \leq x \leq L/2$ (рис. 6).

Выполненные тестовые расчеты показали удовлетворительную сходимость результатов, полученных с использованием описанной компьютерной модели с экспериментальными данными [11]. Проведена оценка нагруженности кузова при соударении вагонов. На рисунке 7 приведены результаты расчета распределения динамического давления на торцевую

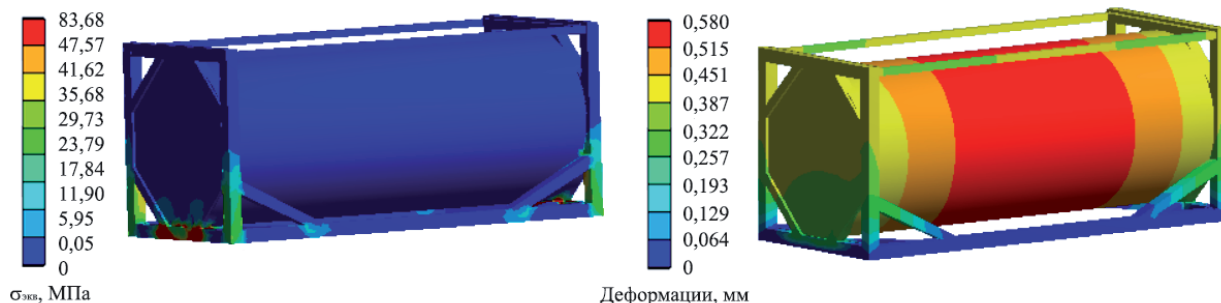


Рис. 5.

Результаты расчета эквивалентных напряжений по Мизесу и деформаций для контейнера-цистерны типа С11Н17 Т11 для случая единичного удара в продольном направлении в инженерном пакете ANSYS

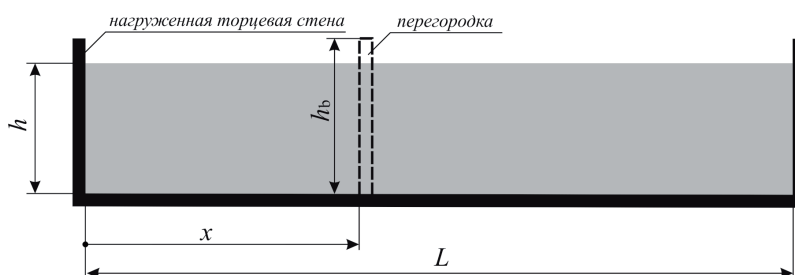


Рис. 6.

Геометрическая схема расчетной модели

стену и перегородку по высоте для различных значений x при $c = 20$ кПа, а на рисунке 8 — при $c = 7$ кПа.

Из приведенных зависимостей видно, что при $c = 20$ кПа по мере увеличения x снижается равномерность распределения нагрузки по высоте и наибольшие давления оказываются в средней части. Эффект такого перераспределения давления обнаружен при $x > 0,22L$. В то же время, давление на перегородку для практически всех рассмотренных мест ее установки оказывается на одном, достаточно высоком, уровне (коридор с кривыми 10). Отметим, что при установке перегородки в средней части вагона давления на торцевую стену и перегородку имеют одинаковые значения (кривые 8 и 9).

Несколько иные зависимости получены при $c = 7$ кПа. Максимальные давления на торцевую стену имеют существенно меньшие значения и стабилизируются при $x > 0,15L$. Кривые распределения давлений на торцевую стену при значениях $x > 0,15L$, а на перегородку оказались в коридоре значений, обозначенных на рисунке 8 позицией 5.

Полученные результаты показали, что установка сплошной перегородки приводит к снижению динамической нагруженности торцевой стены полувагона, причем для разных параметров груза место установки различно. В то же время давления сыпучего груза на установленную перегородку эквивалентны давлению на торцевую стену вагона без такой перегородки, что свидетельствует о нецелесообразности ее использования.

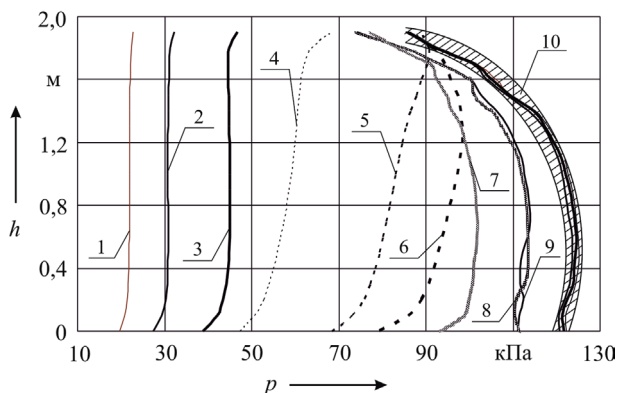


Рис. 7.

Распределение давления сыпучего груза по высоте торцевой стены и перегородки при $c = 20$ кПа: 1 — $x = 0,05L$; 2 — $x = 0,075L$; 3 — $x = 0,1L$; 4 — $x = 0,15L$; 5 — $x = 0,2L$; 6 — $x = 0,22L$; 7 — $x = 0,25L$; 8, 9 — $x = 0,5L$ (на перегородку и стену); 10 — давление на перегородку при $0 \leq x \leq 0,5L$

Анализ изменения динамической нагруженности торцевой стены для широкого диапазона значений напряжений когезии сыпучего груза, а также при разных положениях перегородки показал, что при размещении перегородки на расстоянии $0 \leq x \leq 0,1L$ значения средних давлений на торцевую стену для различных уровней когезии сыпучего груза одинаковы. Далее, по мере увеличения значения напряжения когезии, наблюдается первая стадия разветвления зависимостей на интер-

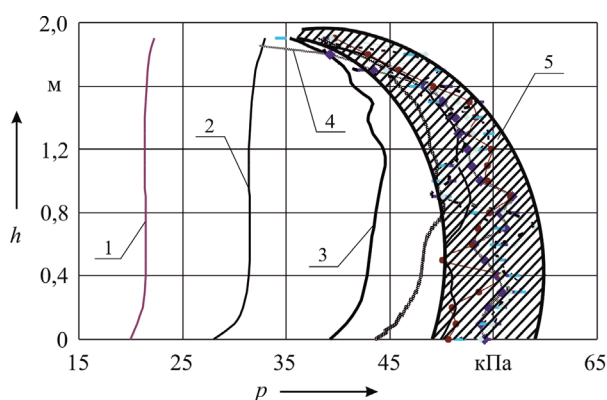


Рис. 8.

Распределение давления сыпучего груза по высоте торцевой стены и перегородки при $c = 7$ кПа: 1 – $x = 0,05L$; 2 – $x = 0,075L$; 3 – $x = 0,1L$; 4 – $x = 0,125L$; 5 – давление на стену при $x > 0,15L$ и на перегородку при $0 \leq x \leq 0,5L$

вале $0,1L \leq x \leq 0,2L$, а при значениях $x > 0,2L$ можно выделить вторую стадию. Отметим, что при рассмотрении материала с когезией менее 1,5 кПа возникли сложности с применением модели Друккера-Прагера и ее численным решением в виду нарушения сходимости нелинейной задачи.

Полученные результаты расчетов позволили установить так называемый «определяющий объем» сыпучего тела $V_{\text{опр}}$, соответствующий продольной силе инерции, действующий на торцевую стену. Очевидно, что для различных сыпучих материалов он будет отличаться. Так, например, при $c = 7$ кПа получено $V_{\text{опр}} = 12...17\%$ от общего объема перевозимого груза, при $c = 15$ кПа – $V_{\text{опр}} \approx 25\%$, при $c = 20$ кПа – $V_{\text{опр}} \approx 30\%$. При $c > 40$ кПа градиент роста $V_{\text{опр}}$ оказывается весьма незначительным.

Таким образом, имеет место высокий разброс значений нагруженности торцевой стены при соударении вагонов для материалов с различными когезионными свойствами. Из графика (рис. 9) видно, что при прочих принятых характеристиках сыпучего тела значение среднего динамического давления на торцевую стену вагона стабилизируется при $c > 40$ кПа. Таким образом, при оценке нагруженности торцевой стены при соударении вагонов и прочих принятых характеристиках сыпучего груза значение $V_{\text{опр}}$ составляет порядка 35%, что соответствует рекомендации, приведенной в нормативной документации. Вместе с тем, следует отметить, что целесообразно ввести адаптивную оценку нагруженности кузовов вагонов, предназначенных для перевозки сыпучих грузов в зависимости от их номенклатуры, указанной в Технических условиях на вагон.

Такой подход приведет к разработке новых конструкций, отвечающим условиям прочности и отличающихся улучшенными технико-экономическими параметрами (снижение массы тары, увеличение грузоподъемности).

А.В. ПУТЯТО, А.О. ШИМАНОВСКИЙ,
М.Г. ГЕГЕДЕШ, П.М. АФАНАСЬКОВ
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА
НА ОСНОВЕ УЧЕТА ДЕФОРМИРОВАНИЯ
ТРАНСПОРТИРУЕМОГО ГРУЗА

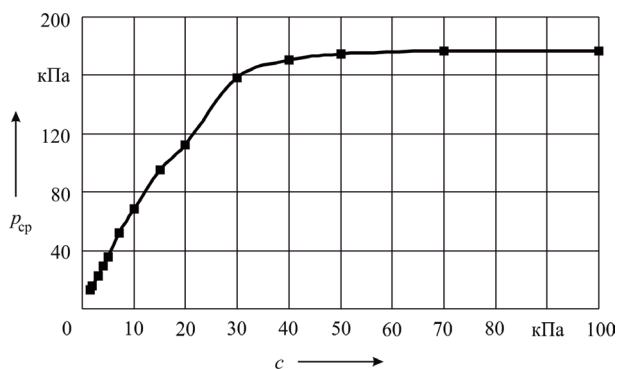


Рис. 9

Изменение $p_{\text{ср}}$ на торцевую стену от значения когезии (перегородка отсутствует)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполненных исследований рассмотрены различные случаи, при которых транспортируемый груз в процессе транспортировки смещается относительно кузова железнодорожного подвижного состава, и получены следующие основные результаты:

1. Анализ транспортировки рельсов на сцепе двух платформ показали, что при движении по кривой для предотвращения ударов рельсов о костыли, размещенные в деревянных подкладках, такие костыли должны размещаться на расстоянии, большем, чем 12 см от крайнего рельса, что позволит обеспечить целостность груза. Однако указанное смещение костыля может приводить к образованию трещин и разрыву подкладки. Конечноэлементное моделирование позволило установить особенности напряженно-деформированного состояния деталей крепления в зависимости от диаметра костыля и размеров бруска и выработать рекомендации по усовершенствованию способов креплений длинномерных грузов на сцепе вагонов.

2. Выполнены прочностные расчеты контейнер-рацистерны C11N17 T11 под действием нагрузок, возникающих при соударении вагонов. Результаты моделирования в среде программного комплекса ANSYS оказались близкими к данным экспериментов и показали, что напряжения в материале конструкции не превышают допускаемые значения.

3. В ходе компьютерного моделирования динамики вагона с сыпучим грузом установлено, что «определяющий объем» 35%, указанный в нормативной документации, соответствует напряжению когезии сыпучего груза $c > 40$ кПа. При меньших значениях напряжения когезии давление сыпучего груза на торцевую стенку кузова может оказаться в несколько раз меньшим. Учет данного факта при проектировании новых специализированных вагонов позволит разработать конструкции, обладающие улучшенными технико-экономическими параметрами по сравнению с универсальными вагонами.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект T22M-073).

ЛИТЕРАТУРА

1. АДИБЕКОВА, К.Б., КАЕРБЕКОВ Д.Ж., МЕДВЕДЕВ А.С., СТАВРОВА Н.Д. Реконструкция железнодорожного пути с целью увеличения скорости движения поездов // Наука и техника Казахстана. 2017. № 3–4. С. 9–18.
2. Американская железнодорожная энциклопедия. М.: Государственное транспортное железнодорожное издательство, 1959, 416 с.
3. АНТРОПОВА А.В., БАТАЛОВ А.В., КОЗЛОВ В.В., ЛАГУН А.В. Математическая модель оценивания динамических характеристик транспортировки ракетных блоков железнодорожным транспортом // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2020. № 673. С. 159–168.
4. ВАСИЛЬЕВ С.М. Математическое моделирование динамических воздействий на длинномерные грузы и опорные вагоны // Вестник Белорусского государственного университета транспорта. Наука и транспорт. 2006. № 1–2(12–13). С. 30–36.
5. ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам: межгос. стандарт. Введ. 2016–07–01. Москва: Стандартинформ. 2014. 54 с.
6. ЛОВСЬКА А.О. Вплив тиску насипного вантажу на стійкість контейнера при перевезенні залізничним поромом // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Динаміка та міцність машин. 2019. №. 1. С. 23–27. DOI:10.20998/2078-9130.2019.1.187413.
7. МАГАЛЯС С.В., БОБРОВ А.А. Устройство для предотвращения поперечного смещения (выброса) рельсовых плетей с рельсовозного состава при транспортировке. Патент на полезную модель RU 142140 U1, 20.06.2014. Заявка № 2013122573/11 от 16.05.2013.
8. МАКЕЕВ С.В., БУЙЛЕНКОВ П.М. Особенности расчета напряженно-деформированного состояния танка-контейнера с учетом реального нагружения в эксплуатации // Наука–образование–производство: Опыт и перспективы развития. Мат-лы XIV Межд. науч.-техн. конф-ии. Нижний Тагил. 2018. Т. 1. С. 174–184.
9. Морской танк-контейнер C11N17 T11 [Электрон. ресурс] https://www.sespe.com/catalog/tank-konteyner/morskoy_tank_konteyner_c11n17_t11/
10. НАУМЕНКО М.А., ХАЛУПА И.И., ИНЮТИН В.И., КОЖЕДУВ С.С. Повышение эффективности укладки сверхдлинных плетей / Проблемы безопасности на транспорте. Мат-лы XII Межд. науч.-практич. конф-ии, Гомель: БелГУТ. 2022. Ч. 1. С. 379–380.
11. ПУТЯТО А.В. Теория и практика совершенствования конструкций кузовов вагонов с учетом взаимодействия с перевозимыми грузами. Гомель: БелГУТ. 2011. 295 с.
12. ПУТЯТО А.В., КОНОВАЛОВ Е.Н., АФАНАСЬКОВ П.М. Прогнозирование остаточного ресурса вагона хоппер-дозатора после длительной эксплуатации с учетом фактических физико-механических характеристик материала несущей конструкции // Механика машин, механизмов и материалов. 2016. № 1 (34). С. 26–35.
13. Рекомендации по перевозке опасных грузов: Руководство по испытаниям и критериям. Нью-Йорк, Женева: Организация объединенных наций. 2013. 460 с.
14. Соглашение о международном железнодорожном грузовом сообщении (СМГС): действует с 1 ноября 1951 г. с изменениями и дополнениями на 1 июля 2015 г. Минск, «Амалфея», 2015, 216 с.
15. ТУРАНОВ Х.Т., РУЗМЕТОВ Я.О., ЯКУШЕВ А.В. О деформируемом состоянии механической системы «Груз-вагон-крепление» // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2019. Т. 16. №. 3. С. 455–468. DOI:10.20295/1815-588X-2019-3-455-468.
16. ЧАГАНОВА О.С., БЫСТРЕНКОВА Т.И., МЕНЬШОВА Е.В. Расчет средств крепления строительных грузов на современных вагонах сочлененного типа // Механика. Исследования и инновации. 2020. Вып. 13. С. 159–165.
17. ШМЫГИН А.А., ЧУГУНОВ М.В. Расчет на устойчивость сжатых элементов вагона-хоппера с использованием САПР // XLIX Огаревские чтения: материалы научной конференции. Саранск: Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева. 2021. Ч. 3. С. 621–629.
18. ASHTIANI I.H., RAKHEJA S., AHMED W. Investigation of coupled dynamics of a railway tank car and liquid cargo subject to a switch-passing maneuver // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. 2019. Vol. 233. №. 10. P. 1023-1037. DOI:10.1177/0954409718823650.
19. BARANOVSKIY D., MYAMLIN S.S., KEVAL I. Increasing the Carrying Capacity of the Solid-Body Rail Freight Car // Advances in Science and Technology. Research Journal. 2022. Vol. 16. N 3. P. 219–225. DOI:10.12913/22998624/149935.
20. CHAGANOVA O.S., VARAZHUN I.A. Fastenings parameters determination for highly deformative cargo, taking into account its durability during transportation in cars and trains // International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research. 2018. Vol. 7. Is. 3. P. 218–222. DOI:10.18178/ijmerr.7.3.218-222.
21. DRUCKER D.C., PRAGER W. Soil mechanics and plastic analysis or limit design. Quarterly of applied math-

- ematics. 1952. Vol. 10. N 2. P. 157–165.
22. **KWIATUSZEWSKA-SARNECKA B.** Reliability and risk function improvement of bulk cargo transportation system // *Journal of Polish Safety and Reliability Association*. 2015. Vol. 6. N 2. P. 81–88. DOI:10.1109/DT.2015.7222965.
 23. **LOVSKA A., GERLICI J., FOMIN O., KRAVCHENKO K., FOMINA YU, LACK T.** Special aspects of determining the dynamic load of the tank container during its transportation in an integrated train set by a railway ferry // *TRANSBALICA XI: Transportation Science and Technology. Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure*. Cham, Springer. P. 581–590. DOI:10.1007/978-3-030-38666-5_61.
 24. **NAGY G.** Numerical and experimental stress determination in a tank car body // *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 45. P. 4292–4297. DOI:10.1016/j.matpr.2020.12.775.
 25. **RAHMATI-ALAEI A., SHARAVI M., SAMADIAN ZAKARIA M.** Hunting stability analysis of partially filled tank wagon on curved track using coupled CFD-MBD method // *Multibody System Dynamics*. 2020. Vol. 50. N 1. P. 45–69. DOI:10.1007/s11044-019-09715-y.
 26. **ROMANOVYCH Y., KRAVETS A., AFANASOV G., POVORozHENKO Y., AFANASOVA O.** Method for determining non-uniform loading of gondola cars with bulk cargo // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1021. N 1. Paper 012048. 11 p. DOI:10.1088/1757-899X/1021/1/012048.
 27. **SHIMANOVSKY A.O.** Recent research of dynamics and strength of tank vehicles // *Механика машин, механизмов и материалов*. 2016. № 3 (36). С. 59–70.
 28. **SHIMANOVSKY A.O., KUZNIATSOVA M.G.** Computer modeling of wheeled vehicles fastened to railway platform // *Revista Academiei Fortelor Terestre*. 2011. Vol. 16. N 1 (61). P. 130–136.
 29. Typical values of soil cohesion for different soil [Электрон. ресурс] <https://www.geotechdata.info/parameter/cohesion>.
 30. **YANG G.X., FUB D.L., LIA Q., LIUA Z.M.** A finite element analysis on mechanical behavior of Al/Al-Mg composites for the design of tank cars under actual measuring loads // *Engineering Failure Analysis*. 2019. Vol. 103. P. 294–307. DOI:10.1016/j.engfailanal.2019.05.008.
 31. **ZHANG D., TANG Y., CLARKE D.B., PENG Q., DONG C.** An innovative method for calculating diagonal lashing force of cargo on railway wagons in a curve alignment // *Vehicle System Dynamics*. 2021. Vol. 59. № 3. P. 352–374. DOI:10.1080/00423114.2019.1686160.
 2. *American Railway Encyclopedia*. Moscow: Gosudarstvennoye transportnoye zheleznodorozhnoye izdatel'stvo. 1959:416. (In Russian).
 3. **ANTROPOVA A.V., BATALOV A.V., KOZLOV V.V., LAGUN A.V.** Mathematical model for assessing the dynamic characteristics of transporting rocket blocks by rail / *Proceedings of the Military Space Academy named after. A.F. Mozhaisky*. 2020;673:159–168. (In Russian).
 4. **VASILIEV S.M.** Mathematical modeling of dynamic effects on long cargo and support cars. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta transporta. Nauka i transport*. 2006;1–2;(12–13):30–36. (In Russian).
 5. **GOST 33211-2014.** Freight cars. Requirements for strength and dynamic properties: interstate. standard. Enter. 2016–07–01. Moscow, Standardinform. 2014:54. (In Russian).
 6. **LOVSKA A.O.** Influencing the pressure of the pressure on the resistance of the container when transported by the slag. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnogo universytetu «KHPI». Seriya: Dynamika ta mitsnist mashyn*. 2019;1:23–27. DOI:10.20998/2078-9130.2019.1.187413. (In Russian).
 7. **MAGALYAS S.V., BOBROV A.L.** A device for preventing lateral displacement (ejection) of rail strands from a rail stock during transportation. Utility model patent RU 142140 U1, 06/20/2014. Application N 2013122573/11 dated 05/16/2013. (In Russian).
 8. **MAKEEV S.V., BUYLENKOV P.M.** Features of calculating the stress-strain state of a tank container taking into account real loading in operation. *Science–education–production: Experience and development prospects. Materials XIV Int. Nau.-Techn. conf. Nizhny Tagil*. 2018;1:174–184. (In Russian).
 9. Sea tank container C11N17 T11 [Electronic. resource] https://www.sespel.com/catalog/tank-konteynery/morskoy_tank_konteyner_c11n17_t11/ (In Russian).
 10. **NAUMENKO M.L., KHALUPA I.I., INYUTIN V.I., KOZHEDUB S.S.** Increasing the efficiency of laying extra-long lashes. *Transport safety problems. Materials XII Int. scientific-practical conference, Gomel: BelGUT*. 2022;1:379–380. (In Russian).
 11. **PUTYATO A.V.** Theory and practice of improving the designs of car bodies, taking into account the interaction with transported goods. Gomel: BelGUT. 2011:295. (In Russian).
 12. **PUTYATO A.V., KONOVALOV E.N., AFANASKOV P.M.** Forecasting the residual life of a hopper dispenser car after long-term operation, taking into account the actual physical and mechanical characteristics of the material of the supporting structure. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov*. 2016;1;(34):26–35. (In Russian).
 13. *Recommendations for the Transport of Dangerous Goods: Manual of Tests and Criteria*. New York, Geneva: Organizatsiya ob'yedinennykh natsiy. 2013:460. (In Russian).

REFERENCES

1. **ADILBEKOVA, K.B., KAERBEKOV D.ZH., MEDVEDEV A.S., STAVROVA N.D.** Reconstruction of the railway track in order to increase the speed of trains. *Nauka i tekhnika Kazakhstana*. 2017;3–4: 9–18. (In

14. Agreement on international rail freight traffic (SMGS): valid since November 1, 1951 with amendments and additions as of July 1, 2015. Minsk: "Amalfeya", 2015:216. (In Russian).
15. TURANOV KH.T., RUZMETOV YA.O., YAKUSHEV A.V. On the deformable state of the mechanical system "Cargo-car-fastening". *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya*. 2019;16;3:455–468. DOI:10.20295/1815-588X-2019-3-455-468. (In Russian).
16. CHAGANOVA O.S., BYSTRENKOVA T.I., MENSHOVA E.V. Calculation of means of securing construction cargo on modern articulated cars. *Mekhanika. Issledovaniya i innovatsii*. 2020;13:159–165. (In Russian).
17. SHMYGIN A.A., CHUGUNOV M.V. Calculation of the stability of compressed elements of a hopper car using CAD // XLIX Ogarevsky readings: materials of a scientific conference. Saransk: Natsional'nyy issledovatel'skiy Mordovskiy gosudarstvennyy universitet im. N.P. Ogareva. 2021;3: 621–629. (In Russian).
18. ASHTIANI I.H., RAKHEJA S., AHMED W. Investigation of coupled dynamics of a railway tank car and liquid cargo subject to a switch-passing maneuver. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2019;233;10:1023-1037. DOI:10.1177/0954409718823650.
19. BARANOVSKIY D., MYAMLIN S.S., KEBAL I. Increasing the Carrying Capacity of the Solid-Body Rail Freight Car. *Advances in Science and Technology. Research Journal*. 2022;16;3:219–225. DOI:10.12913/22998624/149935.
20. CHAGANOVA O.S., VARAZHUN I.A. Fastenings parameters determination for highly deformative cargo, taking into account its durability during transportation in cars and trains. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*. 2018;7;3:218–222. DOI:10.18178/ijmerr.7.3.218-222.
21. DRUCKER D.C., PRAGER W. Soil mechanics and plastic analysis or limit design. *Quarterly of applied mathematics*. 1952;10;2:157–165.
22. KWIATUSZEWSKA-SARNECKA B. Reliability and risk function improvement of bulk cargo transportation system. *Journal of Polish Safety and Reliability Association*. 2015;6;2:81–88. DOI:10.1109/DT.2015.7222965.
23. LOVSKA A., GERLICI J., FOMINO O., KRAVCHENKO K., FOMINA YU, LACK T. Special aspects of determining the dynamic load of the tank container during its transportation in an integrated train set by a railway ferry. *TRANSBALICA XI: Transportation Science and Technology. Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure*. Cham, Springer. 581–590. DOI:10.1007/978-3-030-38666-5_61.
24. NAGY G. Numerical and experimental stress determination in a tank car body. *Materials Today: Proceedings*. 2021;45:4292–4297. DOI:10.1016/j.matpr.2020.12.775.
25. RAHMATI-ALAEI A., SHARAVI M., SAMADIAN ZAKARIA M. Hunting stability analysis of partially filled tank wagon on curved track using coupled CFD-MBD method. *Multibody System Dynamics*. 2020;50;1:45–69. DOI:10.1007/s11044-019-09715-y.
26. ROMANOVYCH Y., KRAVETS A., AFANASOV G., POVOROZHENKO Y., AFANASOVA O. Method for determining non-uniform loading of gondola cars with bulk cargo. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021;1021;1. Paper 012048. 11. DOI:10.1088/1757-899X/1021/1/012048.
27. SHIMANOVSKY A.O. Recent research of dynamics and strength of tank vehicles. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov*. 2016. № 3 (36). С. 59–70.
28. SHIMANOVSKY A.O., KUZNIATSOVA M.G. Computer modeling of wheeled vehicles fastened to railway platform. *Revista Academiei Fortelor Terestre*. 2011;16;1; (61):130–136.
29. Typical values of soil cohesion for different soil [Электрон. ресурс] <https://www.geotechdata.info/parameter/cohesion>.
30. YANG G.X., FUB D.L., LIA Q., LIUA Z.M. A finite element analysis on mechanical behavior of Al/Al-Mg composites for the design of tank cars under actual measuring loads. *Engineering Failure Analysis*. 2019;103:294–307. DOI:10.1016/j.engfailanal.2019.05.008.
31. ZHANG D., TANG Y., CLARKE D.B., PENG Q., DONG C. An innovative method for calculating diagonal lashing force of cargo on railway wagons in a curve alignment. *Vehicle System Dynamics*. 2021;59;3:352–374. DOI:10.1080/00423114.2019.1686160.

Путиято Артур Владимирович,

д.т.н., профессор, ректор Учреждения образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого»

☎ тел.: +37529-652-43-65,

e-mail: putsiaata@gstu.by, pav78@list.ru

Шимановский Александр Олегович

д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Техническая физика и теоретическая механика» Учреждения образования «Белорусский государственный университет транспорта»

☎ тел.: +37529-831-14-19, e-mail: shim@tut.by

Гегедеш Марина Григорьевна

к.т.н., доцент кафедры «Техническая физика и теоретическая механика» Учреждения образования «Белорусский государственный университет транспорта»,

☎ тел.: +37544-730-45-74, e-mail: marina-kuzn@mail.ru

Афанаськов Павел Михайлович

магистр т.н., м.н.с. отраслевой научно-исследовательской лаборатории «Технические и технологические оценки ресурса подвижного состава» Учреждения образования «Белорусский государственный университет транспорта»

☎ 246653, г. Гомель, ул. Кирова, д. 34,

тел.: +37529-369-53-91,

e-mail: pavel.afanaskou@gmail.com