

УДК 629.4.015

А.В. ПУТЯТО, д-р техн. наук; А.И. СОКОЛОВСКИЙ

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

НАГРУЖЕННОСТЬ ТОРЦЕВОЙ СТЕНЫ ПОЛУВАГОНА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ КОГЕЗИОННЫХ СВОЙСТВ СЫПУЧЕГО ГРУЗА

Приведены результаты разработки компьютерной модели для оценки нагруженности торцевой стены полувагона перевозимым сыпучим грузом, реализующей метод конечных элементов. Сыпучее тело представлено упруго-пластической континуальной средой, поведение которой описывается моделью Друккера—Прагера. Получены численные результаты нагруженности торцевой стены при статическом воздействии и при соударении вагонов для широкого диапазона изменения когезионных свойств сыпучего тела. Получены зависимости, демонстрирующие существенное влияние на силовое воздействие торцевой стены полувагона параметра когезии перевозимого груза. Установлены значения объемов сыпучего груза, «определяющих» динамическую нагруженность торцевой стены для различных значений когезии. Полученные результаты могут быть использованы при проведении прочностных расчетов кузовов грузовых вагонов и разработке их новых конструкций с улучшенными технико-экономическими параметрами.

Ключевые слова: полувагон, торцевая стена, нагруженность, сыпучий груз, когезия, метод конечных элементов

Введение. Одним из наиболее интенсивно эксплуатируемых типов грузовых вагонов являются полувагоны, предназначенные преимущественно для перевозки насыпных и навалочных грузов. Кузов универсального полувагона представляет собой «коробку» с открытым верхом, ограниченную боковыми и торцевыми стенами (либо дверьми), а также полом (глухим или в виде разгрузочных люков), расположенным на раме вагона. Одним из наиболее нагруженных элементов кузова, в особенности при соударении вагонов, является его торцевая стена.

Номенклатура перевозимых сыпучих грузов достаточно широка, и, соответственно, их характеристики (угол внутреннего трения, плотность, когезия и т. п.) существенно различаются. В то же время применяемый в «Нормах ...» [4] 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 когезией. Значение когезии может изменяться в широком диапазоне, так, для идеального сыпучего песка (без примесей) она практически равна нулю, для сухого глинистого песка составляет порядка 5–7 кПа, значения для суглинка могут достигать 90 кПа [12]. В связи с этим представляет интерес оценка нагруженности кузова вагона, в частности, торцевой стены при изменении когезионных свойств перевозимого сыпучего груза.

Разработка компьютерной модели сыпучего тела в кузове вагона. Среди существующих подходов к моделированию сыпучих (гранулированных) сред, можно выделить два основных направления:

- моделирование сыпучей среды как континуальной системы [13, 3];
- моделирование сыпучей среды как системы твердых тел [1, 14].

Оба подхода имеют свои достоинства и недостатки. Первый подход ограничен в применении в виду того, что не учитывает напрямую геометрию частиц сыпучей среды. Однако второй подход в обычной постановке требует значительно больших вычислительных затрат. Учитывая отсутствие необходимости определения внутренних сил взаимодействия частиц сыпучего груза,

решение поставленной задачи рассмотрим с использованием первого подхода.

Из экспериментальных исследований [6, 8, 11] известно, что большинство типов сыпучих сред на начальном этапе нагружения проявляют упругие свойства. Дальнейшее увеличение нагрузки приводит к разрушению линейной связи между величиной нагрузки и деформациями, которые на определенном этапе нагружения практически перестают зависеть от прикладываемой нагрузки. Это второй этап деформирования — фаза так называемого предельного равновесия. Следует отметить, что при дальнейшем увеличении деформаций в натурных экспериментах, например с грунтами, наблюдается и третья фаза, когда величина нагрузки, требуемая для приращения деформаций, существенно снижается. Но эта фаза соответствует нарушению сплошности среды.

Все указанные выше феноменологические закономерности поведения реальных сыпучих сред позволяют в качестве физического уравнения состояния сыпучей среды принять модель упруго-идеальнопластического материала. В качестве условия перехода в пластическое состояние используется огибающая кругов Мора

$$|\tau_n| = \Phi(\sigma_n),$$

где τ_n и σ_n — касательная и нормальная (сжимающая) компоненты напряжения на элементарной площадке с нормалью $\bar{n}$; $\Phi(\sigma_n)$ — неубывающая функция.

В общем случае функция $\Phi(\sigma_n)$ является нелинейной и может быть представлена в виде уравнения Кулона [2, 8]:

$$|\tau_n| = c + \sigma_n \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (1)$$

где c — удельное сцепление (когезия); φ — угол внутреннего трения сыпучего груза.

Как показали результаты испытаний [8], часть огибающей кривой предельных напряжений (огибающей кругов Мора) можно с полным на то основанием принимать прямолинейной при изменениях максимальных сжимающих напряжений, возникающих в сыпучем грузе. Обобщая критерий Кулона для случая трехмерного напряжено-деформированного состояния, получаем следующее условие текучести:

$$\begin{aligned} |\sigma_1 - \sigma_2| &= (2c \operatorname{ctg} \varphi - \sigma_1 - \sigma_2) \sin \varphi; \\ |\sigma_2 - \sigma_3| &= (2c \operatorname{ctg} \varphi - \sigma_2 - \sigma_3) \sin \varphi; \\ |\sigma_3 - \sigma_1| &= (2c \operatorname{ctg} \varphi - \sigma_3 - \sigma_1) \sin \varphi. \end{aligned} \quad (2)$$

Уравнения (2) образуют в пространстве главных напряжений $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ поверхность текучести в виде шестигранной пирамиды (пирамида Кулона–Мора).

Эффективные алгоритмы численного решения упруго-пластических задач механики деформируемого твердого тела с негладкими поверхностями текучести находятся пока на стадии разработки и верификации [9, 10, 15]. Поэтому при практическом численном анализе трехмерных задач механики сыпучих сред общепринятым подходом остается аппроксимация кусочно-линейной поверхности Мора–Кулона гладкой поверхностью текучести вида [5, 9, 15]

$$f(I_1, J_2, J_3) = 0, \quad (3)$$

где $I_1 = \sigma_{ij}$ — первый инвариант тензора напряжений; $J_2 = s_{ij}s_{ij}/2$ — второй инвариант девиатора тензора напряжений; $J_3 = s_{ij}s_{jk}s_{ki}/3$ — третий инвариант девиатора тензора напряжений; $s_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij}I_1/3$ — компоненты девиатора тензора напряжений; δ_{ij} — символы Кронекера.

Впервые уравнение гладкой поверхности текучести для анализа сложного нелинейного НДС применительно к грунтам предложено Д. Друккером и В. Прагером в виде [2]

$$\alpha \cdot I_1 + \sqrt{J_2} = k, \quad (4)$$

где α, k — некоторые положительные константы для каждой точки материала.

Следует заметить, что сами авторы критерия (4) не рассматривали свой критерий как аппроксимацию критерия (3). Однако представленные в работе [2] соотношения связи между параметрами α, k и φ , с соответствием варианту вписанного в пирамиду конуса. Причем вывод этих соотношений дан в [2] для случая плоского деформированного состояния. Возможно, в связи с этим обстоятельством и в отечественной, и в зарубежной научно-технической литературе, а также теоретических руководствах коммерческих программ, реализующих метод конечных элементов, нередко встречаются неточности и ошибки при описании моделей упруго-пластических сред с критерием текучести Друккера–Прагера.

В вычислительной механике сыпучих сред наиболее широкое распространение получила модель материала Друккера–Прагера с параметрами

$$\alpha = \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)}; \quad k = \frac{6c \cos \varphi}{\sqrt{3}\sqrt{3 - \sin \varphi}}. \quad (5)$$

Поставленная в работе задача оценки нагруженности торцевой стены полувагона решалась в плоской постановке с использованием программного комплекса конечно-элементного анализа ANSYS. При формировании конечно-элементной сетки использован 4-х узловой конечный элемент PLANE42. Свойства материала сыпучего груза представлены следующими характеристиками: плотность сыпучего груза $\gamma = 1300 \text{ кг/м}^3$; угол естественного откоса $\varphi = 30^\circ$; модуль упругости $E = 10^6 \text{ Н/м}^2$; коэффициент Пуассона $\mu = 0,27$. При моделировании материала стен кузова вагона в качестве исходных данных введены значения модуля упругости $E = 2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$, коэффициента Пуассона $\mu = 0,26$ и плотности $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$. С целью учета сцепления сыпуче-

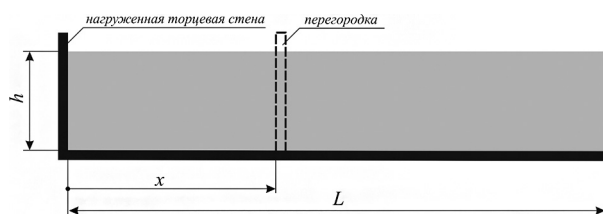


Рисунок 1 — Геометрическая схема расчетной модели

го груза со стенами кузова решалась контактная задача с коэффициентом трения в границе раздела «сыпучий груз — металл», равным 0,3. Геометрия сыпучего груза в продольной плоскости представлена прямоугольником со сторонами $h = 2 \text{ м}$, $L = 10 \text{ м}$ (рисунок 1).

Оценка статической нагруженности торцевой стены. В работе [7] выполнена оценка статической нагруженности кузова вагона сыпучим грузом. Для полноты дальнейшего изложения материала приведем некоторые результаты в части воздействия на торцевую стену. На рисунке 2 а приведены зависимости распределения давления на стену вагона от высоты заполнения кузова вагона для различных значений когезии.

Результаты расчетов показали, что при снижении уровня сцепляемости сыпучей среды, значения контактных давлений на торцевую стену существенно возрастают. Полученное значение давления на стену вагона на уровне пола при невысоком уровне сцепляемости сыпучей среды достаточно тесно согласуется с теорией Кулона. По мере снижения уровня когезии, увеличивается величина уплотнения сыпучего тела Δy , что объяс-

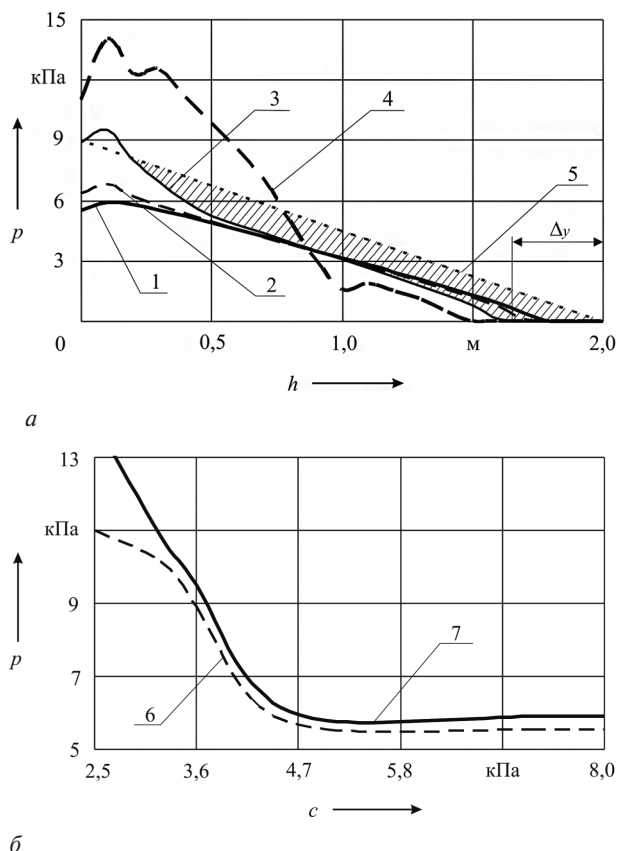


Рисунок 2 — Зависимости давления на торцевую стену от высоты засыпки (а) и величины когезии (б): 1 — $c = 7 \text{ кПа}$; 2 — $c = 4 \text{ кПа}$; 3 — $c = 3 \text{ кПа}$; 4 — $c = 2,5 \text{ кПа}$; 5 — по формуле (1); 6 — давление на максимальной глубине засыпки; 7 — максимальное давление

няет появления «поля уплотнения» (заштрихованная область) в расхождении результатов на рисунке 2 а.

Исходя из зависимостей рисунка 2 б, при определении максимального давления на стены вагона можно наблюдать, что значение максимального статического давления на торцевую стену стабилизируется при $c > 5$ кПа.

Оценка динамической нагруженности торцевой стены.

Выполним оценку нагруженности торцевой стены для случая соударения вагонов при изменении когезионных свойств сыпучего груза. Отметим, что согласно [4] при расчете кузова вагона в случае соударения торцевые стены и двери должны рассчитываться на равномерно распределенное по всей их площади динамическое давление насыпного груза, равное 0,35 грузоподъемности вагона при действии продольного ускорения $3,5g$. Для оценки «определяющего» динамическую нагруженность объема груза ($V_{\text{опр}}$) разработанная модель развита в части установки сплошной поперечной перегородки на расстоянии $0 \leq x \leq L/2$ от нагруженной торцевой стены (рисунок 1). На рисунке 3 представлены результаты расчета распределения динамического давления на торцевую стену по ее высоте для различных значений x при $c = 7$ кПа.

Установлено, что по мере увеличения x снижается равномерность распределения нагрузки по высоте. В то же время наблюдается процесс стабилизации суммарного воздействия на стену при $x \geq 0,15L$.

Рассмотрим изменение динамической нагруженности торцевой стены при широком диапазоне изменений значения когезии, а также положениях перегородки. На рисунке 4 приведены зависимости значений среднего давления $p_{\text{ср}}$ на торцевую стену от места установки перегородки для различных значений когезии.

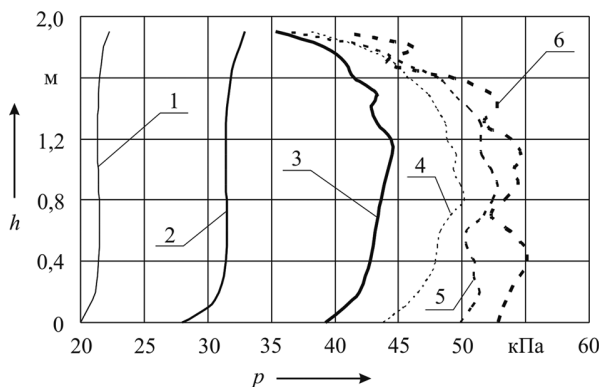


Рисунок 3 — Распределение давления сыпучего груза по высоте торцевой стены: 1 — $x = 0,05L$; 2 — $x = 0,075L$; 3 — $x = 0,1L$; 4 — $x = 0,125L$; 5 — $x = 0,15L$; 6 — $x = L$

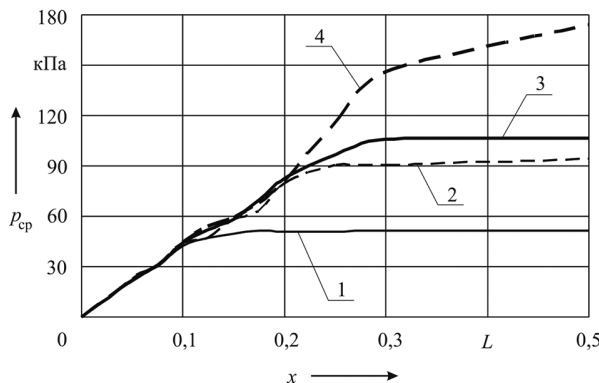


Рисунок 4 — Изменение $p_{\text{ср}}$ на торцевую стену: 1 — $c = 7$ кПа; 2 — $c = 15$ кПа; 3 — $c = 20$ кПа; 4 — $c = 70$ кПа

Полученные результаты показали, что при положении перегородки на расстоянии $0 \leq x \leq 0,1L$ значения средних давлений на торцевую стену для различных уровней когезии сыпучего груза одинаковы. Далее наблюдается первая стадия разветвления зависимостей на интервале $0,1L \leq x \leq 0,2L$, а при значениях $x > 0,2L$ можно условно выделить вторую стадию. Таким образом, на основании полученных зависимостей можно определить $V_{\text{опр}}$ и, очевидно, что для различных сыпучих материалов он будет отличаться. Оценить значения $V_{\text{опр}}$ удобно на основании графиков, приведенных на рисунке 5, показывающих изменение параметра δ (отношение значений среднего давления на стену при наличии перегородки и среднего давления в случае ее отсутствия) в зависимости от положения перегородки для различных значений когезии. Например, при $c = 7$ кПа получим $V_{\text{опр}} = 12...17\%$ от общего объема перевозимого груза, при $c = 15$ кПа — $V_{\text{опр}} \approx 25\%$, при $c = 20$ кПа — $V_{\text{опр}} \approx 30\%$, при $c = 70$ кПа видно, что $V_{\text{опр}}$ достигает 50% .

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.

Учитывая достаточно высокий разброс значений нагруженности торцевой стены при соударении вагонов для материалов с различными когезионными свойствами, рассмотрим изменение давления (без перегородки) в зависимости от параметра c (рисунок 6).

Из графика на рисунке 6 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

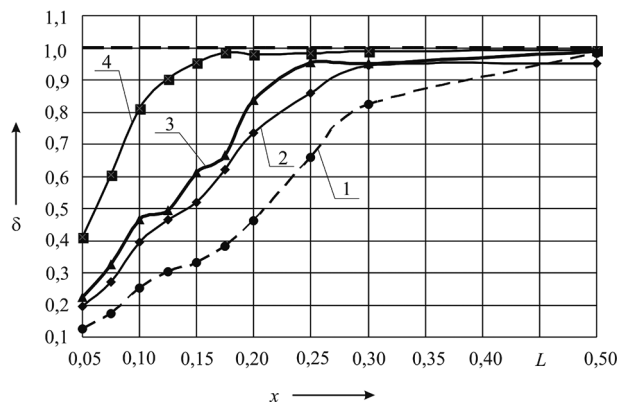


Рисунок 5 — Зависимости $\delta(x)$ для различных значений когезии: 1 — $c = 7$ кПа; 2 — $c = 15$ кПа; 3 — $c = 20$ кПа; 4 — $c = 70$ кПа

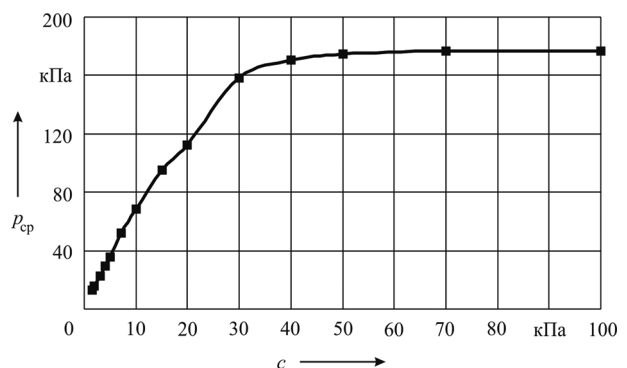


Рисунок 6 — Изменение $p_{\text{ср}}$ на торцевую стену от значения когезии

вагонов и прочих принятых характеристиках сыпучего груза значение $V_{\text{опр}}$ составляет порядка 35 %, что соответствует рекомендации, приведенной в нормативной документации [4]. 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, отвечающих условиям прочности и отличающихся улучшенными технико-экономическими параметрами (снижение массы тары, увеличение грузоподъемности).

Заключение. 1. Разработана компьютерная конечно-элементная модель, позволяющая выполнить оценку нагруженности торцевой стены полувагона сыпучим грузом на основе применения критерия Друккера–Прагера.

2. Получены результаты нагруженности торцевой стены при изменении когезионных свойств перевозимого сыпучего груза, на основе которых найдены значения объемов груза, «определяющих» ее динамическую нагруженность.

3. Полученные результаты могут быть использованы при разработке новых конструкций вагонов, а также модернизации.

Список литературы

1. Бидуля, А.Л. Компьютерное моделирование железнодорожного балласта в плоской твердотельной постановке [Электронный ресурс] / А.Л. Бидуля, Д.Г. Агапов, Д.Ю. Погорелов. — 2004. — Режим доступа: http://umlab.ru/download/-docs/rus/agapov_vestnik.pdf.
2. Друккер, Д. Механика грунтов и пластический анализ или предельное проектирование / Д. Друккер, В. Прагер // Определяющие законы механики грунтов: сб. — М.: Мир, 1975. — Вып. 2. — С. 166–177.
3. Занкович, А.В. Применение метода конечных элементов для моделирования сыпучего тела при исследовании нагруженности кузовов вагонов / А.В. Занкович, А.Э. Павлюков // Безопасность движения, совершенствование конструкций вагонов и ресурсосберегающие технологии в вагонном хозяйстве: сб. науч. тр. — Екатеринбург: УрГУПС, 2003. — С. 143–147.
4. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). — М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. — 319 с.
5. Роботнов, Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела / Ю.Н. Роботнов. — М.: Наука, 1988. — 712 с.
6. Селезнев, В.Е. Математическое моделирование трубопроводных сетей и систем каналов / В.Е. Селезнев, В.В. Алешин, С.Н. Прялов. — М.: МАКС Пресс, 2007. — 692 с.
7. Сенько, В.И. Оценка воздействия перевозимых сыпучих грузов на кузова вагонов / В.И. Сенько, А.В. Путятю // Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна. — Днепропетровск: ДНУЖТ, 2009. — Вып. 30. — С. 214–222.
8. Цытович, Н.А. Механика грунтов / Н.А. Цытович. — М.: Высшая школа, 1973. — 280 с.
9. Crisfield, M.A. Non-linear Finite Element Analysis of Solids and Structures: in two vol. / M.A. Crisfield. — Chichester: John Wiley & Sons, 2000. — Vol. 2. — 494 p.
10. Encyclopedia of Computational Mechanics: in 3 vol. // ed. by E. Stain, R. de Borst, T. J. R. Hughes. — Chichester: John Wiley & Sons, 2004. — Vol. 2: Solids and Structures. — 776 p.
11. O'Rourke, M.J. Response of Buried Pipelines Subject to Earthquake Effects / M. J. O'Rourke, X. Liu. — Buffalo: MCEER, 1999. — 247 p.
12. Typical values of soil cohesion for different soil [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.geotechdata.info/parameter/cohesion.html>. — Дата доступа: 21.06.2016.
13. Verruijt, A. Soil mechanics / A. Verruijt. — Delft: Delft University of Technology, 2001. — 340 p.
14. Vinogradov, O.G. Explicit equation of motion of discrete system of disks in two dimensions / O.G. Vinogradov // Journal of Engineering Mechanics, 1993. — Vol. 118, № 9. — Pp. 1850–1858.
15. Zienkiewicz, O.C. The Finite Element method: in three vol. / O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor. — Butterworth-Heinemann: Oxford, 2000. — Vol. 2: Solid Mechanics. — 479 p.

Putsiata A.V., Sokolovskij A.I.

Loading of the back wall of the gondola at cohesion change of the loose cargo

The results of developing out of computer model for an estimation of loading of the back wall of the gondola with the transported loose cargo, realizing a finite element method are shown. The granular material is presented by elastico-plastic continual medium which behavior is described by the model Drucker–Prager. The numerical results of loading of the back wall at static effect and at impact of rail car for a change of the general range of cohesion of a granular material are obtained. The dependences showing essential influence on power effect of the back wall of the gondola of cohesion parameters of the transported cargo are obtained. Values of volumes of the loose the cargo «defining» dynamic loading of the back wall for various values of cohesion are found. The obtained results can be used in calculations of durability of bodies of rail cars and development of their new constructions with the improved technical and economic parameters.

Поступил в редакцию 29.06.2016.