

4 **Шилько, С. В.** Оценка контактной жесткости локальных покрытий: сопоставление расчетных методов. Ч. 1 / С. В. Шилько, Е. М. Петроковец, Т. В. Семенова // Трение и износ. – 2001. – Т. 22, № 2. – С. 128–133.

5 **Захариев, Г.** О реологической модели полимеров и стеклопластиков / Г. Захариев, Л. Хаджиков, П. Маринов // Механика полимеров. – 1971. – № 5. – С. 851–857.

6 **Рудницкий, В. А.** Оценка свойств эластомерных материалов при постоянной скорости индентирования / В. А. Рудницкий, А. П. Крень, С. В. Шилько // Трение и износ. – 2001. – Т. 22, № 5. – С. 502–509.

7 **Мацкевич, А. В.** Анализ простого последствия и релаксации напряжений в термопластах по теории линейной наследственности / А. В. Мацкевич // Механика стержневых систем и сплошных сред: межвузовский тематический сб. тр. – Л.: ЛИСИ, 1979. – С. 48–51.

Получено 12.06.2006

**ISBN 978-985-468-276-1. Механика. Научные исследования  
и учебно-методические разработки. Вып. 1. Гомель, 2007**

---

УДК 629.4.023:621.6.04

*А. В. ПУТЯТО, В. В. БЕЛОГУБ*

*Белорусский государственный университет транспорта, Гомель*

## **МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И РАСЧЕТНЫЕ СХЕМЫ НАГРУЖЕННОСТИ КУЗОВОВ ВАГОНОВ ПРИ ПЕРЕВОЗКЕ СЫПУЧИХ ГРУЗОВ<sup>1</sup>**

Выполнен анализ расчетных схем при определении прочностных характеристик стен кузовов вагонов в случае перевозки сыпучих грузов. Выделены основные подходы в моделировании сыпучих (гранулированных) сред, дальнейшее развитие и применение которых позволит определять уточненные прочностные характеристики элементов конструкций грузового подвижного состава.

В соответствии с нормативными требованиями вагоностроения при проектировании или модернизации вагонов необходимо производить оценку прочности торцовых и боковых стен, дверей от нагрузок, вызванных действием сыпучего груза.

Одной из основополагающих работ в области статики сыпучего материала является работа [19], где проведены экспериментальные исследования и получено выражение для определения давления внутри силоса, которое не зависит от физико-механических свойств сыпучего материала. Использование полученного выражения требует проведения дополнительных экспериментов

---

<sup>1)</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского Фонда фундаментальных исследований (проекты T07M-008).

для определения отношения горизонтального давления к вертикальному. Эта теория получила развитие в работах [2, 13].

Фундаментальные исследования статики сыпучих материалов проведены в работе В. В. Соколовского [12], где дается описание теории плоского предельного равновесия сыпучей среды и рассмотрены задачи несущей способности оснований. Монография Р. Л. Зенкова [3] носит более прикладной характер и направлена на решение задач, связанных с проектированием транспортных устройств для насыпных грузов.

Решение задач в работах [3, 12] основано на определении напряжений через графические представления с помощью кругов напряжений. В то время как в работе Г. К. Клейна [5] решение задач строительной механики сыпучих тел связано с аналитическими расчетами.

В настоящее время нагруженность стен кузовов грузовых вагонов, предназначенных для транспортировки сыпучих грузов, определяется методами строительной механики сыпучих тел, с позиции которой при взаимодействии сыпучего груза со стеной вагона возникают усилия, обусловленные статическим активным, пассивным и динамическим давлениями, соответственно  $p_a$ ,  $p_n$ ,  $p_d$  [3]. Рассмотрим эволюцию нормативной нагруженности торцевой стены полувагона при транспортировке сыпучего груза на основе исследований, приведенных в [4]. На рисунке 1 приведены эпюры активного  $p_a$  (линия 1) и пассивного  $p_n$  (линия 2) давления, принятые в Нормах 1971 г. [8], максимальные значения которых определяются формулами:

$$p_{a\max} = \gamma gh \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right); \quad (1)$$

$$p_{n\max} = \gamma gh \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right), \quad (2)$$

где  $\gamma$  – насыпная плотность груза;  $\varphi$  – угол естественного откоса груза.

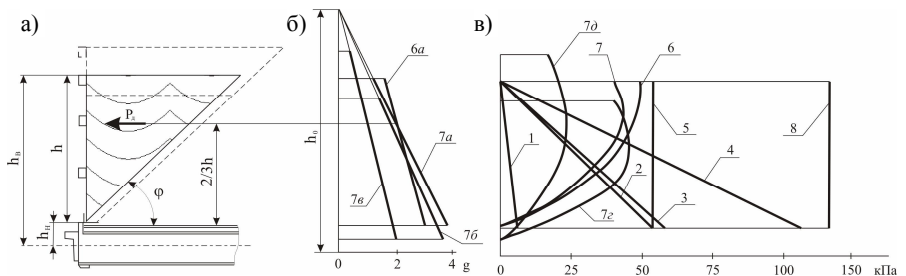


Рисунок 1 – Схема силового воздействия (а), эпюры ускорений (б) и давлений (в) сыпучего груза на торцевую стену полувагона при различных способах расчета, основанных на строительной механике сыпучих тел

В Нормах 1971 г. [8] принято, что на вертикальную стену действует условное расчетное давление  $p_p$  (см. рисунок 1, линия 3), определяемое по формуле

$$p_{pi} = kp_{pi}, \quad (3)$$

где  $k$  – коэффициент, учитывающий влияние активного давления, накопления смещения частиц груза и т. п.,  $k = 1,1$ ;

$$p_{pi} = p_{пmax}(h - h_i) / h.$$

По расчетной схеме, изложенной в Нормах 1983 г. [7], расчет вертикальной торцевой стены предусматривает два варианта нагружения, показанные на рисунке 1 линиями 4 и 5. Вариант, показанный линией 4, предусматривает расчет подобно первой вышеизложенной схеме, только в формуле (3) вместо  $k = 1,1$  принимается  $k = 2$ . По второму варианту давление на стену принимается равномерно распределенным по высоте, как показано линией 5. Значения ординат эпюры давлений в этом случае определяется исходя из условия равенства равнодействующих давлений при обоих вариантах нагружения  $p_{p2} = p_{p1max} / 2 = kp_{пmax} / 2$  и при  $k = 2$  расчетное давление принимает значение, равное максимальному пассивному давлению.

В работе [17] приведена предлагаемая специалистами ВНИИЖТа схема нагружения торцевой стены полувагона, в соответствии с которой на вертикальную торцевую стену действует суммарная нагрузка от активного статического и динамического давлений сыпучего груза, эпюры которых приведены на рисунке 1 линиями 1 и 6.

Динамическое давление сыпучего груза рекомендуется определять следующим образом. Массив сыпучего груза, ограниченный торцевой стеной и углом его естественного откоса под действием продольного ускорения масс груза, вызванного соударением, давит на стену, при этом распределение продольного ускорения по высоте торцевой стены принимается согласно Нормах 1971 г. [8] и приведено на рисунке линией 6а. В результате равнодействующая динамического давления на единицу ширины торцевой стены определится по формуле

$$p_d = a\gamma h^2 \operatorname{ctg}(\varphi / 2),$$

где  $a$  – продольное ускорение на высоте  $(2/3)h$  от пола вагона в долях ускорения свободного падения  $g$  и равно  $2g$ .

В соответствии с этой работой ординаты эпюры динамического давления, которая приведена на рисунке 1 линией 6, определяется по формуле

$$p_{di} = 1,5\gamma gh_i \left(2 - \frac{h_i}{h}\right) \operatorname{ctg} \varphi. \quad (4)$$

Учитывая, что указанное в Нормах 1971 г. [8] распределение продольных ускорений по высоте стены получено экспериментальным путем для 4-осных полувагонов при продольной силе на автосцепке 2,5 МН, применение данной схемы нагружения ограничено этим типом вагона. С учетом изложенного разработана схема, которая предлагается как универсальная для любого типа грузового загона. В этой схеме, как и в схеме ВНИИЖТа, на торцовую стену действует суммарная нагрузка от активного статического и расчетного динамического давления. Ордината эпюры динамического давления при этом определяется не нормативным условным распределением продольных ускорений, а в зависимости от массы вагона и груза, высоты торцовой стены, ее расположения, величины продольной силы, приложенной к автосцепке, и т.д. В связи с предложенными изменениями формула (4) принимает вид

$$P_{Di} = N\gamma \operatorname{ctg} \varphi \left(1 - \frac{h_i}{h_0}\right) (h_i - h_H) / k_m m_{\text{бр}}, \quad (5)$$

где  $N$  – значение продольной силы, соответствующее расчетному режиму;  $h_i$  – расстояние от оси автосцепки до точки, в которой определяется давление;  $h_0$  – расстояние от оси автосцепки до условной точки с ускорением, равным нулю;  $h_H$  – расстояние от оси автосцепки до нижней кромки груза;  $k_m$  – коэффициент приведенной массы;  $m_{\text{бр}}$  – масса брутто вагона.

Недостаток приложения давления по схеме (5) заключается в необходимости экспериментального определения значений  $h_0$ ,  $k_m$  для отдельных типов вагонов. Так вид эпюр продольных ускорений сыпучего груза для 4-осного полувагона модели 12-119, крытого модели 11-260 и 8-осного полувагона модели 12-1528 при силе удара 2,5 МН приведен на рисунке 1 линиями 7а, 7б, 7в, а соответствующих динамических давлений на торцовую стену – линиями 7, 7г, 7д [4].

Исходя из Норм 1996 г. [6] активное (статическое) давление распора насыпного груза на единицу площади вертикальных стенок кузова определяется по формуле (1) с учетом множителя  $(1 + K_{\text{дв}})$ , где  $K_{\text{дв}}$  – коэффициент динамики. При рассмотрении удара в автосцепку торцовые стены кузова должны рассчитываться на равномерно распределенное по всей их площади динамическое давление насыпного груза, возникающее при соударении вагонов от действия силы инерции массы груза  $m$ , равном 0,35 грузоподъемности вагона при продольном ускорении  $a_x = 3,5g$  (линия 8, см. рисунок 1). Сила инерции определяется по формуле

$$N_{\text{и}} = ma_x.$$

На основе сопоставления предлагаемых схем нагружения и анализа экспериментальных исследований нагруженности стен можно сделать следующие основные выводы:

1 Схема нагружения (3) при  $k = 1,1$  приводит к получению существенно заниженных расчетных напряжений по сравнению с экспериментальными в верхних обвязках, верхних поясах и вертикальных стойках торцовых стен вагонов и завышенных – в нижних поясах торцовых стен. Следовательно, данная схема нагружения не соответствует действительному положению и справедливо была заменена при корректировке Норм 1983 г. [7].

2 Расчетная схема нагружения (3) при  $k = 2$  приводит к получению существенно завышенных напряжений в элементах торцовых стен и плохо согласуется с экспериментальными данными. Расчеты по данной схеме нагружения позволяют обеспечить достаточную прочность элементов торцовых стен, но неоправданно завышают расход металла.

3 Схема нагружения (4) позволяет получать для 4-осных полувагонов расчетные напряжения в несущих элементах, близкие по величине и характеру распределения к полученным экспериментально. Для оценки прочности торцовых стен других типов грузовых вагонов по этой схеме необходимо экспериментальным путем уточнять диаграмму распределения продольных ускорений груза по высоте торцевой стены кузова.

4 Схема нагружения (5) позволяет получать расчетные напряжения, по величине и характеру распределения достаточно близкие к экспериментальным значениям практически для всех типов вагонов, но также требует накопления экспериментальных данных для различных типов вагонов по отдельным параметрам.

5 Практика расчета существующих конструкций торцовых стен показала, что схема нагружения сыпучим грузом вследствие ударного взаимодействия по Нормам 1996 г. [6] дает существенно завышенные значения напряжений в конструкции [9].

Таким образом, схемы нагружения, полученные на основе решения задач нагруженности стенок сыпучим грузом методами строительной механики сыпучих тел, требуют существенных затрат на экспериментальные исследования, что связано с особенностями динамики железнодорожного подвижного состава.

Дальнейшее уточнение проектировочных расчетов торцовых стен грузовых вагонов может быть достигнуто с учетом проведенных исследований на основе более детального анализа взаимодействия элементов конструкции с сыпучим грузом с привлечением современных методов вычислительной механики.

В настоящее время среди существующих подходов к моделированию сыпучих (гранулированных) сред можно выделить два основных направления:

- моделирование сыпучей среды как континуальной системы;
- моделирование сыпучей среды как системы твердых тел.

Одним из наиболее близких к реальности подходов является представление о сыпучем теле как о неидеальной жидкости или упругодиссипативной сплошной среде. Однако аналитическое решение такой системы, включающей уравнения в частных производных и сложный характер граничных условий и нелинейность задачи, практически невыполнимо. В то же время, численное решение с использованием современного уровня вычислительной техники вполне возможно. Если рассматривать поведение сыпучего материала с позиции жидкости, то самое важное отличие заключается во взаимодействии частиц, которое не похоже на взаимодействие молекул в жидкости, а именно:

- между песчинками нет сил притяжения;
- столкновения песчинок неупруги;
- между песчинками существует трение.

Первое явление означает, что в системе возникают неоднородности плотности, которые не исчезают, а наоборот усиливаются, что приводит к распаду жидкости на отдельные группы (кластеры). Таким образом, если в какой-то области увеличилась концентрация частиц, то это приводит к увеличению числа столкновений, что в силу их неупругости приводит к падению скорости частиц относительно окружения. Это значит, что в этом районе частиц, влетающих в этот объем, будет больше, чем вылетающих, что приводит к дальнейшему увеличению локальной плотности и росту неоднородности. Если жидкость находится в поле тяжести, то области с повышенной плотностью будут тяжелее окружающей жидкости. В результате возникнет гидродинамическая неустойчивость, что приводит к конвекции и появлению вихрей (второе отличие).

Стандартный подход к теоретическому описанию гранулированных жидкостей заключается в использовании уравнений гидродинамики и адаптируется с учетом специфики гранулированных материалов. Сначала выбирается такое уравнение состояния гранулированной жидкости, которое могло бы приводить к кластеризации (т. е. локальная температура должна падать при повышении плотности). Далее в него вводится дополнительное слагаемое, описывающее диссипацию энергии из-за неупругого столкновения частиц, и выбирается некая реологическая модель материала (рисунок 2), а также фиксируется зависимость коэффициента теплопроводности от параметров гранулированной жидкости. Затем решается полученное уравнение.

В работе [2] на основании таких уравнений теоретически исследовалась текучесть гранулированной жидкости, заключенной между двумя вращающимися соосными цилиндрами. Несмотря на то, что уравнения базировались на упрощенной модели межчастичного взаимодействия, была обнаружена нетривиальная зависимость текучести материала от средней плотности и от

температуры. В частности, было отмечено аномально быстрое увеличение коэффициента вязкости с ростом плотности (точнее, при приближении плотности к некоторому критическому значению, за которым материал перестает течь). Несмотря на то, что выбранная модель чисто гидродинамическая, авторы смогли проследить, как происходит "затвердевание" гранулированной жидкости, т. е. как вязкое поведение сменяется упругим. Несколько иной подход к проблеме состоит в попытке описать поведение гранулированных жидкостей нелинейными гидродинамическими уравнениями типа уравнения Бюргерса [16].

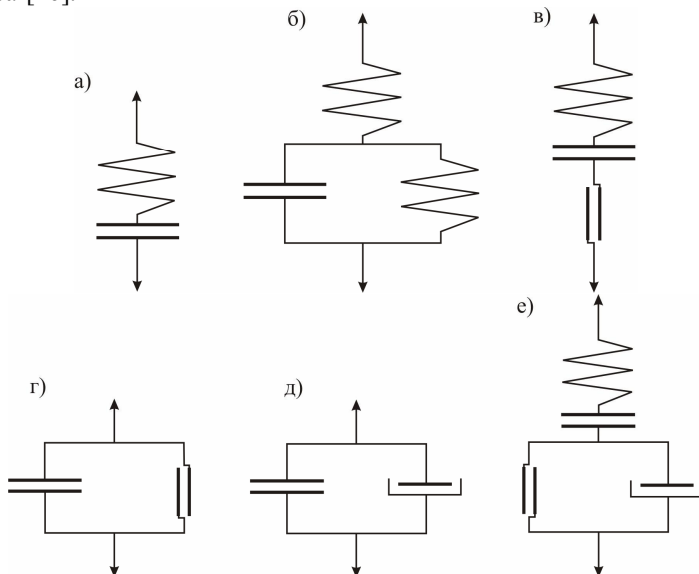


Рисунок 2 – Реологические модели сыпучего материала:

а – упругая; б – разномодульная упругая; в – упругопластическая; г – пластическая;  
 д – вязкая; е – упруговязкопластическая

Также при реализации первого подхода моделирования сыпучей среды широкое распространение получил метод конечных элементов с различными вариантами математического описания поведения материала сыпучей среды. К таким вариантам относятся представление сыпучей среды, описываемой уравнениями механики деформируемого твердого тела в упругой постановке с учетом «приведенных» характеристик материала (модуль упругости, плотность, коэффициент Пуассона); описание поведения сыпучего тела на основе уравнений гидромеханики (о чем сказано выше); применение модели материала Друкера-Прагера, описывающей пластическое деформирование среды [11] и прочие.

Второй подход основан на использование законов механики твердого тела. Широкое распространение в инженерных расчетах получили способы дискретизации сыпучего тела и представление его в виде конечного числа одинаковых или различных по массе твердых тел, которые могут перемещаться друг относительно друга, при различных видах связи между собой [10]. В литературе широкое распространение получили шаровая [15] и клиновая [14] модели. Встречаются работы, где все тела (гранулы), входящие в систему, представлены либо плоскими (круг, плоский многоугольник и др.), либо объемными (шар, объемный многоугольник и др.) [1, 18, 20]. Условием контакта между телами служит пересечение границ тел, что приводит к возникновению контактной силы, варианты описания которой, могут быть весьма различны (закон Герца, закон Кулона, упруго-диссипативное взаимодействие).

Проведенный обзор различных подходов моделирования сыпучих тел и расчетных схем нагруженности сыпучим грузом кузовов грузовых вагонов показывает, что исследования, связанные с методами и способами моделирования сыпучих тел при определении нагруженности кузовов транспортных средств носят актуальный характер и требуют дальнейшего развития. Применение новых методов и схем нагружения, более полно описывающих взаимодействие кузова с сыпучим грузом, при последующей оценке прочности вагонов носит важный прикладной характер с позиции разработки новых и модернизации существующих их элементов конструкций.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 **Бидуля, А. Л.** Компьютерное моделирование железнодорожного балласта в плоской твердотельной постановке [Электрон. ресурс] / А. Л. Бидуля, Д. Г. Агапов, Д. Ю. Погорелов – 2004. Режим доступа: [http://umlab.ru/download/docs/rus/agapov\\_vestnik.pdf](http://umlab.ru/download/docs/rus/agapov_vestnik.pdf).

2 **Гутьяр, Е. М.** Вопросы динамики сыпучей среды / Е. М. Гутьяр // Научные сообщения ЦНИИСК. – М., 1958. – Вып. 2. – С. 41–43.

3 **Зенков, Р. Л.** Механика насыпных грузов / Р. Л. Зенков. – М.: Машиностроение, 1964 – 251 с.

4 **Иванов, А. В.** Оценка схем расчетного нагружения торцовых стен и дверей грузовых вагонов от действия сыпучего груза / А. В. Иванов, Н. И. Миронов, С. И. Пашарин // Проблемы совершенствования вагонных конструкций и методов их исследования: сб. науч. тр. – М.: ВНИИВ, 1984. – С. 14–21.

5 **Клейн, Г. К.** Строительная механика сыпучих тел / Г. К. Клейн – М.: Стройиздат, 1977. – 256 с.

6 Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) / ГосНИИВ-ВНИИЖТ. – М., 1996. – 319 с.

7 Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) / ГосНИИВ-ВНИИЖТ. – М., 1983. – 260 с.



8 Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) / ГосНИИВ-ВНИИЖТ. – М., 1971. – 180 с.

9 Оценка технического состояния вагонов, транспортных средств, разработка мероприятий и новой конструкторской документации по восстановлению утраченного ресурса с целью продления срока службы. Этап IV – Разработка конструкторской документации на элементы вагонов по заданию службы или вагонных депо // Отчет. Рук. В. И. Сенько – № ГР 20053411 – Гомель: БелГУТ, 2006. – 125 с.

10 **Павлюков, А. Э.** Расчетно-экспериментальная методика оценки напряженно-деформированного состояния торцевой стены полувагона / А. Э. Павлюков, В. Ф. Лапшин // Повышение надежности, совершенствование ремонта и технического обслуживания: сб. науч. тр. – Екатеринбург: УрГУПС, 1996. – Вып. 4(86) – С. 83–97.

11 **Путято, А. В.** Нагруженность кузова вагона при транспортировке сыпучих грузов / А. В. Путято, А. О. Шимановский // Теоретическая и прикладная механика: науч.-техн. междунар. журнал. – Минск, 2007. – Вып. 22. – С. 149–151.

12 **Соколовский, В. В.** Статика сыпучей среды / В. В. Соколовский – М.: Физматлит, 1960 – 240 с.

13 **Сорокин, Н. В.** Давление сыпучих тел на стены и дно силосов переменного сечения / Н. В. Сорокин // Советское мукомолье и хлебопечение. – М., 1935. – № 4 – С. 17–20.

14 **Стриженок, Т. А.** Математическое моделирование динамического взаимодействия сыпучего груза с торцевой стеной при соударении вагонов: автореф. дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук / Т. А. Стриженок. – Брянск: БИТМ, 1990. – 24 с.

15 **Тарлыков, В. И.** Исследование усилий распора кузовов вагонов скатывающихся грузами: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В. И. Тарлыков. – Омск: ОМИИТ, 1971. – 18 с.

16 **Флетчер, К.** Вычислительные методы в динамике жидкостей: в 2 ч. Ч. 1 / К. Флетчер. – М.: Мир, 1991. – 504 с.

17 **Шаринов, И. Л.** Определение давления сыпучего груза на торцевые стены вагона при соударении / И. Л. Шаринов, О. Г. Бойчевский // Вестник ВНИИЖТа, 1981. – № 7. – С. 87–89.

18 **Gavrilov, D.** Object-oriented library for simulation of granular-type materials / D. Gavrilov, O. G. Vinogradov // Proceedings of the 1994 Summer Computer Simulation Conference – San Diego: CA. – P. 51–56.

19 **Jansen, H. A.** Versuche uber Getreided ruck in Silozllen // Z. d. VDI, 1895. – b. XXXIX. – № 35 – S. 1045–1049.

20 **Vinogradov, O. G.** Explicit equation of motion of discrete system of disks in two dimensions / O. G. Vinogradov // Journal of Engineering Mechanics. Vol. 118, № 9 – P. 1850 – 1858.

Получено 12.05.2006