



21-osios jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ teminės konferencijos  
**TRANSPORTO INŽINERIJA IR VADYBA**,  
vykusios 2018 m. gegužės 4-5 d. Vilniuje, straipsnių rinkinys

Proceedings of the 21th Conference for Junior Researchers 'Science – Future of Lithuania'  
**TRANSPORT ENGINEERING AND MANAGEMENT**, 4-5 May 2018, Vilnius, Lithuania

Сборник статей 21-й конференции молодых ученых «Наука – будущее Литвы»  
**ИНЖЕНЕРИЯ ТРАНСПОРТА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПЕРЕВОЗОК**, 4-5 мая 2018 г., Вильнюс, Литва

## НАГРУЖЕНИЕ КУЗОВА ВАГОНА СЫПУЧИМ МАТЕРИАЛОМ ПРИ РАСЧЕТЕ НА ПРОЧНОСТЬ

Павел Афанаськов

*ОНИЛ ТТОРЕПС, Белорусский государственный университет транспорта,  
Гомель, Республика Беларусь  
E-mail: pavel.afanaskou@gmail.com*

**Аннотация.** Рассмотрены современные подходы к решению задачи нагружения вертикальных и наклонных элементов кузовов грузовых вагонов, перевозящих различную номенклатуру сыпучих грузов, в статической и динамической постановке. Проведен расчет нагрузок, действующих на кузова вагонов-хопперов и полувагонов, в зависимости от типа перевозимого груза, в соответствии с требованиями актуальных нормативно-правовых актов. Разработаны конечно-элементные модели вагонов, перевозящих сыпучие материалы. Приведены наиболее часто встречающиеся повреждения элементов, кузовов вагонов, взаимодействующих с сыпучим грузом. Обращено внимание на недостатки современных подходов оценивающих величины нагрузок действующих на кузов грузового вагона перевозящего сыпучие среды.

**Ключевые слова:** сыпучая среда, статика сыпучей среды, динамика сыпучей среды, давление распора, кузов вагона, вагон-хоппер, полувагон.

### Введение

Специализированный подвижной состав бункерного типа, для перевозки различной номенклатуры грузов, нашел широкое применение на сети Белорусской железной дороги.

В соответствии с актуальными требованиями нормативной документации вагоностроения при проектировании новых конструкций или модернизации конструкций вагонов, перевозящих сыпучие материалы, необходимо производить оценку прочности боковых и торцовых стен от нагрузок, вызванных воздействием сыпучего материала на них. На сегодняшний день силовые и граничные условия при выполнении прочностных расчетов кузовов грузовых вагонов определяются в соответствии с «Нормами для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных)» в редакции 1996 года и ГОСТ 33211-2014 «Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам» вступившим в действие с 1 июня 2017 года.

### Исследования Янсена

Исследования в области статике и динамике сыпучих материалов начались очень давно. Одной из основополагающих работ в области статике сыпучего материала является работа Янсена, которая была впервые

опубликована в 1895 году (Jansen 1985), в ней проведены экспериментальные исследования и получено выражение для определения давления внутри силоса, которое не зависит от физико-механических свойств сыпучего материала.

Величина осевого давления сыпучего материала определена по формуле Янсена:

$$P_{oc} = \frac{\rho_0 F g}{f K L} \left( 1 - e^{-\frac{f K L}{F} H} \right), \quad (1)$$

где  $\rho_0$  – плотность сыпучего материала;  $f$  – коэффициент трения сыпучего материала о стенки;  $F$  – площадь горизонтального сечения бункера;  $L$  – периметр сечения бункера;  $K$  – коэффициент бокового давления, определяющий отношение горизонтального давления  $P_{rad}$  на вертикальную стенку к вертикальному (осевому) давлению  $P_{oc}$  на горизонтальную площадку;  $H$  – высота слоя засыпки сыпучего материала в бункере.

Необходимо отметить то, что в формулу (1) из физико-механических свойств самого сыпучего материала входит только плотности  $\rho$ . Не учтена когезия сыпучего материала, а как показывают исследования, она оказывает значительное влияние на характер поведения сыпучего материала. В зависимости от уровня сцепления между частицами сыпучий материал может себя вести подобно жидкости оказывающей гидроста-

тическое давление или жидкости с наличием связанности между частицами. Не учитывается и изменение объема под воздействием сдвиговых деформаций, наблюдаемое в зернистых материалах, называемое дилатансией.

Несмотря на это, теория, изложенная Янсенем, получила дальнейшее развитие в работах многих отечественных и зарубежных ученых. Ее применяют и современные исследователи в своих работах (Rusinek, Lukaszuk 2004).

Также из формулы (1) видно, что давление на вертикальные стенки от сыпучего материала стремится асимптотически к максимуму при увеличении уровня высоты засыпки стремящемся к бесконечности.

### Исследования Кенена

Формула для определения коэффициента бокового давления  $K$  была впервые выведена Кененом (Mazarskiy 1964):

$$K = \operatorname{tg}^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right), \quad (2)$$

где  $\varphi$  – угол внутреннего трения.

Исходя из теории сыпучих сред формулу осевого давления (1) можно записать так:

$$P_{oc} = \frac{\rho_0 R}{Kf}, \quad (3)$$

где  $\rho_0$  – плотность сыпучего материала;  $R = F/L$  – гидравлический радиус поперечного сечения бункера;  $K$  – коэффициент бокового давления;  $f$  – коэффициент трения сыпучего материала о стенки.

Как показал опыт эксплуатации, формула (3) для многих сыпучих материалов дают заниженные значения напряжений, так как при выводе формул не учитывались явления динамики, связанные с неравномерностью распределения давления по периметру. Действительные нагрузки, которые превышают теоретические, рассчитанные по формуле Янсена, объясняются также явлением зацепления его частиц на них. Необходимо учитывать и то, что при возрастании высоты засыпки, нижние слои материала подвергаются уплотнению под действием собственного веса, что оказывает влияние на характер распределения нагрузок по высоте.

### Исследования Клейна

Клейн Г.К. проводил исследование давления сыпучей среды на стенки сосуда и по результатам аналитического исследования им была предложена формула для расчета давлений, на основе формулы Янсена. Эта формула учитывает увеличение объемного веса насыпного материала с возрастанием давления и показал, расчетные нагрузки могут быть больше в зависимости от ряда условий, чем полученные по формуле Кенена.

Формула Клейна (Mazarskiy 1964) с учетом увеличения плотности при увеличении высоты засыпки

имеет следующий вид:

$$P_{oc} = \frac{1 - e^{-\frac{\rho H (B - LKf)}{\rho F}}}{\frac{LKf}{\rho F} - B} g, \quad (4)$$

при

$$B = \frac{1}{E} \left(1 - \frac{2\mu^2}{1 - \mu}\right),$$

где  $\rho$  – плотность сыпучего материала;  $f$  – коэффициент трения сыпучего материала о стенки;  $F$  – площадь горизонтального сечения бункера;  $L$  – периметр сечения бункера;  $K$  – коэффициент бокового давления;  $H$  – высота слоя засыпки сыпучего материала в бункере;  $B$  – условный коэффициент, зависящий от  $\mu$  и  $E$ ;  $E$  – модуль упругости;  $\mu$  – коэффициент поперечной деформации.

### Нормы Европейского Союза

На территории стран Европейского союза действует стандарт (EN 1991-4, 2006) который регламентирует силы, действующие на бункера и сосуды. В соответствии со стандартом нагрузка, действующая на элементы конструкции бункера от действия сыпучего материала, определяется формулами

$$p_{hf}(z) = p_{ho} Y_J(z), \quad (5)$$

при

$$p_{ho} = \gamma K z_0,$$

$$z_0 = \frac{1}{K\mu} \frac{A}{U},$$

$$Y_J(z) = 1 - e^{-z/z_0},$$

где:  $p_{ho}$  – асимптотическое горизонтальное давление;  $Y_J(z)$  – функция изменения давления от высоты засыпки;  $\gamma$  – насыпная плотность сыпучего материала;  $K$  – значение коэффициента поперечного давления;  $A$  – площадь поперечного сечения вертикального сегмента бункера;  $U$  – периметр поперечного сечения вертикального сегмента бункера;  $\mu$  – коэффициент трения сыпучего материала о стенки бункера;  $z_0$  – характеристическая глубина по теории Янсена;  $z$  – глубина засыпки.

Зависимость для определения давления (5) имеет те же недостатки что и теория Янсена, так как она базируется на данной теории.

### Нормы Евразийского экономического Союза

В настоящее время на территории стран Евразийского экономического Союза силовые и граничные условия при выполнении прочностных расчетов новых конструкций кузовов грузовых вагонов и оценку остаточного ресурса кузовов вагонов, находящихся в эксплуатации регламентирует (GOST 33211 2014).

Применительно к загруженности кузовов вагонов сыпучими материалами рекомендуется определять давление от перевозимого груза в соответствии с так называемой теорией Кулона (Klein 1977), это наиболее распространённый подход в строительной механике сыпучих сред.

Активное (статическое) давление распора насыпного груза на единицу площади стенок кузова в общем случае исходя из требований (GOST 33211, 2014) определяется по формуле:

$$P_{oc} = \frac{\gamma g y \sin(\alpha + \varphi)}{\sin^2 \alpha \cdot \sin(\alpha - \delta) \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \cdot \sin(\varphi - \beta)}{\sin(\alpha - \delta) \cdot \sin(\alpha + \beta)}} \right]^2}, \quad (6)$$

где:  $\gamma$  – насыпная плотность груза;  $g$  – ускорение свободного падения;  $y$  – расстояние от поверхности груза до точки, в которой определяется давление;  $\alpha$  – угол наклона стенки кузова к горизонту;  $\beta$  – угол наклона поверхности груза к горизонту;  $\delta$  – угол трения груза о металлические стенки кузова;  $\varphi$  – угол естественного откоса груза, образуемый поверхностью свободно насыпанного груза с горизонтальной плоскостью.

Вывод зависимости (6) давления на стенки кузова вагона от сыпучего груза, приведенной в нормативной документации рассмотрен в работе (Putyato 2010). Стоит отметить то, что теория Кулона основана на ряде упрощений:

- сыпучее тело ограничено сверху горизонтальной плоскостью;
- сыпучее тело целиком находится в состоянии предельного равновесия.

Одним из наиболее неблагоприятных режимов эксплуатации кузовов грузовых вагонов является удар. При рассмотрении ударного режима нагружения кузовов грузовых вагонов необходимо руководствоваться (Normy 1996) и (GOST 33211 2014). Торцевые стены кузова должны рассчитываться на равномерно распределенное по всей площади торцевой стены динамическое давление насыпного материала

$$N_{u.c} = 0.35N \frac{m}{m_B}, \quad (7)$$

где  $N$  – значение продольной силы, приложенной к вагону;  $m$  – грузоподъемность вагона;  $m_B$  – максимальная расчетная масса вагона.

В (Normy 1996) предусмотрено применение еще одной формулы для определения силы инерции насыпного материала, возникающее при соударении вагонов от действия силы инерции массы груза, равное 0,35 грузоподъемности вагона при продольном ускорении. Сила инерции

$$N_u = m a_x, \quad (8)$$

где  $m$  – масса груза с учетом коэффициента равного 0,35;  $a_x$  – нормированная величина продольного ускорения (замедления),  $a_x = 3,5g$ .

## Результаты расчета

По формуле (7) расчетная величина нагрузки, действующей на торцевую стену при ударе, составит 905,94 кН (или 92,38 тс) для вагона модели 12-119 (тара – 22,5 т, грузоподъемность – 69,0 т), а для модели 12-132 (тара – 24,0 т, грузоподъемность – 70,0 т) – 894,56 кН (91,22 тс). При этом грузоподъемность первой модели меньше на одну тонну. Применяв эту же формулу, для вагонов-хопперов различных моделей, можно получить следующие значения нагрузок на торцевые стены: для модели 11-740 (имеющей массу тары 20,0 т и грузоподъемность 64,0 т) – 914,96 кН (93,30 тс), для модели 19-9774 (имеющей массу тары 23,5 т и грузоподъемность 70,5 т) – 901,04 кН (91,88 тс).

Из представленных выше данных видно, что у полувагона с большей грузоподъемностью нагрузка на торцевую стену меньше, так как и для вагона-минераловоза модели 19-9774, имеющего грузоподъемность больше на 6,5 т, нагрузка, приходящаяся на торцевую стену, меньше, чем у модели 11-740.

Рассчитав с использованием формулы (8) значения инерционной нагрузки для перечисленных выше моделей вагонов, получим: для полувагонов модели 12-119 и 12-132 – соответственно 828,96 и 840,92 кН (или 84,5 и 85,8 тс); для вагонов бункерного типа моделей 11-740 и 19-9774 – 768,84 и 846,31 кН (78,4 и 86,3 тс).

Полученные результаты с использованием формул (7) и (8) отличаются по величинам нагрузок для одних и тех же моделей вагонов и имеют различную зависимость от грузоподъемности. В первом случае она получается обратной, а во втором – прямо пропорциональной.

Оценка прочности перечисленных выше моделей вагонов производилась с использованием пакета прикладных программ DSMFem. Для этого были разработаны расчетные конечно-элементные модели кузовов. При создании расчетных моделей использовались плоские пластинчатые 3- и 4-угольные конечные элементы.

После проведения прочностных расчетов на нагрузки, возникающие при ударе, расчетные напряжения превысили допускаемые, которые равны пределу текучести материала у всех моделей вагонов. Следовательно, в процессе эксплуатации на торцевой стене вагона должны наблюдаться остаточные деформации как минимум листов обшивки. Однако обследование технического состояния кузовов, выработавших назначенный срок службы, никаких деформаций элементов торцевых стен не выявило. К наиболее часто встречающимся неисправностям, выявленным в ходе технических обследований, относятся:

- трещины обшивки торцевой стены в зоне приварки к коньку (для вагонов-хопперов);
- трещины в узлах соединения боковой стены и бункера (для вагонов-хопперов);
- деформация крыши (для вагонов-хопперов);
- деформация верхней обвязки (для полувагонов);

– разрывы обшивки кузова у полувагонов, по причине механических повреждений, из-за нарушения требований, предъявляемых к погрузочно-разгрузочным работам.

Отсюда можно сделать вывод, что полученные значения нагрузок являются завышенными.

Таким образом, можно сделать вывод, что приведенные в нормативно-правовых актах зависимости 7 и 8 не позволяют определить адекватную величину нагрузки, действующей на торцевую стену вагонов при ударах. По нашему мнению, распределение давления на торцевые стены также требует подробного изучения для различных типов вагонов и не должно определяться с использованием унифицированной зависимости.

## Выводы

1. Рассмотрены основные подходы в области исследования статике и динамике сыпучих материалов, решающие задачу нагружения вертикальных и наклонных элементов конструкций от воздействия сыпучего материала.
2. Приведены результаты расчета торцевых стен полувагонов модели 12-119 и 12-132 и вагонов-хопперов модели 11-740 и 19-9774.
3. Представлены недостатки современных подходов, позволяющих оценивать нагрузки, возникающие в вертикальных и наклонных элементах конструкций под воздействием сыпучего материала.

## Литература

- EN 1991-4. 2006. Eurocode 1: Actions on structures - Part 4: Silos and tanks [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC] 107 p.
- GOST 33211. 2014. *Vagony gruzovyye. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam*, Moskva. 54 p. (in Russian).
- Jansen H. A. 1895. *Versuche uber Getreidedruck in Silozellen*. b. XXXIX 35(1): 1045–1049.
- Kleyn, G. K. 1977. *Stroitel'naya mekhanika sypuchikh tel*. Moskva. 256 p. (in Russian).
- Mazarskiy S.M. 1971. *Silosnyye sklady drevesnoy shchepy*. Moskva. 41 p. (in Russian).
- Normy. 1996. *Normy dlya rascheta i proyektirovaniya vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnykh)*. Moskva. 319 p. (in Russian).
- Putyato A.V. 2010. *K voprosu o normativnom nagruzhении kuzova vagona sypuchim gruzom pri raschete na prochnost*. *Mekhanika. Issledovaniya i innovatsii* 4(1): 129–135. (in Russian).
- Rusinek R., Lukaszuk J. 2004. Influence of moisture content on pressure ratio of rape seeds. *Research Agricultural Engineering* 50(1): 11–14.
- Zenkov R.L. 1964. *Mekhanika nasypanykh gruzov*. Moskva. 241 p. (in Russian).