

УДК 629.463.65

А. В. ПУТЯТО

Белорусский государственный университет транспорта, Гомель

К ВОПРОСУ О НОРМАТИВНОМ НАГРУЖЕНИИ КУЗОВА ВАГОНА СЫПУЧИМ ГРУЗОМ ПРИ РАСЧЕТЕ НА ПРОЧНОСТЬ

Рассмотрен вывод зависимости давления на стенки кузова вагона от сыпучего груза, приведенной в нормативной документации для расчета кузовов вагонов на прочность. Указаны неточности в нормативной формуле и ограничения в ее применении.

В настоящее время силовые и граничные условия при выполнении прочностных расчетов кузовов грузовых вагонов определяются в соответствии с «Нормами для расчета ...» в редакции 1996 г. [4], которые в настоящее время перерабатываются, уточняются и редактируются с учетом современного уровня знаний и научных достижений в рассматриваемой области [3]. Применительно к нагруженности кузовов вагонов сыпучими грузами в действующей редакции «Норм...» рекомендуется использовать наиболее распространенный подход в строительной механике сыпучих тел, при котором давление от перевозимого груза определяется в соответствии с теорией Кулона [2], основанной на ряде упрощений: сыпучее тело ограничено сверху горизонтальной плоскостью и целиком находится в состоянии предельного равновесия.

Этот метод условно называется «теорией Кулона». Он основан на следующих допущениях (рисунок 1, а) [2].

1 Форма разрушения системы, состоящей из подпорной стены и удерживаемого ею массива сыпучего тела, определяется перемещением стены в сторону от массива с одновременным сползанием некоторой призмы последнего по некоторой поверхности скольжения.

2 Поверхность скольжения заменяется плоскостью.

3 В качестве второй поверхности скольжения принимается непосредственно задняя грань стены.

4 Сползающая призма рассматривается как абсолютно твердое тело, что позволяет заменить действующие на нее объемные и поверхностные силы их равнодействующими \bar{G} , \bar{Q} и \bar{R} .

5 Сыпучее тело лишено сцепления.

6 Система рассматривается в состоянии предельного равновесия, то есть в состоянии, соответствующем начальному моменту перемещения стены и скольжению призмы сыпучего тела. Это позволяет считать, что силы, действующие на сползающую призму со стороны стены и со стороны части сыпучего тела, оставшейся неподвижной, отклоняются от нормалей к соответст-

$$R = G \frac{\sin \psi}{\sin(\psi + \theta - \varphi)}. \quad (2)$$

Уравнения (1) и (2) содержат три неизвестные – силы \bar{Q} и \bar{R} и угол θ . Значение силы \bar{G} при данной объемной массе сыпучего тела вполне определяется площадью основания сползающей призмы, которая, в свою очередь, зависит от направления плоскости скольжения, то есть от угла θ .

Исходя из теоремы, предложенной А. А. Гвоздевым [1], согласно которой истинная форма разрушения системы отвечает наименьшему значению разрушающей нагрузки, следует принять угол наклона плоскости скольжения таким, чтобы активное давление на стену было наибольшим. Тогда для опрокидывания или сдвига стены потребуется минимальная дополнительная разрушающая нагрузка. Это условие, принятое Ш. Кулоном, позволяет составить недостающее уравнение

$$\frac{dQ}{d\theta} = 0, \quad (3)$$

которое для нахождения \bar{Q} должно быть решено совместно с уравнением (1).

Выполним дифференцирование выражения (1) по θ и приравняем производную нулю:

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{dG}{d\theta} \cdot \frac{\sin(\theta - \varphi)}{\sin(\psi + \theta - \varphi)} + G \cdot \left(\frac{\cos(\theta - \varphi)\sin(\psi + \theta - \varphi) - \sin(\theta - \varphi)\cos(\psi + \theta - \varphi)}{\sin^2(\psi + \theta - \varphi)} \right) = 0;$$

$$G = - \frac{dG}{d\theta} \frac{\sin(\theta - \varphi) \sin(\psi + \theta - \varphi)}{\sin \psi}. \quad (4)$$

Из рисунка 1, где линия EH проведена под углом ψ к линии BH , видно, что

$$G = \rho S_{ABE}; \quad dG = 0,5\rho BE^2 d\theta; \quad \sin(\theta - \varphi) = \frac{EL}{BE};$$

$$\frac{\sin(\psi + \theta - \varphi)}{\sin \psi} = \frac{\sin(\pi - \psi - \theta + \varphi)}{\sin \psi} = \frac{BH}{BE}.$$

Подставляя эти выражения в формулу (4), получим

$$\rho S_{ABE} = -0,5\rho BE^2 \frac{EL}{BE} \frac{BH}{BE} = -0,5\rho EL \cdot BH,$$

из чего следует, что $S_{ABE} = S_{BEH}$.

Приняв точку H за центр окружности, сделаем в точке I засечку радиусом EH на линии BC . Площади треугольников BEH и EHI общей высотой EL относятся одна к другой, как их основания:

$$\frac{S_{EHI}}{S_{BEH}} = \frac{HI}{BH} = \frac{EH}{BH}.$$

Из подобия треугольников BEC и BKH можно составить пропорцию $\frac{BC}{BH} = \frac{BE}{HK}$. Из подобия треугольников BEH и BKD — $\frac{BE}{BK} = \frac{BH}{BD}$.

Следовательно,

$$\frac{BC}{BH} = \frac{BH}{BD}, \text{ или } BH^2 = BC \cdot BD.$$

Из (1) для силы активного давления сыпучего тела на стену можно вывести соответствующую развернутую формулу для случая, когда поверхность засыпки плоская. Для этого используем построение, показанное на рисунке 1.

$$Q = G \frac{\sin(\theta - \varphi)}{\sin(\psi + \theta - \varphi)} = \frac{1}{2} \rho \cdot BH \cdot EL \cdot \frac{\sin(\theta - \varphi)}{\sin(\psi + \theta - \varphi)} = \frac{1}{2} \rho \cdot EH \cdot EL = \frac{1}{2} \rho \cdot EH^2 \sin \psi$$

На рисунке 2 для адаптирования приводимой методики к формулам, предлагаемым в «Нормах для расчета...», 1996 г., угол α обозначим между горизонтальной плоскостью и задней гранью стены.

$$EH = AD \cdot \frac{CH}{CD},$$

поскольку треугольник CEH подобен треугольнику CAD .

Исходя из теоремы синусов применительно к треугольнику ADB , запишем

$$AD = AB \frac{\sin(\pi - \alpha - \varphi)}{\sin \psi},$$

следовательно,

$$EH = AB \frac{\sin(\pi - \alpha - \varphi)}{\sin \psi} \cdot \frac{CH}{CD} = \frac{h}{\sin \alpha} \cdot \frac{\sin(\varphi + \alpha)}{\sin \psi} \cdot \frac{CH}{CD}.$$

Можно записать

$$\frac{CH}{CD} = \frac{BC - BH}{BC - BD} = \frac{BC - \sqrt{BC \cdot BD}}{BC - BD} = \frac{\sqrt{BC}(\sqrt{BC} - \sqrt{BD})}{(\sqrt{BC})^2 - (\sqrt{BD})^2} = \frac{1}{1 + \sqrt{BD/BC}}.$$

Из рассмотрения треугольника ABD и треугольника ABC следует

$$\frac{AB}{\sin \psi} = \frac{BD}{\sin(\varphi + \varphi_0)} \text{ и } \frac{AB}{\sin(\varphi - \beta)} = \frac{BC}{\sin(\alpha + \beta)},$$

тогда

$$\frac{BD}{BC} = \frac{BD \cdot AB}{AB \cdot BC} = \frac{\sin(\varphi + \varphi_0)}{\sin \psi} \cdot \frac{\sin(\varphi - \beta)}{\sin(\alpha + \beta)} \text{ и } \frac{CH}{CD} = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \varphi_0) \cdot \sin(\varphi - \beta)}{\sin \psi \cdot \sin(\alpha + \beta)}}}.$$

Следовательно,

$$EH = \frac{h}{\sin \alpha} \cdot \frac{\sin(\varphi + \alpha)}{\sin \psi} \cdot \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \varphi_0) \cdot \sin(\varphi - \beta)}{\sin \psi \cdot \sin(\alpha + \beta)}}}.$$

Таким образом,

$$Q = \frac{1}{2} \rho \sin \psi \left[\frac{h}{\sin \alpha} \cdot \frac{\sin(\varphi + \alpha)}{\sin \psi} \cdot \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \varphi_0) \cdot \sin(\varphi - \beta)}{\sin \psi \cdot \sin(\alpha + \beta)}}} \right]^2$$

Учитывая, что $\psi = \alpha - \varphi_0$, получим

$$Q = \frac{\rho h^2 \sin^2(\varphi + \alpha)}{2 \sin^2 \alpha \cdot \sin(\alpha - \varphi_0) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \varphi_0) \cdot \sin(\varphi - \beta)}{\sin(\alpha - \varphi_0) \cdot \sin(\alpha + \beta)}} \right]^2}$$

Для определения распределения давления на стенку выполним дифференцирование полученной формулы по высоте стены:

$$p = \frac{dQ}{dh} = \frac{\rho h \sin^2(\varphi + \alpha)}{\sin^2 \alpha \cdot \sin(\alpha - \varphi_0) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \varphi_0) \cdot \sin(\varphi - \beta)}{\sin(\alpha - \varphi_0) \cdot \sin(\alpha + \beta)}} \right]^2}$$

Следует отметить, что в «Нормах для расчета...» для вычисления давления на стенку кузова вагона используется формула

$$p_H = \frac{(1 + K_{дв}) \gamma g y \sin(\alpha + \varphi)}{\sin^2 \alpha \sin(\alpha - \delta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi - \beta)}{\sin(\alpha - \delta) \sin(\alpha + \beta)}} \right]^2}$$

где $K_{дв}$ – коэффициент вертикальной динамики, γ – насыпная плотность; g – ускорение свободного падения; y – расстояние от поверхности; α , β , δ , φ – углы наклона стенки кузова и поверхности груза к горизонту, трения груза о стенки кузова, естественного откоса.

Как видно, нормативное распределение имеет небольшую неточность в выражении, хотя и существенно не оказывающую влияние на результат.

Таким образом, при нормативном приложении давлений от перевозимого сыпучего груза нет возможности учета ряда физико-механических свойств перевозимого груза, например, когезии и дилатансии, изменение параметров которых зачастую приводят к существенной корректировке получаемых результатов [5]. Кроме того, в рассматриваемом подходе учета нагруженности кузова вагона сыпучим грузом возникают сложности при определении давления на стенки вагона, имеющего «каплевидную» форму, получившую в настоящее время широкое распространение при проектировании вагонов бункерного типа. Также следует отметить, что применение упомянутой схемы приложения давления от перевозимого сыпучего груза не эффективно при рассмотрении особенностей нагружения кузова, сопровождающихся наличи-

ем переходных режимов движения вагона, связанных с высокими градиентами изменения кинематических характеристик элементов конструкций подвижного состава (экстренное торможение в кривой, соударение вагонов).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 **Гвоздев, А. А.** Расчет несущей способности конструкций по методу предельного равновесия / А. А. Гвоздев. – М.: Госстройиздат, 1949. – 280 с.

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

3 **Кочнов, А. Д.** О нормативном документе для расчета грузовых вагонов на прочность и ходовые качества и необходимости его дальнейшего совершенствования / А. Д. Кочнов, В. С. Плоткин // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты: тезисы докладов. – СПб., 2009. – С. 100–101.

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

5 **Пуятю, А. В.** Моделирование статической и динамической загруженности кузова вагона сыпучим грузом / А. В. Пуятю: зб. науч. прац. – Харків: УкрЖАЗТ, 2007. – Вып. 82. – С. 99–104.

A. V. PUTSIATA

TO THE QUESTION OF STANDARD LOADING OF CAR BODY WITH LOOSE GOODS FOR STRENGTH

The derivation of pressure on car body walls- loose goods dependence given in the standard documentation for the calculation of car bodies for strength is considered. Inaccuracies in the normative formula and limitations of its application are specified.

Получено 11.02.2010

ISBN 978-985-468-707-0. Механика. Научные исследования и учебно-методические разработки. Вып. 4. Гомель, 2010

УДК 623.593 : 534

А. А. ЦЕРЕНЯ, Ю. А. ГРИБКОВ

Учреждение образования «Военная академия Республики Беларусь»

МИШЕННОЕ УСТРОЙСТВО

Описано практическое применение теории так называемого обращенного маятника. Эта теория была адаптирована и осуществлена авторами в патенте на изобретение и в реальной конструкции уникального мишенного устройства.

Академик П. Л. Капица в 1951 году писал: «Казалось бы, что за 300 лет, прошедших со времен Галилея, этот вопрос должен быть исчерпан (изучение маятников) и если что-либо оставалось для изучения, то это должно было но-