

УДК 629.4.015

П. М. АФАНАСЬКОВ, инженер, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СЫПУЧЕГО ГРУЗА С КУЗОВОМ ВАГОНА

Рассмотрены основные подходы в области исследования статики и динамики сыпучих материалов, которые позволяют оценить нагрузку, действующую на торцевые и боковые стенки кузова вагона, предназначенного для перевозки сыпучих грузов. Указаны преимущества и недостатки рассмотренных методов оценки, их применение в моделировании сыпучей среды.

Введение. Железнодорожный транспорт Республики Беларусь на сегодняшний день занимает одно из ведущих мест на рынке транспортных услуг страны, грузооборот железнодорожного транспорта практически вдвое превышает грузооборот автомобильного транспорта и составляет более 32 % от общего грузооборота страны, уступая лишь трубопроводному. После резкого снижения объемов грузоперевозок в 2015 году начал проследиваться четкий рост. По прогнозам аналитиков Белорусской железной дороги на период до 2020 года ожидается ежегодное наращивание объемов отправления грузов по сети железных дорог. Успешная реализация данной задачи в отрасли напрямую зависит от эффективности и надёжности работы вагонного парка как ключевого в цепи организации перевозочного процесса.

Специализированный подвижной состав бункерного типа для перевозки различной номенклатуры грузов нашел широкое применение на сети Белорусской железной дороги [1, 2].

В соответствии с актуальными требованиями нормативной документации вагоностроения [1, 2] 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.

Сыпучая среда. Можно выделить два основных направления в изучении сыпучей среды. Первое – исследование строения среды. В рамках этого направления исследуются различные типы упаковок частиц, задачи определения оптимального грансостава, позволяющего достичь наиболее плотных упаковок, и др. Второе направление связано с исследованием поведения среды в процессе деформирования.

С точки зрения реологического поведения сыпучие среды можно отнести к классу упругопластических. Для их исследования используются те же методы механики деформируемого твердого тела, что и в теориях упругости и пластичности. Возникновение механики сыпучих сред как науки принято связывать с работой Кулона [3]. За 242 года, прошедшие с того времени, в этой области проведено множество исследований и опубликовано большое количество работ.

Перейдя к краевым задачам, стоит отметить, что исследования в области статики сыпучих материалов начались давно. Одной из основополагающих работ в области статики сыпучего материала является работа Янсена, которая была впервые опубликована в 1895 году [4]. Задача Янсена о распределении давлений сыпучего материала на дно и стенки емкости, которую она заполняет, является одной из классических задач механики сыпучих сред. Эта задача весьма актуальна, и ее исследованию посвящена обширная литература. Интерес к ней связан с необходимостью расчета различных бункеров для хранения сыпучих и порошковых материалов, химических реакторов, заполненных гранулированными компонентами, и т.д. Первое решение задачи для вертикальных боковых стенок было получено путем проведения экспериментального исследования, в ходе которого получено выражение для определения давления внутри силоса, которое не зависит от физико-механических свойств сыпучего материала [4].

Решение Янсена базируется на двух гипотезах:

- коэффициент бокового распора, равный отношению нормального напряжения на стенках к среднему нормальному напряжению в горизонтальном сечении, является величиной постоянной (аналог закона Паскаля);

- касательные напряжения на стенках полностью развиты и пропорциональны соответствующим нормальным напряжениям.

Величина осевого давления сыпучего материала, определенная по формуле Янсена,

$$P_{oc} = \frac{\rho_0 F g}{fKL} \left(1 - e^{-\frac{fKLH}{F}} \right), \quad (1)$$

где ρ_0 – плотность сыпучего материала; F – площадь горизонтального сечения бункера; f – коэффициент трения сыпучего материала о стенки; K – коэффициент бокового распора, определяющий отношение горизонтального давления $P_{рад}$ на вертикальную стенку к вертикальному (осевому) давлению P_{oc} на горизонтальную площадку; L – периметр сечения бункера; H – высота слоя засыпки сыпучего материала в бункере.

Необходимо обратить внимание на то, что в формуле (1) из физико-механических свойств самого сыпучего материала входит только плотность ρ . 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 гидростатическое давление, у которой касательные напряжения между частицами среды стремятся к нулю при величине когезии меньше 3000 Н/м², тем самым оказывая

максимальное давление распора. При величине когезии в диапазоне от 3000 до 5000 Н/м² сыпучий материал частично обладает свойствами жидкости, но с наличием связанности между частицами. Высокая связанность частиц сыпучего материала ведет к снижению уровня давления распора (при когезии выше 5000 Н/м²) [5]. Не учитывается и изменение объема под воздействием сдвиговых деформаций, наблюдаемое в зернистых материалах, называемое дилатансией.

Для использования формулы Янсена необходимы данные о величине коэффициента бокового распора. Рекомендуемые существующими нормами значения колеблются в весьма широких пределах. Так, для зернохранилищ по нормам России и Беларуси $K = 0,4$, по нормам США $K = 0,6$; в ФРГ в течение многих лет использовалось значение $K = 0,3$, затем ввели $K = 0,5$, причем эти значения предположительные [6]. Таким образом, в формуле Янсена вопрос о значении коэффициента бокового распора остается открытым. Кроме того, оставаясь в рамках этой схемы, невозможно оценить и ее точность. Экспериментальная же оценка точности наталкивается на ряд трудностей, связанных с зависимостью давления от податливости датчиков напряжений, стенок емкостей и большого количества факторов.

Несмотря на это, теория, изложенная Янсенем, получила дальнейшее развитие в работах многих отечественных и зарубежных ученых. Ее применяют и современные исследователи в своих работах [7].

Также из формулы (1) видно, что давление на вертикальные стенки от сыпучего материала стремится асимптотически к максимуму при увеличении уровня высоты засыпки $H = \infty$.

Формула для определения коэффициента бокового давления K была впервые выведена Кененом [8]:

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

где φ – 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 $R = F/L$ гидравлический радиус поперечного сечения бункера.

Как показал опыт эксплуатации, формулы (3) для многих материалов дают заниженные значения, так как при выводе формул не учитывались явления динамики, связанные с неравномерностью распределения давления по периметру. Действительные нагрузки, превышающие теоретические по формуле Янсена, объясняются также явлением зависания материала на стенке в результате налипания 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.

Клейн Г.К. проводил исследования 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 показывает, что расчетные нагрузки могут быть больше, чем полученные по формуле Кенена, в зависимости от ряда условий.

Формула Г.К. Клейна [8] с учетом увеличения плотности при увеличении высоты засыпки имеет следующий вид:

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

при

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

где E – модуль упругости; μ – коэффициент поперечной деформации; B – условный коэффициент, зависящий от μ и E .

Работа Р.Л. Зенкова носит более прикладной характер и направлена на решение задач, связанных с проектированием транспортных устройств для насыпных грузов. На основании формулы (1) Зенковым выведена обобщенная формула для расчета давления [9]. В свою формулу Зенков вводит высоту вертикальной свободно стоящей стенки H_0 и физико-механические свойства сыпучей среды

$$P_{oc} = \rho g [E(H - H_0) + H_0] \quad (5)$$

при

$$H_0 = \frac{2\tau_0}{\rho} \cdot \frac{\cos \alpha}{1 - \cos \alpha}; \quad E = \frac{1}{\frac{fKL}{F} H} \left(1 - \frac{1}{e^{\frac{fKL}{F} H}} \right),$$

где τ_0 – начальное сопротивление сдвигу; α – угол внутреннего трения; E – коэффициент зависания; H – высота слоя засыпки сыпучих материалов; K – коэффициент бокового давления; f – коэффициент внешнего трения.

Для связанных сыпучих материалов выражение (5) имеет следующий вид:

$$P_{oc} = \frac{\rho R}{Kf} + \rho H_0. \quad (6)$$

Формулы для расчета давлений Г.К. Клейна и Р.Л. Зенкова не получили широкого распространения. Формулу Янсена пытались скорректировать и многие другие ученые, но и их работы не получили дальнейшего развития.

Сотрудниками ВНИИЖТа в работе [10] была представлена схема нагружения торцевой стены полувагона от действия сыпучего материала. В соответствии с ней на вертикальную плоскость действует суммарная нагрузка от активного статического и динамического давлений сыпучего материала. Равнодействующая динамического давления на единицу ширины торцевой стены предлагают определить по формуле

$$P_d = a\gamma h^2 \operatorname{ctg}\left(\frac{\varphi}{2}\right), \quad (7)$$

где a – продольное ускорение на высоте $(2/3)h$ от пола вагона в долях ускорения свободного падения g и равное $2g$; γ – насыпная плотность сыпучего материала; φ – угол естественного откоса сыпучего материала.

Применение такой схемы нагружения имеет одно существенное ограничение – она применима только для 4-осных полувагонов, так как указанное распределение продольных ускорений по высоте стены получено экспериментальным путем при продольной силе на автосцепке 2,5 МН для данного типа вагона.

А.В. Пулято в работе [5], на основании схемы ВНИИЖТа, разработал схему, которая предлагается как универсальная для любого типа грузового вагона. В разработанной им схеме 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 торцевой стены, ее расположения и величины продольной силы, приложенной к автосцепке:

$$P_{di} = N\gamma \text{ctg}\phi \left(1 - \frac{h_i}{h_0} \right) \frac{h_i - h_n}{k_m m_{бр}}, \quad (8)$$

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_n – расстояние от оси автосцепки до нижней кромки груза; k_m – коэффициент приведенной массы; $m_{бр}$ – масса брутто вагона.

Недостаток нагружения по схеме (8) заключается в необходимости экспериментального определения значений h_0 и k_m для отдельных типов вагонов.

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 [11, 12]. Применительно к загрузженности кузовов вагонов сыпучими материалами в [11, 12] рекомендуется определять давление от перевозимого груза в соответствии с так называемой теорией Кулона, это наиболее распространенный подход в строительной механике сыпучих сред.

Активное (статическое) давление распора сыпучего груза на единицу площади стенок кузова в общем случае исходя из требований [11] определяется по формуле

$$P_a = \frac{\gamma g y \sin(\alpha + \phi)}{\sin^2 \alpha \cdot \sin(\alpha - \delta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \cdot \sin(\phi - \beta)}{\sin(\alpha - \delta) \cdot \sin(\alpha + \beta)}} \right]^2}, \quad (9)$$

где γ – насыпная плотность груза; g – ускорение свободного падения; y – расстояние от поверхности груза до точки, в которой определяется давление; α – угол наклона стенки кузова к горизонту; ϕ – угол естественного откоса груза, образуемый поверхностью свободно насыпанного груза с горизонтальной плоскостью; δ – угол трения груза о металлические стенки кузова; β – угол наклона поверхности груза к горизонту.

Стоит отметить, что теория Кулона основана на ряде упрощений: сыпучее тело ограничено сверху горизонтальной плоскостью и 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 нормативами [11, 12]. Торцевые стены кузова должны рассчитываться на равномерно распределенное по всей площади торцевой стены динамическое давление насыпного материала

$$N_{и.сип} = 0,35N \frac{m}{m_{ваг}}, \quad (10)$$

где N – значение продольной силы, приложенной к вагону; m – грузоподъемность вагона; $m_{ваг}$ – максимальная расчетная масса вагона.

В [12] предусмотрено применение еще одной формулы для определения силы инерции сыпучего материала, возникающее при соударении вагонов от действия силы инерции массы груза, равное 0,35 грузоподъемности вагона при продольном ускорении $a_x = 3,5g$. Сила инерции

$$N_{и} = m a_x, \quad (11)$$

где m – масса груза.

На территории стран Европейского союза применяется стандарт [13], который регламентирует силы, действующие на бункера и сосуды. В соответствии со стандартом [13] нагрузка, действующая на элементы конструкции бункера от сыпучего материала, рассчитывается по формулам

$$P_{hf}(z) = P_{h0} Y_J(z); \quad (12)$$

$$P_{h0} = \gamma K z_0; \quad z_0 = \frac{1}{K\mu} \frac{A}{U}; \quad Y_J(z) = 1 - e^{-z/z_0},$$

где $Y_J(z)$ – функция изменения давления от высоты засыпки; γ – насыпная плотность сыпучего материала; K – значение коэффициента поперечного давления; z_0 – характеристическая глубина по теории Янсена; μ – коэффициент трения сыпучего материала о стенки бункера; A – площадь поперечного сечения вертикального сегмента бункера; U – периметр поперечного сечения вертикального сегмента бункера; z – глубина засыпки.

Зависимость для определения давления (12) имеет те же недостатки, что и теория Янсена, так как она базируется на данной теории.

Моделирование сыпучей среды. В настоящий момент существует два основных подхода к моделированию сыпучих сред, которые существенно отличаются друг от друга:

- моделирование сыпучего тела как сплошной среды (континуальная система, метод конечных элементов);
- твердотельная модель сыпучей среды (дискретная модель, состоящая из частиц-гранул, метод дискретных элементов).

При реализации первого подхода широкое распространение получил метод конечных элементов с различными вариантами математического описания поведения материала сыпучей среды. К таким вариантам относятся представление сыпучей среды, описываемое уравнениями механики деформируемого тела в упругой постановке с учетом приведенных характеристик материала (модуль упругости, плотность, коэффициент Пуассона); описание поведения сыпучей среды на основе уравнений гидромеханики; применение модели материала Друкера-Прагера, описывающей пластическое деформирование среды и пр.

Второй подход основан на использовании законов механики твердого тела. Сыпучая среда моделируется конечным числом частиц (гранул), которые взаимодействуют между собой. Частицы такой среды, как правило, являются абсолютно твердыми телами. Первым приближением такой гранулярной среды является система твердых сферических тел в пространстве (3D) или кругов в плоскости (2D), также в качестве частиц могут использоваться плоские или объемные многоугольники, в зависимости от определенных условий конкретной задачи. Контакт между телами возникает при пересечении границ тел и приводит к возникновению сил контактного взаимодействия, при отсутствии контакта тела считаются невзаимодействующими. Контактные взаимодействия могут быть описаны весьма разнообразно: в соответствии с законом Кулона или законом Герца, упруго-диссипативно.

Метод гидродинамики сглаженных частиц может использоваться для моделирования сплошных сред, он основан на подходе Лагранжа и составляет одно семейство численных методов с методом дискретных элементов. При сопряжении метода вычислительной гидродинамики с методом дискретных элементов можно получить альтернативный подход, он будет относиться к семейству сеточных методов, основанных на подходе Эйлера.

Каждый из описанных подходов имеет свои достоинства и недостатки. Первый метод не учитывает геометрические характеристики гранул сыпучей среды и их взаимодействие между собой. Метод дискретных элементов учитывает геометрию гранул и их взаимодействие, но требует очень интенсивных компьютерных вычислений. В рамках метода дискретных элементов могут быть смоделированы мультифазные течения, такие как проникание газа или жидкости в подвижный сыпучий материал.

Метод дискретных элементов обладает большим потенциалом как инструмент, позволяющий моделировать сыпучие среды. Как уже отмечалось выше, он опирается на мощные вычислительные ресурсы и сложные алгоритмы. Данный метод не является новым, однако он начал свое интенсивное развитие лишь несколько лет назад, что обусловлено достижением необходимого уровня развития как вычислительной техники, так и методов программирования. На сегодняшний день существует ряд программных пакетов, позволяющих без существенных затрат решать задачи легкого и среднего уровня, то есть тот инструмент, который позволяет изучить поведение сыпучей среды, не занимаясь непосредственно крупномасштабным промышленным моделированием.

Получено 17.05.2018

P. M. Afanaskov. Interaction of bulk cargo with the car body.

The main approaches in the field of static and dynamics of bulk materials have been considered, which allow estimating the load acting on the end and side walls of the car body intended for transportation of bulk cargo. The advantages and disadvantages of the estimation considered methods have been indicated. The basic approaches applied to modeling of granular medium have been considered.

Выводы.

1 Рассмотрены основные подходы в области исследования статике и динамики сыпучих материалов, решающие задачу нагружения вертикальных и наклонных элементов конструкций от воздействия сыпучего материала.

2 Приведено описание основных методов моделирования сыпучих сред.

3 Представлены недостатки современных подходов, позволяющих оценивать нагрузки, возникающие в вертикальных и наклонных элементах конструкций под воздействием сыпучего материала.

Список литературы

1 **Senko, V.** Evaluation of stress-strain state bodies of the hopper cars, taking into account the impact of bulk cargo / V. Senko, A. Pigunov, P. Afanaskou // *Mechanika*. – 2017. – P. 331–335.

2 **Пигунов, А. В.** Несущая способность кузовов грузовых вагонов для перевозки сыпучих грузов с учетом современных требований к прочности / А. В. Пигунов, П. М. Афанаськов, П. М. Буйленков // *Актуальные вопросы машиноведения*. – 2017. – № 6. – С. 210–214.

3 **Conlomb, C. A.** Essai sur une application des regies des maximes et minimus a guelgues problemes de statigue relatifs a architecture / C. A. Conlomb // *Mem. Acad. Raj. Press. Divers Savants*. – 1776. – P. 7.

4 **Jansen, H. A.** Versuche uber Getreidedruck in Silozellen / H. A. Jansen // *Z.d.VDI*. – 1895. – № 35. – P. 1045–1049.

5 **Путьто, А. В.** Теория и практика совершенствования конструкций кузовов вагонов с учетом взаимодействия с перевозимыми грузами / А. В. Путьто. – Гомель : БелГУТ, 2011. – 295 с.

6 **Таймер, О. Ф.** Аварии железобетонных силосов зерновых элеваторов / О. Ф. Таймер // *Конструирование и технология машиностроения*. – 1969. – № 2. – С. 181.

7 **Rusinek, R.** Influence of moisture content on pressure ratio of rape seeds / R. Rusinek, J. Lukaszuk // *Research Agricultural Engineering*. – 2004. – № 50 (1). – P. 11–14.

8 **Мазарский, С. М.** Силосные склады древесной щепы / С. М. Мазарский. – М. : Всесоюз. науч.-исслед. и проект. ин-т эконом., организ. управл. произв. и информ. по лесной, целлюлозно-бум. и деревообр. пром., 1971. – 41 с.

9 **Зенков, Р. Л.** Механика насыпных грузов / Р. Л. Зенков. – М. : Машиностроение, 1964. – 241 с.

10 **Шаринов, И. Л.** Определение давления сыпучего груза на торцовые стены вагона при соударении / И. Л. Шаринов // *Вестник ВНИИЖТ*. – 1981. – № 7. – С. 87–89.

11 *Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам : ГОСТ 33211–2014*. – Введ. 2017-06-01. – М. : Стандартинформ, 2016. – 54 с.

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

13 *Actions on structures – Part 4: Silos and tanks : EN 1991-4*. – 2006. – 107 p.