

НАГРУЖЕННОСТЬ КУЗОВА ВАГОНА ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ СЫПУЧИХ ГРУЗОВ

Путяго А. В., Шимановский А. О.

Methods of computer simulation solve a problem of loading of a body of a bunker coach by a granular body. Different alternatives of exposition of behaviour of a material of granular medium surveyed

Сыпучие (или гранулированные) материалы уже давно и достаточно широко используются человеком в быту и производстве. В то же время, несмотря на огромное прикладное значение свойства сыпучих материалов изучены недостаточно.

Основным средством транспортировки сыпучих грузов в настоящее время является железнодорожный транспорт. Поэтому при анализе прочности грузовых вагонов к основным расчетным самоуравновешенным нагрузкам относят силы распора насыпных и скатывающихся грузов. Наиболее распространенным подходом при определении давления в кузове вагона от действия сыпучего тела является теория Кулона, при использовании которой исходят из ряда упрощающих предположений [3]. Основываясь на них, принимают, что находящееся в бункере сыпучее тело, ограниченное сверху горизонтальной плоскостью, целиком находится в состоянии предельного равновесия, при этом вертикальное σ_y и горизонтальное σ_x напряжения на глубине h определяются по формуле

$$\sigma_y = \gamma h; \sigma_x = \gamma t g^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right),$$

где γ – плотность сыпучего груза;

φ – угол естественного откоса сыпучего груза.

Из приведенных выражений следует, что эпюра давлений на бункер имеет вид треугольника на вертикальных стенках и трапеции на наклонных элементах. При этом в процессе создания расчетной модели вагона возникает необходимость приведения распределенной нагрузки к ее узлам, что во многих ситуациях выполняется весьма приближенно.

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.

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, 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 [5]; применение модели материала Друкера-Прагера, описывающей пластическое деформирование среды [2] и прочие.

Второй подход основан на использование законов механики твердого тела. Здесь сыпучая, а в данном случае гранулированная среда, моделируется конечным числом взаимодействующих между собой гранул. Так 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, 4, 6]. 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). При отсутствии контакта тела считаются невзаимодействующими.

Оба подхода имеют свои достоинства и недостатки. Первый подход ограничен в применении в виду того, что не учитывает напрямую геометрию частиц сыпучей среды, что необходимо в ряде задач. Однако второй подход в обычной постановке требует значительно больших вычислительных затрат.

При анализе прочности кузова транспортного средства, в котором находится мелкодисперсный груз, например песок, целесообразно применение метода конечных элементов. Задача об исследовании нагруженности кузова вагона сыпучим грузом решалась в несколько этапов. На первой стадии использована модель материала, подчиняющаяся законам упругого деформирования. С целью определения адекватности получаемых результатов по разработанной математической модели на втором этапе исследований создана конечно-элементная модель, основанная на использовании гипотезы Друкера-Прагера, описывающей упруго-идеальнопластическую среду. Применение условия прочности Друкера-Прагера позволяет выполнять расчеты пластического деформирования при течении материала, при этом поверхность текучести не изменяется в процессе пластического деформирования.

Для реализации численных решений использован программный комплекс конечно-элементного анализа ANSYS. При создании геометрической модели использовались чертежные размеры четырехосного вагона-хоппера для перевозки минеральных удобрений модели 19-9755. Формирование конечно-элементной сетки выполнено 4-х узловым конечным элементом PLANE42. Свойства материала представлены следующими характеристиками [2]: плотность сыпучего груза, 1000 кг/м^3 ; угол естественного откоса, 30° ; модуль упругости, 10^6 Н/м^2 ; коэффициент Пуассона, 0.27; величина когезии, 7200 Н/м^2 ; угол дилатантности, 0° .

Используя симметричность конструкции, создана плоская конечно-элементная модель $\frac{1}{2}$ части кузова бункерного вагона, заполненного сыпучим грузом, состоящая из 1564 конечных элементов.

Решена задача определения нагруженности стенок кузова при статической осадке сыпучего груза. На рис. 1 приведены эпюры распределения эквивалентных напряжений в плоскости сыпучего тела при решении задачи в упругой постановке и с использованием модели Друкера-Прагера. Результаты расчета показали, что картины распределения напряжений имеют принципиальные отличия. К наиболее напряженным областям при упругом решении следует отнести зону бункерного выступа, где ярко выражен концентратор напряжений. В то же время при учете свойств упруго-идеальнопластической среды максимальный уровень напряжений снизился в два раза и концентрация максимальных значений зафиксирована в области перехода вертикальной стенки кузова вагона на наклонную поверхность бункера.

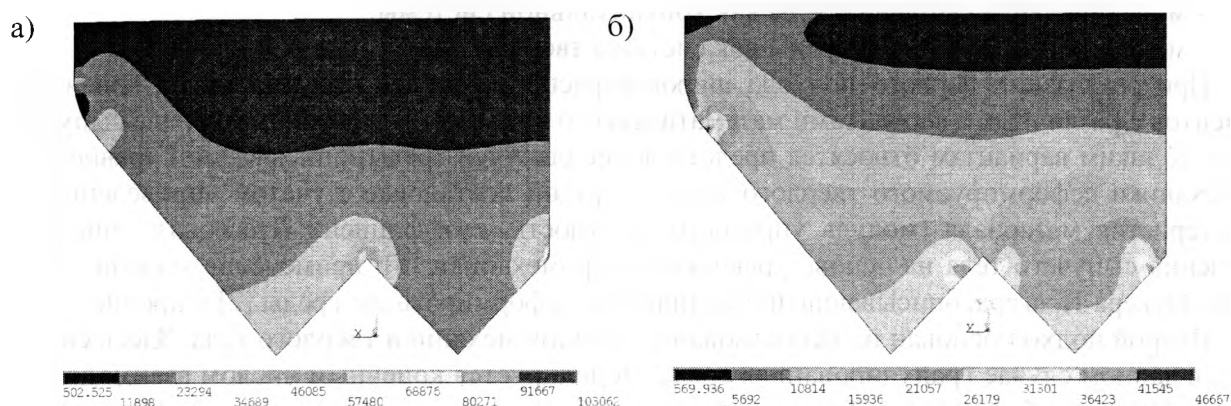


Рис. 1 Распределение эквивалентных напряжений в сыпучем теле: а – упругая среда; б – упруго-идеальнопластическая среда

Для определения характера распределения давления по внутренней поверхности кузова бункерного вагона определены значения узловых реакций. На рис. 2 приведены векторы узловых сил для обоих этапов исследования. Результаты расчета показали, что характер распределения нагруженности стенок кузова вагона несколько отличается от вида, характерного

при использовании теории Кулона. При решении задачи в упругой постановке (рис. 2, а) максимальные значения узловых реакций зафиксированы в местах геометрических концентраторов (вершина бункера, переход от вертикальной стенки на наклонную). В то же время при использовании гипотезы Друкера-Прагера получено, что максимальные значения узловых сил получены на некотором расстоянии от указанных выше геометрических концентраторов (рис. 2, б).

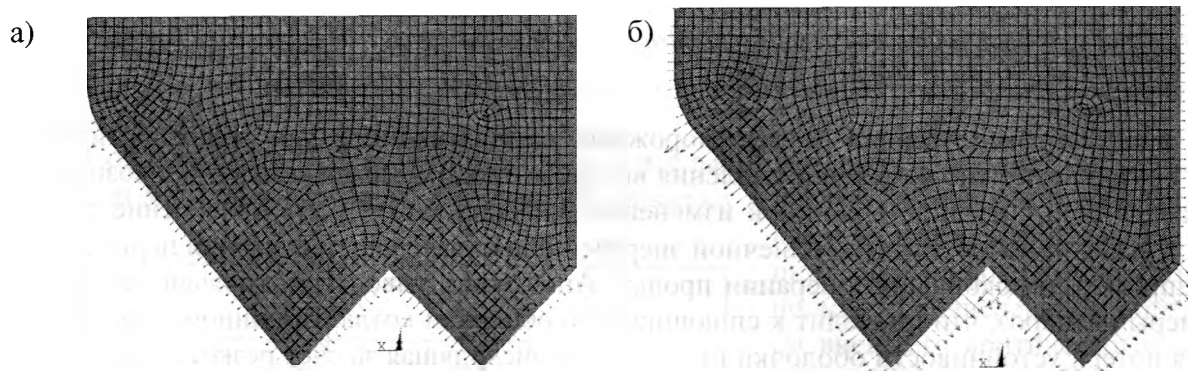


Рис. 2 Вектора узловых реакций при осадке сыпучего груза: а – упругая среда; б – упруго-идеальнопластическая среда

Полученные значения узловых сил могут быть использованы при проведении прочностных расчетов кузовов грузового подвижного состава, предназначенного для перевозки сыпучих грузов.

ЛИТЕРАТУРА

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.
2. **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. научн. тр. – Екатеринбург: УрГУПС, 2003. – С. 143 – 147.
3. **Зенков, Р. Л.** Механика насыпных грузов / Р. Л. Зенков. – М.: Машиностроение, 1964. – 251 с.
4. **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.
5. **Verruijt, A.** Soil mechanics / A. Verruijt. – Delft University of Technjlogy, 2001. – 340 p.
6. **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.