

УДК 623.093

Совершенствование методики расчета преград из сыпучих материалов на примере корундового песка

Зузов Валерий Николаевич

zuzov@bmstu.ru

Яковлев Денис Александрович^(*)

iakovlev.denis.a@gmail.com

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Мобильная защита для транспортных средств — это всегда компромисс между защитой, стоимостью и массой. До сих пор идет поиск новых разновидностей брони, среди которых можно выделить новый тип «мягкой» брони, где объем любой формы и размеров заполняется керамическими гранулами. Данный тип защиты имеет недостатки — это толщина брони и риск высыпания частиц из емкости в случае разрушения оболочки. Кроме этого, в открытом доступе нет информации по расчетам нового типа брони. Анализ опубликованных подходов показал, что моделирование сыпучих преград при баллистическом воздействии представляет научный интерес. В статье представлен механизм рассеивания кинетической энергии, на базе которых возможно разработать расчетную модель, при использовании решателя LS-DYNA добиться приемлемой точности и оптимального времени решения.

Ключевые слова: песок, пуля, LS-DYNA, конечно-элементная модель, подход

Improving the methodology for calculating barriers from bulk materials using the example of corundum sand

Zuzov Valeriy Nikolaevich

zuzov@bmstu.ru

Iakovlev Denis Alexandrohich^(*)

iakovlev.denis.a@gmail.com

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. Mobile protection for vehicles is always a compromise between protection, cost and mass. There is still a search for new types of armor, among which a new type of soft armor can be distinguished, where the volume of any shape and size is filled with ceramic granules. This type of protection has disadvantages, such as the thickness of the armor and the risk of particles spilling out of the container in the event of shell destruction. In addition, there is no publicly available information on the calculations of the new type of armor. An analysis of the published approaches has shown that modeling of bulk barriers under ballistic impact is of scientific interest. The article presents the mechanism of kinetic energy dissipation, on the basis of which it is possible to develop a computational model, using the LS-DYNA solver to achieve acceptable accuracy and optimal solution time.

Keywords: sand, bullet, LS-DYNA, finite element model, approach

Введение. Многослойная броня, как класс, включает в себя керамические панели, применение которых возрастает. Расчетные исследования керамической брони основываются на методах Джонсона — Холмквиста для всех видов ке-

рамических материалов [1–3], но большинство работ посвящены бронеплитам с применением непрерывного или сегментированного слоя керамики.

Разработчиками нового типа «мягкой» защиты (представляет собой емкость, заполненной керамическими гранулами) утверждается, что защита от пули «Шар НАТО» обеспечивает стенка толщиной 100 мм. Основываясь на законе Холла — Петча, уменьшение размера зерен в керамическом материале приводит к упрочнению и повышению его твердости, можно предположить, что, уменьшив средний размер гранул и обеспечив более полное заполнение емкости, можно уменьшить толщину пакета. Проводились экспериментальные открытые исследования [4], без описания модели песка для дальнейшего численного моделирования.

Цель исследования в совершенствовании методики расчета преград из сыпучих материалов на примере корундового песка при высокоскоростном баллистическом воздействии твердым телом применительно к расчетам в пакете LS-DYNA.

Материалы и методы. В работе модель песка реализована в варианте лагранжевой формулировки. Для представления сыпучего материала в методе применяются частицы, которые осуществляют взаимодействия друг с другом посредством контакта и упругих столкновений (рис. 1). При этом контакт точечный, который позволяет учитывать трение и демпфирование.

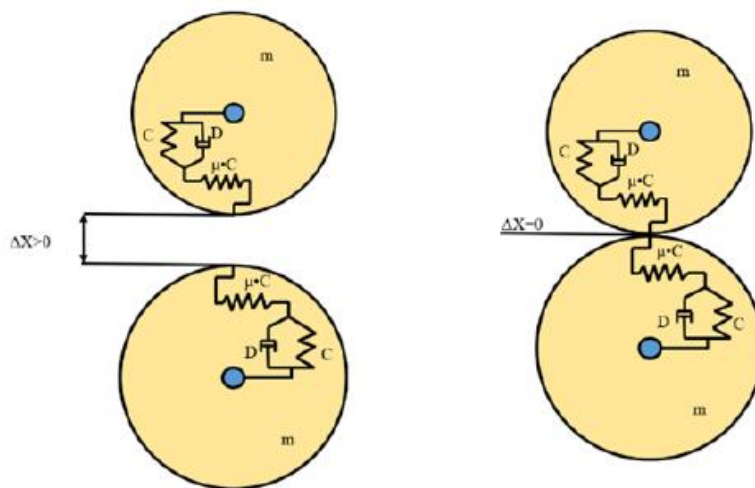


Рис. 1. Принципиальная схема описания контактного взаимодействия частиц песка

Модель контакта состоит из двух линейных пружин, одна из которых действует в нормальном направлении, а другая — в тангенциальном. Обе пружины имеют одинаковую жесткость C . Линейный демпфер с коэффициентом демпфирования D действует параллельно пружине, моделирующей жесткость нормального контакта, касательное усилие, действующее на пружину, ограничено коэффициентом кулоновского трения μ . Условие работы контакта — это достижение зазора ΔX , равного по значению 0. Таким образом, реализуется механизм рассеивания кинетической энергии в расчетных

моделях. Подобное описание механизма рассеивания энергии допустимо, так как согласно работе [5] до 90 % кинетической энергии снаряда рассеивается за счет взаимного перемещения частиц.

Результаты. Разработаны КЭ-модели, где присутствует емкость конечно-го объема и ударник с силуэтом пули 7,62 мм «Шар НАТО». Емкость наполняется элементами на основе DEM и FEM. Так, на рис. 2 приведены результаты расчета.

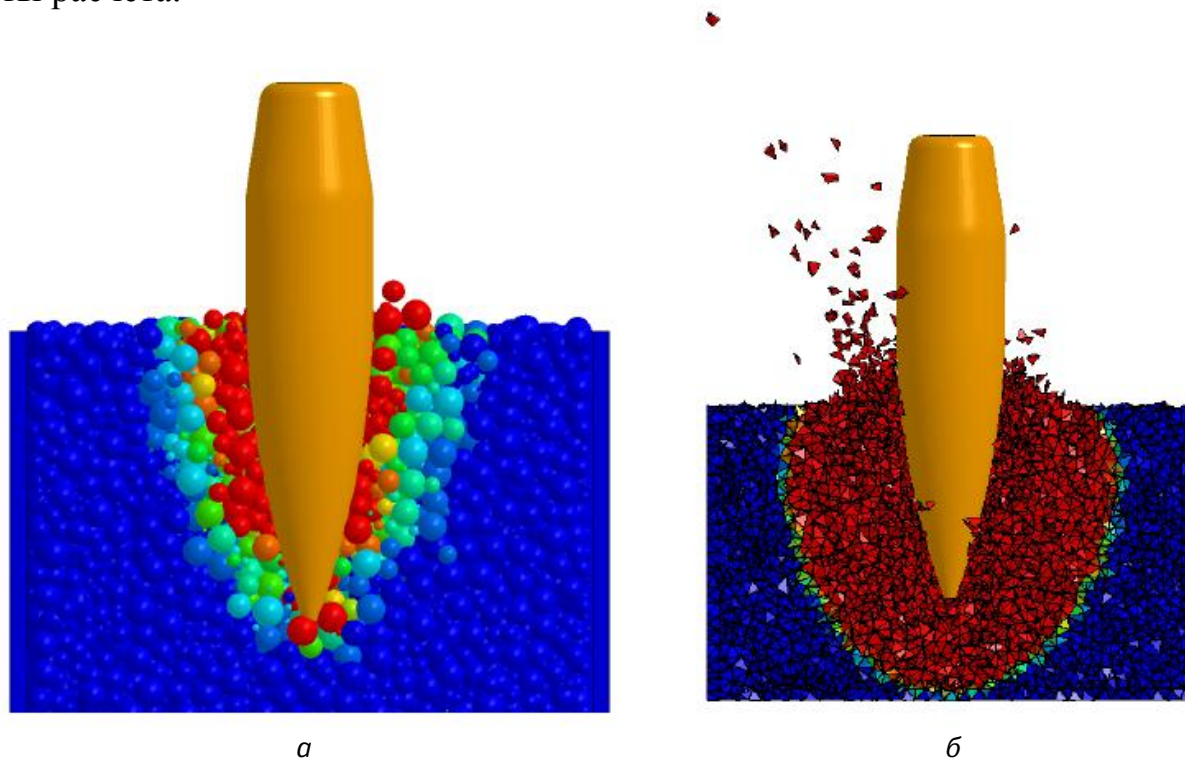


Рис. 2. Результаты расчета в постановке: а — DEM; б — FEM

Обсуждение полученных результатов. Совершенствование методики заключается в обоснованном применении выбранного механизма рассеивания энергии ударника при взаимодействии с песком на основе объемных элементов FEM (finite element method) с обеспечением обоснованного зазора между элементами. Подход имеет преимущество малая ресурсоемкость при описании контактного взаимодействия, так в FEM-постановке отладка модели занимает в 2 раза меньше, чем в DEM постановке.

Закключение. Изложен подход к моделированию контактного взаимодействия при высокоскоростном баллистическом взаимодействии песка с ударником. Описанный подход позволяет учесть область давления перед ударником и более явное реверсивное движение частиц с внешних слоев преграды, что позволит более точно описать пробитие многослойные преграды с сыпучим промежуточным слоем.

Результаты демонстрируют, что изложенный подход к моделированию контактного взаимодействия описывает процесс взаимодействия песка и ударника полно. Так сходжение численного моделирования в пакете LS-DYNA с экспериментами [4, 6] достигает 90 % и остается прогнозируемым, при этом

остается возможность доработки модели песка под конкретную задачу. Данный подход хорошо согласуется с глобальными моделями, применяемыми при расчете транспортных средств.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Jiang A., Li Y., Li D., Hou H. Study on Anti-Penetration Performance of Semi-Cylindrical Ceramic Composite Armor against 12.7 mm API Projectile. *Crystals*, 2022, vol. 12, art. no. 1343. <https://doi.org/10.3390/cryst12101343>
- [2] Yi X. Progress of ceramic materials in the application of armor protection. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 2023, vol. 73, pp. 274–282. <https://doi.org/10.54097/hset.v73i.12987>
- [3] Rashed A., Yazdani M. Studying the behavior of ceramic armors impacted by a 7.62-mm APM2 projectile. *Journal of Modares Mechanical Engineering*, 2015, vol. 14, pp. 125–136.
- [4] Kopinski P. Ceramic Particle Armor. *Proceedings of the Ground Vehicle Systems Engineering and Technology Symposium (GVSETS)*, INDIA, Novi, 2019, pp. 13–15.
- [5] Braslau D. Partitioning of energy in hypervelocity impact against loose sand target. *Journal of Geophysical Research*, 1970, no. 75, pp. 3987–3999.
- [6] Børvik T., Dey S., Clausen A.H. Penetration of granular materials by small-arms bullets. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, vol. 36, iss. 7, pp. 948–964. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2008.12.003>