

Исследование влияния основных параметров моделей сыпучих преград (корундового песка) на сопротивление прониканию твердого тела при высокоскоростном баллистическом воздействии

© В.Н. Зузов, Д.А. Яковлев

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация

Анализ опубликованных современных подходов бронирования транспортных средств показал, что моделирование сыпучих преград при баллистическом воздействии представляет научный интерес. Причем чаще всего применяются подходы, основанные на лагранжевой формулировке. Представлены требования к материалу и принятые в исследовании допущения, с учетом которых разработаны расчетные модели для пакета LS-DYNA. Изложен метод моделирования преград с применением сыпучих материалов, а также отражены результаты моделирования сыпучих преград в разных постановках при баллистическом воздействии на примере пули «шар НАТО». Одно из преимуществ предлагаемого метода описания частиц песка заключается в том, что сохраняется возможность описать механизм их разрушения. Исследована степень влияния размеров частиц, коэффициента трения и модели материала песка на проникающую способность ударника в конечно-элементном моделировании высокоскоростного удара в пакете LS-DYNA. При этом основное внимание уделялось прогнозированию замедления снаряда с максимальной точностью. Анализ полученных результатов показал, что моделирование на базе изложенного метода продемонстрировало себя наилучшим образом. На примере с использованием пули было выявлено с помощью изложенного метода моделирования, как влияют размеры частиц, коэффициент трения и модель материала песка на проникающую способность ударника.

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

Введение. Для защиты транспортных средств от баллистического воздействия используются сталь, алюминиевые сплавы, керамические и другие материалы. В настоящее время при разработке специальных транспортных средств, например инкассаторских, расширяется применение керамических материалов вследствие их легкости, жесткости и коррозионной стойкости. Проведено большое количество экспериментальных и численных исследований, на основе которых были получены аналитические зависимости, позволяющие описать механизм взаимодействия ударника с защитным пакетом. Численные исследования этих задач базируются на методах Джонсона — Холмквиста применительно к керамическим материалам различных видов [1–5]. Однако почти все работы посвящены исследованию керамических панелей со сплошным слоем керамики или сегментных керамических элементов, а при бронировании транспортных средств используются комбинации распространенных методов.

С целью разработки брони нового типа для транспортных средств было проанализировано несколько подходов к моделированию песка и сыпучих преград при баллистическом воздействии и ударном взаимодействии на базе элементов разных типов. При этом в качестве основного материала был выбран корунд. Исследование проводилось на примере емкости, заполненной песком. При изучении процесса проникновения ударника была выбрана наиболее распространенная пуля 7,62×63 мм «Шар НАТО» (далее — пуля).

Процесс взаимодействия пули с песком заключается в следующем: в сыпучей среде твердое тело испытывает множество соударений с отдельными частицами, что не позволяет ему продвигаться через препятствие в изначально заданном направлении. Значительно искривляется его траектория и накапливается разброс при измерении пройденного пути в песке во время испытаний. До 90 % его кинетической энергии уходит на относительное перемещение частиц песка в преграде, а не на разрушение структуры преграды, как в стали.

Цель исследования — оценить степень влияния размеров частиц, скорости проникновения, коэффициента трения и модели материала песка на проникающую способность пули в конечно-элементном моделировании высокоскоростного удара на базе разработанной в пакете LS-DYNA модели.

Требования к материалу и принятые допущения. На основе анализа исследований, представленных в [6–9], можно выделить наиболее характерные допущения, применяемые в случае использования сыпучих материалов. После детального анализа можно принять следующие допущения и сформулировать требования, которые нужно учитывать при разработке модели материала.

- Для репрезентативности результатов в работе применяется корундовый (керамический) песок как наиболее доступный и дешевый материал.

- Поскольку песок относится к несвязным грунтам, т. е. заполненные воздухом промежутки остаются между его частицами, последние способны перемещаться между собой под действием внешних сил. Так как эти частицы песка не имеют химической связи, при движении они просто соударяются без сопротивления, а их сближение ограничивается нормальным контактом, причем трением можно пренебречь на этапе разработки модели, однако в дальнейшем оно будет учтено.

- Когда на песок накладывается сжимающая нагрузка, он начинает уплотняться, так как частицы сближаются и занимают меньший объем. В результате песок формирует область давления перед пулей, в связи с чем энергия высокоскоростного удара распределяется на большую площадь.

- Первоначально на этапе отработки метода моделирования сыпучих преград (корундового песка) для определения сопротивления

прониканию твердого тела при высокоскоростном баллистическом воздействии пуля была принята недеформируемой. Однако в реальных условиях это достигается при определенных условиях, т. е. при низких скоростях воздействия [10], потому что при высоких скоростях ударник деформируется и проникающая способность ощутимо падает (в дальнейших расчетах это будет учтено).

- При оценке заполняемости объема песком была принята идеализированная модель частицы в форме шара равного объема.

- Предполагается, что сыпучий материал не может заполнить емкость на 100 %. Для столь плотного заполнения керамическим песком требуется его спекание при высоких температурах под давлением, из-за чего нарушается структура керамики и она превращается в монолит.

Была рассмотрена группа идеализированных геометрических задач, в ходе которых определялись как наиболее, так и наименее плотное заполнение емкости частицами равного объема. Если емкость заполняется частицами большего диаметра, то плотность песка уменьшается, а при заполнении частицами меньшего диаметра она увеличивается. Значит, опустив теоретические выкладки, можно получить, что при наиболее плотном заполнении частицы песка, имеющие диаметр 1 мм, занимают до 89 % объема емкости, а при наименее плотном заполнении — до 78 %. Эмпирическим путем было получено заполнение, равное 86 %, при численном воспроизведении опубликованных экспериментальных данных [6]. Было также выявлено, что зазор существенно влияет на баллистическую стойкость.

Описание моделей материалов. Сердечник пули и ее оболочки моделировались абсолютно жесткими. Это позволяет в явном виде исследовать влияние размеров частиц, коэффициента трения и модели материала песка на проникающую способность пули.

В исследованиях [6–9] частицам песка были присвоены свойства абсолютно жесткого материала, что требует отдельного рассмотрения. Для того чтобы дать оценку влиянию модели материала при моделировании частиц песка, следует выбрать несколько приемлемых моделей материала, что должно быть обусловлено спецификой расчетов керамических материалов, свойствами исследуемого материала и характером воздействия. В зависимости от решаемой задачи при моделировании керамических материалов применяют четыре основные модели, с помощью которых можно описать поведение керамического песка при высокоскоростном ударе: абсолютно жесткий материал [10], пластичный материал [11], модель Джонсона — Холмквиста [11], а также пользовательская модель материала.

Пользовательская модель материала разработана на основе модели материала Джонсона — Холмквиста при описании прохождения

эксперимента [6]. Она применяется в комбинации со сплошной средой, но позволяет моделировать замедление ударника в сплошной среде со скоростью заглубления в сыпучей среде.

Значения параметров, необходимых для описания пользовательской модели материала, используемого при исследовании, были получены путем итерационного подбора и подробно рассмотрены в работе [11]. Параметры для описания песка в пользовательской модели материала приведены ниже:

Модуль сдвига G , ГПа	9
Плотность ρ , кг/м ³	3700
Параметры прочности материала:	
A	0,93
B	0,31
C	0,007
m	0,6
n	0,64
T , ГПа	0,362
SFMAX, ГПа	0,3
HEL, ГПа	0,6
RHEL, ГПа	0,2
Исходная относительная скорость деформации EPSI	1,0
Часть упругой энергии, которая превращается в энергию гидростатического давления, Beta, Дж	1,0
Параметры пластической деформации при трещинообразовании:	
$D1$	0,01
$D2$	0,7
Коэффициенты давления:	
$K1$, ГПа	0,8
$K2$, ГПа	0
$K3$, ГПа	0

Поскольку большая часть кинетической энергии тратится на уплотнение и относительное перемещение частиц, справедливо добавить в рассмотрение модель абсолютно жесткого материала. Пластичный материал и модель материала Джонсона — Холмквиста дают возможность учитывать деформации частиц и их разрушение, что позволяет уточнять механизм взаимодействия. Пользовательская модель материала может применяться на этапе оптимизации расчетной модели.

Жесткое тело (модель материала 020_MAT_RIGID в LS-DYNA) может иметь несоединенные узлы в конечно-элементной сетке (КЭС) и при этом вести себя как единое тело. Таким образом, при моделировании частиц песка абсолютно жестким телом рекомендуется использовать иную модель материала (220_MAT_DISCRETE_RIGID в LS-DYNA). Значения параметров, необходимых для описания тех материалов, которые относятся к модели абсолютно жесткого материала, используемого в исследовании, приведены в табл. 1.

Параметры группы абсолютно жестких материалов

Материал	Плотность ρ , кг/м ³	Модуль Юнга E , МПа	Коэффициент Пуассона ν
Свинцовый сердечник	11 360	1000	0,42
Латунная оболочка	8520	115 000	0,31
Песок оксида алюминия Al_2O_3	3700	3 150 000	0,24

Модуль Юнга E и коэффициент Пуассона ν используются для задания параметров контактного взаимодействия, если жесткое тело в нем участвует.

Модель Джонсона — Холмквиста (модель материала 110_MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CERAMICS в LS-DYNA) широко распространена в механике твердого тела. Она применяется для моделирования механического поведения хрупких материалов как с учетом механизма разрушения, так и без него, что дает возможность оценивать пластичные элементы. Такие материалы обычно обладают высокой прочностью на сжатие, но низкой — на растяжение, а также имеют тенденцию к прогрессирующему повреждению под нагрузкой из-за роста микротрещин. Значения необходимых параметров для описания материала, участвующего в исследовании, взяты из [11].

Описание предлагаемых конечно-элементных моделей. Выбранная модель песка реализована в варианте лагранжевой формулировки. Для представления сыпучего материала в методе применяются частицы, которые взаимодействуют друг с другом посредством контакта и упругих столкновений (рис. 1). При этом происходит точечный контакт, позволяющий учитывать трение и демпфирование.

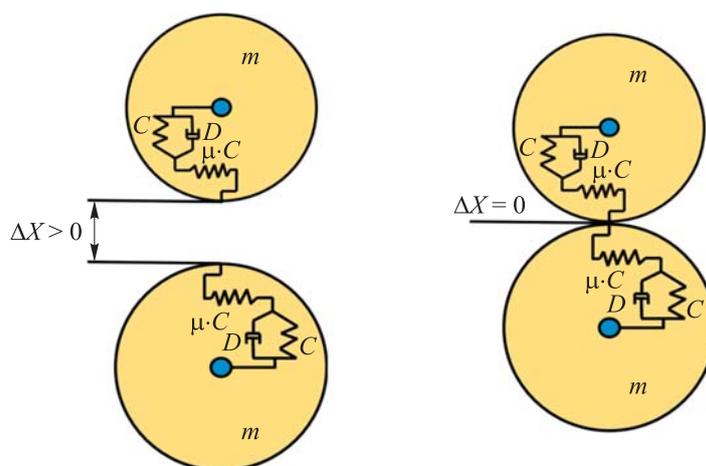


Рис. 1. Принципиальная схема описания контактного взаимодействия частиц песка

Модель контакта состоит из двух линейных пружин, одна из которых действует в нормальном направлении, а другая — в тангенциальном. Обе пружины имеют одинаковую жесткость C . Кроме того, 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 — достижение зазора ΔX , равного нулю. Таким образом, реализуется механизм рассеяния кинетической энергии в расчетных моделях. Подобное описание механизма рассеяния энергии допустимо, так как, согласно отмеченному в [12], до 90 % кинетической энергии снаряда рассеивается за счет взаимного перемещения частиц.

Разработка модели сыпучих преград должна начинаться с качественной оценки влияния типов элементов на точность и скорость расчетов. В рамках исследования разработаны и исследуются несколько КЭ-моделей, в которых присутствует емкость конечного объема, частицы песка и ударник, имеющий силуэт, как у пули.

Модели различаются типом элементов, применяемых для описания керамического песка. Требуется проанализировать влияние этих типов на соответствие результатов моделирования экспериментальным данным.

При баллистическом воздействии на песок применяется DEM (Discrete Element Method), или метод дискретных элементов частиц [10]. Однако обоснования выбора DEM в открытом доступе нет. При моделировании движения сыпучей среды часто применяют SPH-метод (Smoothed-Particle Hydrodynamics), или метод сглаженных частиц [8]. Моделирование статической сыпучей среды и грунтов реализуют с помощью FEM (Finite Element Method), или методом конечных элементов, при постановке из [7] в виде сплошной среды. Сыпучая среда (песок) в FEM-постановке с элементами, сгенерированными с зазором, не моделировалась, но данный метод позволяет описать структуру песка поэлементно. Моделирование песка в лагранжево-эйлеровых (ALE) и эйлеровых подходах затруднительно, поскольку наблюдались проблемы с контактом и численными ошибками в модели [9].

Так, в числе исследуемых типов элементов используются HEX element (шестигранный трехмерный элемент), TET element (четырегранный трехмерный элемент), SPH element (элемент сглаженных частиц) и discrete element (дискретный элемент). Суммарно в исследовании применяются пять методов описания структуры песка.

Первая модель в FEM-постановке. Исследуется взаимодействие пули и песка, который моделируется сплошной средой. Применена пользовательская модель материала, позволяющая прогнозировать только замедление пули, пренебрегая сопутствующими процессами.

Вторая модель в FEM-постановке. Применяются HEX-элементы первого порядка и TET-элементы первого порядка. В данной модели исследуется взаимодействие пули и песка, который моделируется дискретной средой. Элементы в данной модели представлены без зазора (зазора между гранями нет, а узлы не являются общими для соседних элементов).

Третья модель в FEM-постановке. Применяются HEX-элементы первого порядка и TET-элементы первого порядка. В данной модели исследуется взаимодействие пули и песка, который моделируется дискретной средой. Элементы в этой модели представлены с зазором, эквивалентное запыление равно 86 %. В моделях применены абсолютно жесткая модель материала, модель пластичного материала и модель материала Джонсона — Холмквиста.

Четвертая и пятая модели построены с применением метода сглаженных частиц и метода дискретных элементов частиц. В них также исследуется взаимодействие пули и песка, моделируемого дискретной средой, а кроме того, используются абсолютно жесткая модель материала и модель материала Джонсона — Холмквиста. Визуализация этих моделей показана на рис. 2.

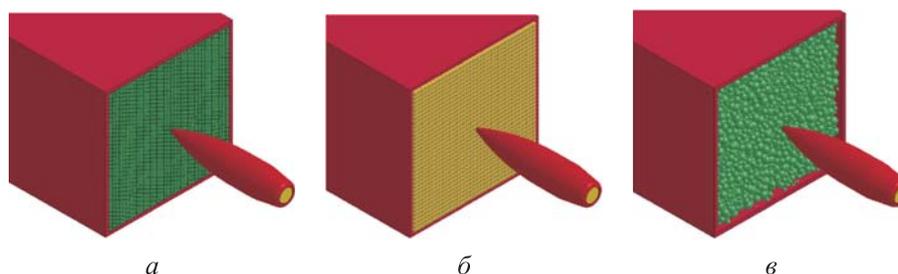


Рис. 2. Визуализация емкости с моделью песка из разных элементов:
а — четырехгранный трехмерный элемент; б — метод сглаженных частиц;
в — метод дискретных элементов частиц

Была проведена оценка влияния размера элементов, коэффициентов трения и скорости. Размер элементов учтен равномерным заполнением элементами не только равного объема, но и разного размера с целью оптимизации расчетного времени. Так, для исследования влияния размера элементов на проникающую способность пули в песок требуется создать дополнительные модели. Визуализация моделей с частицами равного и разного объема представлена на рис. 3.

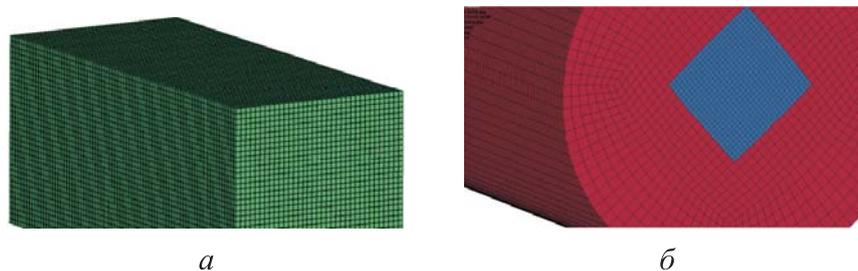


Рис. 3. Визуализация моделей с частицами равного (а) и разного (б) объема

Результаты исследования. Экспериментальные исследования [6, 10] выступают в роли референсных значений глубины проникновения ударника в песок при баллистическом взаимодействии с песком. Ожидаемая глубина проникновения ударника в песок составляет 235 мм. Для моделирования песка сплошной неразрывной средой требуется разработать пользовательскую модель материала, которая будет однозначно описывать поведение сыпучей преграды. По выполненной оценке, данный подход дает малую погрешность — до 1 %, но не позволяет комплексно описать процесс пенетрации и требуется доработка при применении, отличающемся от предложенного.

При работе с методом дискретных элементов необходимо учитывать, что эти элементы генерируются с зазором и уплотнение сетки при взаимодействии с ударником происходит с запозданием (аналогично удару мяча по рою пчел), что демонстрируется также в исследовании [10]. Расчетная погрешность при использовании этого метода достигает 60 %.

Для решения задач в SPH-постановке необходимо доработать модель материала. Кроме того, данный метод не поддерживает модель абсолютно жесткого материала.

За счет своей формы HEX-элементы имеют лучшую останавливающую способность, чем TET-элементы, что не является плюсом при сравнении с экспериментом [10]. Лучшее совпадение с экспериментом (до 91 %) показали результаты расчета с моделью песка из TET-элементов первого порядка, смоделированных с зазором, причем материал в модели был принят абсолютно жестким. Именно такое описание частиц сыпучего материала принято при дальнейшем исследовании влияния их размеров, скорости проникновения частиц и коэффициента трения. Результаты моделирования приведены в табл. 2.

В столбце с описанием подхода отображены тип элемента и модель материала, где 041 — это пользовательская модель материала; 110 — модель Джонсона — Холмкиста; 110+ — модель Джонсона — Холмкиста без разрушения; 220 — абсолютно жесткий материал. Номера моделей материалов присвоены в соответствии с карточками моделей материалов в пакете LS-DYNA. Анализ данных табл. 2 показал,

что стабильное решение задачи было получено в 42 % расчетных моделей. Визуализация результатов в разных постановках приведена на рис. 4.

Таблица 2

Результаты анализа влияния типов элементов

Метод описания частиц песка	Средний размер элемента 1 мм	Ожидаемое время решения, с	Пенетрация, мм	Количество элементов (узлов)
ФЕМ (сплошная среда)	041	420	238	287 572 (404 210)
ФЕМ без зазора (дискретные HEX-элементы)	110	3911	– **	287 572 (1 083 234)
	110+	2474*	34	
	220	2676	2	
ФЕМ с зазором (дискретные HEX-элементы)	110	1651	127 **	
	110+	1447*	110	
	220	1653	68 **	
ФЕМ без зазора (дискретные TET-элементы)	110	–	– **	1 447 920 (5 332 626)
	110+	3443470*	12 **	
	220	264030	50	
ФЕМ с зазором (дискретные TET-элементы)	110	–	– **	
	110+	1743470 *	10 **	
	220	130347	216	
SPH	110	629 *	>875 **	287 572 (397 234)
	020	–	–	
DEM	110	300680	575	242 818 (352 479)
	220	150347	575	
Примечание: * — непрогнозируемое увеличение времени расчета; ** — невозможность точного определения итоговой толщины ввиду расхождения модели.				

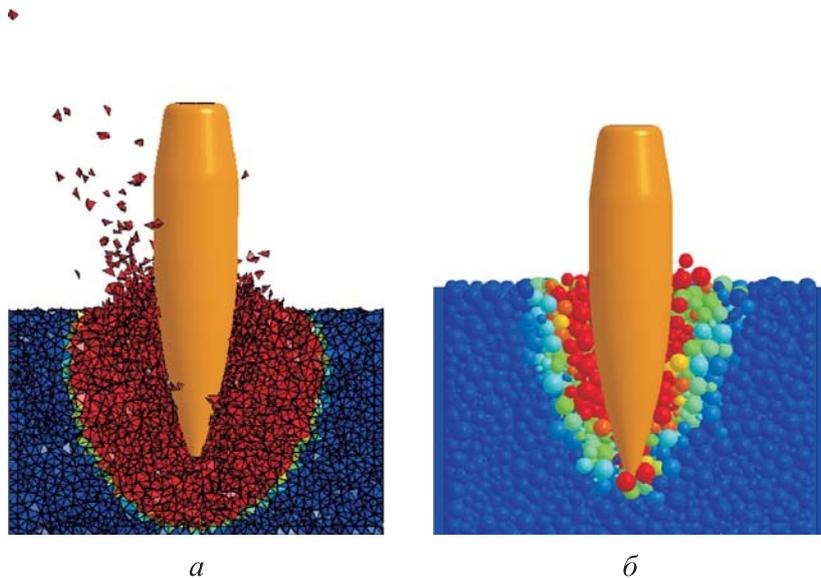


Рис. 4. Картины поведения частиц в моделях при попадании пули в емкости, заполненные четырехгранным трехмерным элементом (*а*) и методом дискретных элементов частиц (*б*)

В статье [6] утверждается, что при начальной скорости взаимодействия, не превышающей 400 м/с, глубина пенетрации изменяется в пределах 10 % в зависимости от зернистости песка. Зависимость остаточной энергии при заглублении ударника в сыпучую преграду показана на рис. 5. Результаты расчета взаимодействия сэндвич-панели с разным наполнением с ударником приведены в табл. 3.

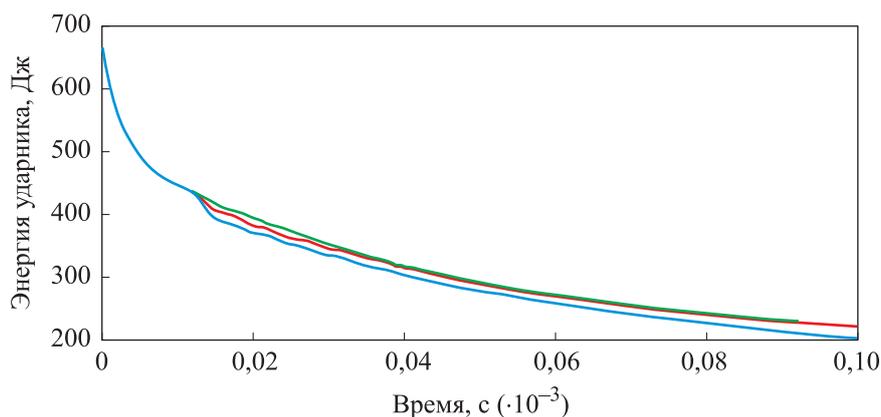


Рис. 5. Зависимость остаточной энергии от времени при заглублении ударника в сыпучую преграду, изменение размера частиц:
0,5 мм — — ; 1,0 мм — — ; 1,5 мм — —

Следует отметить, что разница остаточных энергий при среднем размере элемента 1,0 мм и 0,5 мм составляет не более 3,5 %, а при увеличении среднего размера элемента до 1,5 мм происходит улучшение баллистической стойкости сэндвич-панели на 10 %. Однако данные эксперимента [6] демонстрируют обратную зависимость. Отмечается, что модели, заполненные неравнообъемными элементами (см. рис. 2, б), давали нестабильные результаты с относительно высокими погрешностями решений.

Таблица 3

Результаты расчета сэндвич-панели с вариацией среднего размера частиц песка

Средний размер частиц песка, мм	Количество остаточной энергии, Дж	Время расчета, с	Количество элементов в модели
0,5	229	77 700	903 675
1,0	221	16 262	591 024
1,5	202	13 620	545 347

Анализ результатов расчета [13] без учета и с учетом трения показывает, что разница скоростей убывания энергии ударника не превышает 3 %. Этот вывод будет учитываться в представленном исследовании. Зависимость остаточной энергии при заглоблении ударника в сыпучую преграду продемонстрирована на рис. 6.

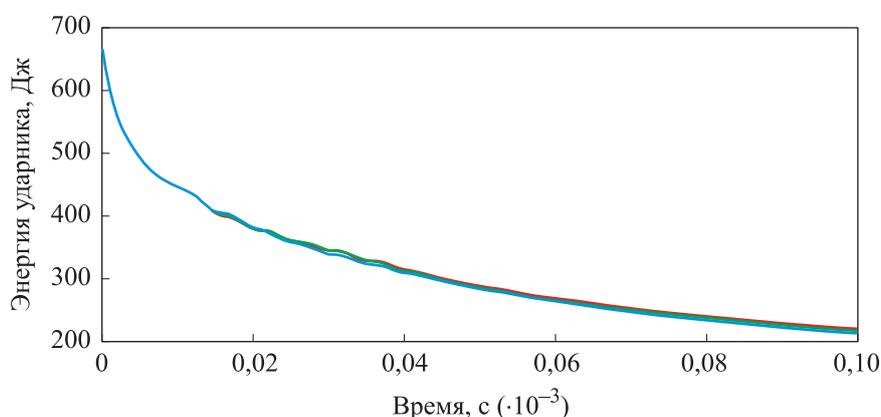


Рис. 6. Зависимость остаточной энергии от времени при заглоблении ударника в сыпучую преграду, изменение коэффициента трения:
0 — — ; 0,001 — — ; 0,01 — —

Роль трения в вопросах пенетрации ударника на высоких скоростях до сих пор не ясна. В некоторых численных исследованиях трением пренебрегали и ограничивались лишь нормальным контактом [10], а в других учитывали его [13]. Стоит обратить внимание,

что при введении коэффициента трения, равного 0,001, наблюдается улучшение баллистической стойкости на 2,5 %, при двукратном увеличении расчетного времени, а при коэффициенте трения, равном 0,01, отмечается улучшение баллистической стойкости на 2,7 % при незначительном увеличении расчетного времени. Данные расчета хорошо согласуются с данными, приведенными в статье [13]. Результаты расчета с вариацией среднего коэффициента трения в модели даны в табл. 4.

Таблица 4

Результаты моделирования первого этапа

Средний размер элемента песка, мм	Значение коэффициента трения	Количество остаточной энергии, Дж	Время расчета, с
1,0	0	221	16 262
1,0	0,001	226	30 731
1,0	0,010	227	17 930

По результатам расчетов определено, что влияние скорости становится более явным при взаимодействии деформируемого ударника с частицами песка. В рассмотренном исследовании увеличение глубины проникновения недеформируемого ударника пропорционально возрастанию его начальной скорости. Так, при повышении скорости взаимодействия пропорционально увеличивается глубина проникновения ударника.

Заключение. Моделирование частиц песка со средним размером элементов 1 мм является наилучшим по соотношению расчетного времени и вычислительной погрешности. Зернистость частиц меньше 1 мм не вносит существенного вклада в останавливающую способность песка, но при этом значительно возрастает продолжительность расчетного времени (до 55 %). При увеличении размера частиц возрастает погрешность результатов при сокращении расчетного времени. Коэффициент трения изменяет баллистическую стойкость в пределах 3 %, при этом наблюдается значительный прирост расчетного времени (до 90 %). Таким образом, в дальнейших расчетах трением допустимо пренебречь. При исследовании баллистического взаимодействия керамического песка и ударника (на примере пули) рекомендуется моделировать песок в FEM-постановке с применением однородных ТЕТ-элементов первого порядка, смоделированных с зазором. Относительное заполнение емкости песком предлагается задавать в диапазоне 80...90 % (рекомендуется 86 %), его частицы целесообразно моделировать абсолютно жесткими. Сформулированные в ходе исследования рекомендации будут использованы при разработке защитной структуры для транспортных средств.

Рассмотренный метод обеспечивает ограничение погрешности расчетов до 10 %, что близко к погрешности при расчете по существующим методам, но сам метод отличается гибкостью, что является преимуществом при разработке сложных структур, характерных для транспортных средств. Основное преимущество метода — возможность более полно описать сам процесс заглужения ударника, так как сохраняется возможность описания механизма разрушения частиц. Кроме того, метод позволяет пожертвовать точностью описания процесса заглужения ударника в угоду скорости вычислений с сохранением точности. Это может дать дополнительные преимущества при выборе метода для оценки самого процесса заглужения ударника. Применение рассмотренного метода сопряжено со значительным сокращением количества подготовительных итераций, что положительно скажется при подготовке задач большого объема, например при моделировании автомобиля целиком. В представленном методе моделируется механизм рассеяния кинетической энергии, основанный на точечном контакте, что позволяет учитывать трение и демпфирование. До 90 % кинетической энергии уходит на относительное перемещение частиц песка в преграде и на их уплотнение, а не на разрушение структуры преграды. Остаток кинетической энергии приходится на деформацию и разрушение песчинок и самого снаряда, что важно для грамотного описания процесса заглужения и для дальнейшей оценки запреградных деформаций.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T. Improved Florence model and optimization of two-component armor against single impact or two impacts. *Composite Structures*, 2009, vol. 88, no. 1, pp. 158–165. DOI: 10.1016/j.compstruct.2008.02.015
- [2] Hazel P.J. *Armour. Material, theory and design*. Boca Raton, CRC Press, 2016, 395 p.
- [3] Rashed Ali, Yazdani Mojtaba, Babaluo A., Hajizadeh Parvin Pedram. Investigation on high-velocity impact performance of multi-layered alumina ceramic armors with polymeric interlayers. *Journal of Composite Materials*, 2015. DOI: 10.1177/0021998315622982
- [4] Liu Siyu, Qu Zhipeng, Lv Mingyun, Ma Guangyuan. Damage and failure mechanism of bullets impact sapphire based on LS-DYNA. 2018. DOI: 10.2991/icmea-17.2018.41
- [5] Shanazari Hadi, Liaghat Gholamhossein, Feli Saeid, Hadavinia Homayoun. Analytical and experimental study of high-velocity impact on ceramic/nanocomposite targets. *Journal of Composite Materials*, 2017, vol. 50. DOI: 10.1177/0021998317692658
- [6] Kopinski P. Ceramic Particle Armor. In: *Proceedings of the Ground Vehicle Systems Engineering and Technology Symposium (GVSETS)*, NDIA, Novi, MI, Aug. 13–15, 2019. DOI: 10.4271/2024-01-3816.
- [7] Basu U., Chopra A.K. Perfectly matched layers for time-harmonic elastodynamics of unbounded domains: theory and finite-element implementation. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 2003, vol. 192, pp. 1337–1375.

- [8] De Vet, S.J., Bereket, Y., Hill, K.M., De Bruyn, J.R. Collapse of a rectangular well in a quasi-two-dimensional granular bed. *Physical Rev. E.*, 2010, vol. 82 (4), paper 041304.
- [9] Børvik T., Hanssen A.G., Langseth M., Olovsson L. Response of structures to planar blast loads — A finite element engineering approach. *Computers & Structures*, 2009, no. 87, pp. 507–520.
- [10] Børvik Tore, Dey Sumita, Olovsson L. Penetration of granular materials by small-arms bullets. *International Journal of Impact Engineering*, 2014, vol. 75. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2014.07.016
- [11] Malciu Adrian, Pupaza Cristina, Puica Constantin, Pană Iuliana-Florina. Finite element model validation for a 14.5 mm armor piercing bullet impact on a multi-layered add-on armor plate. *MATEC Web of Conferences*, 2022, vol. 373, paper 00038. DOI: 10.1051/mateconf/202237300038
- [12] Braslau D. Partitioning of energy in hypervelocity impact against loose sand target. *Journal of Geophysical Research*, 1970, no. 75, pp. 3987–3999.
- [13] Shash Nebras, Zuzov V. Modified Johnson–Cook Model-based Numerical Simulation of Small Arms Bullets Penetration in the Aluminum Alloy Plates. *Science and Education. Bauman MSTU Scientific Journal*, 2017, no. 17, pp. 1–19. DOI: 10.7463/0117.0000922.

Статья поступила в редакцию 04.06.2025

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Зузов В.Н., Яковлев Д.А. Исследование влияния основных параметров моделей сыпучих преград (корундового песка) на сопротивление прониканию твердого тела при высокоскоростном баллистическом воздействии. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2025, вып. 8. EDN ZITHOZ

Зузов Валерий Николаевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Колесные машины», МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: zuzov@bmstu.ru

Яковлев Денис Александрович — аспирант кафедры «Колесные машины», МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: iakovlev.denis.a@gmail.com

Studying the influence of the bulk barrier model parameters (corundum sand) on resistance to penetration of a solid body under the high-speed ballistic impact

©V.N. Zuzov, D.A. Yakovlev

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

Analyzing the published modern approaches to the vehicles armoring shows that simulating the bulk obstacles under a ballistic impact is of scientific interest. Moreover, approaches based on the Lagrangian formulation are most often applied. The paper presents requirements for the material and the assumptions adopted in the study. They are used to develop computation models for the LS-DYNA package, describe a method for simulating obstacles using the bulk materials, and identify results of simulating the bulk obstacles in different settings under a ballistic impact using an example of the NATO ball bullet. One of the proposed method advantages in describing the sand particles is the ability to identify the particle destruction mechanisms. The paper analyzes the influence of particle size influence degree, friction coefficient and the sand material model on the striker penetration ability in the finite element simulation of a high-speed impact in the LS-DYNA package. The paper focuses major attention on forecasting the projectile deceleration with the maximum accuracy. The study results in finding that simulation based on the described method shows itself perfectly. The bullet example reflects results of the particle size, friction coefficient and sand material model influence on the striker penetrating ability when applying the described simulation method.

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

REFERENCES

- [1] Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T. Improved Florence model and optimization of two-component armor against single impact or two impacts. *Composite Structures*, 2009, vol. 88, no. 1, pp. 158–165. DOI: 10.1016/j.compstruct.2008.02.015
- [2] Hazel P.J. Armour. *Material, theory and design*. Boca Raton, CRC Press, 2016, 395 p.
- [3] Rashed Ali, Yazdani Mojtaba, Babaluo A., Hajizadeh Parvin Pedram. Investigation on high-velocity impact performance of multi-layered alumina ceramic armors with polymeric interlayers. *Journal of Composite Materials*, 2015. DOI: 10.1177/0021998315622982
- [4] Liu Siyu, Qu Zhipeng, Lv Mingyun, Ma Guangyuan. Damage and failure mechanism of bullets impact sapphire based on LS-DYNA. 2018. DOI: 10.2991/icmea-17.2018.41
- [5] Shanazari Hadi, Liaghat Gholamhossein, Feli Saeid, Hadavinia Homayoun. Analytical and experimental study of high-velocity impact on ceramic/nanocomposite targets. *Journal of Composite Materials*, 2017, vol. 50. DOI: 10.1177/0021998317692658
- [6] Kopinski P. Ceramic Particle Armor. In: *Proceedings of the Ground Vehicle Systems Engineering and Technology Symposium (GVSETS)*, NDIA, Novi, MI, Aug. 13–15, 2019. DOI: 10.4271/2024-01-3816

- [7] Basu U., Chopra A.K. Perfectly matched layers for time-harmonic elastodynamics of unbounded domains: theory and finite-element implementation. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 2003, vol. 192, pp. 1337–1375.
- [8] De Vet, S.J., Bereket, Y., Hill, K.M., De Bruyn, J.R. Collapse of a rectangular well in a quasi-two-dimensional granular bed. *Physical Rev. E.*, 2010, vol. 82 (4), paper 041304.
- [9] Børvik T., Hanssen A.G., Langseth M., Olovsson L. Response of structures to planar blast loads — A finite element engineering approach. *Computers & Structures*, 2009, no. 87, pp. 507–520.
- [10] Børvik Tore, Dey Sumita, Olovsson L. Penetration of granular materials by small-arms bullets. *International Journal of Impact Engineering*, 2014, vol. 75. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2014.07.016
- [11] Malciu Adrian, Pupaza Cristina, Puica Constantin, Pană Iuliana-Florina. Finite element model validation for a 14.5 mm armor piercing bullet impact on a multi-layered add-on armor plate. *MATEC Web of Conferences*, 2022, vol. 373, paper 00038. DOI: 10.1051/mateconf/202237300038
- [12] Braslau D. Partitioning of energy in hypervelocity impact against loose sand target. *Journal of Geophysical Research*, 1970, no. 75, pp. 3987–3999.
- [13] Shash Nebras, Zuzov V. Modified Johnson–Cook Model-based Numerical Simulation of Small Arms Bullets Penetration in the Aluminum Alloy Plates. *Science and Education. Bauman MSTU Scientific Journal*, 2017, no. 17, pp. 1–19. DOI: 10.7463/0117.0000922

Zuzov V.N., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Wheeled Vehicles, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: zuzov@bmstu.ru

Yakovlev D.A., Postgraduate, Department of Wheeled Vehicles, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: iakovlev.denis.a@gmail.com