

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ MODELING AND OPTIMIZATION

УДК 543.4:5.44.2

А. Р. Мухутдинов¹, докт. техн. наук, профессор, e-mail: muhutdinov@rambler.ru,

З. Р. Вахидова², канд. техн. наук, доц., e-mail: MRZulphiya@rambler.ru,

М. Г. Ефимов¹, магистрант, jero07@bk.ru

¹ Казанский национальный исследовательский технологический университет

² Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева — КАИ

Компьютерное моделирование бризантного действия взрыва

Представлена разработанная и отработанная методика создания компьютерной модели бризантного действия взрыва в ANSYS AUTODYN. Показано, что модель позволяет прогнозировать бризантное действие взрыва для различных взрывчатых веществ с ошибкой до 7 %. Проведено сравнительное изучение результатов моделирования и эксперимента для зависимости бризантности тротила от плотности его заряда.

Ключевые слова: компьютерная модель, бризантность, эксплуатационные параметры, взрывчатые вещества

Введение

Известно, что бризантность является одной из важнейших характеристик взрывчатого вещества (ВВ), на основании которой проводят сравнительную оценку и выбор ВВ для разных целей (боеприпасы, подрывные средства и т. д.) [1]. Количественному определению бризантности посвящено много работ [2–8]. Следует отметить, что экспериментальное определение бризантности ВВ является опасным и дорогим мероприятием [подготовленный персонал и специально оборудованная площадка с необходимым инвентарем (свинцовый столбик, стальной диск, навеска ВВ и электродетонатор)]. Поэтому использование информационных технологий для компьютерного моделирования бризантного действия взрыва является более удобным, наглядным, дешевым и безопасным по сравнению с реальным экспериментом. На сегодняшний день разработан широкий спектр прикладных программных средств для моделирования быстропротекающих процессов [9–11]. Так, для моделирования явлений, которые характеризуются малым временем протекания, большими деформациями и перемещениями, частичным или полным разрушением материала, наиболее приемлемым является прикладное программное обеспечение (ППО) ANSYS AUTODYN.

Анализ литературы показал, что компьютерным моделированием бризантного действия взрыва занимается большое число исследователей, однако подробных методик в этих работах не представлено. В связи с этим разработка методики компьютерного моделирования бризантного действия взрыва яв-

ляется актуальной задачей, имеющей научный и практический интерес.

Методика и объект исследования

Цель данной работы — разработка и отработка методики создания компьютерной модели бризантного действия взрыва для определения бризантности ВВ (проба Гесса) с помощью ППО ANSYS AUTODYN. Объектом исследования является процесс бризантного действия взрыва тротила (вторичного взрывчатого вещества нормальной мощности (ВВВ НМ 1) [8, 9, 14]). Предлагаемая методика включает следующие этапы:

- 1-й этап — запуск ППО ANSYS AUTODYN;
- 2-й этап — создание новой модели;
- 3-й этап — выбор материалов, которые будут использоваться в построении модели;
- 4-й этап — определение плотности тротила;
- 5-й этап — создание начальных граничных условий для воздуха;
- 6-й этап — создание конечных граничных условий;
- 7-й этап — создание Лагранжевой части для свинцового цилиндра;
- 8-й этап — создание Лагранжевой части для стальной пластины;
- 9-й этап — создание Лагранжевой части для стальной плиты;
- 10-й этап — создание Лагранжевой части для взрыва;
- 11-й этап — определение условий оттока Эйлеровой части для взрыва за границы модели;
- 12-й этап — установление Лагранж—Лагранж взаимодействия;

13-й этап — установление Эйлер—Лагранж взаимодействия;

14-й этап — установление точки детонации;

15-й этап — определение контроля решений;

16-й этап — определение выходных параметров;

17-й этап — настраивание отображений модели;

18-й этап — проведение расчета бризантности;

19-й этап — создание GIF-анимации (*Graphics Interchange Format* — формат для обмена изображениями) решенной задачи.

Построение модели осуществляли в двумерной постановке, симметрия — осевая. Численное интегрирование уравнений совместно с определяющими соотношениями для материалов при соответствующих начальных и граничных условиях выполняли на Эйлеровой сетке — для воздуха и взрывчатого вещества, а на Лагранжевой сетке — для цилиндра, диска и плиты. Пространственное разрешение составляло 1 ячейка на 1 мм. Взрывчатое вещество, так же как и материалы для цилиндра, диска и плиты, выбирали из стандартной библиотеки программ.

При создании компьютерной модели бризантного действия взрыва использовали следующие уравнения:

- для тротила (в программе *TNT*) — уравнение *Джонса—Уилкинса—Ли (JWL)*, которое описывает состояние и поведение продуктов детонации;
- для воздуха (в программе *AIR*) — уравнение *идеального газа (Ideal Gas)*, описывающее зависимость между давлением, объемом и абсолютной температурой газа. Внутреннюю энергию начального условия для воздуха задавали равной $2,068 \cdot 10^5$ Дж/кг, чтобы инициализировать его с давлением в 1 атм. Следует отметить, что для тротила и воздуха нет модели прочности;
- для стали 1006 (в программе *STEEL 1006*) и свинца (в программе *LEAD*) имеются одинаковые уравнения *ударной адиабаты (Shock)*, которые описывают моделирование взаимодействия жидкостей с объектом. Необходимо отметить, что модели прочности для этих материалов разные — *модель Джонсона—Кука (Johnson—Cook)*, являющаяся частным случаем изотропного упрочнения, и *уравнение Стейнберга — Гуинана (Steinberg—Guinan)*, описывающее прочность материала по модулю и пределу упругости соответственно.

На левой, правой и верхней границах модели устанавливали граничные условия *Flow Out* (в программе *Euler*), определяющие возможность свободного течения веществ изнутри за пределы расчетного поля без каких-либо отражений от границ.

Для материалов (взрывчатое вещество, свинец, сталь и воздух) устанавливали соответствующие ГОСТ 5984—99 параметры. Геометрические размеры Лагранжевых частей: свинцовый цилиндр ($d = 40$ мм, $h = 60$ мм); стальная пластина ($d = 41$ мм, $h = 10$ мм); стальная плита — подставка ($d = 200$ мм,

$h = 20$ мм). Настройку Лагранжевых частей выполняли по геометрическим размерам Эйлеровых частей: заряд тротила ($m = 50$ г, $d = 40$ мм, $h = 40$ мм при $\rho = 1$ г/см³); воздух (в соответствии с параметрами используемых материалов). Устанавливали и другие характеристики веществ, а также их уравнения состояния (с коэффициентами и параметрами) и др. На рис. 1 (см. вторую сторону обложки) представлены компьютерная модель (рис. 1, а) и реальная экспериментальная сборка (рис. 1, б), построенные в соответствии с ГОСТ 5984—99. Голубым цветом (1) показаны стальной диск и стальная плита, синим (4) — воздух, зеленым (2) — свинцовый цилиндр, красным (3) — заряд тротила. Иницируется заряд в желтой точке.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Результатом данной работы стала разработанная и отработанная методика, позволяющая создать компьютерную модель бризантного действия взрыва и выполнить расчет бризантности за 18 основных этапов. Необходимо также отметить, что компьютерная модель позволяет наблюдать изменение высоты свинцового цилиндра в разные моменты времени при детонации тротила, что достаточно сложно при проведении натурального эксперимента. Следует отметить, что свинцовый цилиндр компьютерной модели (рис. 2, а, см. вторую сторону обложки) приобретал грибовидную форму, как и в реальном эксперименте (рис. 2, б).

Результат замеров обжатия свинцового цилиндра показал бризантность 16 мм (см. таблицу), что согласуется с экспериментальными данными [12] и составляет 3 %. Этот результат подтверждает возможность использования ППО *ANSYS AUTODYN* для моделирования бризантного действия взрыва.

Далее проводили апробацию разработанной методики для других бризантных (вторичных) взрывчатых веществ повышенной мощности (ПМ 3, ПМ 2, ПМ 1, смесь ПН 1 и ПМ 1) [8, 14], которые имеются в стандартной библиотеке ППО *ANSYS AUTODYN*. Результаты приведены в таблице, где $\Delta H_{\text{эксп}}$ — высота свинцового цилиндра из литературных данных; $\Delta H_{\text{комп}}$ — высота свинцового цилиндра, полученная с помощью компьютерной модели.

Результаты определения бризантности для ВВ и их составов

Наименование ВВВ	$\Delta H_{\text{эксп}}$, мм	$\Delta H_{\text{комп}}$, мм	Относительная погрешность, %
НМ 1	16,5 [12, 8, 14]	16	3
ПМ 3	19,0 [12, 8, 14]	18	5,2
ПМ 2	24,0 [12, 8, 14]	22,6	5,8
Смесь НМ 1 / ПМ 1 (40/60)	22,5 [13, 8, 14]	22,1	1,7
ПМ 1	23,0 [13, 8, 14]	21,3	7,3

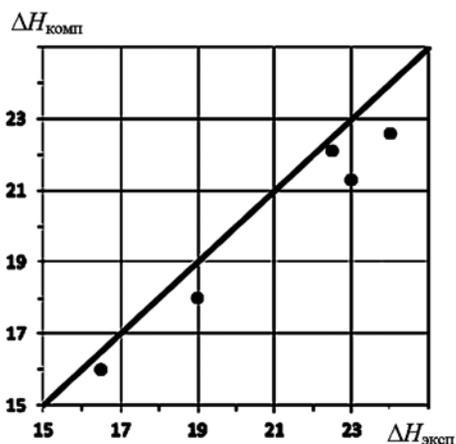


Рис. 3. Зависимость $\Delta H_{\text{комп}} = f(\Delta H_{\text{эксп}})$

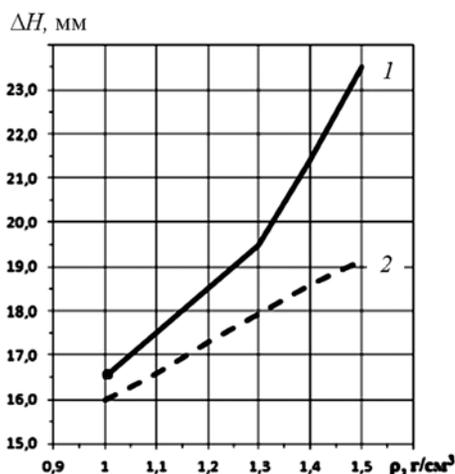


Рис. 4. Зависимость обжатия свинцовых цилиндров от плотности зарядов:

1 — кривая, полученная на основе литературных данных [1];
2 — кривая, полученная на основе компьютерной модели

Для наглядности табличные данные представлены в виде графика на рис. 3. Точками показаны данные бризантности, полученные с помощью компьютерной модели, сплошной линией показана тождественная функция $\Delta H_{\text{комп}} = f(\Delta H_{\text{эксп}})$. На основании полученной зависимости видно, что моделирование с использованием ППО занижает результат от 1,7 до 7,3 %. Это связано с неполным учетом основных свойств объекта.

Вторым этапом апробации является сравнительное изучение зависимости бризантности тротила от плотности его заряда на основе литературных данных [1] и результатов моделирования (рис. 4).

Зависимость ΔH от ρ (рис. 4), полученная на основе компьютерной модели (кривая 2), имеет линейный характер, где во всем изученном диапазоне данных (1,0... 1,5 г/см³) наблюдается рост бризантности на 16 %. При построении этой зависимости по экспериментальным данным [1] (кривая 1) картина меняется: зависимость имеет нелинейный характер, где в интервале плотности 1,3...1,5 г/см³ наблюдается значительный рост значения бри-

зантности, который составляет 17 %, в диапазоне 1,0...1,3 г/см³ — 15 %, а в общем (1,0...1,5 г/см³) на 30 %. В связи с этим характер кривой 2, полученной на основе компьютерной модели, отличается от кривой 1, построенной по экспериментальным данным, которая фиксирует резкие отклонения (на 17 %) в диапазоне плотности 1,3...1,5 г/см³.

Заключение

Использование компьютерного моделирования на основе современных информационных технологий для изучения бризантного действия взрыва является актуальным.

Разработана и отработана методика создания компьютерной модели для оценки бризантного действия взрыва по обжатию свинцового цилиндра (проба Гесса). Проведено сравнительное изучение результатов моделирования и эксперимента по бризантности. Показано, что компьютерная модель позволяет прогнозировать бризантное действие взрыва (проба Гесса) для различных ВВ с ошибкой до 7,3 %.

Сравнительное изучение результатов моделирования и эксперимента для зависимости бризантности тротила [8] от плотности его заряда показало, что компьютерная модель позволяет прогнозировать результат с ошибкой до 3 %.

Список литературы

1. Баум Ф. А., Станюкович К. П., Шехтер Б. И. Физика взрыва. М.: Наука, 1975. 752 с.
2. Андреев С. Г., Бабкин А. Б., Баум Ф. А. и др. Физика взрыва. Изд. 3-е, испр. Т. 1. М.: Наука, 2004. 832 с.
3. Миропольский Ф. П., Кузнецов В. В., Саркисян Р. С., Галущко Б. И. Авиационные средства поражения. М.: Военное издательство, 1995. 255 с.
4. Андреев К. К. Взрыв и взрывчатые вещества. М.: Военное Министерство Обороны СССР, 1956. 112 с.
5. Андреев К. К., Беляев А. Ф. Теория взрывчатых веществ. М.: Оборонгиз, 1960. 597 с.
6. Дубнов Л. В., Бахаревич Н. С., Романов А. И. Промышленные взрывчатые вещества. М.: Недра, 1988. 358 с.
7. Шагов Ю. В. Взрывчатые вещества и пороха. М.: Воениздат, 1976. 120 с.
8. Пиротехника. Справочник по взрывчатым веществам, порохам и пиротехническим составам. Москва. 2012. С. 182.
9. Будников М. А., Левкович Н. Л., Быстров И. В., Сиротинский В. Ф., Шехтер Б. И. Взрывчатые вещества и пороха. М.: Государственное издательство оборонной промышленности. 1955, 109 с.
10. Мухутдинов А. Р., Вахидова З. Р., Ефимов М. Г. Моделирование процесса горения твердого топлива в топочном устройстве // Вестник Казан. технол. ун-та. 2014. Т. 17, № 20. С. 114—116.
11. Мухутдинов А. Р., Вахидова З. Р., Двоеносова М. В. Исследование особенности горения фрезерного торфа нейросетевым моделированием // Вестник Казан. технол. ун-та, 2014. Т. 17, № 22. С. 55—57.
12. Мухутдинов А. Р., Вахидова З. Р. Результаты изучения картины процесса горения твердого топлива с использованием информационных технологий // Вестник Казан. технол. ун-та, 2013. Т. 16, № 3. С. 69—72.
13. Хмельницкий Л. И. Справочник по бризантным взрывчатым веществам. Часть 1. Москва, 1962. С. 44.
14. Горст А. Г. Пороха и взрывчатые вещества. М.: Машиностроение, 1972. 208 с.
15. Взрывчатые вещества ВВ, классификация. <http://www.eragun.org/ind14.html>.

A. R. Mukhutdinov¹, Professor, e-mail: muhutdinov@rambler.ru,
Z. R. Vahidova², Associate Professor, e-mail: MRZulphiya@rambler.ru,
M. G. Efimov¹, Graduate Student, e-mail: jero07@bk.ru
¹KNRTU,
²KNRTU-KAI

Computer Modelling of Brisant Action of Explosion

In this article the developed and fulfilled technique of creation of computer model of brisant action of explosion for sinking of the lead cylinder (Ness's test) is presented to ANSYS AUTODYN. Comparative studying of results of modeling and experiment is carried out: shattering effects of secondary explosives of the increased power. It is shown that the computer model allows to predict brisant action of explosion with a mistake to 7%; dependences of shattering effect of trotyl on density of its charge. It is shown that the computer model allows to predict brisant action of explosion (Hess's test) with a mistake to 3%. It is established that character of the curve received on the basis of computer model differs from the curve constructed on experimental data which fixes sharp deviations (for 17%) in the range of density of 1,3...1,5 g/cm³.

Keywords: computer model, shattering effect, operational parameters, explosives.

References

1. Baum F. A., Stanjukovich K. P., Shehter B. I. *Fizika vzryva*, Moscow, Nauka, 1975, 752 p.
2. Andreev S. G., Babkin A. B., Baum F. A. et al. *Fizika vzryva*. Izd. 3-e, ispr. Vol. 1. Moskva, Nauka, 2004, 832 p.
3. Miropol'skij F. P., Kuznecov V. V., Sarkisjan R. S., Galushko B. I. *Aviacionnye sredstva porazheniya*, Moscow, Voennoe izdatel'stvo, 1995, 255 p.
4. Andreev K. K. *Vzryv i vzryvchatye veshhestva*, Moscow, Voennoe Ministerstvo Oborony SSSR, 1956, 112 p.
5. Andreev K. K., Beljaev A. F. *Teoriya vzryvchatykh veshhestv*, Moscow, Oborongiz, 1960, 597 p.
6. Dubnov L. V., Baharevich N. S., Romanov A. I. *Promyshlennye vzryvchatye veshhestva*. Moscow, Nedra, 1988, 358 p.
7. Shagov Ju. V. *Vzryvchatye veshhestva i poroha*. Moscow, Voeniadat, 1976, 120 p.
8. Piropravka. *Spravochnik po vzryvchatym veshhestvam, poroham i pirotehnicheskim sostavam*, Moscow, 2012, 182 p.
9. Budnikov M. A., Levkovich H. L., Bystrov I. V., Sirotinskij V. F., Shehter B. I. *Vzryvchatye veshhestva i poroha*. Moscow: Gosudarstvennoe izdatel'stvo oboronnoj promyshlennosti, 1955, 109 p.
10. Muhutdinov A. R., Vahidova Z. R., Efimov M. G. Modelirovanie processa gorenija verdogo topliva v topochnom ustrojstve, *Vestnik Kazan, tehnol. un-ta*, 2014, vol. 17, no. 20, pp. 114–116.
11. Muhutdinov A. R., Vahidova Z. R., Dvoenosova M. V. Issledovanie osobennosti gorenija frezernogo torfa nejrosetevym modelirovanijem, *Vestnik Kazan. tehnol. un-ta*, 2014, vol. 17, no. 22, pp. 55–57.
12. Muhutdinov A. R., Vahidova Z. R. Rezul'taty izuchenija kartiny processa gorenija tverdogo topliva s ispol'zovaniem informacionnykh tehnologij, *Vestnik Kazan. tehnol. un-ta*, 2013, vol. 16, no. 3, pp. 69–72.
13. Hmel'nickij L. I. *Spravochnik po brizantnym vzryvchatym veshhestvam*, Chast' 1. Moscow, 1962, 44 p.
14. Gorst A. G. *Poroha i vzryvchatye veshhestva*, Moscow, Mashinostroenie, 1972, 208 p.
15. *Vzryvchatye veshhestva VV, klassifikacija*. URL: <http://www.eragun.org/ind14.html>.

УДК 004.36

С. А. Инютин, д-р техн. наук, проф., e-mail: inyutin_int@mail.ru,
Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (МАИ)

Метод вычисления количественной характеристики модулярной величины

Разработан итерационный метод вычисления количественной характеристики отношения порядка для компьютерных модулярных форматов данных в параллельных реконфигурируемых вычислительных системах. Количественная характеристика предназначена для выполнения немодулярных операций в параллельной компьютерной арифметике. Итерационный метод позволяет получить характеристику с использованием дополнительного оборудования с минимальной разрядностью при квадратичной сложности вычислительного алгоритма.

Ключевые слова: многопроцессорные реконфигурируемые системы, вычислительный процесс, сложность вычисления, модулярные компьютерные форматы, числовые характеристики