

УДК 623.54

К. А. Иванов, аспирант
А. А. Горев, магистрант
ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

МЕТОД КРУПНЫХ ЧАСТИЦ В МОДЕЛИРОВАНИИ ПОЛЕТА СНАРЯДА СО СВЕРХЗВУКОВОЙ СКОРОСТЬЮ

В данной статье описан метод решения задачи внешней баллистики совместным решением задачи обтекания снаряда и задачи о движении твердого тела. Для подтверждения применимости представленного в статье метода было выполнено моделирование полета пули патрона 7Н6 при сверхзвуковых скоростях. Результаты, полученные при моделировании, хорошо согласуются с экспериментальными данными – таблицами стрельбы. Предложенный в статье метод может быть интересен для решения задачи внешней баллистики для снарядов при сверхзвуковых скоростях.

Ключевые слова: внешняя баллистика, метод крупных частиц, моделирование полета снаряда.

Одной из важных задач проектирования боеприпасов стрелкового оружия и артиллерии является определение баллистических характеристик снарядов, определяющих их траекторные параметры. Существенное снижение трудоемкости и стоимости разработки боеприпасов в настоящее время обеспечивается путем применения для решения задач внешней баллистики эмпирических зависимостей [1, 2], методов и алгоритмов вычислительной газодинамики [3]. Отметим, что использование коэффициентов формы и эмпирических зависимостей вносит погрешность в расчеты, а использование методов вычислительной гидрогазодинамики требует проведения расчета на определенной скорости обтекания с заданным шагом для получения табличной зависимости силы сопротивления от скорости.

Отмеченные проблемы позволяют сформулировать цель исследования – разработать метод расчета траекторных параметров снаряда при наличии возможных диапазонов скорости его полета.

Для достижения цели сформулированы следующие задачи согласно [4]:

– Разработать метод расчета внешней баллистики снарядов на всем диапазоне скоростей.

– Выполнить проверку результатов, полученных с разработанным методом, с экспериментальными данными.

Для выполнения поставленных задач используются известные уравнения движения снаряда, решение которых находится методом крупных частиц.

Связанное решение задач обтекания снаряда сверхзвуковым потоком и решение уравнений движения твердого тела позволит получить траекторные параметры снаряда при различных значениях скорости полета снаряда.

Метод крупных частиц [5, 6] при использовании методов параллельного программирования [7] позволяет получить поля скоростей и давлений, силу лобового сопротивления снаряда за относительно малое время вычислений. А численное интегрирование уравнений движения снаряда с полученным значением силы лобового сопротивления дает информацию о пройденном расстоянии и величине потери снарядом скорости.

Авторами было разработано программное обеспечение, включающее модуль решения задачи осесимметричного обтекания снаряда сверхзвуковым потоком методом крупных частиц [8, 9], модуль решения уравнений движения снаряда методом Рунге – Кутты [10].

В данной статье рассмотрено численное моделирование полета пули 7Н6 [11]. Для данной пули построена следующая сетка, выполненная в сеточном генераторе GMSH (рис. 1) [12]. При моделировании обтекания принимаются параметры среды, соответствующие параметрам стандартной атмосферы при высоте над уровнем моря 0 м и температуре +15 °С [13]. Начальная скорость пули 7Н6 при расчете равна 801 м/с.

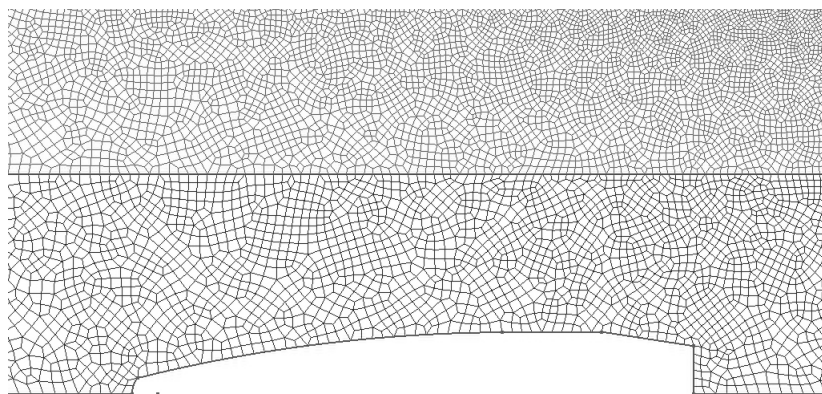


Рис. 1. Сетка для проведения расчетов

При проведении анализа внешней баллистики путь патрона 7Н6 критерием точности полученного решения является отклонение вычисленного значения силы сопротивления от значения, полученного с использованием таблиц стрельбы [14].

Для вычисления значения силы сопротивления используется метод наименьших квадратов [15]. Функция, для которой производится определение коэффициентов с помощью метода наименьших квадратов:

$$V = \exp(a \cdot t^2 + b \cdot t + c). \quad (1)$$

Определение коэффициентов для функции выполняется с помощью программы wxMaxima [16].

Подставляя формулу (1) в выражения второго закона Ньютона, зависимость силы сопротивления от времени выражается уравнением

$$F = m(2 \cdot a \cdot t + b) \exp(a \cdot t^2 + b \cdot t + c). \quad (2)$$

Для пули патрона 7Н6 была использована основная таблица для автоматов Калашникова (АК74 и АКС74) [17]. Данные сведены в табл. 1.

Таблица 1. Табличные данные для пули патрона 7Н6

№ п/п	Дальность, м	Полное время полета пули, с	Окончательная скорость пули, м/с
1	100	0,12	801
2	200	0,25	709
3	300	0,39	623
4	400	0,57	543
5	500	0,77	467
6	600	1,01	397
7	700	1,29	340
8	800	1,60	306

С использованием метода наименьших квадратов определены коэффициенты для уравнения (1). Зависимость между скоростью и временем полета пули выражается формулой

$$V = \exp(0,22 \cdot t^2 - 1,04 \cdot t + 6,81). \quad (3)$$

Зависимость силы сопротивления от скорости приведена в табл. 2.

Таблица 2. Сравнение силы сопротивления

№ п/п	Скорость, м/с	Сила сопротивления, Н	
		Таблицы стрельбы	Численный эксперимент
1	801	2,6	2,39
2	709	2,18	2,04
3	623	1,8	1,7
4	543	1,45	1,38
5	467	1,12	1,06
6	397	0,83	0,73
7	340	0,39	0,46

В результате интегрирования уравнения движения пули были получены зависимости скорости от дальности, которые приведены в табл. 3, на рис. 2.

Таблица 3. Сравнение силы сопротивления

№ п/п	Дальность, м	Скорость, м/с		Относительная погрешность, %
		Таблицы стрельбы	Численный эксперимент	
1	100	801	801	0
2	200	709	714	0,7
3	300	623	632	1,4
4	400	543	553	1,8
5	500	467	481	3
6	600	397	417	5
7	700	340	365	7,3

Из табл. 3, рис. 2 видно, что с увеличением дальности относительная погрешность определения скорости увеличивается, что связано с накоплением ошибки при интегрировании уравнения движения пули. Максимальная относительная погрешность 7,3 %.

В результате решения задачи обтекания пули патрона 7Н6 были получены поля скоростей, которые приведены на рис. 3.

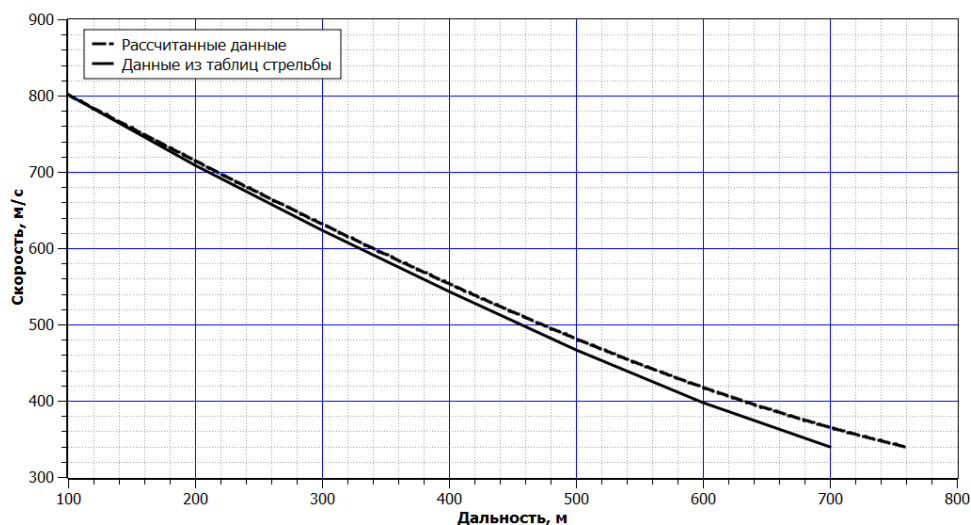


Рис. 2. Сравнение зависимости скорости от дальности



Рис. 3. Поле скоростей при обтекании пули 7Н6 со скоростью 801 м/с

При оценке результатов работы использованы материалы из работ [18, 19]. Из результатов решения видно, что данные, полученные с помощью разработанного метода, хорошо согласуются с экспериментальными данными из таблиц стрельбы. Это позволяет сделать вывод, что данный метод может быть использован при проектировании новых снарядов, определения траекторных параметров на всем диапазоне скоростей, при этом он позволит сократить число дорогостоящих натурных испытаний.

Библиографические ссылки

1. Венцель Д. А., Окунев Б. Н., Шапиро Я. М. Внешняя баллистика. – Ч. 1. – Л. : Ар. акад. им. Ф. Э. Дзержинского, 1933.
2. Ефремов А. К. Аппроксимация закона сопротивления воздуха 1943 г. // Наука и образование. – 2013.
3. Supersonic, turbulent flow computation and drag optimization for axisymmetric afterbodies / R. M. Cummings, H.T. Yang and Y. H. Oh. Computers & Fluids. Vol. 24, Issue 4, May 1995, Pages 487–507.
4. Селетков С. Г., Иванова С. С. Объект, субъект предмет научно-квалификационной работы // Вестник ИжГТУ. – 2014. – № 1. – С. 175–178 с.
5. Блинов Д. С. Решение газодинамических задач в областях сложной формы с использованием конечно-объемных алгоритмов метода крупных частиц // Вестник ИжГТУ. – 2009. – № 1 (41). – С. 151–154.
6. Ливеровский Р. И., Шевырев С. П. Численное моделирование плоских задач сверхзвуковой газовой динамики на треугольной сетке // Вестник РУДН. Сер. Математика. Информатика. Физика. – 2014. – № 4. – С. 23–32.
7. Немнюгин С. А., Стесик О. Л. Параллельное программирование для многопроцессорных вычислительных систем. – СПб. : БХВ-Петербург, 2002. – 400 с. : ил.
8. Блинов Д. С. Решение газодинамических задач в областях сложной формы с использованием конечно-объемных алгоритмов метода крупных частиц // Вестник ИжГТУ. – 2009. – № 1 (41). – С. 151–154.
9. Ливеровский Р. И., Шевырев С. П. Численное моделирование плоских задач сверхзвуковой газовой динамики на треугольной сетке // Вестник РУДН. Сер. Математика. Информатика. Физика. – 2014. – № 4. – С. 23–32.
10. Разностные схемы (введение в теорию) : учеб. пособие / С. К. Годунов, В. С. Рябенский. – М. : Наука, 1977.
11. Дворянинов В. Н. Боевые патроны стрелкового оружия. – URL: <http://www.patronschik.ru/book4.html>.
12. Geuzaine C. and Remacle J.-F. Gmsh: a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities. International Journal for Numerical Methods in Engineering 79 (11), pp. 1309–1331, 2009.
13. ГОСТ Атмосфера стандартная. Параметры – взамен ГОСТ 4401–73. Введен 27.02.81. Группа Т 27. – 180 с.
14. Таблицы стрельбы по наземным целям из стрелкового оружия калибров 5,45 и 7,62 мм. – М. : Военное издательство министерства обороны СССР, 1977. – 263 с.
15. Вержбицкий В. М. Основы численных методов: Учебник для вузов/В.М. Вержбицкий. – М. : Высш. шк., 2002. – 840 с. : ил.
16. Hans Benker. Ingenieurmathematik mit Computeralgebra-Systemen: AXIOM, DERIVE, MACSYMA, MAPLE, MATHCAD, MATHEMATICA, MATHLAB und MuPAD in der Anwendung. (German) [Engineering mathematics with computer algebra systems: AXIOM, DERIVE, MACSYMA, MAPLE, MATHCAD, MATHEMATICA, MATHLAB and MuPAD in their use]. Friedrich Vieweg und Sohn, Braunschweig, Germany, 1998.
17. Там же.
18. Селетков С. Г., Иванова С. С. Актуальность и значение результатов диссертационной работы // Вестник ИжГТУ. – 2015. – № 2. – С. 119–121.
19. Селетков С. Г. Новый результат в диссертационной работе и его получение // Вестник ИжГТУ. – 2015. – № 1. – С. 140–143.

К. А. Иванов, Post-graduate, Kalashnikov ISTU

А. А. Горева, Master's Degree Student, Kalashnikov ISTU

Discrete Element Method in Projectile Motion Modelling on Supersonic Velocities

This article presents the external ballistics solution method, which is based on the coupled solution of the flowing projectile with CFD methods and solution of the rigid body dynamics. To verify the presented method the 7N6 projectile was modelled on supersonic velocities. Result of the modelling are in good agreement with the experimental data – firing tables. Presented method can be used for solving external ballistics problem of the projectiles on supersonic velocities.

Keywords: external ballistics, discrete element method, projectile motion modelling.

Получено: 01.06.16