

УДК 530

## БАЛЛИСТИКА ОСКОЛКОВ КУБИЧЕСКОЙ ФОРМЫ\*

© 2018 г. Герасимов С.И.<sup>1,2,3,4</sup>, Ерофеев В.И.<sup>3,5</sup>,  
Каныгин И.И.<sup>1,2</sup>, Кикеев В.А.<sup>3,4</sup>, Фомкин А.П.<sup>2</sup>,  
Яненко Б.А.<sup>1</sup>, Герасимова Р.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Саровский физико-технический институт НИЯУ МИФИ, Саров,  
Российская Федерация

<sup>2</sup>Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,  
Саров, Российская Федерация

<sup>3</sup>Институт проблем машиностроения РАН – филиал Федерального исследовательского центра «Институт прикладной физики Российской академии наук», Нижний Новгород, Российская Федерация

<sup>4</sup>Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Российская Федерация

<sup>5</sup>Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация

s.i.gerasimov@mail.ru, erof.vi@yandex.ru, vkikeev@mail.ru

Поступила в редакцию 09.11.2017

Представлены результаты расчетного исследования сверхзвукового обтекания потоком воздуха фрагментов кубической формы. Фрагменты были различным образом ориентированы относительно направления набегающего потока. Рассматривались кубики с длиной ребра 8 мм. Скорость набегающего потока воздуха изменялась в пределах значений числа Маха от 2 до 10. Расчет процесса обтекания проводился с использованием инженерной программы SolidWorks путем численного решения полных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса. Для учета турбулентности использовалась  $k-\epsilon$ -модель. Для воздуха применялось уравнение состояния совершенного газа. Начальные значения плотности, температуры и давления соответствовали нормальным условиям. Расчет разбивался на несколько этапов, в конце каждого из которых проводился анализ полученного решения и основанное на этом анализе измельчение счетной сетки в зонах высокоградиентного распределения параметров потока. Полное число счетных ячеек в конкретном расчете, как правило, не превышало  $2,5 \cdot 10^6$ . Точность полученных результатов оценивалась по характеру сходимости решения на каждом из рассматриваемых этапов расчета. Для уменьшения расчетных областей использовались условия симметрии. В процессе расчета определялись такие аэродинамические характеристики моделей, как коэффициенты сопротивления, строились картины полей обтекания. Значение коэффициента сопротивления в зависимости от скорости играет важную роль в баллистике осколков. Для сравнения представ-

\* Выполнено при поддержке РНФ (проект № 14-19-01637).

лены результаты экспериментального исследования сверхзвукового обтекания потоком воздуха осколков кубической формы, различным образом ориентированных относительно направления набегающего потока, представлены результаты визуализации процесса сверхзвукового обтекания фрагментов кубической формы с использованием метода теневого фотографирования. Показан характер уноса за счет аэротермомеханического разрушения осколка при гиперзвуковых скоростях с помощью импульсной рентгенографии. Эксперименты проводились в аэробаллистическом тире с использованием ствольных метательных установок. Помимо постов теневого фотографирования применялись посты импульсного рентгенографирования. На представленной рентгенограмме показан характерный унос материала при сверхзвуковом обтекании испытываемого образца из стали.

*Ключевые слова:* сверхзвуковое обтекание, фрагмент кубической формы, метод численного решения, теневая фотография.

При испытаниях тел малых размеров, например осколков, возникает ряд особенностей по сравнению со штатными испытаниями моделей. Недостоверность априорного знания характера движения таких элементов, их выход из зоны регистрации, обусловленный действием аэродинамических сил на гранях, ориентированных под углом к направлению полета, снижают количество регистрируемых положений и вынуждают ограничиваться определением только линейных координат. Для получения рабочей информации при таких исследованиях целесообразно иметь тестовые расчетно-экспериментальные данные по аэродинамическим характеристикам движения эталонных тел из того же материала и тех же размеров.

Подрыв осколочного боеприпаса осуществляется, как правило, на некотором расстоянии от поражаемых объектов [1]. Дистанция, на которой осколки сохраняют способность поражать цели, может достигать ста и более метров. Полет осколков проходит в воздушной среде, создающей сопротивление движению, что приводит к падению их скорости на траектории. Для оценки эффективности действия осколочного боеприпаса важным является определение закона снижения скорости в полете  $v(x)$ .

Задача о движении осколка в воздушной среде решается при следующих допущениях: плотность воздуха вдоль траектории постоянна, влияние силы тяжести пренебрежимо мало. С учетом этих допущений уравнение движения осколка запишется в виде

$$m \frac{dv}{dt} = - \frac{\rho_a S_p c_x v^2}{2},$$

где  $m$  – масса осколка;  $v$  – текущая скорость осколка;  $\rho_a$  – плотность воздуха;  $S_p$  – текущая площадь мишени осколка;  $c_x$  – коэффициент лобового сопротивления.

Если для осколков сферической формы имеется большой ряд экспериментальных данных, то для других практически важных форм требуется проведение отдельного исследования.

Для наземной аэродинамической отработки широко применяется метод исследований в аэробаллистическом тире [2]: объект испытания выстреливается из пороховой или легкогазовой установки в свободный полет с заданными начальными условиями по скорости и углу атаки.

В настоящей статье, являющейся продолжением цикла статей [3–10], представлены результаты расчетных и экспериментальных исследований сверхзвукового

обтекания потоком воздуха фрагментов кубической формы, различным образом ориентированных относительно направления набегающего потока, представлены результаты визуализации процесса сверхзвукового обтекания тел кубической формы двумя методами: теоретическим – на основе математической модели путем численного решения полных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса с использованием инженерной программы SolidWorks [11] (серийный номер SolidWorks 2006 для учебных заведений – 9710 0044 1213 5426) и экспериментальным – с использованием метода теневой фоторегистрации [12–14].

Моделируемым объектом являлся кубик с характерным размером ребра 8 мм. Для определения влияния размеров расчетного домена на характер обтекания куба и коэффициент лобового сопротивления рассматривались несколько доменов различных размеров при одинаковой начальной скорости обтекания с числом Маха  $M = 7$ . Исходя из условий симметрии, была взята лишь четвертая часть полного, окружающего весь куб домена. Расчетный домен, используемый в дальнейших исследованиях влияния начальной скорости потока на коэффициент лобового сопротивления и на характер обтекания куба, имеет размеры 90×50×50 мм.

В качестве метода моделирования выбран метод численного решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса, дополненных  $k$ – $\epsilon$ -моделью турбулентности.

Этот метод реализован в инженерном пакете программ SolidWorks. Пакет представляет собой комбинацию полной версии системы как графической среды и гидрогазодинамического решателя, препроцессор которого позволяет реализовывать автоматизированный или ручной метод блочного построения расчетной сетки и ее последующей адаптации в зонах больших градиентов параметров потока. Указанный пакет позволяет рассчитывать широкий круг различных течений: двумерные и трехмерные, ламинарные, турбулентные и переходные, несжимаемые, сжимаемые, с до-, транс- и сверхзвуковыми областями, стационарные и нестационарные течения многокомпонентных текучих сред в каналах и/или вокруг тел, с учетом гравитации, пограничного слоя, в том числе с учетом шероховатости стенок, с конвективным теплообменом между текучей средой и твердым телом, которое, в свою очередь, может состоять из нескольких материалов; с одновременным расчетом теплопередачи в твердых телах, то есть с решением задачи сопряженного теплообмена, в том числе с учетом радиационного теплообмена между поверхностями; течения газовых смесей с равновесной конденсацией содержащегося в них водяного пара; течения воды с равновесной кавитацией или равновесным кипением; течения через пористые среды как через рассредоточенные сопротивления; ламинарные течения неньютоновских жидкостей; течения сжимаемых жидкостей; двухфазные течения как движение жидких или твердых частиц в потоке текучей среды. В рассматриваемой задаче движение текучей среды моделируется с помощью осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса, дополненных  $k$ – $\epsilon$ -моделью турбулентности, используются уравнения состояния компонентов текучей среды, а также эмпирические зависимости вязкости и теплопроводности среды от температуры.

В качестве граничных задаются условия непротекания и прилипания на стенке. Если не рассчитывается теплопередача внутри стенки, то на стенке, контактирующей с текучей средой, задается температура поверхности или тепловой поток между стенкой и текучей средой. Если теплопередача внутри стенки рассчитывается, то задаются тепловые условия на внешней поверхности тела на границе расчетной

области. Задаются также параметры текучей среды на входных и выходных отверстиях модели (в том числе с возможным моделированием приточных или вытяжных вентиляторов) во внутренних и внешних задачах или на границах расчетной области во внешних задачах. Могут быть заданы также вращательные и/или поступательные движения поверхности стенки, не меняющие геометрию стенки, или вращение тела в выделенной осесимметричной подобласти расчетной области. Возможно задание объемных источников тепла в текучей среде и/или в теле (если рассчитывается теплопередача в твердых телах), поверхностных источников тепла на поверхности твердого тела.

Трехмерный расчет процесса внешнего обтекания куба сверхзвуковым потоком сжимаемого газа проводился с учетом соответствующих граничных условий на поверхности куба и на стенках расчетного домена. Решались полные, осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье – Стокса, дополненные двухпараметрической моделью турбулентности. Диапазон рассмотренных начальных скоростей обтекания составлял 2–10 М. Для воздуха использовалось уравнение состояния совершенного газа.

В результате численного решения определены аэродинамические силы, действующие на обтекаемую поверхность объекта, рассчитаны параметры обтекающего газа в расчетном объеме. На рис. 1–4 представлены визуальные картины распределения давлений, плотностей, температур, скоростей вокруг обтекаемого кубика ( $M = 9$ ).

На рис. 5 приведены результаты численного моделирования в виде зависимости коэффициента лобового сопротивления  $c_x$  от числа Маха при ориентациях обтекаемого кубика гранью, ребром и вершиной к набегающему потоку.

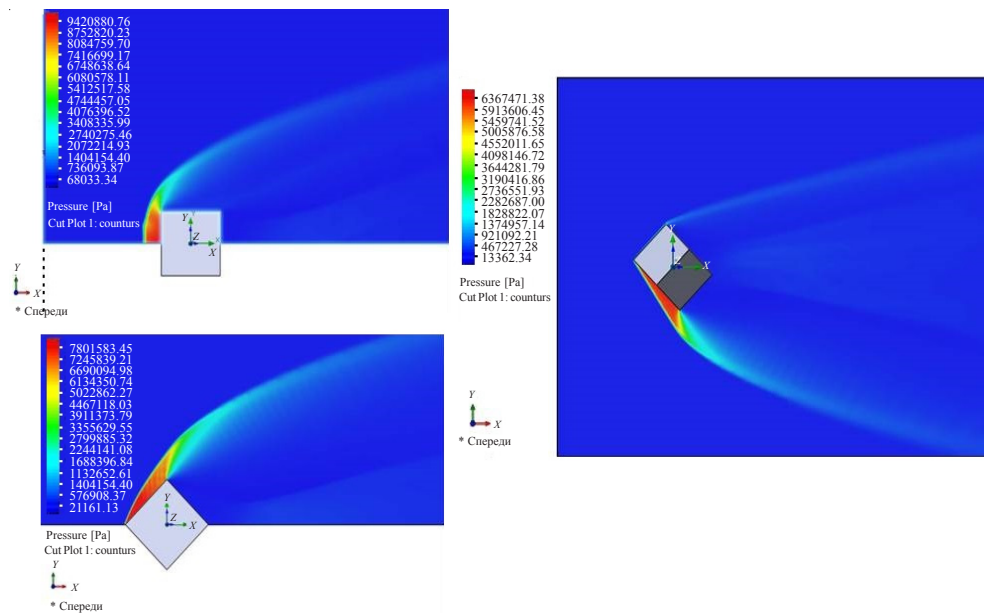


Рис. 1. Поле распределения давления

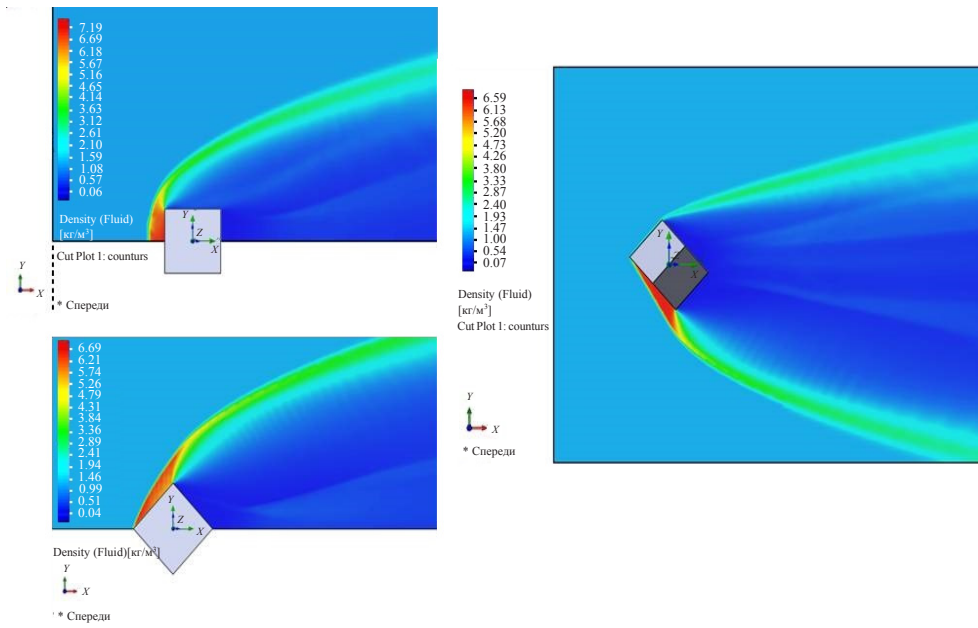


Рис. 2. Поле распределения плотности

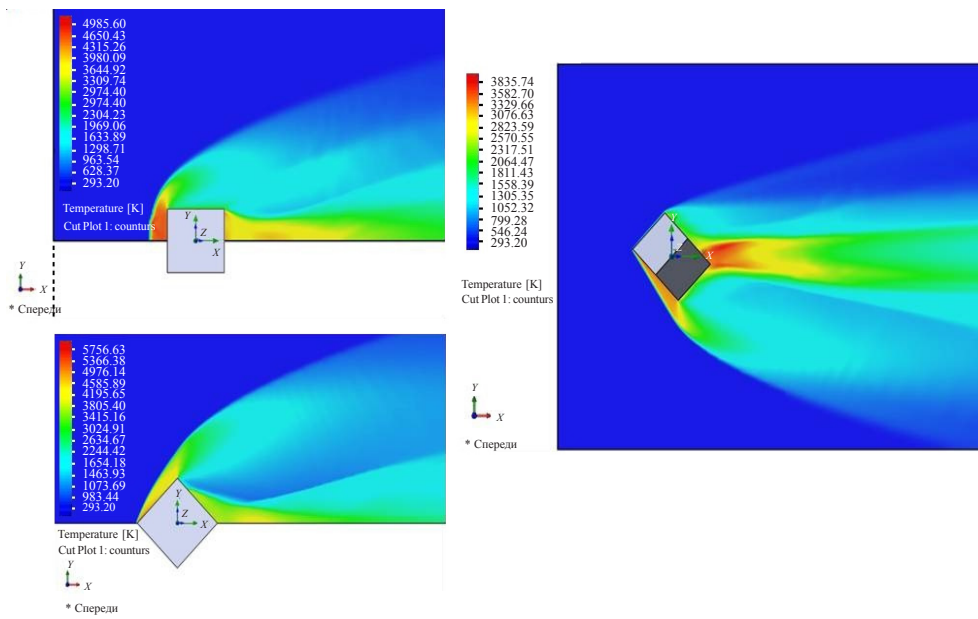


Рис. 3. Поле распределения температуры

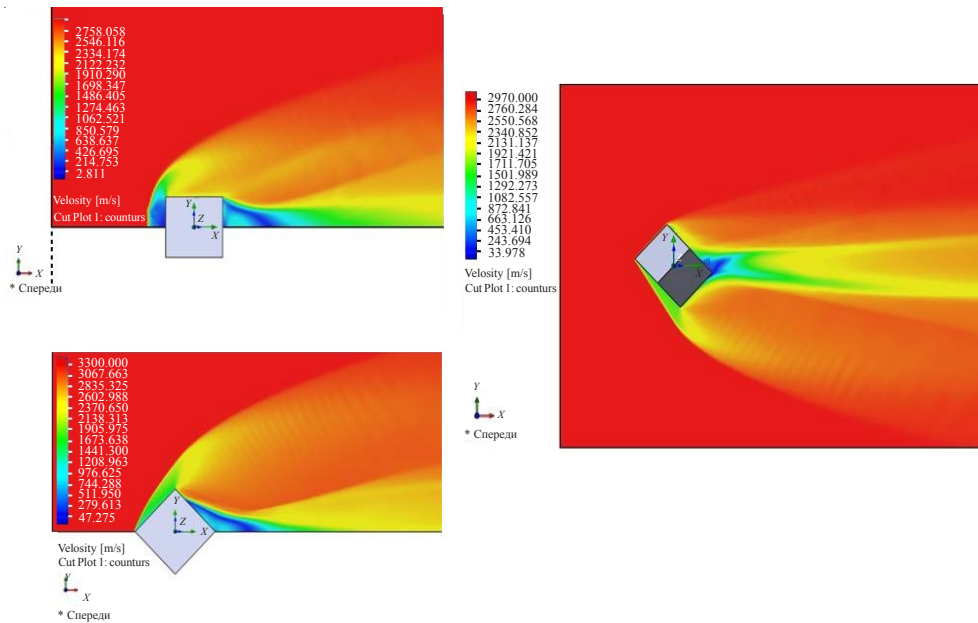


Рис. 4. Поле распределения скорости

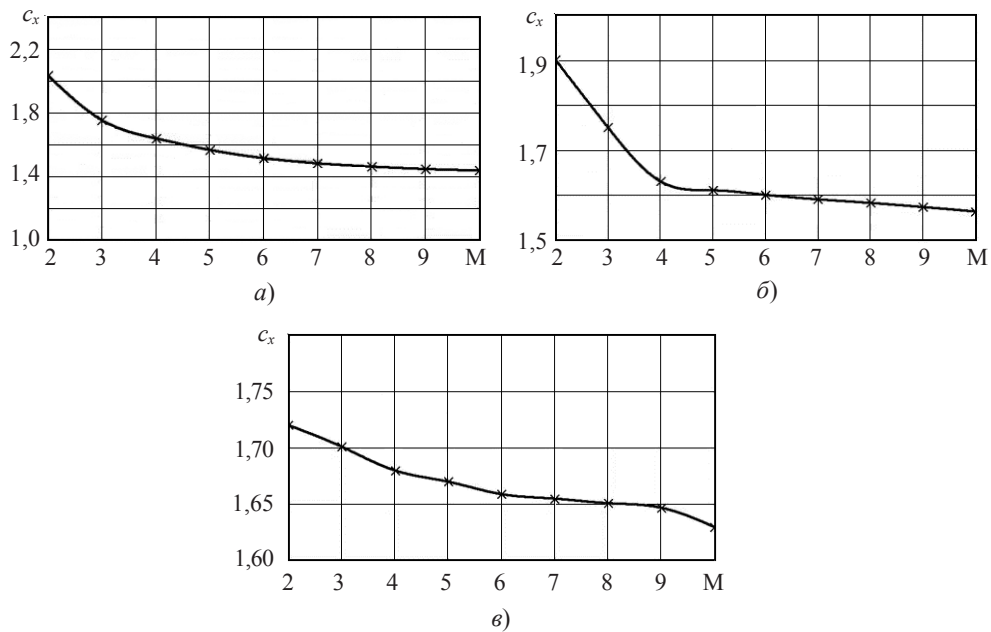


Рис. 5. Зависимость коэффициента лобового сопротивления от числа Маха при различных ориентациях кубика к набегающему потоку: *a* – гранью, *б* – ребром, *в* – вершиной

Для визуализации волновой картины обтекания [15] применялись теневые методы регистрации с использованием мощных точечных источников света [16–22]. С помощью этих методов визуализируются оптические неоднородности (скачки уплотнения), составляющие так называемый спектр обтекания исследуемого тела движущимся сверхзвуковым потоком воздуха. Исследовались тела из сплава ВЖ

(вольфрам–никель–железо) размером  $8 \times 8 \times 8$  мм ( $m = 8,7$  г) при начальной ориентации к набегающему потоку гранью, ребром и вершиной. Регистрация внешнетраекторных линейных координат и полетного времени на траектории полета осуществлялась не менее чем в 12 точках на длине измерительного участка более 50 м в аэробаллистическом тире.

Испытания тел кубической формы при начальных скоростях метания  $V < 2$  км/с проводились путем отстрела объекта испытаний из пороховой баллистической установки калибром 23 мм. В этих экспериментах, кроме внешнетраекторных параметров, получены широкоформатные теневые спектры обтекания (рис. 6).

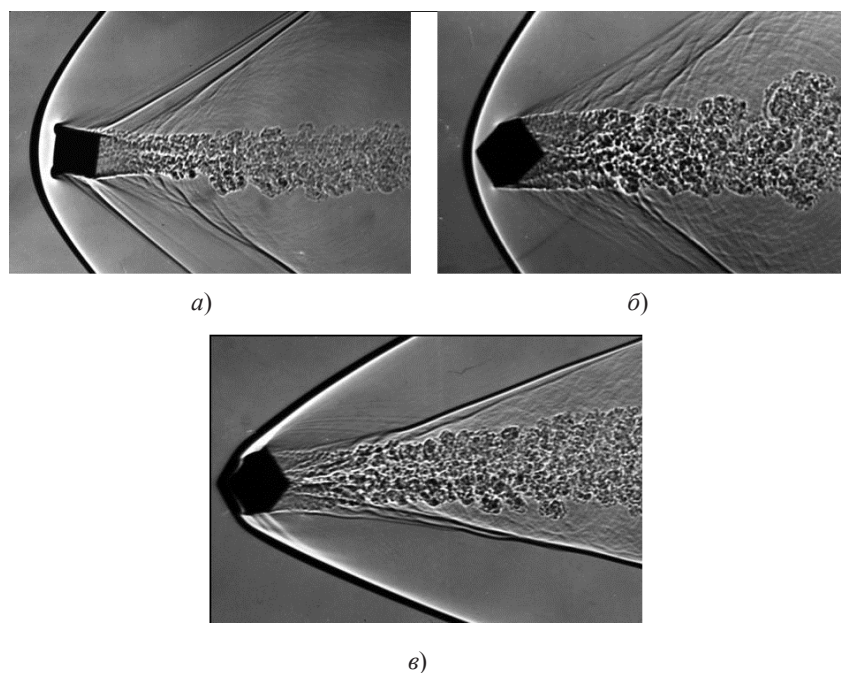


Рис. 6. Визуализация спектров обтекания куба, первоначально ориентированного в канале ствола: *a* – гранью; *б* – ребром горизонтально; *в* – вершиной

Полученные в каждом конкретном опыте данные внешнетраекторных измерений положения центра масс использовались при определении коэффициента лобового сопротивления путем решения системы дифференциальных уравнений движения, которая в наибольшей мере (по минимуму взвешенной суммы квадратов невязок расчетных и измеренных значений координат) согласуется с данными измерений.

В качестве тестовых объектов при тех же режимах испытаний исследовались объекты в форме шара из того же материала диаметром 10,4 мм.

На рис. 7 приведена среднеопытная экспериментальная зависимость коэффициента лобового сопротивления  $c_x$  от числа Маха для тела кубической формы в диапазоне  $M_{cp} = (0,8-3,8)$  М с погрешностью  $2\sigma \leq 2\%$ . Коэффициент лобового сопротивления  $c_x$  относится к площади миделя равновеликой по объему сферы. Приняты следующие обозначения: ● – для шара диаметром 10,4 мм; ■, ▲, ◆ – для куба  $8 \times 8 \times 8$  мм, ориентированного гранью, ребром и вершиной соответственно.

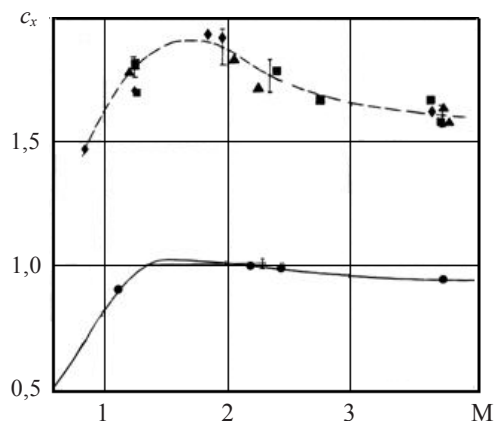


Рис. 7. Экспериментальные зависимости коэффициента силы лобового сопротивления куба от числа Маха

При метании с начальными гиперзвуковыми скоростями различных элементов, моделирующих осколки, следует отметить, что шарики и кубики, не имеющие преимущественной аэродинамической ориентации, в полете оказываются статически устойчивыми и сохраняют ориентацию с момента начала уноса (рис. 8).

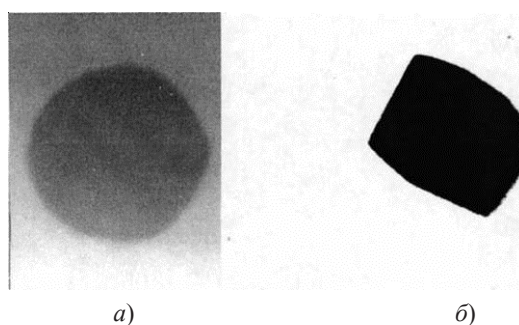


Рис. 8. Рентгеновские снимки стального шарика и кубика из ВНИИ в полете:  
 а)  $X = 156$  м,  $V = 1,4$  км/с; б)  $X = 26$  м,  $V = 4,4$  км/с

Проведено расчетно-экспериментальное исследование сверхзвукового движения фрагментов кубической формы, различным образом начально ориентированных относительно направления набегающего потока. Получены экспериментальные теневые спектры обтекания и расчетные картины распределения давлений, плотностей, температур, скоростей вокруг обтекаемого кубика. В результате экспериментальной отработки получены среднеопытные зависимости коэффициентов лобового сопротивления  $c_x$  в диапазоне чисел Маха от 0,8 до 3,8 при отсутствии обгара и термомеханического разрушения. Экспериментальная зависимость для кубиков получена с погрешностью  $2\sigma \leq 2\%$  и не зависит от первоначальной ориентации объекта испытания в канале ствола баллистической установки. В этой связи численные результаты, хорошо согласующиеся с экспериментальными, имеют дополнительную ценность и позволяют сделать вывод о разумном переносе части решаемых задач с дорогостоящих опытов на математическое моделирование. Отметим также, что реальные осколки, имеющие всегда одну первоначальную ориентацию (гранью вперед), в процессе полета из-за вращения будут ее менять и их



коэффициент лобового сопротивления должен быть ниже, чем у кубика. При наличии уноса в случае метания с гиперзвуковыми скоростями фрагменты начальной кубической формы становятся статически устойчивыми в дальнейшем полете.

#### Список литературы

1. *Боеприпасы: учебник*. В 2 т. Под общей ред. В.В. Селиванова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. Т. 1. 508 с.; Т. 2. 552 с.
2. Герасимов С.И., Файков Ю.И., Холин С.А. *Кумулятивные источники света*. Саров: Изд-во РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2011. 328 с.
3. Герасимов С.И., Ерофеев В.И., Кикеев В.А., Фомкин А.П. Об особенностях расчетно-экспериментальных исследований аэродинамических процессов при гиперзвуковых скоростях обтекания. *Вычислительная механика сплошных сред*. 2013. Т. 6. №1. С. 34–40.
4. Герасимов С.И., Ерофеев В.И., Кикеев В.А. О расчетных исследованиях, сопровождающих аэробаллистические испытания. *Математические методы в технике и технологиях*. 2013. № 9-1(59). С. 192–193.
5. Герасимов С.И., Ерофеев В.И., Кикеев В.А., Фомкин А.П. Различные механизмы разрушения тел в гиперзвуковом потоке, выявленные с помощью оптической и рентгенографической регистрации. *Научная визуализация*. 2015. Т. 7. №1. С. 38–44.
6. Герасимов С.И., Кикеев В.А., Фомкин А.П. Повышение информативности аэробаллистического эксперимента как мера повышения точности определения коэффициента сопротивления. *Журнал технической физики*. 2016. Т. 86. №11. С. 125–132.
7. Кикеев В.А., Герасимов С.И., Тотышев К.В., Львова Е.А., Герасимова Р.В. Спектры обтекания тел, движущихся со сверхзвуковой скоростью, в аэродинамических исследованиях. *Вестник Национального исследовательского ядерного университета МИФИ*. 2016. Т. 5. №4. С. 289–293.
8. Герасимов С.И., Кикеев В.А., Тотышев К.В., Фомкин А.П., Яненко Б.А. Визуализация сверхзвукового движения сферы в воздухе и в воде. *Научная визуализация*. 2017. Т. 9. №1. С. 1–25.
9. Герасимов С.И., Ерофеев В.И., Кикеев В.А., Фомкин А.П., Яненко Б.А., Герасимова Р.В. Два механизма аэротермомеханического разрушения при гиперзвуковых скоростях обтекания в воздухе. *Проблемы прочности и пластичности*. 2018. Т. 80. №2. С. 219–226.
10. Герасимов С.И., Ерофеев В.И., Кикеев В.А., Кузьмин В.А., Яненко Б.А. Расчетное исследование динамики каверны при ударе шара о воду с дозвуковыми и трансзвуковыми скоростями. *Вестник научно-технического развития*. 2018. №7 (131). С. 20–26.
11. [http://www.solidworks.ru/index.php?option=com\\_content&id=151&Itemid=66](http://www.solidworks.ru/index.php?option=com_content&id=151&Itemid=66)
12. Герасимов С.И., Файков Ю.И. *Теневое фотографирование в расходящемся пучке света*. Саров: Изд-во РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2010. 344 с.
13. Герасимов С.И., Трепалов Н.А. Теневой фоновый метод – оптический метод исследования ударных волн. *Журнал технической физики*. 2017. Т. 87. №12. С. 1802–1807.
14. Герасимов С.И., Ерофеев В.И., Трепалов Н.А., Яненко Б.А., Герасимова Р.В. Использование теневого фонового метода для регистрации ударной волны от взрыва заряда взрывчатого вещества цилиндрической формы. *Проблемы прочности и пластичности*. 2018. Т. 80. №1. С. 109–117.
15. Герасимов С.И., Ерофеев В.И., Солдатов И.Н. *Волновые процессы в сплошных средах*. Саров: Изд-во РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2012. 254 с.
16. Герасимов С.И., Мешков Е.Е. Способ получения импульса света и импульсный источник света. *Патент РФ на изобретение* RUS 2152665 03.02.1998.
17. Герасимов С.И., Вашурков А.С., Лень А.В. Газоразрядный импульсный источник света. *Патент РФ на изобретение* RUS 2195746 27.08.2001.
18. Сперанский А.В., Герасимов С.И., Ерофеев В.И. Взрывной источник света, основанный на применении эффектов гидродинамических неустойчивостей, для оборудования баллистических трасс. *Нелинейный мир*. 2013. Т. 11. №12. С. 829–835.
19. Герасимов С.И., Ерофеев В.И., Сперанский А.В., Тотышев К.В. Применение точечного газоразрядного источника света в комбинированных схемах фоторегистрации.

*Вопросы атомной науки и техники. Серия: Теоретическая и прикладная физика.* 2013. №2. С. 40–45.

20. Сперанский А.В., Герасимов С.И., Писецкий В.В. Применение точечного газоразрядного источника света в комбинированных схемах фоторегистрации в практике аэробаллистического эксперимента. *Вестник Национального исследовательского ядерного университета МИФИ.* 2014. Т. 3. №3. С. 340–345.

21. Ганичев А.Н., Герасимов С.И., Ерофеев В.И., Каныгин И.И., Кудрявцева Т.В., Львова Е.А., Турусов М.Р. Оптико-электронная регистрация в газодинамическом эксперименте. *Вестник научно-технического развития.* 2015. №11 (99). С. 29–37.

22. Герасимов С.И., Герасимова Р.В., Ерофеев В.И., Кузьмин В.А., Одзерихо И.А., Сидницкий И.О., Тотышев К.В., Яненко Б.А. Расчет электровзрывного источника света. *Вестник научно-технического развития.* 2018. №2 (126). С. 14–17.

### References

1. *Boepripasy: uchebnik.* V 2 t. [Ammunition: textbook. In 2 vols.] Ed. V.V. Selivanova. Moscow. MGTU n.a. N.E. Bauman Publ. 2016. Vol. 1. 508 p.; Vol. 2. 552 p. (In Russian).

2. Gerasimov S.I., Faikov Yu.I., Kholin S.A. *Kumulyativnye istochniki sveta [Cumulative Light Sources].* Sarov. RFNC–VNIIEF Publ. 2011. 328 p. (In Russian).

3. Gerasimov S.I., Erofeev V.I., Kikeev V.A., Fomkin A.P. Ob osobennostyakh raschetno-eksperimentalnykh issledovaniy aerodinamicheskikh protsessov pri giperzvukovykh skorostyakh obtekaniya [On specific features of numerical and experimental investigation of aerodynamic processes at hypersonic flow velocity]. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred [Computational Continuum Mechanics].* 2013. Vol. 6. No 1. P. 34–40 (In Russian).

4. Gerasimov S.I., Erofeev V.I., Kikeev V.A. O raschetnykh issledovaniyakh, soprovozhdayushchikh aeroballisticheskie ispytaniya [About current studies accompanying aerobalistic testing]. *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh [Mathematical Methods in Engineering and Technology].* 2013. No 9-1(59). P. 192–193 (In Russian).

5. Gerasimov S.I., Erofeev V.I., Kikeev V.A., Fomkin A.P. Razlichnye mekhanizmy razrusheniya tel v giperzvukovom potoke, vyyavlennye s pomoshchyu opticheskoy i rentgenograficheskoy registratsii [Various mechanisms of aerothermomechanical destruction of objects in hypersonic flow recorded with optical and X-ray techniques]. *Nauchnaya vizualizatsiya [Scientific Visualization].* 2015. Vol. 7. No 1. P. 38–44 (In Russian).

6. Gerasimov S.I., Kikeev V.A., Fomkin A.P. Increasing the informative character of aerobalistic experiment for increasing accuracy of determination of the drag coefficient. *Technical Physics.* 2016. Vol. 61. No 11. P. 1729–1736.

7. Kikeev V.A., Gerasimov S.I., Totyshev K.V., Lvova E.A., Gerasimova R.V. Spektry obtekaniya tel, dvizhushchikhsya so sverkhzvukovoy skorostyu, v aerodinamicheskikh issledovaniyakh [Flow spectra of bodies moving at supersonic speed in aerodynamic studies]. *Vestnik Natsionalnogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta MIFI [Bulletin of the National Research Nuclear University MEPHI].* 2016. Vol. 5. No 4. P. 289–293 (In Russian).

8. Gerasimov S.I., Kikeev V.A., Totyshev K.V., Fomkin A.P., Yanenko B.A. Vizualizatsiya sverkhzvukovogo dvizheniya sfery v vozdukh i v vode [Visualization of supersonic motion of a sphere in air and in water]. *Nauchnaya vizualizatsiya [Scientific Visualization].* 2017. Vol. 9. No 1. P. 1–25 (In Russian).

9. Gerasimov S.I., Erofeev V.I., Kikeev V.A., Fomkin A.P., Yanenko B.A., Gerasimova R.V. Dva mekhanizma aerothermomekhanicheskogo razrusheniya pri giperzvukovykh skorostyakh obtekaniya v vozdukh [Two mechanisms of aerothermomechanical destruction at hypersonic velocities in air]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity].* 2018. Vol. 80. No 2. P. 219–226 (In Russian).

10. Gerasimov S.I., Erofeev V.I., Kikeev V.A., Kuzmin V.A., Yanenko B.A. Raschetnoe issledovanie dinamiki kaverny pri udare shara o vodu s dozvukovymi i transzvukovymi skorostyami [Cavity dynamics in high-speed water entry for sphere with transend velocities] *Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya [Bulletin of Science and Technical Development].* 2018. No 7 (131). P. 20–26 (In Russian).

11. [http://www.solidworks.ru/index.php?option=com\\_content&id=151&Itemid=66](http://www.solidworks.ru/index.php?option=com_content&id=151&Itemid=66)
12. Gerasimov S.I., Faikov Yu.I. *Tenevoe fotografirovanie v raskhodyashchemsya puchke sveta* [Shadow Photography in a Divergent Beam of Light]. Sarov. RFNC–VNIIEF Publ. 2010. 344 p. (In Russian).
13. Gerasimov S.I., Trepalov N.A. Background oriented schlieren method as an optical method to study shock waves. *Technical Physics*. 2017. Vol. 62. No 12. P. 1799–1804.
14. Gerasimov S.I., Erofeev V.I., Trepalov N.A., Yanenko B.A., Gerasimova R.V. Ispolzovanie tenevogo fonovogo metoda dlya registratsii udarnoy volny ot vzryva zaryada vzryvchatogo veshchestva tsilindricheskoy formy [Using the shadow background method for registering a shock wave from exploding a cylindrical explosive charge]. *Problemy prochnosti i plastichnosti* [Problems of Strength and Plasticity]. 2018. Vol. 80. No 1. P. 109–117 (In Russian).
15. Gerasimov S.I., Erofeev V.I., Soldatov I.N. *Volnovye protsessy v sploshnykh sredakh* [Wave Processes in Continuous Media]. Sarov. RFNC–VNIIEF Publ. 2012. 254 p. (In Russian).
16. Gerasimov S.I., Meshkov E.E. Sposob polucheniya impulsa sveta i impulsnyy istochnik sveta [Method for obtaining a light pulse and a pulsed light source]. *Patent RF na izobretenie* [RF Patent for the Invention] RUS 2152665 03.02.1998 (In Russian).
17. Gerasimov S.I., Vashurkov A.S., Len' A.V. Gazorazryadnyy impulsnyy istochnik sveta [A pulsed gas discharge light source]. *Patent RF na izobretenie* [RF Patent for the Invention] RUS 2195746 27.08.2001 (In Russian).
18. Speransky A.V., Gerasimov S.I., Erofeev V.I. Vzryvnoy istochnik sveta, osnovanny na primeneni efektoy gidrodinamicheskikh neustoychivostey, dlya oborudovaniya ballisticheskikh trass [Explosive light source based on effects of hydrodynamic instabilities for equipping the ballistic ranges]. *Nelineyniy mir* [Nonlinear World]. 2013. Vol. 11. No 12. P. 829–835 (In Russian).
19. Gerasimov S.I., Erofeev V.I., Speransky A.V., Totyshev K.V. Primenenie tochechnogo gazorazryadnogo istochnika sveta v kombinirovannykh skhemakh fotoregistratsii [Application of a point gas-discharge light source in combined photoregistration schemes]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Teoreticheskaya i prikladnaya fizika* [Issues of Nuclear Science and Technology. Series: Theoretical and Applied Physics]. 2013. No 2. P. 40–45 (In Russian).
20. Speransky A.V., Gerasimov S.I., Pisetskii V.V. Primenenie tochechnogo gazorazryadnogo istochnika sveta v kombinirovannykh skhemakh fotoregistratsii v praktike aeroballisticheskogo eksperimenta [Application of a point gas-discharge light source in combined photoregistration schemes in the practice of aeroballistic experiment]. *Vestnik Natsionalnogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta MIFI* [Bulletin of the National Research Nuclear University MEPHI]. 2014. Vol. 3. No 3. P. 340–345 (In Russian).
21. Ganichev A.N., Gerasimov S.I., Erofeev V.I., Kanygin I.I., Kudryavtseva T.V., Lvova E.A., Turusov M.R. Optiko-elektronnaya registratsiya v gazodinamicheskom eksperimente [Optical photoelectrons registration gasdynamic experiments]. *Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya* [Bulletin of Science and Technical Development]. 2015. No 11 (99). P. 29–37 (In Russian).
22. Gerasimov S.I., Gerasimova R.V., Erofeev V.I., Kuzmin V.A., Odzerikho I.A., Sinitsky I.O., Totyshev K.V., Yanenko B.A. Raschet elektrovzryvnogo istochnika sveta [Modeling the electric-explosive light source]. *Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya* [Bulletin of Science and Technical Development]. 2018. No 2 (126). P. 14–17 (In Russian).

## BALLISTICS OF CUBE SPLINTERS

**Gerasimov S.I.<sup>1,2,3,4</sup>, Erofeev V.I.<sup>3,5</sup>, Kanygin I.I.<sup>1,2</sup>, Kikeev V.A.<sup>3,4</sup>,  
Fomkin A.P.<sup>2</sup>, Yanenko B.A.<sup>1</sup>, Gerasimova R.V.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Sarov Physics and Technical Institute of National Research Nuclear University MEPhI,  
Sarov, Russian Federation*

<sup>2</sup>*Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics,  
Sarov, Russian Federation*

<sup>3</sup>*Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences –  
Branch of Federal Research Center “Institute of Applied Physics of the RAS”,  
Nizhny Novgorod, Russian Federation*

<sup>4</sup>*Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,  
Nizhny Novgorod, Russian Federation*

<sup>5</sup>*National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod,  
Nizhny Novgorod, Russian Federation*

Calculating results on the nature of aerodynamic interaction of cube objects are presented for a velocity range from 2 up to 10 Mach numbers. The objects were arbitrary oriented relatively to moving flow. The examined objects have a character size 8 mm. The method of numerical solution of the complete Navier-Stokes equations averaged according to Reynolds and supplemented by a simple turbulence model has been selected for simulations. The complete picture of the flow past a single cube was built taking into account its orientation relative to the flow direction. Three-dimensional calculation of the process of exterior flow around considered objects by a supersonic gas flow was conducted taking into account appropriate boundary conditions on the surfaces of objects and on the walls of a calculation domain. The equation of state of the perfect gas was used for air. The aerodynamic forces and moments acting on streamlined surfaces of objects and also all parameters of the gas flowing in a calculation volume - pressure, density, temperature and velocity fields were determined as a result of solution. The complete calculation was divided into several stages, in the end of which the automatic analysis of an obtained solution was made and the coarse mesh refinement based on this analysis was conducted in high-gradient areas of flow parameters. The complete number of counting cells  $n$  in a concrete calculation, as a rule, did not exceed  $2.5 \cdot 10^6$ . The precision of obtained results was estimated by the character of solution convergence on each of considered calculation stages. The symmetry conditions were used for the decrease of a calculation domain. During calculation such aerodynamic characteristics of each object as the drag coefficient was determined. The value of drag coefficient in dependence of velocity plays important role in splinter ballistics. For comparison the results of supersonic experiments for cube splinters arbitrary oriented relatively to moving flow are presented. Visualization of the flow about the cube samples was performed using shadow technique. The character of ablation due to aerothermomechanical destruction is shown with pulsed roengraphy. Experiments have been carried out in aeroballistic range using powder ballistic launchers. In the presented X-ray image the shape of the steel cube undergoing hypersonic flow is shown.

*Keywords:* supersonic flow, cube splinter, numerical solution, shadow picture.