

УДК 539.42, 533.6.05

**С.И. Герасимов<sup>1</sup>, В.И. Ерофеев<sup>1</sup>, В.А. Кикеев<sup>1</sup>, В.А. Кузьмин<sup>1</sup>,  
А.П. Фомкин<sup>2</sup>, Б.А. Яненко<sup>1</sup>, А.Н. Жаров<sup>3</sup>, И.А. Новиков<sup>3</sup>****ИЗМЕНЕНИЕ ФОРМЫ ТЕЛА ПРИ ДВИЖЕНИИ С ГИПЕРЗВУКОВОЙ  
СКОРОСТЬЮ В ГАЗЕ ПРИ НАЛИЧИИ РАЗРУШЕНИЯ ТЕЛА**<sup>1</sup>*Институт проблем машиностроения РАН*<sup>2</sup>*Саровский физико-технический институт*<sup>3</sup>*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева*

Представлены результаты экспериментальных исследований разрушения тел при гиперзвуковой скорости движения в воздухе в условиях аэробаллистических испытаний. Приведены схемы проведения экспериментов и состав использованной регистрирующей аппаратуры. В качестве объектов испытаний использовались металлические шары, выполненные из различных конструкционных материалов. Исследовались характер уноса массы материала и изменение обводов тела при разрушении в потоке газа. Для данных изделий показан характер обтекания, проведено численное моделирование, получены зависимости коэффициента аэродинамического сопротивления от числа Маха.

**Ключевые слова:** разрушение, гиперзвуковая аэродинамика, аэробаллистические испытания, численное моделирование.

**Введение**

Повышение эксплуатационных скоростей движения объектов в воздушной среде – актуальная задача для ряда отраслей промышленности, например, ракетно-космической. Однако, при высокоскоростном движении тела в воздухе, при достижении определенного диапазона скоростей, особенно в гиперзвуковой области, полет сопровождается сложными физико-химическими процессами во внешней среде и в деформируемом твердом теле.

Необходимо отметить методическую особенность аэродинамики больших скоростей – трудность проведения экспериментальных исследований. Для гиперзвуковых течений характерны появление волн неустойчивости в пограничном слое, ионизация молекул воздуха, наличие высокотемпературных потоков и ряд других процессов [1]. Одним из таких процессов может стать аэротермомеханическое разрушение, при котором возникает унос массы материала движущегося объекта, что может существенно изменить динамику полета тела, а также затруднить прогнозирование и защиту от попадания объекта и ударно-волнового воздействия от его движения [2]. При уносе массы материала происходит изменение геометрической формы тела и его аэродинамических характеристик.

В работе представлены результаты расчетно-экспериментальных исследований изменения формы тел при гиперзвуковом движении в воздухе и наличии разрушения тел.

**Экспериментальное исследование**

В качестве объектов испытаний выбраны тела простой формы – металлические шары, выполненные из разных конструкционных материалов – стали и сплава вольфрама, никеля и железа (ВНЖ). Данные тела отстреливались в свободный полет на гиперзвуковой аэробаллистической установке со скоростями в диапазоне от 3,9 км/с до 5,9 км/с.

Аэробаллистическая установка (рис. 1) включает в себя два основных элемента: легкогазовую метательную установку и измерительную трассу полета объектов общей длиной 160 м. На открытой местности расположены начальный участок трассы полета (длиной 36 м) и метательная установка. Основной измерительный участок трассы – аэробаллистический тир,

представляющий из себя измерительную трассу закрытого типа, расположен в объеме закрытого затемненного сооружения, где сосредоточена большая часть оптической регистрирующей аппаратуры – 15 фотопостов, равномерно расположенных по длине участка. Для экспериментального исследования явлений, сопровождающих процесс обтекания шара, движущегося с гиперзвуковой скоростью в воздухе, предлагается использовать теневой фоновый метод, а также метод съемки в отраженном свете [3-5].

Штатный фотопост включает в себя 2 аэрофотоаппарата с фокусом 100 мм и до 4 импульсных источников света, способных давать световые вспышки в момент фоторегистрации длительностью 4 мкс. Управление работой оптико-фотографической аппаратуры аэробаллистического типа осуществляется с помощью автоматизированной системы управления на базе ЭВМ в реальном масштабе времени с учетом измеренной базозадающим устройством реальной скорости движения. В зависимости от задач испытаний, фоторегистрация может проводиться для двух случаев: в отраженном свете и силуэтно-теневая регистрация. Для съемки в отраженном свете фоторегистрация осуществляется на черном фоне, в случае силуэтно-теновой регистрации – на белом.

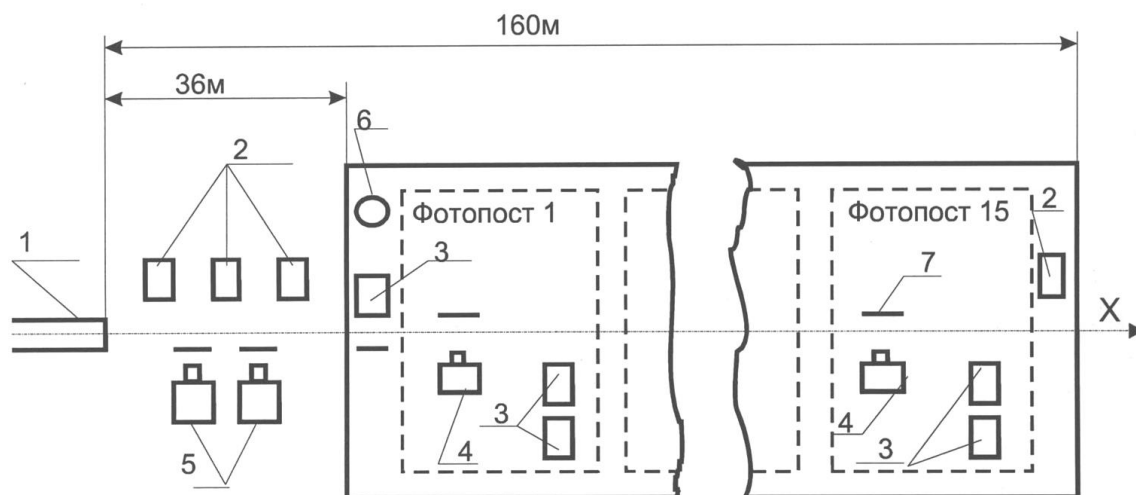
Для повышения информативности опытов и улучшения качества получаемой опытной информации на открытом участке трассы и в аэробаллистическом типе устанавливались рентгеновские аппараты мягкого излучения, синхро-баллистические и электронно-оптические фотокамеры. Электронно-оптическая камера позволяет получать фотоснимки с длительностью экспозиции до 1 мкс, что является важным для высокоскоростных режимов испытаний. Синхро-баллистическая фотокамера обеспечивает фотосъемку на движущуюся пленку, что в случае хорошей синхронизации позволяет получать снимки без искажений от смаза изображения. При этом, регулируя ширину щели затвора синхро-баллистической фотокамеры можно добиться величины экспозиции примерно 10 мкс.

При гиперзвуковых скоростях полета имеет место наличие фонового излучения ионизированного воздуха, что делает прямотеневую съемку невозможной. В данном случае теневые снимки могут быть получены в схеме комбинированного поста (рис. 2). Одновременно при срабатывании точечного источника света строится теневое изображение летящего тела на полупрозрачном экране, регистрируемое одной камерой с электронно-оптическим затвором и производится фотографирование в отраженном свете другой. Снимки в отраженном свете отличаются в зависимости от условий опыта, скорости и материала шара. Схема регистрации теневого фонового метода состоит из оптического регистратора (видеокамеры, фотоаппарата) источника света, фонового экрана программы обработки и исследуемой области. Визуализация картины течений с помощью теневого фонового метода осуществляется на основе регистрации двух и более снимков фонового экрана.

Зафиксировано наличие процессов аэротермомеханического разрушения и уноса массы объектов испытаний (рис. 3, 4).

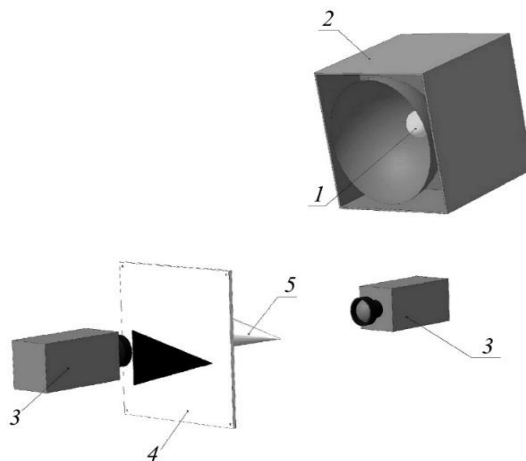
Для опытов с шариком из стали следует отметить, что трек, регистрируемый фотокамерами, имеет четкие границы и не содержит дополнительных треков каких-либо сопутствующих фрагментов. Также необходимо отметить пульсирующий характер трека. Данный процесс характерен только для той части траектории, где происходит унос с поверхности тела. Периодически происходит увеличение поперечных размеров трека (яркости свечения, вспышки). Частота следования участков трека увеличенных размеров и их протяженность непостоянна.

Для шарика из ВНЖ характерным является наличие плотного трека светящегося шарика в ореоле расходящихся треков светящихся частиц значительно меньших размеров.



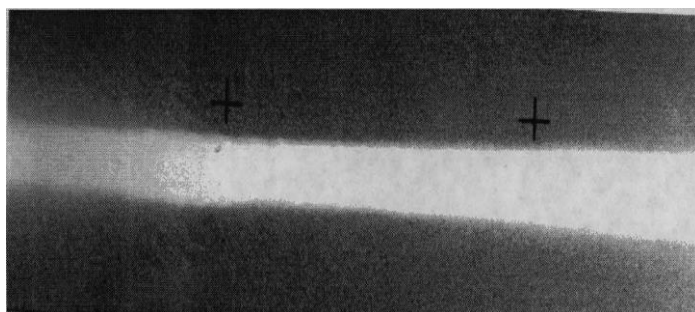
**Рис. 1. Состав и схема расстановки оборудования аэробаллистической установки:**

- 1 – метательная установка, 2 – рентгеновские аппараты,*
- 3 – импульсные источники света, 4 – аэрофотоаппараты,*
- 5 – электронно-оптическая камера, 6 – синхро-баллистическая фотокамера, 7 – экран*

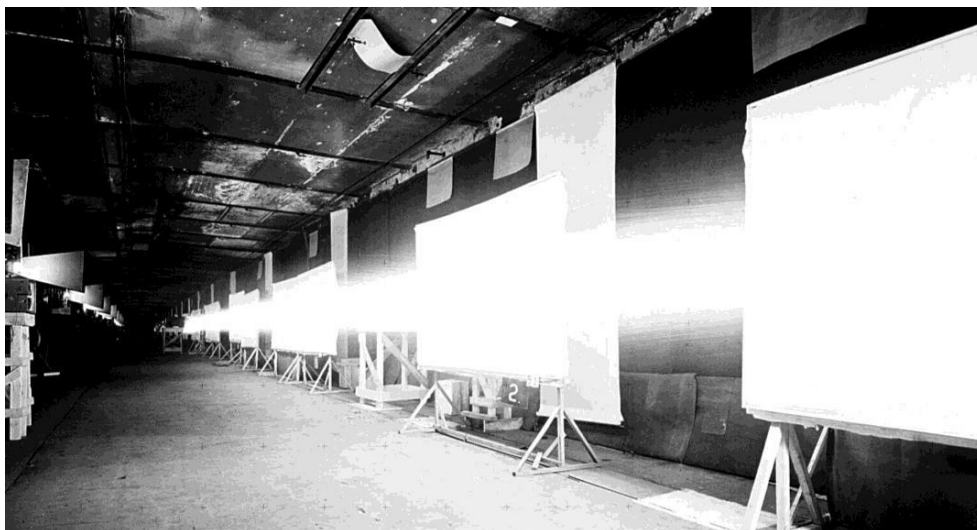


**Рис. 2. Схема комбинированного поста для одновременного получения теневого изображения и фотоизображения в отраженном свете:**

- 1 – точечный излучатель, 2 – газоразрядный накопитель, 3 – камера,*
- 4 – полупрозрачный экран; 5 – регистрируемый объект исследования*



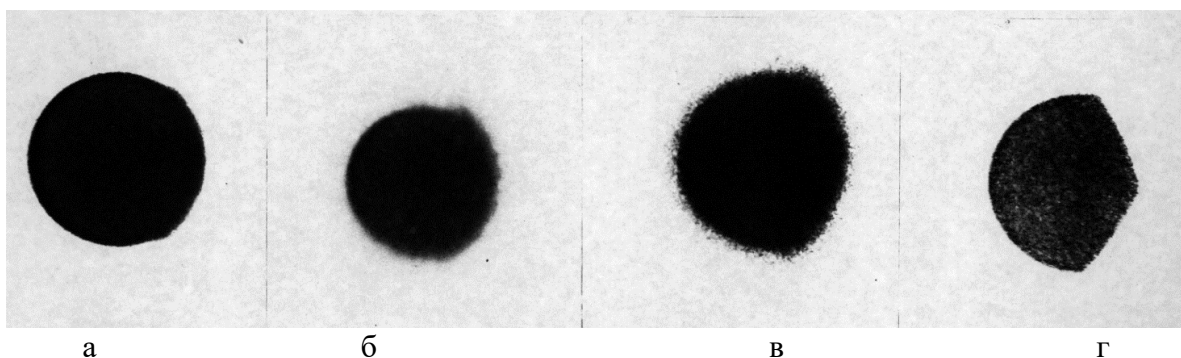
**Рис. 3. Регистрация полета стального шарика камерой аэрофотоаппарата на участке траектории, где происходил унос массы материала**



**Рис. 4. Фотография с аэрофотоаппарата полета шарика из ВНЖ при наличии разрушения тела (начальная скорость полета 5,86 км/с)**

Представлены рентгеновские снимки шара из сплава ВНЖ в различных стадиях полета (рис. 5) и шарика из стали (рис. 6). При анализе снимков можно отметить, что оба шарика, стальной и из сплава ВНЖ, в конечной стадии полета (рис. 5, г и рис. 6), когда унос прекратился, имеют характерные обводы «метеоритной» формы. Процесс аэротермомеханического разрушения шарика наблюдается при начальных скоростях метания более 4 км/с, и сопровождается уносом массы, интенсивность которого с увеличением начальной скорости полета возрастает, о чем свидетельствуют данные рентгенографирования на конечных участках траектории, когда унос завершился.

Вместе с тем, возможно различное поведение объектов испытаний при фактически одинаковых начальных скоростях  $V_0 = 4,0-4,2$  км/с. В некоторых опытах процесс аэротермомеханического разрушения объектов испытаний из ВНЖ может протекать достаточно интенсивно и обуславливать существенное изменение обводов, а в других – отсутствовать вообще, о чем свидетельствуют данные рентгенографирования. Данное явление может быть объяснено отличием в начальных условиях движения шарика. Например, возможно наличие начальной угловой скорости относительно центра масс тела. В таком случае в зоне воздействия высоких тепловых нагрузок все время оказываются новые участки поверхности тела, прогрева которых до температуры плавления не происходит.



**Рис. 5. Рентгеновские снимки шарика из ВНЖ в различных стадиях полета:**

а) расстояние от среза ствола метательной установки  $X=14$  м, скорость  $V=4,9$  км/с;

б)  $X=26$  м,  $V=4,6$  км/с, в)  $X=43$  м,  $V=4,1$  км/с,

г)  $X=156$  м,  $V=1,5$  км/с (направление полета слева направо)

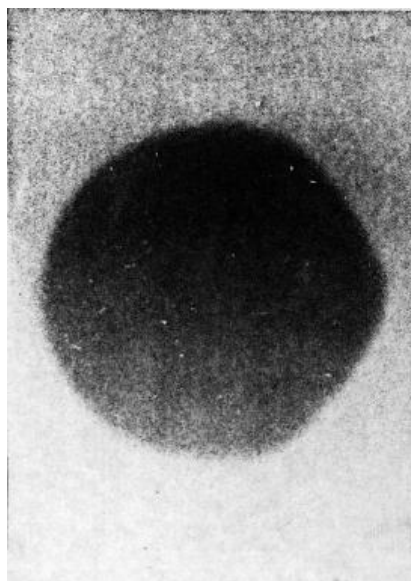


Рис. 6. Рентгеновский снимок шарика из стали  $X=129$  м,  $V=1,4$  км/с

На основе анализа и измерения параметров тел, зафиксированных на рентгеновских снимках, проводились оценки уноса массы объекта испытаний. Полученные зависимости для скоростных режимов  $V_0 = 4,0-4,3$  км/с и  $V_0 > 5,6$  км/с (рис. 7) в дальнейшем использовались при обработке данных внешнетраекторных измерений для оценки среднеинтегрального коэффициента силы лобового сопротивления  $C_x$  в каждом конкретном опыте. Для шара из ВНЖ для случая, показанного на рис. 5, г) коэффициент силы лобового сопротивления  $C_x = 1,1409$ .

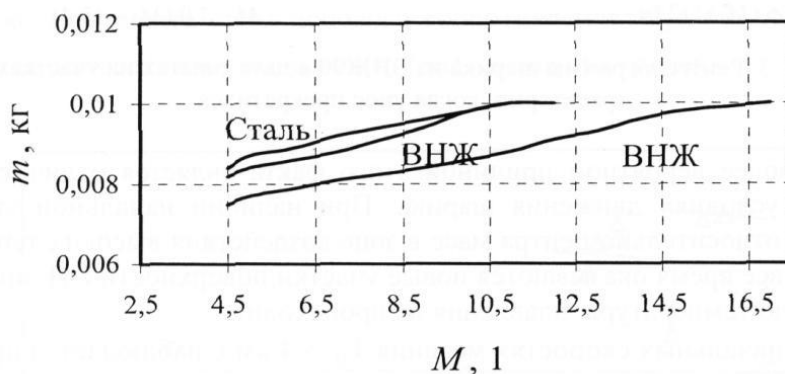
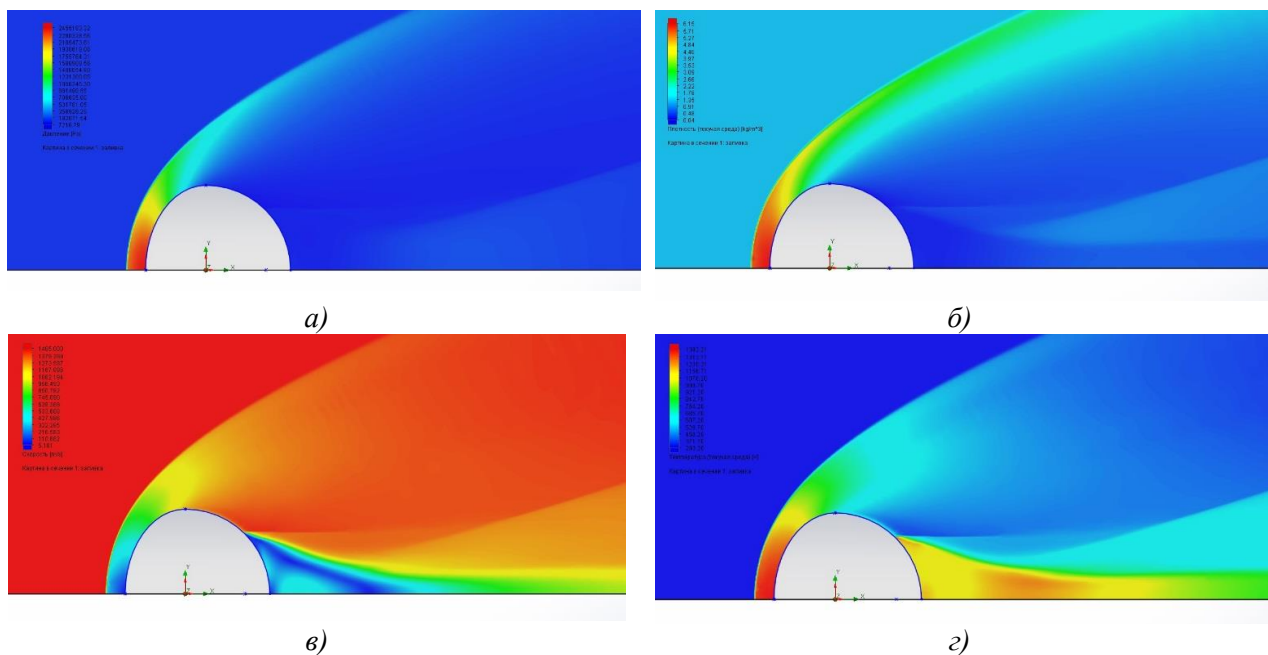


Рис. 7. Экспериментальная величина уноса

### Численное моделирование

Проведено численное моделирование процессов, сопровождающих гиперзвуковой полет тела с помощью метода контрольных объемов. Решались осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса. Получены зависимости коэффициента аэродинамического сопротивления от числа Маха, картины распределения полей давлений, температур, плотностей, скоростей (рис. 8) в газовой среде с учетом изменения формы объекта испытаний при наличии уноса массы материала. Вычислено значение коэффициента силы лобового сопротивления при наличии уноса массы шара (для случая, показанного на рис. 8  $C_x = 1,086$ ). Погрешность по отношению к эксперименту не превысила 5 %.



**Рис. 8. Распределение расчетных полей:**

а) давлений (Па), б) плотностей ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ), в) скоростей (м/с), г) температур (К) в газовой среде при наличии уноса массы шара,  $V=1,5 \text{ км}/\text{с}$

### Заключение

Проведены расчетно-экспериментальные исследования изменения формы и уноса массы материала тела при гиперзвуковом полете в воздухе. Показаны результаты регистрации полета тел простейшей формы – шаров, при наличии разрушения объекта испытаний. Приведены рентгеновские снимки обводов шаров, выполненных из стали и сплава ВНЖ, оценена величина уноса материала. Проведено численное моделирование. Получены значения коэффициента силы лобового сопротивления при наличии уноса массы шара.

*Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ № МК-2078.2019.8.*

### Библиографический список

1. Пробстин, Р.Ф. Теория гиперзвуковых течений [Текст] / Р.Ф. Пробстин, У.Д. Хейз. – М.: Издательство иностранной литературы, 1962. – 607 с.
2. Герасимов, С.И. Различные механизмы разрушения тел в гиперзвуковом потоке, выявленные с помощью оптической и рентгенографической регистрации [Текст] / С.И. Герасимов, В.И. Ерофеев, В.А. Кикеев, А.П. Фомкин // Научная визуализация. 2015. Т. 7. № 1. С. 38-44.
3. Герасимов, С.И. Теневая схема с селективным диапазоном фоторегистрации в аэродинамических испытаниях [Текст] / С.И. Герасимов, В.А. Кикеев, В.А. Кузьмин, К.В. Тотышев, А.П. Фомкин, Р.В. Герасимова // Научная визуализация. 2019. Т. 11, № 2. С. 1-10.
4. Герасимов С.И. Теневое фотографирование в расходящемся пучке света [Текст] / С.И. Герасимов, Ю.И. Файков. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2010. – 344 с.
5. Герасимов, С.И. Кумулятивные источники света [Текст] / С.И. Герасимов, Ю.И. Файков, С.А. Холин. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2011. – 327с.