

УДК 531.01

## РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПРИ ГИПЕРЗВУКОВЫХ СКОРОСТЯХ ОБТЕКАНИЯ ОБЪЕКТОВ

© Сергей Иванович Герасимов<sup>1,2</sup>, Василий Андреевич Кикеев<sup>1</sup>,  
Дмитрий Юрьевич Смирнов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем машиностроения РАН, Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup>Саровский физико-технический институт, филиал НИЯУ «МИФИ», Саров, Россия

[s.i.gerasimov@mail.ru](mailto:s.i.gerasimov@mail.ru)

*Аннотация.* Обсуждается методика численного моделирования динамических процессов, происходящих при гиперзвуковом обтекании объектов. Расчетные данные сравниваются с данными, полученными при аэробаллистических испытаниях.

*Ключевые слова:* аэробаллистические испытания, гиперзвуковое обтекание, численное моделирование, визуализация аэродинамических процессов.

Работа выполнена в рамках государственного задания на проведение фундаментальных научных исследований на 2013-2020 г.г. по теме № 0035-2014-0402, № государственной регистрации 01201458047 и при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 17-08-01096, № 18-29-10073).

## CALCULATED AND EXPERIMENTAL STUDIES OF PROCESSES AT HYPERSONIC VELOCITIES AROUND OBJECTS

© S.I. Gerasimov<sup>1,2</sup>, V.V. Kikeev<sup>1</sup>, D.Yu. Smirnov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mechanical Engineering Research Institute of the RAS, Nizhny Novgorod, Russia

<sup>2</sup>Sarov Physical Technical Institute, Sarov, Russia

[s.i.gerasimov@mail.ru](mailto:s.i.gerasimov@mail.ru)

*Abstract.* Discusses the technique of numerical simulation of dynamic processes occurring during hypersonic flow around objects. The calculated data are compared with the data obtained during aeroballistic tests.

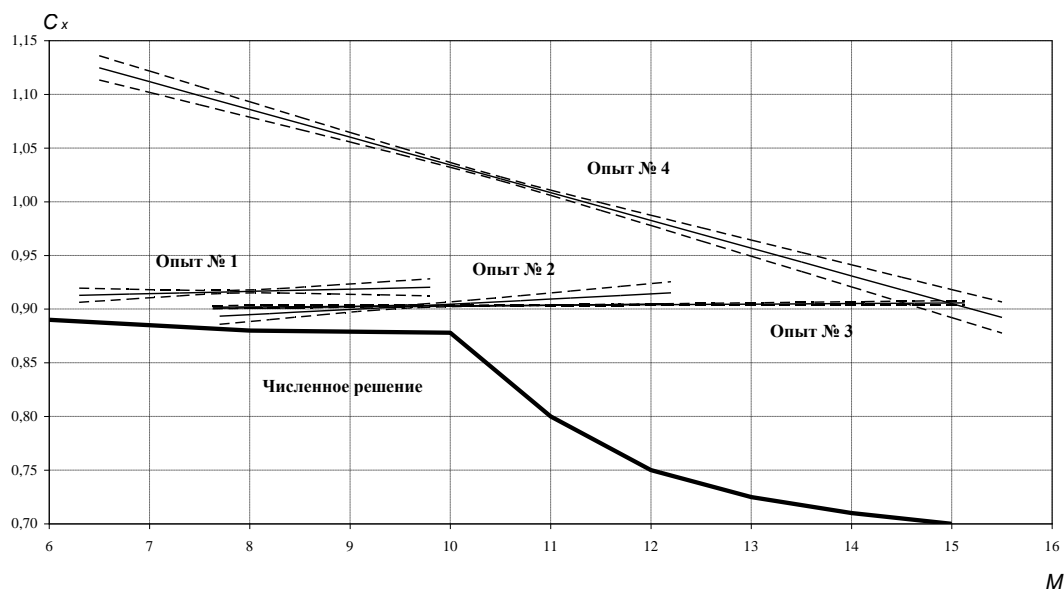
*Keywords:* aeroballistic tests, hypersonic flow, numerical simulation, visualization of aerodynamic processes.

*Acknowledgements.* The work was carried out within the Russian state task for conducting fundamental scientific research for 2013-2020 on the topic No. 0035-2014-0402, state registration number 01201458047 and the work was supported by the Russian Foundation Investigation Fond, projects no.17-08-01096, no.18-29-10073.

Юстировка аэробаллистической трассы проводилась с помощью шаров из различных материалов при разных начальных скоростях полёта. Трасса имеет измерительный участок длиной 120 м и позволяет реализовывать скорости полета от 130 м/с до 6500 м/с ( $M = 0,4-20$ ), числа Рейнольдса  $Re = 6 \cdot 10^5 - 1,2 \cdot 10^7$ .

Шары из высокопрочного сплава с добавлением вольфрама и рения (диаметр 10,4 мм, масса 11,5 г) метались с начальными скоростями 3,86 км/с (опыт №1); 4,70 км/с (опыт № 2); 5,07 км/с (опыт №3); 5,27 км/с (опыт №4).

Зависимость коэффициента силы лобового сопротивления  $C_x(M)$  от числа Маха для шаров представлена на рис.1. Зависимость коэффициента силы лобового сопротивления  $C_x(M)$  для сферы при отсутствии уноса материала ОИ соответствуют "классическим" представлениям и практически постоянна в пределах погрешности эксперимента во всем реализованном скоростном диапазоне. В опыте № 4 зависимость  $C_x(M)$  имеет большой градиент, что является косвенным доказательством наличия аэротермомеханического разрушения конструкционных материалов ОИ, сопровождающегося существенными изменениями геометрии и массы ( $\sim 10-15\%$ ).



**Рис. 1.** Зависимость коэффициента силы лобового сопротивления от числа Маха для шаров из высокопрочного сплава с добавлением вольфрама и рения.

Для отработки методик расчета с помощью современных инженерных методов компьютерного моделирования процесса сверхзвукового обтекания произведен расчет моделей при различных скоростях обтекания.

В качестве объекта моделирования выбран шар 10,4 мм. В качестве метода моделирования выбран метод численного решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса, дополненный  $k-\varepsilon$  – моделью турбулентности. Этот метод реализован в современном инженерном программном пакете COSMOSFloWorks.

На рис.2 приведена дважды адаптированная после 1380 и 2070 итераций сетка для условий обтекания с начальной скоростью  $M = 7$ . Исходная сетка состояла из 234963 ячеек, а адаптированная сетка из 381676, 801067.

Диапазон рассмотренных начальных скоростей обтекания составлял 6–10  $M$ . В процессе расчета определялись полные в объеме домена поля для всех параметров обтекающего газа, определялось значение коэффициента лобового сопротивления шара. Полученные результаты показаны на рис. 1 и рис. 3, характер обтекания шара при начальной скорости  $M = 7$  показан на рис. 4. Из рисунков можно заметить, что характер обтекания и вычисленные значения коэффициента сопротивления в зависимости от чисел Маха в целом соответствуют экспериментальным данным, приведенным в различных источниках ранее [1–4].

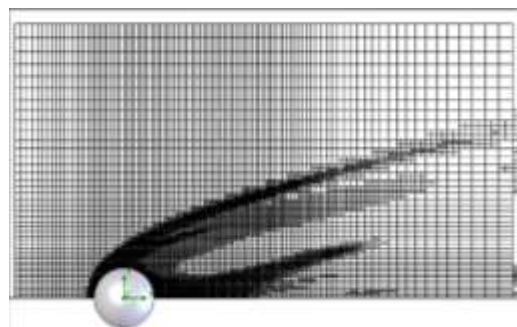


Рис. 2. Адаптированная расчетная сетка при  $M = 7$ .

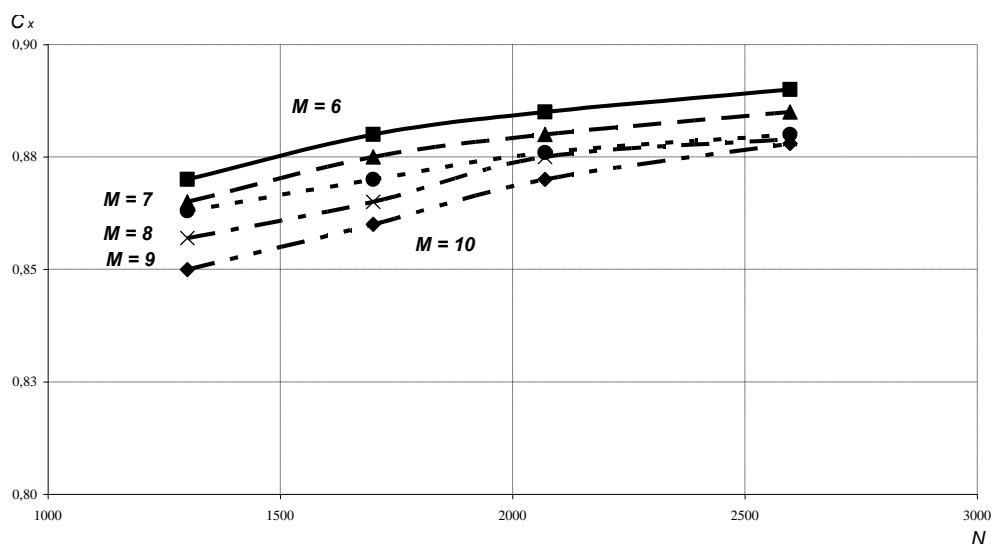
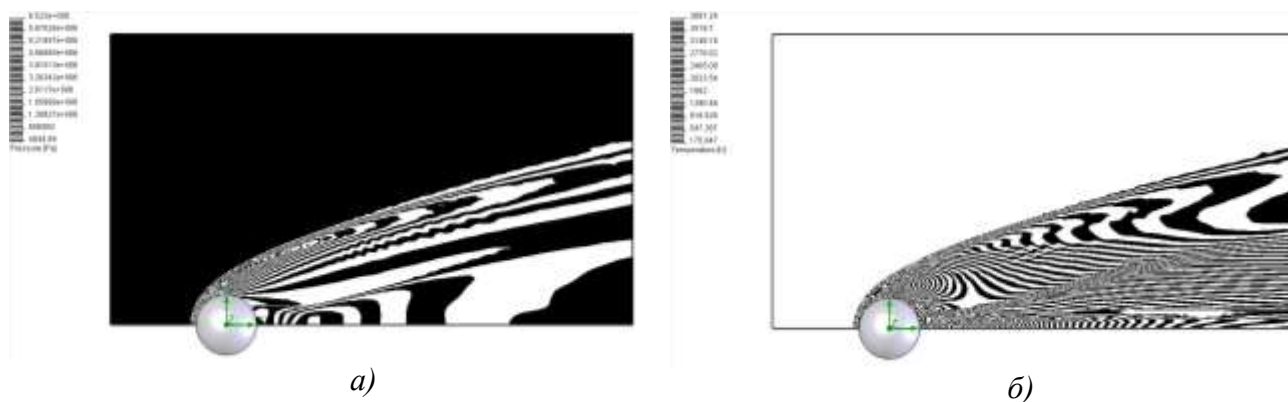
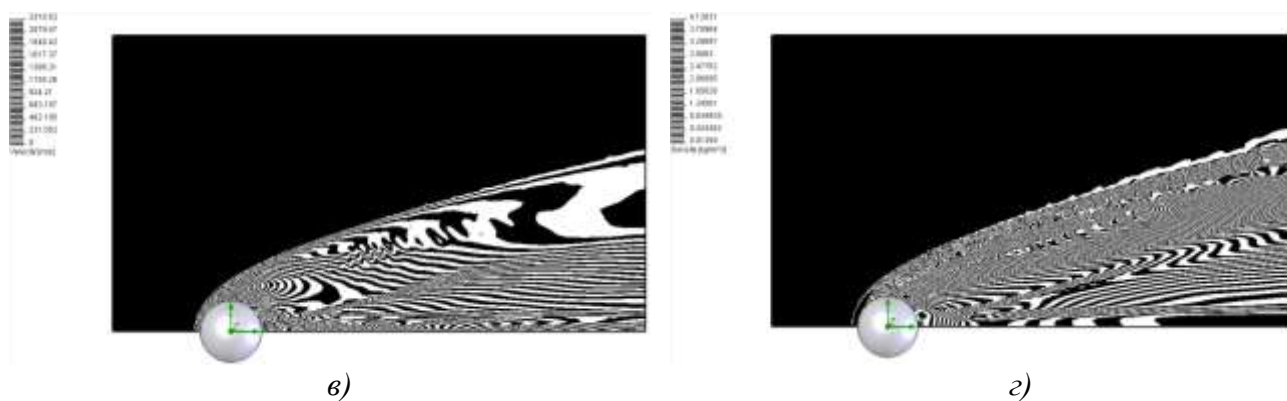


Рис. 3. Зависимость коэффициента силы лобового сопротивления от числа итераций при различных числах Маха для шара диаметром 10,4 мм.





**Рис.4.** Распределение полей давлений (а), температур (б), плотностей (в) и скоростей (г) шара при обтекании с начальной скоростью  $M = 7$ .

Расчеты с начальными скоростями более  $M = 10$  показали, что инженерный программный пакет COSMOSFloWorks не предназначен для столь высоких скоростей обтекания. При данных скоростях происходит нарушение алгоритма автоматической адаптации расчетной сетки, что приводит к некорректным значениям коэффициента лобового сопротивления и характера обтекания шара в целом. На рис.1 отлично видно огромное отличие от экспериментальных результатов. Учитывая этот факт, можно сделать предположение, что данный программный пакет ориентирован на расчет сверх- и гиперзвукового обтекания до  $M \approx 10$ .

#### Список литературы

1. Герасимов С.И., Файков Ю.И. Теневое фотографирование в расходящемся пучке света. – Саров: Изд-во РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2010. - 342 с.
2. Герасимов С.И., Файков Ю.И., Холин С.А. Кумулятивные источники света. – Саров: Изд-во РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2011. - 327 с.
3. Бейли А.Б., Хайт Дж. Коэффициент сопротивления сферы в широком диапазоне чисел Маха и Рейнольдса // Ракетная техника и космонавтика. - 1972. - Т. 10, № 11. - С. 56-62.
4. Van Dyke M. An Album of Fluid Motion. - Stanford, California, The Parabolic Press, 1982. - 176 p.

*Дата поступления: 13 апреля 2019 г.*