

03

Экспериментальное исследование взаимодействия летящих тел с пламенами

© А.С. Барышников, И.В. Басаргин, С.В. Бобашев, Н.А. Монахов,
П.А. Попов, В.А. Сахаров, М.В. Чистякова

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
E-mail: al.bar@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 19 марта 2015 г.

Изучается воздействие нагретой области газа на устойчивость модели при сверхзвуковом движении в свободном полете. Выявлены условия максимального воздействия на аэродинамику полета тела в неоднородной нагретой области.

При исследовании взаимодействия области плазмы с ударной волной важен вопрос о влиянии газодинамических процессов, которые могли бы вызвать неустойчивость и деструкцию ударной волны [1–3]. Особенно важен вопрос о влиянии неоднородности нагретой области плазмы. С другой стороны, сама задача изменения аэродинамической устойчивости моделей при пролете тела через тепловую неоднородность представляет собой большую прикладную проблему [4–7].

Эксперименты проводились на баллистической установке ФТИ им. А.Ф. Иоффе, основными элементами которой являются: пороховая пушка калибром 35 мм, секционная барокамера длиной около 10 м и пулеулавливатель [8]. Общая длина установки 25 м. Вторая, физическая, секция, предназначена для проведения физических исследований, оснащена одной системой фотографирования. В остальной газодинамической, экспериментальной камере, находящейся за переходной секцией, равномерно через 1 м расположены секции газодинамических исследований. В этих секциях могут быть получены теневые фотографии: в вертикальной плоскости — в 16 сечениях, расположенных через 0.5 м вдоль барокамеры, и в горизонтальной плоскости — в 8 сечениях, расположенных через 1 м. Примеры получаемых в эксперименте теневых фотографий приведены на рис. 1. Наглядно продемонстрирована эффективность воздействия нагретых областей воздуха (пламени) на динамику полета тел.

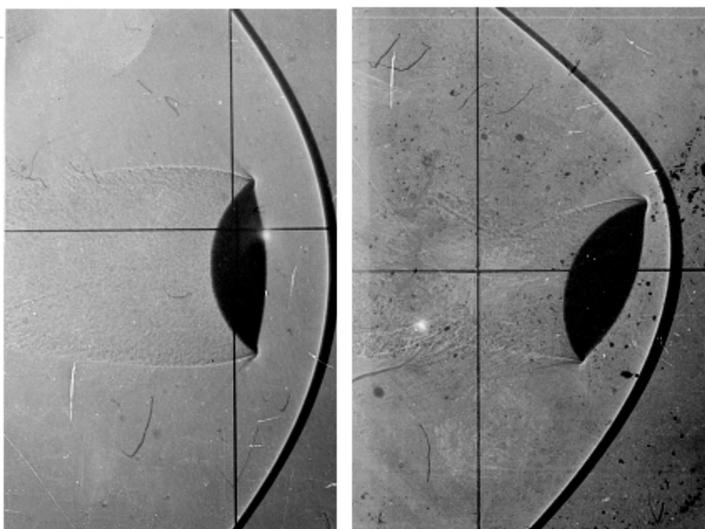


Рис. 1. Сравнение теневых фотографий: *a* — сегментального тела в свободном полете, $M = 1.9$, *b* — сегментального тела с возмущением по углу атаки при взаимодействии с пламенем, $M = 2.1$ (колебания модели в горизонтальной плоскости).

Температурная неоднородность моделировалась пламенем спиртовой горелки, помещенной в середине физической секции вдоль пролета тела и на расстоянии 1–1.1 м. Пролетающие модели представляли собой сегментальные диски диаметром $d = 28$ мм и массой 26.3 г, изготовленные из латуни. При выстреле в невозмущенный пламенем воздух в процессе отделения от деталей поддонов модели получали слабые, до 5° , возмущения по углу атаки (рис. 1, *a*), носившие случайный характер как по величине амплитуды, так и по направленности колебаний. Траектория была близка к продольной оси лабораторной системы координат, совпадающей с осью барокамеры установки, и отклонение моделей от точки прицеливания составляло величину 10 мм.

При пролете модели через пламя, как и ожидалось, колебательное движение модели имелось на газодинамическом участке установки, длина волны колебаний $\lambda \approx 1.4$ м. Пламя располагалось вертикально,

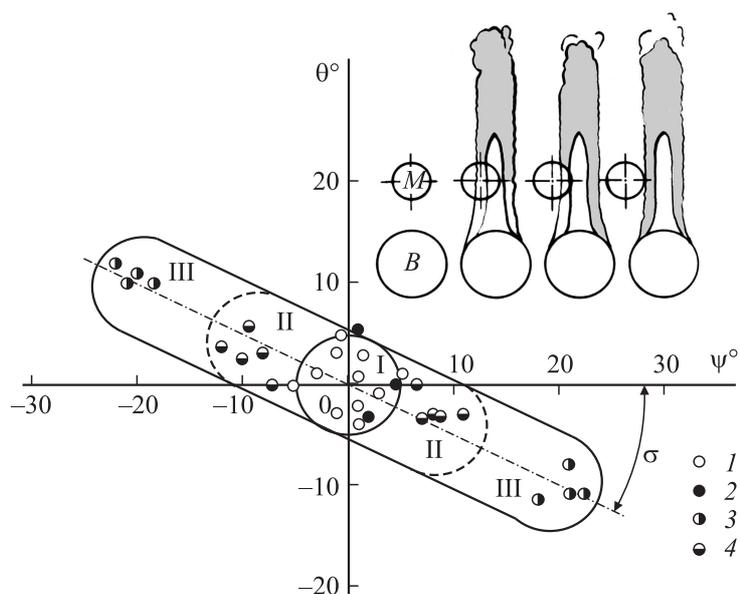


Рис. 2. Характер возмущения углового движения сегментального тела пламенем в зависимости от схемы его пролета: 1 — без горения, 2 — почти целиком внутри нагретой области, 3 — наполовину в нагретой области, 4 — касается нагретой области. *M* — вид сзади модели, *B* — торец горелки, нагретая область изображена серым цветом, ψ — угол тангажа, θ — угол атаки модели, φ — угол наклона плоскости колебаний модели.

плоскость колебаний была близка к горизонтальной. При полете модели пламя нельзя было считать однородным. Оценки показали, что на границе пламени относительный перепад плотности $\Delta\rho_n/\rho = 24\text{--}25\%$ и перепад температуры $\Delta T_n = 1200\text{--}1500\text{ К}$. Эксперименты показали, что после пролета модели через пламя амплитуда угла колебаний $\alpha_{0\text{max}} \approx 26^\circ$, а плоскость колебаний наклонена к горизонту под углом $\varphi \approx 27^\circ$ (рис. 2).

В зависимости от величины смещения модели от плоскости симметрии пламени максимальный пространственный угол колебаний $\sqrt{\varphi^2 + \vartheta^2} \approx \alpha$ оказывался в I, II или III областях (рис. 2). Максимальные возмущения по углу атаки дали эксперименты с пролетом

модели по схеме 3. Одновременно с усилением колебаний при пролете через пламя было отмечено и отклонение модели от точки прицеливания на 60 mm. Таким образом, изменение угла наклона траектории модели из-за взаимодействия с пламенем составило примерно 3.5° . По полученным в экспериментах теневым фотографиям измерялись координаты моделей на универсальном измерительном микроскопе и проводились расчеты аэродинамических характеристик. Это позволило сделать выводы, что, возможно, тепловая неоднородность вызывает отклонение летательного аппарата от полета по расчетной траектории за счет уменьшения силы сопротивления и подъемной силы в области пламени. Наибольшее возмущение угла отклонения модели от значений при полете без пламени (схема полета 1) наблюдается именно при полете по схеме 3 (рис. 2), когда модель заходит в область пламени только на четверть диаметра. Следовательно, можно предположить, что возбуждение колебаний летательного аппарата по углу атаки происходит за счет перепада плотности и температуры на границе пламени. Возмущений на самой головной ударной волне не отмечалось (рис. 1, *b*).

Список литературы

- [1] *Барышников А.С., Бедин А.П., Маленников В.Г.* и др. // Письма в ЖТФ. 1979. Т. 5. В. 5. С. 281–284.
- [2] *Varyshnikov A.S., Basargin I.V., Chistyakova M.V.* // Phys. Scr. 2010. # 014037.
- [3] *Горшков Н.А., Климов А.И., Мишин Г.И., Федотов А.Б., Явор И.П.* // ЖТФ. 1987. Т. 57. В. 10. С. 1893–1898.
- [4] *Каменецкий В.Ф., Турчак Л.И.* // Численное моделирование в аэрогидродинамике. М.: Наука, 1986. С. 104–115.
- [5] *Головачёв Ю.П., Леонтьева Н.В.* // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1989. Т. 29. С. 791–793.
- [6] *Георгиевский П.Ю., Левин В.А.* // Фундаментальные проблемы механики и смежных наук в изучении многомасштабных процессов в природе и технике / Под ред. акад. И.Г. Горячева, акад. Н.Ф. Морозова. СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2014. С. 102–117
- [7] *Георгиевский П.Ю., Левин В.А., Сутырин О.Г.* // Тезисы докладов XVII школы-семинара, посвященной памяти акад. Г.Г. Черного и 55-летию со дня основания НИИ механики МГУ. М.: Изд-во МГУ, 2014.
- [8] *Златин Н.А., Красильщиков А.П., Мишин Г.И.* и др. Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях. М.: Наука, 1974. 344 с.