

03

© 1991

РАСЧЕТ ТРЕХМЕРНОГО ОБТЕКАНИЯ КУБА
СВЕРХЗВУКОВЫМ ПОТОКОМ ГАЗА

Д.И. Бараусов, Э.М. Дробышевский

Гиперзвуковое обтекание куба довольно неожиданно стало актуальной задачей. Связано это с тем, что куб наиболее пригоден для ускорения плазменным поршнем в квадратном канале электродинамических рельсотронных ускорителей, обещающих дать скорости ~ 10 км/с и более [1, 2].

Исследовалось течение невязкого газа в районе передней грани куба (вектор скорости на бесконечности нормален ей). Течение в следе не рассматривалось. Для расчета использовалась известная схема второго порядка Мак-Кормака [3, 4]. Вычисления велись на сетке $40 \times 32 \times 32$, обтекаемое тело – четверть торца куба – занимало объем $20 \times 16 \times 16$ ячеек. Расчет проводился асимптотическим методом установления во времени. Ударные волны специально не выделялись: их положение определялось по максимальному градиенту плотности. Начальные условия – равномерно движущийся со скоростью 5 км/с воздух при нормальной плотности и давлении с показателем адиабаты $\gamma = 1.4$ и 1.2.

На рис. 1 дано расположение поверхностей ударных волн – головного скачка уплотнения перед телом и косоугольного скачка уплотнения, примыкающего к боковым поверхностям тела. Поле скоростей представлено стрелками на рис. 2. Отчетливо видно сильное торможение потока в головном скачке и поворот течения в косых скачках. На рис. 3 изображена звуковая поверхность, возникающая из-за сильного торможения потока в головном скачке.

Характерной чертой задачи является обтекание выпуклого прямого угла. Его наличие сказывается, прежде всего, на форме поверхности головного скачка, которая на угле имеет большую кривизну, чем вблизи середины ребер куба. Соответственно, звуковая поверхность несколько дальше отходит от середины боковых граней.

В распределении плотности газа перед гранью тела также имеются особенности; по мере приближения к боковым граням изолинии плотности в поперечном сечении перед телом начинают повторять форму тела, причем градиент плотности максимален на угле (здесь плотность спадает быстрее всего). Вследствие такого распределения плотности поток массы, обтекающий боковую грань, уменьшается от ее середины к ограничивающим эту грань боковым ребрам. Иначе говоря, при обтекании передней грани куба основной поток массы концентрируется к середине ограничивающих ее ребер. По-видимому, аналогичный эффект наблюдался экспериментально для

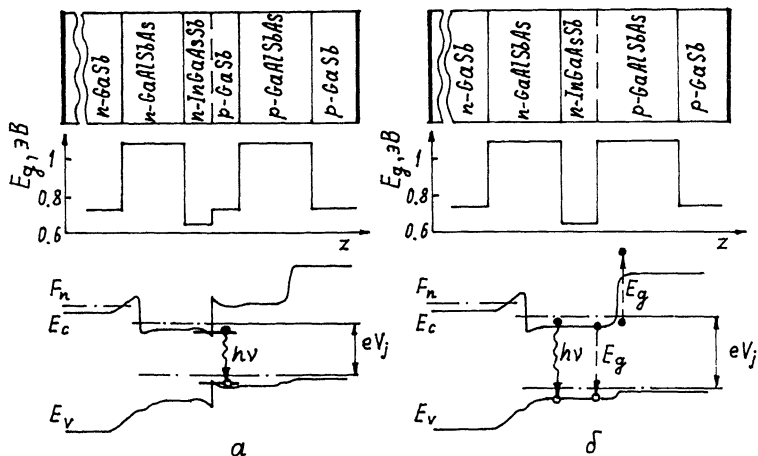


Рис. 1. Общий вид системы ударных волн на передней грани куба.

выбросов, возникавших при сверхскоростном соударении куба с твердой мишенью [5].

Из расчетов следует, что отношение величины отхода головной ударной волны δ к длине ребра куба ≈ 0.3 . Сравнение ее с данными по обтеканию кругового цилиндра [6] показывает, что это значение δ превышает отход головного скачка от торца цилиндра, вписанного в куб, но меньше отхода от описанного цилиндра. Если взять цилиндр с площадью торца, равной площади грани куба, то δ получается практически одинаковым.

При больших скоростях обтекания (число $M \geq 15$) становятся существенными физико-химические реакции, и показатель адиабаты уменьшается до $\gamma \approx 1.2$. Качественно картина обтекания не меняется, и описанные выше эффекты сохраняются, но плотность за ударными волнами возрастает, а головной скачок подходит ближе к передней грани тела.

При расчете коэффициента волнового сопротивления C_x учитывались лишь силы, действующие на торец тела. Вычисленные для куба значения $C_x = 1.64$ при $\gamma = 1.4$ и $C_x = 1.73$ при $\gamma = 1.2$. Чтобы выявить влияние изменения формы тела на C_x , были проведены также расчеты обтекания торца параллелепипеда с отношением сторон 1:2 ($C_x = 1.69$ при $\gamma = 1.4$) и торца кругового цилиндра ($C_x = 1.63$ при $\gamma = 1.4$). Последнее значение можно сопоставить с результатами расчетов обтекания воздухом цилиндра [7], которые дали $C_x = 1.677$ при $\gamma = 1.4$ (при $M = \infty$) и $C_x = 1.81-1.83$ при учете диссоциации и ионизации молекул воздуха (при $v = 7.5$ км/с, $M \approx 24$, $\gamma \approx 1.15$). Полученное нами значение C_x оказывается на 2-3% меньшим.

Таким образом, реальное значение коэффициента сопротивления куба, движущегося в воздухе при $M \sim 20$, должно лежать в пределах $C_x = 1.7-1.8$.

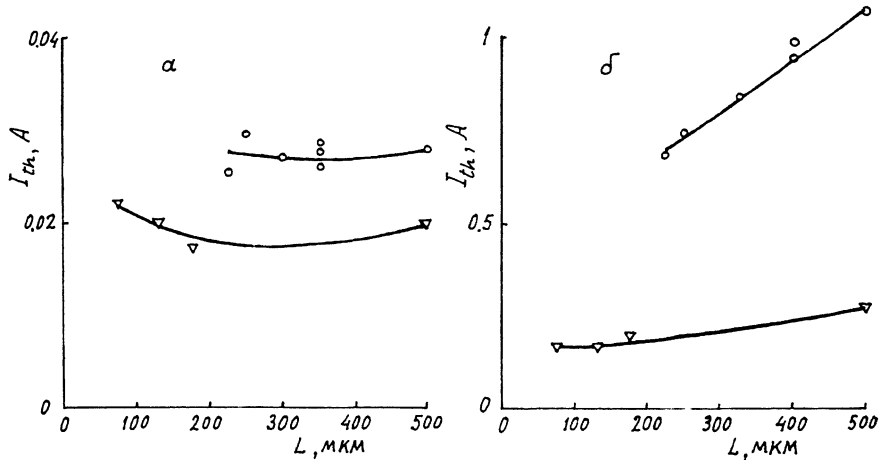


Рис. 2. Поле скоростей. Направление и величина стрелки соответствует направлению и величине вектора скорости.

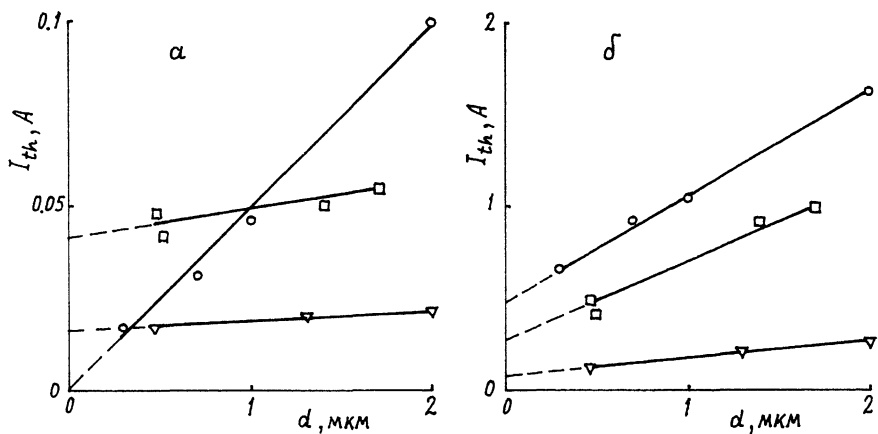


Рис. 3. Звуковая поверхность, разделяющая зоны дозвукового и сверхзвукового течения за головным скачком уплотнения.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] W e l d o n W.F. // Int. J. Impact Engng. 1987. V. 5. P. 671-621.
- [2] Д р о б ы ш е в с к и й Э.М., Р о з о в С.И., Ж у - к о в Б.Г., К у р а к и н Р.О. С о к о л о в В.М. // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17 (в печати); Препринт ФТИ-1484. Л. 1990. С. 8.
- [3] Р и з з и А., И н о у й е М. // РКТ. 1973. Т. 11. № 11. С. 27-37.
- [4] Ж м а к и н А.И., Ф у р с е н к о А.А. // ЖВММФ. 1980. Т. 20. № 4. С. 1021-1031.
- [5] Д р о б ы ш е в с к и й Э.М., Ж у к о в Б.Г., Р о - з о в С.И., С о к о л о в В.М., К у р а к и н Р.О., С а в е л ь е в М.А. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. В. 12. С. 64-68.
- [6] М а с л е н н и к о в В.Г. В сб. „Аэрофизические исследо- вания сверхзвуковых течений“ / Под редакцией Ю.А. Дунаева. М.-Л.: Наука, 1967. С. 241-255.
- [7] Б е л о ц е р к о в с к и й О.М. Численное исследование современных задач газовой динамики. М.: Наука. 1974. С. 394.

Физико-технический
институт
им. А.Ф. Иоффе АН СССР,
Ленинград

Поступило в Редакцию
29 марта 1991 г.