

01;03
©1994

ОБ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНОМ РЕЖИМЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СВЕРХЗВУКОВОГО НЕРАВНОМЕРНОГО ПОТОКА С ПРЕГРАДОЙ

С.В.Гувернюк, К.Г.Савинов

При взаимодействии сверхзвуковых недорасширенных струй с преградами при некоторых значениях параметров наблюдается автоколебательный режим взаимодействия. Его исследованию посвящено много экспериментальных и теоретических работ, например, [1-5]. Во многих из них выдвигаются различные гипотезы о механизме поддержания автоколебаний. Окончательная точка зрения на механизм возникновения автоколебательного режима еще не сложилась. В данной работе дается описание свойств этого режима на примере численного исследования взаимодействия сверхзвукового потока со сферой.

Сверхзвуковой неравномерный поток задавался в виде

$$\frac{U_\infty(y)}{U_\infty(0)} = \frac{[1 - a \exp(-by^2)]}{1 - a}, \quad V_\infty(y) = 0, \quad (1)$$

$$P_\infty(y) = P_\infty(0),$$

$$\frac{h_\infty(y)}{h_\infty(0)} = 1 + c \left[1 - \left(\frac{U_\infty(y)}{U_\infty(0)} \right)^2 \right],$$

где U, V — осевая и поперечная компоненты скорости; P — давление, h — энтальпия; параметры a, b, c определяют интенсивность и ширину зоны неравномерности потока. При $a > 0$ получается сдвиговое течение типа следа [6], при $a < 0$ формулами (1) задается течение типа струи с максимумом скорости на оси $y = 0$.

Рассмотрим осесимметричную задачу о невязком сверхзвуковом обтекании сферы (радиуса $R = 1$) неравномерным потоком второго типа ($a < 0$). Для численного решения этой задачи использовался метод установления второго порядка точности по пространственной координате с выделением ударной волны [7]. Если зафиксировать параметр c и параметр b , характеризующий ширину зоны неравномерности, и уменьшать параметр a от $a = 0$ (равномерный поток), то начиная с некоторого значения a (будем обозначать его a_*), стационарного решения не существует. При

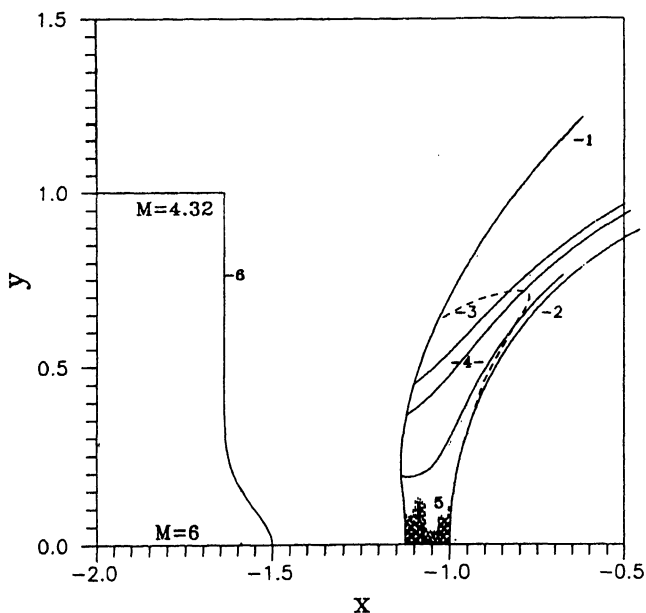


Рис. 1. Расчетная картина нестационарного обтекания сферы в момент минимального отхода: 1 — фронт ударной волны, 2 — контур преграды, 3 — звуковая линия, 4 — линии тока, 5 — приосевая область интенсивных пульсаций, 6 — профиль числа Маха набегающего потока.

$a \leq a_*$ наблюдается возникновение автоколебательного режима течения. Характерным для этого режима является периодическое изменение отхода ударной волны и газодинамических параметров в ударном слое в приосевой области. На рис. 1 представлена картина обтекания при $M_\infty(0) = 6$, $a = -0.11$, $b = 35$, $c = 3$ в момент, соответствующий минимальному отходу ударной волны на оси (M — число Маха). Штриховкой помечена область, в которой пульсации давления превышают 5%. На этом же рисунке дан профиль числа Маха набегающего потока. Как видно, интенсивные пульсации происходят лишь вблизи оси $0 \leq y \leq 0.1$. При $y > 0.1$ положение ударной волны и газодинамические величины в ударном слое практически не меняются со временем, что дает возможность представить линии тока, совпадающие с траекториями частиц в этой области. На рис. 2 показан характер изменения на оси отхода ударной волны (кривая 1), давления на теле (2) и на волне (3) в зависимости от безразмерного времени

$$\tau = \frac{tU_\infty(0)}{R}.$$

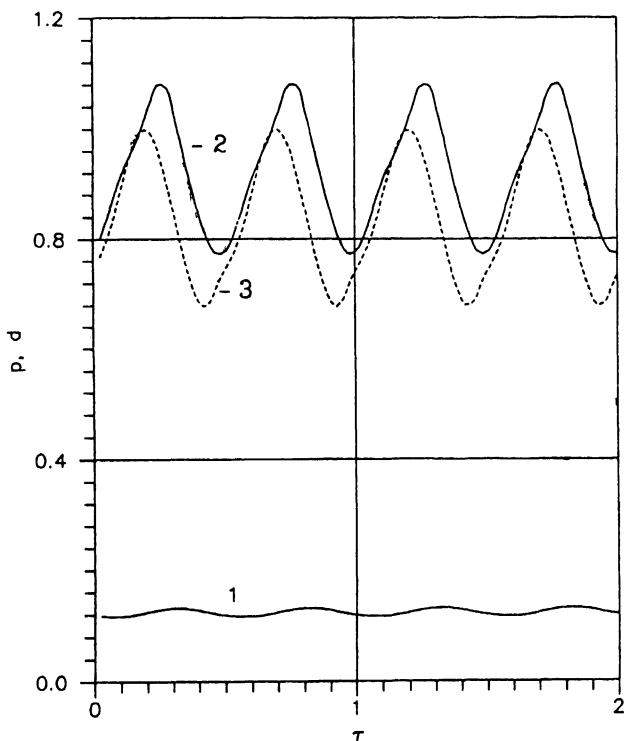


Рис. 2. Колебания отхода ударной волны d и давления на оси p , отнесенного к удвоенному скоростному напору набегающего потока на оси симметрии: 1 — отход волны, 2 — давление на теле, 3 — давление на волне.

Колебания давления на волне совпадают по фазе с колебаниями отхода ударной волны. При дальнейшем уменьшении параметра a амплитуда колебаний увеличивается, а частота практически не меняется. Увеличение параметра b при фиксированном a также приводит к увеличению амплитуды колебаний.

Следует указать, что при неравномерности потока указанного типа автоколебательные режимы обнаружены при расчетах обтекания тел различной формы, в частности, при обтекании цилиндрического торца, но выход на этот режим происходит при других значениях параметров a и b .

На основании анализа проведенных расчетов можно заключить:

1) развивающиеся колебания слабо взаимодействуют с периферийной областью и наблюдается быстрое затухание возмущений, идущих от оси к периферии вниз по потоку;

2) пороговое возбуждение интенсивных колебаний наблюдалось в области $a \leq a_*$ с увеличением степени неравномерности набегающего потока;

3) не наблюдалось обратного воздействия периферийного течения на приосевое. Во всех рассмотренных течениях можно было выделить приосевую трубку тока, такую, что внешнее по отношению к ней течение остается практически установившимся, хотя в приосевой области внутри указанной трубки существуют интенсивные колебания;

4) распределение интенсивности пульсаций газодинамических величин в приосевой области является немонотонным, существует несколько максимумов на участке между ударной волной и телом, причем глобальный максимум может достигаться внутри ударного слоя на оси;

5) характерная безразмерная частота автоколебаний имеет порядок

$$\bar{\nu} = \frac{\nu R}{U_\infty(0)} \approx 2.$$

Отмеченные свойства характерны для преград различной формы, в частности для тел с плоским передним срезом; уменьшение кривизны лобовой поверхности приводит к тому, что переход к нестационарному режиму обтекания наступает при меньшей степени неравномерности набегающего потока (при меньших a и b^{-1}).

Остановимся на физической сущности возникновения автоколебательного режима. При заданном характере набегающего потока, когда число Маха на оси заметно превышает число Маха на периферии, отход скачка уплотнения на оси меньше, чем в ее окрестности. Это приводит к тому, что на оси вогнутость скачка направлена в сторону набегающего потока. При такой форме скачка уплотнения течение за ним направлено к оси, т.е. является сходящимся. Но такое течение вблизи линии торможения неустойчиво [8]. Вследствие этого стационарный режим обтекания существовать не может.

Таким образом, переход к нестационарному режиму обтекания определяется явлениями неустойчивости ударного слоя в приосевой области, приводящими к формированию самоподдерживающихся периодических колебаний, которые сосредоточены в узкой приосевой области и могут существовать независимо от взаимодействия с периферийным течением. Это качественно согласуется с результатами [2], где возможность использования приосевого приближения постулировалась без рассмотрения течения в целом.

Список литературы

- [1] Мерч К.А. Сб. пер. Механика. 1965. В. 2. С. 110-129.
- [2] Соколов Е.И. // Изв. АН СССР.МЖГ. 1992. В. 2. С. 36-42.
- [3] Голубков А.Г., Козьменко Б.К., Остапенко В.А., Солотчин А.В. // СО АН СССР. Сер. техн. наук. 1972. Т. 3. В. 13. С. 52-58.
- [4] Кузьмина В.Е., Матвеев С.К. // ПМТФ. 1979. В. 6. С. 93-99.
- [5] Набережная Г.В., Нестеров Ю.Н. // Тр. ЦАГИ. В. 1765. М., 1976. 23 с.
- [6] Линь, Ривз, Зигельман // Ракетная техника и космонавтика. 1977. Т. 15. В. 8. С. 95-103.
- [7] Любимов А.Н., Русанов В.В. Течение газа около тупых тел. Часть I. М., 1970. 287 с.
- [8] Чжен П. Отрывные течения. Т. 1. М., 1972. 299 с.

Институт механики
Московского государственного
университета им.М.В.Ломоносова

Поступило в Редакцию
19 февраля 1994 г.