

УДК 533.6.011.5:519.6

© 1990 г.

БОРОНИН В. И., ШВЕЦ А. И.

АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛНОЛЕТОВ, ПОСТРОЕННЫХ НА ТЕЧЕНИЯХ ЗА ОСЕСИММЕТРИЧНЫМИ СКАЧКАМИ УПЛОТНЕНИЯ

При сверхзвуковых скоростях полета основная часть подъемной силы образуется за счет сжатия потока на нижних поверхностях, поэтому при конструировании летательного аппарата необходимо эффективно использовать эти поверхности. Ряд сверхзвуковых летательных аппаратов — волнолетов образует присоединенные к передним кромкам скачки уплотнения и не имеют четкой границы между несущими элементами и корпусом. Если верхние поверхности волнолетов параллельны вектору скорости невозмущенного потока, то аэродинамические характеристики определяются формой только нижней поверхности [1]. Для построения волнолетов с оптимальными аэродинамическими характеристиками используют замену поверхности тока через заданную линию, расположенную на скачке уплотнения (переднюю кромку волнолета), твердой поверхностью. Поле течения за скачком уплотнения можно найти обратным методом. Однако рост погрешностей округления в алгоритме решения задач обратным методом затрудняет точный расчет структуры течения [2]. Параметры течения за произвольной ударной волной во всем поле течения нельзя рассчитать и методом характеристик, так как угол наклона скачка уплотнения меньше угла наклона характеристики первого рода в точке на этом скачке. В этой связи представляет интерес создание методик, позволяющих достаточно надежно для анализа аэродинамических характеристик рассчитывать поле течения за одним скачком уплотнения, за которым не образуется внутренних ударных волн.

В данной статье кратко приводится методика численного расчета параметров течения за осесимметричными скачками уплотнения. Приведены аэродинамические характеристики волнолетов, поверхности сжатия которых построены на течениях за осесимметричными степенными скачками уплотнения. Проведено сравнение этих характеристик с аэродинамическими характеристиками волнолетов с плоскими поверхностями сжатия.

1. Методика расчета параметров течения за осесимметричными скачками уплотнения. Пусть известна форма осесимметричной ударной волны, уравнение образующей которой в цилиндрической системе координат XR (где ось X направлена параллельно вектору скорости невозмущенного потока), $r=f(x)$, и требуется рассчитать параметры течения за этой волной.

Задача решается численно. Выбирается часть присоединенной ударной волны длиной, равной единице, и разбивается на N мелких одинаковой длины вдоль оси X отрезков. Затем решается система уравнений, состоящая из основных уравнений газодинамики (уравнения неразрывности, двух уравнений движения и уравнения, выражающего условие постоянства энтропии вдоль линии тока) и четырех равенств, представляющих собой формулы вычисления параметров течения вдоль известного направления. На первом шаге за это направление выбирается ударная волна. Система алгебраических уравнений решается относительно первых производных от параметров течения: скоростей V_x и V_r , давления p и плотности ρ по известным их значениям на ударной волне. Затем по формуле Тейлора с точностью до производных первого порядка вычисляются значения газодинамических параметров на малых расстояниях от ударной волны. При этом для устойчивости решения приращения независимых переменных выбираются так, чтобы соответствующие приращения вдоль линии тока (вдоль вектора скорости) не выходили за область характеристических

треугольников, образованных пересечением характеристик первого и второго рода, выходящих из соседних расчетных узлов на ударной волне. Решив эту систему во всех узлах на ударной волне и продолжив решение вдоль вектора скорости на ударной волне, получим следующую за ударной волной расчетную линию, на которой известны параметры течения. Продолжая эту процедуру, получим область за ударной волной, в которой известны все газодинамические параметры.

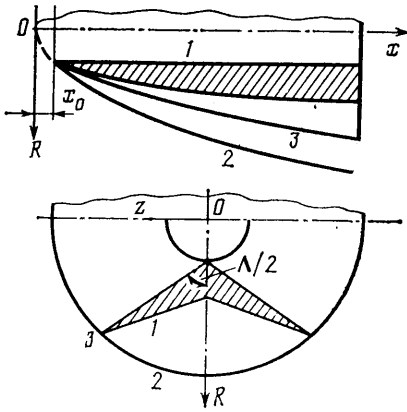
Для вычисления газодинамических параметров с большей точностью, например с точностью до производных второго порядка, каждое уравнение системы дифференцируется по независимым переменным x и r . В результате получается система 16 алгебраических уравнений относительно 12 вторых производных от параметров течения и 4 производных от направляющих косинусов известного направления.

Построение волнолета показано на фиг. 1, где 1 – волнолет, 2 – ударная волна, 3 – передняя кромка волнолета. Верхние поверхности волнолета плоскости, пересекающиеся под углом Λ , а нижняя поверхность выстраивается вдоль поверхности тока через линию пересечения скачка уплотнения с верхней поверхностью волнолета.

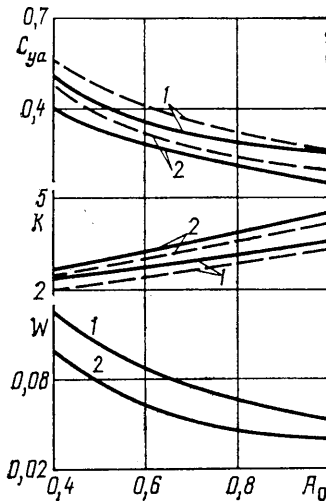
2. Анализ аэродинамических характеристик несущих форм. Была составлена программа для ЭВМ, построены несущие тела с осесимметричными параболическими скачками уплотнения, уравнение которых $x = A_0 r^2$, и рассчитаны их аэродинамические характеристики. Для установления точности расчетов параметров течения вычислены значения энтропии за этими скачками уплотнения. Относительные погрешности их изменения вдоль линии тока составляли сотые доли процента. Для определения влияния шага на параметры течения были выполнены расчеты с $N = 40, 60$ и 100 с точностью до производных первого и второго порядков. Максимальные различия параметров течения, вычисленные с точностью до производных второго

порядка с $N = 40$ и 60 , составляли 9%, а при $N = 60$ и $100 \sim 3\%$. Эти же параметры, вычисленные при $N = 100$ с точностью до производных первого и второго порядков, различались на $\sim 2\%$. Для сравнения были определены аэродинамические характеристики несущих тел, построенных на течениях за плоскими скачками уплотнения. Сравнения выполнялись при одинаковом объеме W , длине b и угле раскрытия Λ . Сначала проводилось вычисление нижней поверхности тела за осесимметричным скачком уплотнения, затем при заданной длине и известной верхней поверхности находился объем тела. По известным длине, углу раскрытия, объему тела и числу Маха определялся угол наклона плоского скачка уплотнения, на котором строилось эквивалентное по длине и объему тело. Расчеты проводились при $N = 100$ с точностью до производных второго порядка.

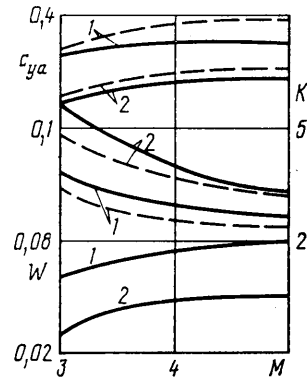
На фиг. 2, 3 приведены зависимости коэф-



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3

коэффициента подъемной силы, аэродинамического качества и объема волнолетов от A_0 для различных значений x_0 (сплошные линии — аэродинамические характеристики волнолетов с параболическими скачками, штриховые — с плоскими скачками) (фиг. 2, $M=4$, $\Lambda=90^\circ$; 1 — $x_0=0,7$; 2 — 1,0) и числа Маха набегающего потока (фиг. 3, $x_0=0,85$, $\Lambda=90^\circ$; 1 — $A_0=0,6$; 2 — 1,0).

Аэродинамическое качество волнолетов с параболическими скачками больше, чем у волнолетов с плоскими скачками уплотнения, однако коэффициент подъемной силы выше у волнолетов с плоскими скачками уплотнения. С увеличением A_0 коэффициент подъемной силы и объем несущих тел уменьшаются (уменьшается наклон скачка уплотнения и, следовательно, толщина несущих тел), а аэродинамическое качество растет. По мере увеличения x_0 кривые $C_{ya}=f(A_0)$, $W=f(A_0)$ снижаются, а $K=f(A_0)$ возрастает (по той же причине). С уменьшением числа Маха коэффициент подъемной силы и объем снижаются, а аэродинамическое качество растет, так как для данной формы ударной волны с уменьшением M_∞ несущее тело становится тоньше.

ЛИТЕРАТУРА

1. Майкапар Г. И. Сравнение волнолетов различной формы // Уч. зап. ЦАГИ. 1985. Т. 16, № 4. С. 100–104.
2. Любимов А. Н., Русанов В. В. Течение газа около тупых тел. Ч. 1. М.: Наука, 1970. 287 с.

Москва

Поступила в редакцию
30.X.1987