

что с уменьшением высоты процесс установления равновесной температуры происходит значительно быстрее; на графиках можно проследить также влияние угла атаки на процесс установления равновесной температуры.

Поступила 17 VIII 1961

ЛИТЕРАТУРА

1. Stalder J. R. and Jukoff D. Heat Transfer to Bodies Travelling at High Speed in the Upper Atmosphere, 1949, NASA Report 944. (Русс. пер. ВРТ, 1952, № 5).
2. Stalder J. R., Goodwin G. and Greager M. O. A comparison of Theory and Experiment for High Speed Free Molecule Flow, 1951, NASA Report 1032. (Русс. пер. Механика, 1954, № 3).
3. Пащенко Н. Т. Обтекание колеблющейся поверхности потоком сильно разреженного газа. ПММ, 1959, т. 23, вып. 4.
4. Кочин Н. Е., Кибель И. А., Розе Н. В. Теоретическая гидромеханика. М., ГИТТЛ, 1948, т. II.
5. Krzywoblocki M. Z. On Some Problems in Free Molecule-Slip Flow Regimes, Acta Physica Austriaca, 1955, Band 9, Heft 3—4.
6. Физические свойства поносферы на высотах от 90 до 300 км. Проблемы современной физики, 1957, № 10.
7. Ракетные исследования верхней атмосферы. ВРТ, 1956, № 5.

О ПОДЪЕМНОЙ СИЛЕ ПРИ ГИПЕРЗВУКОВЫХ СКОРОСТЯХ

В. С. Галкин, А. А. Гладков (Москва)

Обращается внимание на то, что подъемная сила широкого класса (клин, конус и т. п.) тел при гиперзвуковых скоростях и любом значении числа Кнудсена может быть отрицательной при любом угле атаки α в интервале $0 < \alpha \leq \pi / 2$. Для наглядности рассмотрим простейший случай: обтекание клина с углом полураствора δ свободно-молекулярным потоком, скорость которого $V \gg c$, т. е. $S = V / c \gg 1$, где c — наиболее вероятная тепловая скорость налетающих на тело молекул. При этом тепловыми скоростями налетающих молекул можно пренебречь и считать, что они двигаются параллельно одна другой с одинаковой скоростью V . Тогда при наличии диффузного отражения весь импульс налетающих молекул тратится на силу сопротивления тела, а подъемная сила создается импульсом отраженных молекул, сила реакции которого направлена по внутренней нормали к элементу поверхности тела.

Пусть сила сопротивления тела направлена по оси x , параллельной V , подъемная сила — по оси y , получающейся поворотом вектора V против часовой стрелки на угол $\pi / 2$, угол атаки есть угол между осью x и осью симметрии клина.

Подъемная сила нижней поверхности клина

$$Y_+ \approx \sin 2(\delta + \alpha)$$

Подъемная сила верхней поверхности клина

$$Y_- \approx \sin 2(\alpha - \delta) \text{ при } \delta > \alpha, \quad Y_- = 0 \text{ при } \delta \leq \alpha$$

Иначе, подъемная сила клина

$$Y \approx \sin 2\alpha \cos 2\delta \text{ при } \delta > \alpha, \quad Y \approx \sin 2(\delta + \alpha) \text{ при } \delta \leq \alpha$$

Отсюда следует, что $Y \leq 0$ при $\delta \geq \pi / 4$ для любого угла атаки, $Y \leq 0$ при $\delta < \pi / 4$ для $\alpha \geq \pi / 2 - \delta$ ($\alpha \geq \delta$).

В последнем случае аэродинамические силы действуют только на нижнюю поверхность. Если $\alpha \geq \pi / 2 - \delta$, то ее угол атаки больше или равен $\pi / 2$, проекция силы реакции импульса отраженных молекул на ось y отрицательна или равна нулю. Можно показать, что в случае кругового конуса $Y \leq 0$ при любом угле атаки, если $\sin \delta \geq 1 / \sqrt{3}$. Полученный вывод легко объяснить. Если угол атаки клина или конуса $\alpha \approx \pi / 2$, то всегда $Y < 0$.

Рассмотрим случай произвольного угла атаки. Увеличим δ до $\delta = \pi / 2$. Сила реакции импульса отраженных молекул будет направлена по внутренней нормали к полученной пластине, причем угол между этой нормалью и осью y больше $\pi / 2$. Следовательно, проекция силы реакции импульса отраженных молекул на ось y отрицательная. Из соображений непрерывности следует, что при $\delta < \pi / 2$ имеет место некоторый диапазон значений δ , когда $Y < 0$.

Исследуем теперь случай $S \ll 1$. Потoki импульса ко всем элементам поверхности приблизительно одинаковы, а сила, действующая на элемент поверхности, направлена почти перпендикулярно к нему. Так как проекция единичного вектора нормали к верхней поверхности клина на ось y больше, чем соответствующая проекция в случае нижней поверхности, то при любом угле атаки бесконечного клина давление на верхнюю поверхность клина больше, чем на нижнюю, т. е. $Y < 0$.

Суммируя полученные выводы, приходим к заключению, что при любом S есть значения δ больше некоторого $\delta = \varphi$, при которых подъемная сила бесконечного клина отрицательна. При $S > 2$, когда донным давлением можно пренебречь, этот вывод переносится на реальный случай клина конечной длины.

Очевидно, что этот вывод справедлив для широкого класса тел. Исключением будут тела типа цилиндра и пластины под углом атаки, у которых всегда $Y \geq 0$.

В общем случае значения тех геометрических параметров тел, при которых $Y < 0$, зависит от формы тела, величины S и коэффициентов аккомодации и отражения.

В зависимости от формы тела и перечисленных величин коэффициенты сопротивления тел рассматриваемого класса могут либо возрастать вместе с углом атаки, либо убывать.

В случае гиперзвуковых скоростей полученные выводы особенно отчетливо проявляются при больших значениях отношения температуры отраженных молекул T_r к температуре невозмущенного потока T . На фигуре приведены поляры конусов для случая, когда $T_r / T = S^2 / 5$ и $S \gg 1$. Кружками отмечены соответствующие значения аэродинамических коэффициентов при $\alpha = 0, 20, 40, 70, 90^\circ$. Отражение предполагалось чисто диффузным.

Легко показать, что полученный вывод о существовании класса тел, подъемная сила которых отрицательна при любом угле атаки в диапазоне $0 < \alpha \leq \pi / 2$, справедлив и для случая обтекания тел гиперзвуковым потоком сплошной среды, когда распределение давления по телу можно рассчитывать по теории Ньютона. Действительно, рассмотрим простейший случай: обтекание клина гиперзвуковым невязким потоком. Тогда

$$Y_+ \approx \sin(\delta + \alpha) \sin 2(\delta + \alpha), \quad Y_- \approx \sin(\alpha - \delta) \sin 2(\delta - \alpha) \quad \text{при } \delta > \alpha$$

$$Y_- = 0 \quad \text{при } \delta \leq \alpha, \quad Y < 0, \quad \text{если } \alpha \approx \pi / 2$$

$$Y \leq 0 \quad \text{при } \delta \leq \alpha, \quad \text{если } \alpha + \delta \geq \pi / 2$$

Когда угол атаки мал, то из приведенных формул следует, что

$$Y \approx \alpha \sin \delta (2 - 3 \sin^2 \delta) \quad \text{при } \delta > \alpha$$

Учитывая эти оценки, можно показать, что $Y \leq 0$ в интервале $0 \leq \alpha \leq \pi / 2$, когда $\sin \delta \geq \sqrt{2/3}$. Очевидно, что вывод об отрицательности подъемной силы рассматриваемого класса тел справедлив для зеркального отражения в свободномолекулярном потоке и вообще для любого типа отражения.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что при любых значениях числа Кнудсена подъемная сила широкого класса (клин, конус и т. п.) тел в гиперзвуковом потоке отрицательна при любых значениях угла атаки в интервале $0 < \alpha \leq \pi / 2$.

Поступила 11 VII 1961

