

УДК 533.69.048 : 533.6.011.8

О ВЛИЯНИИ СОСТАВА ГАЗА НА АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕЛ В СВОБОДНОМОЛЕКУЛЯРНОМ ПОТОКЕ

Л. А. ВАСИЛЬЕВ, Н. А. ФИЛИППОВА

(Москва)

В работе показано, что молекулярный состав газа может существенно влиять на аэродинамические характеристики. Этот вывод подтверждается оценкой погрешности, возникающей при использовании среднего молекулярного веса при расчете аэродинамических характеристик пластины на высотах 200–800 км.

В свободномолекулярном режиме обтекания аэродинамическое воздействие многокомпонентного газового потока на тело складывается из действия отдельных компонент. Интегральные аэродинамические коэффициенты сил и моментов могут быть выражены в виде

$$(1) \quad C = \sum_i \rho_i C_i / \sum_i \rho_i$$

где C — интегральный аэродинамический коэффициент, ρ_i — плотность i -й компоненты газового потока, C_i — аэродинамический коэффициент, соответствующий i -й компоненте.

Хотя состав газа бывает различным для разных условий обтекания, при определении аэродинамических характеристик тел в свободномолекулярном потоке обычно пользуются либо одним и тем же значением каждого аэродинамического коэффициента, либо суммарной плотностью и средним молекулярным весом газа

$$(2) \quad C_* = C(m_*), \quad m_* = \sum_i m_i \rho_i / \sum_i \rho_i$$

где m_* — средний молекулярный вес газа, m_i — молекулярный вес i -й компоненты.

В настоящее время в связи с возросшими требованиями к точности определения аэродинамических характеристик и увеличением объема информации о параметрах верхней атмосферы и механизме взаимодействия атомных частиц с поверхностью летательного аппарата возникла необходимость вернуться к поставленному в [1] вопросу о влиянии газового состава на определение аэродинамических коэффициентов и о величине погрешности, которая может быть допущена при использовании аэродинамических характеристик, определенных по среднему молекулярному весу или без учета изменения состава газа и различия свойств материала поверхности тела.

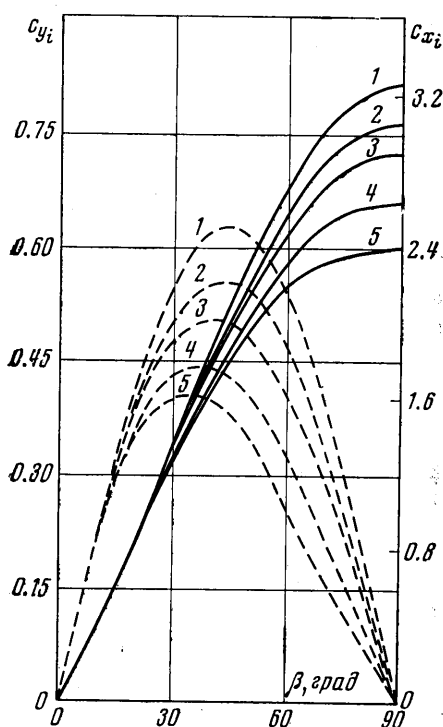
Исследуем влияние состава газа на аэродинамические характеристики пластины, что позволит оценить влияние состава на аэродинамические характеристики выпуклых и слабо невыпуклых тел.

Отражение молекул от поверхности будем считать диффузным. Примем также для коэффициента аккомодации энергии a зависимость от угла падения частиц $\pi/2 - \beta$ и величины отношения масс набегающей частицы и атома материала поверхности μ , предложенную в [2]

$$(3) \quad a = 3.6\mu \sin \beta (1 + \mu)^{-2}.$$

При расчете аэродинамических коэффициентов силы сопротивления и подъемной силы пластины (C_{x_i} , C_{y_i}) число Маха принимается равным бесконечности. Как показали оценки, это предположение, так же как и выбор условной схемы отражения частиц от поверхности, не влияет существенно на сделанные в работе выводы.

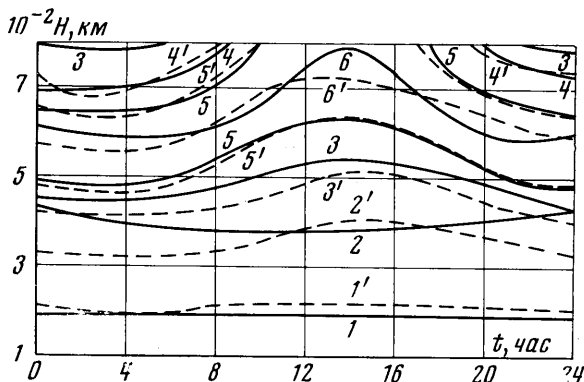
График зависимости C_{x_i} и C_{y_i} от величины β для разных значений μ дан на фиг. 1. Пунктирными линиями нанесены кривые C_{y_i} . Кривые 1, ..., 5 соответствуют $\mu = 0, 0.1, 0.2, 0.4, 1$. Видно, что при $0 \leq \beta \leq 45^\circ$ различие в материале поверхности и составе



Фиг. 1

на погрешности κ_{C_x} находилась при $\beta=90^\circ$, а κ_{C_y} (пунктирные линии на фиг. 2) — при $\beta=45^\circ$.

Кривые 1, ..., 6 соответствуют $\kappa_{C_x} = -0.01, 0, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04$, а 1', ..., 6' — $\kappa_{C_y} = -0.05, 0, 0.03, 0.05, 0.01, 0.15$.



Фиг. 2

Газовый состав верхней атмосферы брался по международной стандартной модели атмосферы CIRA-65 [3], в которой обобщены сведения о газовой оболочке Земли на высотах более 30 км.

Видно, что погрешность максимальна на высотах 600–700 км и достигает 4% для C_x и 15% для C_y .

Таким образом, если необходимо, чтобы погрешность определения аэродинамических характеристик была меньше величины, приведенной на фиг. 2, то надо исполь-

газа практически не сказывается на коэффициенте сопротивления.

При $45^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$ коэффициент сопротивления существенно зависит от μ . Особенно велико влияние величины μ , если она значительно отличается от единицы. При изменении μ от 0 до 1 C_x изменяется примерно на 30%.

Еще сильнее влияет μ на величину C_y . При максимальных значениях C_y отклонения могут достигать 50%, а при больших β относительное изменение C_y становится еще более значительным.

Таким образом, молекулярный состав газа необходимо учитывать практически во всех случаях. Исключением могут быть лишь случаи сравнительно больших плотностей газового потока, когда на поверхности имеется значительный адсорбированный слой, который сглаживает влияние материала поверхности и приближает величину коэффициента аккомодации к единице.

Для анализа возможности расчета с использованием среднего значения молекулярного веса газа рассмотрим фиг. 2, на которой представлены значения относительных погрешностей C_x и C_y , рассчитанных по (2), в зависимости от высоты полета H и времени суток t

$$(4) \quad \kappa = (C_* - C) / C_*$$

Расчет погрешностей коэффициентов сопротивления и подъемной силы κ_{C_x} , κ_{C_y} проведен для алюминиевой пластины, свободной от адсорбированного слоя. Величи-

зовать вместо расчета по формулам (2) более точную методику, основанную на использовании (1). На практике форма исследуемого тела, как правило, достаточно сложна. Местный угол атаки и материал поверхности различны для разных участков тела. В этом случае оценку погрешности можно с достаточной степенью точности провести, используя приближенные сведения о доле поверхности, находящейся под определенным углом атаки и пользуясь номограммами, подобными проведенным на фиг. 1, 2. При этом выводы о применении той или иной методики расчета остаются справедливыми.

Поступила 17 XI 1972.

ЛИТЕРАТУРА

1. Галкин В. С. Об учете молекулярного состава воздуха при расчетах коэффициентов аэродинамических сил и температуры тела в свободномолекулярном потоке при больших сверхзвуковых скоростях. Инж. ж., 1961, т. 1, № 1, стр. 175, 176.
2. Goodman F. O. Three-dimensional hard spheres theory of scattering of gas atoms from a solid surface. 1. Limit of large incident speed. Surface Sci., 1967, vol. 7, No. 3, pp. 391–421.
3. CIRA 1965, COSPAR international reference atmosphere 1965. Amsterdam, North-Holland Publ. Co., 1965.

УДК 533.7

ТЕЧЕНИЕ ГАЗА И ТЕРМОМОЛЕКУЛЯРНАЯ РАЗНОСТЬ ДАВЛЕНИЙ В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ

С. Г. СКАЖУН, П. Е. СУЕТИН, В. Г. ЧЕРНЯК

(Свердловск)

В подавляющем большинстве теоретических работ, посвященных движению разреженного газа в каналах при произвольных числах Кнудсена, анализ течения проводится на основе решения модельного уравнения Бхатнагара, Гросса и Крукса (модель БГК). При переходе к сплошной среде эта модель дает неправильное число Прандтля, т. е. не пригодна для корректного описания явлений, обусловленных неоднородностью давления и температуры [1]. К последним относится эффект термомолекулярной разности давлений. Анализ этого эффекта может быть проведен на основе решения других модельных уравнений, процедуры построения которых предложены в [2–4].

В настоящей работе использованы модель БГК и простейшая из статистических моделей, обеспечивающих правильное значение числа Прандтля, — эллипсоидальная модель [3]. Следует отметить, что решения конкретных задач кинетической теории газов для различных моделей представляют интерес в аспекте исследования сходимости процедур построения этих моделей.

В соответствии с задачами статья состоит из трех частей. В первой части рассматривается изотермическое течение Пуазейля, во второй — изобарное течение под действием градиента температуры и в третьей — эффект термомолекулярной разности давлений при произвольных числах Кнудсена. Задачи решаются методом Бубнова — Галеркина [5] и путь решения достаточно подробно описан для эллипсоидальной модели. Для модели БГК приведены лишь окончательные результаты.

Теоретические результаты для изотермического течения и термомолекулярной разности давлений сопоставляются с экспериментальными данными в широком диапазоне чисел Кнудсена, а также с теоретическими результатами других авторов.

Газ, находящийся между бесконечными параллельными плоскостями $x = \pm 1/2$, возмущен малыми градиентами температуры и давления, направленными вдоль оси z . Тогда функцию распределения f молекул по скоростям можно представить в лиnearизованном виде

$$(0.1) \quad f = f_0(z) [1 + h(c, x)], \quad f_0 = n(z) \left[\frac{m}{2\pi kT(z)} \right]^{3/2} \exp \left(-\frac{mv^2}{2kT(z)} \right)$$

где x, z и c_x, c_y, c_z — безразмерные координаты и компоненты молекулярной скорости, n, T — плотность и температура газа, m — масса молекул, k — постоянная Больцмана, h — функция возмущения.