

УДК 533.6.048:629.783

**Оценка характера взаимодействия  
свободномолекулярного потока газа со спутником  
по экспериментальным данным**

**В. А. Шабохин**

Державне конструкторське бюро «Південне», Дніпропетровськ

Надійшла до редакції 05.02.98

Запропоновано схему взаємодії вільномолекулярного потоку газу з поверхнею космічного апарата та алгоритм визначення аеродинамічних характеристик тіл.

В настоящей статье предложена схема взаимодействия свободномолекулярного потока с поверхностью космического аппарата, которую условно можно назвать «кислородной», произведено сравнение теоретических и опытных данных и получены аналитические выражения для расчета аэродинамических характеристик тел.

В работе [4] приведены результаты экспериментального определения значений коэффициента аэродинамического сопротивления, полученные по торможению для 3132 измерений орбит спутников с высотой перигея 180—300 км и значений эксцентриситета 0—0.11. Обнаружено, что значения коэффициентов аэродинамического сопротивления спутников, близких к сфере, коррелируют с показателем доли атомарного кислорода, взаимодействующего с поверхностью КА.

Анализ различных моделей атмосферы показал, что характер изменения доли компонентов атмосферы с высотой и значением индекса солнечной активности в этих моделях одинаков: с увеличением высоты доля молекулярного азота и кислорода уменьшается, доля гелия увеличивается, а доля атомарного кислорода сначала увеличивается, а затем уменьшается. При этом на высотах 200—800 км в зависимости от индекса солнечной активности  $F_{10.7}$  (экзосферной температуры) атомарный кислород является основным компонентом атмос-

феры. Для примера на рис. 1 приведено изменение доли атомарного кислорода с высотой для моделей атмосферы CIRA-65 (сплошные линии) и CIRA-72 (штриховые линии). Видно, что в рассматриваемом диапазоне высот полета КА преобладающим является атомарный кислород (для исследуемого массива опытных значений  $C_x$  математическое ожидание

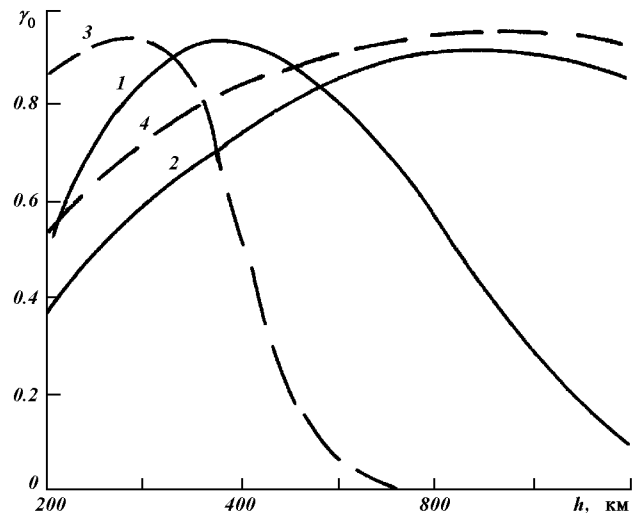


Рис. 1. Изменение доли атомарного кислорода с высотой в рамках моделей CIRA-65 (кривая 1 — при  $F_{10.7} = 65$ , 2 — при  $F_{10.7} = 250$ ) и CIRA-72 (3 —  $T_{\infty} = 500$  К, 4 —  $T_{\infty} = 1800$  К)

индекса солнечной активности  $F_{10.7} = 130.7 \pm 31.9$ ).

В ряде работ по исследованию взаимодействия атомарного кислорода с различными поверхностями (кварц, нержавеющая сталь, тефлон, золото, титан) при давлении  $10^{-7}$  тор обнаружено, что он химически адсорбируется почти на каждой известной поверхности (см., например [5]). Поэтому можно предположить, что доля диффузно отраженных молекул пропорциональна доле атомарного кислорода, падающего на поверхность. С другой стороны, из работ [1, 2, 4] следует, что при малых местных углах атаки  $\beta$  имеет место зеркальное отражение молекул, а при  $\beta = 90^\circ$  почти все молекулы отражаются диффузно. Поэтому можно предположить, что доля диффузно отраженных молекул пропорциональна доле атомарного кислорода и синусу угла атаки  $\beta$ . Запишем это предположение в виде:

$$\sigma = \gamma_0 \sin \beta, \quad (1)$$

где  $\gamma_0$  — доля атомарного кислорода.

Учитывая вариации состава атмосферы вдоль орбиты, а также наличие гетерогенных процессов с формированием хемосорбированного слоя кислорода на поверхности, в первом приближении целесообразно использовать значение  $\gamma_0$ , определенное за виток. Тем самым будет косвенно учитываться процесс образования адсорбционного слоя.

Вторым важным параметром взаимодействия свободномолекулярного потока с поверхностью является коэффициент аккомодации энергии  $\alpha_{ак}$  для адсорбированных молекул. Экспериментальных данных по определению коэффициента аккомодации для атомарного (молекулярного) кислорода нет. Поэтому произведем качественную оценку значений  $\alpha_{ак}$  на основе экспериментальных данных.

В процессе взаимодействия атомарного кислорода с поверхностью происходит образование адсорбционного слоя. Как показано в работе [5], заполнение адсорбционного слоя пропорционально числу атомов, падающих в единицу времени на единицу поверхности. Чем больше атомов кислорода падает на поверхность, тем больше вероятность заполнения адсорбционного слоя атомами кислорода как при физической, так и при химической адсорбции. После образования первого слоя происходит образование второго и третьего слоев. Первые два слоя могут адсорбироваться в виде атомов, но десорбироваться в виде молекул. Так как поверхность покрыта адсорбционным слоем, имеет неровности, то газовая частица может отражаться не после единственного столкновения, а после некоторой задержки на поверхности. Поэтому можно предположить, что коэффициент  $\alpha_{ак}$  в первом приближении про-

порционален доле атомарного кислорода

$$\alpha_{ак} = \gamma_0. \quad (2)$$

Для определения коэффициентов нормальной  $P_n$  и касательной  $P_\tau$  сил, действующих на площадку, воспользуемся соотношениями [3]:

$$P_n = 2(2 - \sigma) \sin^2 \beta + \sigma \sqrt{\pi/2} \sqrt{1 - \alpha_{ак}} \sin \beta, \\ P_\tau = 2\sigma \sin \beta \cos \beta, \quad (3)$$

где  $\sigma$  — доля диффузно отраженных молекул;  $\beta$  — угол между вектором скорости набегающего потока и поверхностью элементарной площадки.

При этом принимались общепринятые допущения, что скорость спутника значительно больше тепловой скорости потока.

Интегрируя выражения (3) согласно [3], получим формулу для определения  $C_x$  сферы для диффузной схемы взаимодействия при  $\sigma = 1$ :

$$C_x = 2 + \sqrt{2\pi/9} \sqrt{1 - \alpha_{ак}}. \quad (4)$$

График зависимости  $C_x$  для сферы, полученный с использованием (4) для различных значений  $\alpha_{ак}$ , представлен на рис. 2 (кривая 1). Здесь же приведены экспериментальные значения  $C_x$  для сферы (треугольники), полученные для  $h_{\min} = 180$ — $210$  км и различных значений среднеинтегральной за виток доли атомарного кислорода  $\gamma_0$ . Расчет  $\gamma_0$  проводился по данным модели атмосферы CIRA-65 на основании математических ожиданий значений

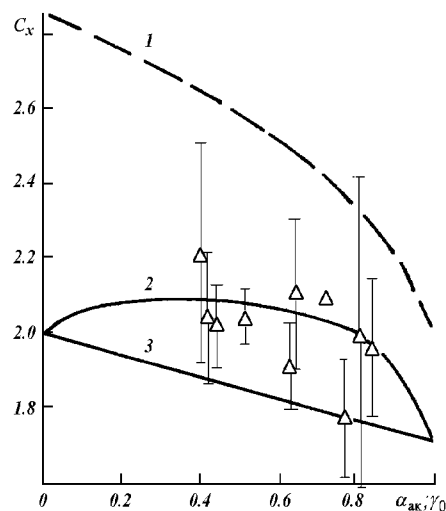


Рис. 2. Зависимость коэффициента  $C_x$  сферы от коэффициента аккомодации (доли атомарного кислорода): треугольники — экспериментальные величины генеральных средних значений  $C_x$  с доверительной вероятностью 0.95; кривая 1 — расчет по диффузной схеме; 2 — согласно (6); 3 — согласно (7)

гео- и гелиофизических факторов общей выборки. Опытные значения  $C_x$  лежат значительно ниже кривой 1.

Выражения (3) с учетом (1) имеют вид

$$P_n = 4\sin^2\beta - 2\gamma_0\sin^3\beta + \gamma_0\sqrt{\pi/2}\sqrt{1 - \alpha_{ак}}\sin^2\beta,$$

$$P_\tau = 2\gamma_0\sin^2\beta\cos\beta. \quad (5)$$

Интегрируя (5), получим для сферы

$$C_x = 2 - 0.27\gamma_0 + \gamma_0\sqrt{\pi/8}\sqrt{1 - \alpha_{ак}}. \quad (6)$$

Эта зависимость с учетом (2) представлена на рис. 2 (кривая 2).

Предельный случай можно получить, полагая в формуле (6)  $\alpha_{ак} = 1$ .

В этом случае

$$C_x = 2 - 0.27\gamma_0. \quad (7)$$

График изменения  $C_x = f(\gamma_0)$  согласно (7) приведен на рис. 2 (кривая 3).

На рис. 3 показаны зависимости опытных и расчетных значений коэффициента  $C_x$  для сферы от высоты апогея. Как видно из графика, большинство экспериментальных данных лежит между кривыми (3) и (4).

Расчет  $C_x$  согласно (6) удовлетворительно согласуется с большей частью опытных данных  $C_x$ .

Таким образом, предложенная «кислородная» схема взаимодействия, основанная на преобладании химически активного атомарного кислорода на рассмотренных высотах полета спутников и характере его взаимодействия с поверхностью КА, удовлетворительно описывает имеющиеся экспериментальные данные.

Необходимо отметить также, что, по-видимому, значения коэффициентов нормальной  $P_n$  и кас-

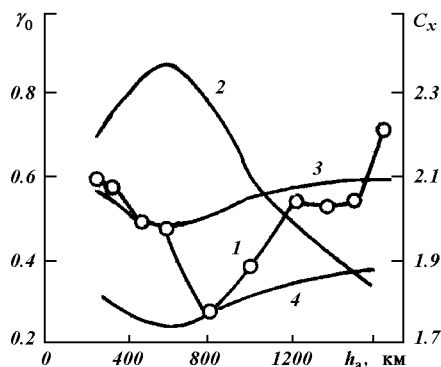


Рис. 3. Значения коэффициента  $C_x$  для сферы: 1 — экспериментальные данные при  $h_n = 180-210$  км; 2 — расчетные значения доли атомарного кислорода для  $h_n = 200$  км; 3 — расчет  $C_x$  согласно (6); 4 — расчет  $C_x$  согласно (7)

ательной  $P_\tau$  сил, действующих на площадку, при движении КА вдоль орбиты изменяются вследствие изменения состава набегающего потока, особенно для орбит с большим эксцентриситетом. Это должно приводить и к изменению аэродинамических сил, действующих на КА при движении по витку. В то же время для круговых орбит характер взаимодействия потока с поверхностью для высот с преобладанием атомарного кислорода будет отличаться от изложенного для эллиптических орбит. Но и для круговых орбит можно воспользоваться предложенными соотношениями, поскольку экспериментальные данные  $C_x$  для малых эксцентриситетов орбит хорошо согласуются с рассчитанными по формуле (6).

Ниже приведены выражения для определения аэродинамических характеристик тел простой формы для принятой «кислородной» схемы взаимодействия.

**Плоская пластина.** Используя формулы (5) для  $P_n$  и  $P_\tau$  (см. рис. 4, 5), после интегрирования получим

$$C_x = 4\sin^3\beta - 2\gamma_0\sin^4\beta + \gamma_0\sin^3\beta\sqrt{(\pi/2)(1 - \alpha_{ак})} + 2\gamma_0\sin^2\beta\cos^2\beta,$$

$$C_y = 4\sin^2\beta\cos\beta - 4\gamma_0\sin^3\beta\cos\beta + \gamma_0\sin^3\beta\cos\beta\sqrt{(\pi/2)(1 - \alpha_{ак})}, \quad (8)$$

При  $\alpha_{ак} = 1$  выражения (8) имеют вид

$$C_x = 4\sin^3\beta + 2\gamma_0\sin^2\beta\cos^2\beta,$$

$$C_y = 4\sin^2\beta\cos\beta(1 - \gamma_0\sin\beta).$$

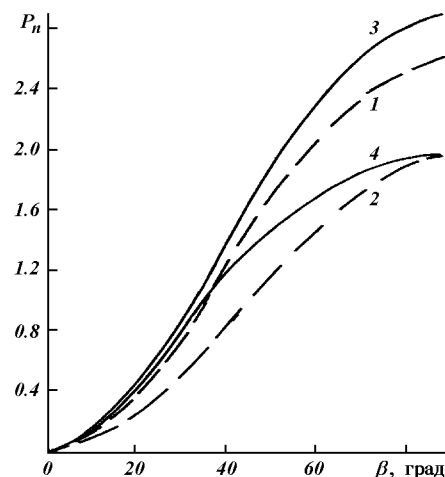


Рис. 4. Зависимость коэффициента  $P_n$  пластины от угла атаки: согласно диффузной схеме при  $\sigma = 1$  (кривая 1 — для  $\alpha_{ак} = 0.8$ , 2 —  $\alpha_{ак} = 1$ ) и согласно «кислородной» схемы (3 —  $\alpha_{ак} = \gamma_0 = 0.8$ , 4 —  $\alpha_{ак} = \gamma_0 = 1$ )

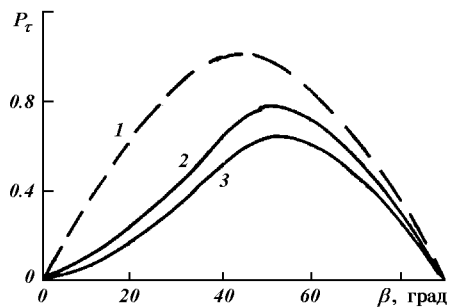


Рис. 5. Зависимость коэффициента  $P_\tau$  от угла атаки: 1 — диффузная схема при  $\sigma_\tau = 1$ ,  $\alpha_{ак} = 1$ ; 2, 3 — «кислородная» схема при  $\gamma_0 = 1$  и 0.8 соответственно

#### Круговой цилиндр.

$$C_n = 2.67 \sin^3 \beta + \sqrt{2\pi/9} \gamma_0 \sqrt{1 - \alpha_{ак}} \sin^2 \beta - \frac{\pi}{4} \gamma_0 \sin^3 \beta;$$

$$C_\tau = \frac{\pi}{2} \gamma_0 \sin^2 \beta \cos \beta;$$

$$C_x = 2.67 \sin^3 \beta + \sqrt{2\pi/9} \sqrt{1 - \alpha_{ак}} \sin^3 \beta + \frac{\pi}{4} \gamma_0 \sin^2 \beta (2 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta);$$

$$C_y = 2.67 \sin^2 \beta \cos \beta + \gamma_0 \sqrt{2\pi/9} \sqrt{1 - \alpha_{ак}} \sin^2 \beta \cos \beta - \frac{\pi}{4} \gamma_0 \sin^3 \beta \cos \beta.$$

При  $\alpha_{ак} = 1$

$$C_n = 2.67 \sin^2 \beta - \frac{\pi}{4} \gamma_0 \sin^3 \beta;$$

$$C_\tau = \frac{\pi}{2} \gamma_0 \sin^2 \beta \cos \beta;$$

$$C_x = 2.67 \sin^3 \beta + \frac{\pi}{4} \gamma_0 \sin^2 \beta (2 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta);$$

$$C_y = 2.67 \sin^2 \beta \cos \beta - \frac{\pi}{4} \gamma_0 \sin^3 \beta \cos \beta.$$

Сравнение показывает, что значение  $C_x$ , вычисленное в рамках «кислородной» модели, меньше вычисленных по диффузной схеме, причем с увеличением  $\gamma_0$  и угла атаки  $\beta$  эта разность уменьшается. Значение  $C_x$  цилиндра для случая поперечного

обтекания ( $\beta = 90^\circ$ ) равно

$$C_x = 2.67 + \sqrt{2\pi/9} \gamma_0 \sqrt{1 - \alpha_{ак}} - \frac{\pi}{4} \gamma_0.$$

**Конус.** Выражение для расчета аэродинамического сопротивления с углом полураствора  $\alpha$  на угле атаки  $\beta = 0$  имеет вид

$$C_x = 2 \sin^2 \alpha \operatorname{tg} \alpha (2\pi + \gamma_0 \sqrt{\pi^3/8} \sqrt{1 - \alpha_{ак}}) + 2\pi \gamma_0 \sin \alpha \operatorname{tg} \alpha (\cos^2 \beta - \sin^2 \beta).$$

Расчеты  $C_x$  конуса, проведенные по «кислородной» и диффузной схеме при одинаковых значениях  $\gamma_0$  и  $\alpha_{ак}$ , близки друг к другу.

Не вызывает сомнения, что реальные процессы, происходящие на поверхности в разреженном газе, гораздо сложнее.

Вместе с тем предложенная теоретическая модель косвенно учитывает структуру набегающего потока и удовлетворительно описывает характер изменения имеющих опытных данных, согласуется с экспериментальными данными других авторов и может быть полезна для дальнейших исследований.

1. Баранцев Р. Г. Новые результаты аналитической теории взаимодействия газов с поверхностями // Динамика разреженного газа: Тр. VI Всесоюз. конф. — Новосибирск, 1980.—Кн. 1.—С. 104—114.
2. Варакин Г. К., Фарафонов В. Г. Аэродинамические характеристики элемента поверхности, обтекаемой высокоскоростным свободномолекулярным потоком // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа.—1975.—№ 4.—С. 181—184.
3. Ковтуненко В. М., Камеко В. Ф., Яскевич Э. П. Аэродинамика орбитальных космических аппаратов. — Киев.: Наук. думка, 1977.—156 с.
4. Шабохин В. А. Экспериментальные результаты определения аэродинамических характеристик спутников в свободномолекулярном потоке газа // Косміч. наука і технологія.—1998.—4, № 1.—С. 68—70.
5. Riley J., Giesse C. F. Interaction of atomic oxygen with various surface // J. Chem. Phys.—1970.—53.—P. 146.

#### ASSESSING THE INTERACTION BETWEEN FREE-MOLECULE GAS FLOW AND A SATELLITE FROM EXPERIMENTAL DATA

V. A. Shabokhin

A model is proposed for the interaction between free-molecule gas flow and the surface of a spacecraft. The model can be used for determining aerodynamic body characteristics.