

УДК 533.6.011.8

ИЗМЕРЕНИЕ ПОТОКА ИМПУЛЬСА ОТРАЖЕННЫХ МОЛЕКУЛ ОТ ПОВЕРХНОСТИ ЗАДАННОЙ ШЕРОХОВАТОСТИ ПРИ СВОБОДНОМОЛЕКУЛЯРНОМ ОБТЕКАНИИ

НИКИФОРОВ А. П.

Величина силы, переданная твердой поверхности отраженными молекулами при свободномолекулярном обтекании, зависит, во-первых, от механизма взаимодействия молекул с элементом поверхности или, точнее, определяется функцией распределения по скоростям отраженных молекул и, во-вторых, от столкновений молекул с неровностями поверхности, число которых зависит от углов наклона сторон этих неровностей [1]. Таким образом, если известен микрорельеф площадки, помещенной в молекулярный поток, то из измерений силы, действующей на нее, можно извлечь некоторую информацию о характере взаимодействия молекул с элементом поверхности.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование передачи импульса молекулами, отраженными от пластины, в зависимости от степени шероховатости поверхности. Большинство экспериментальных исследований по обмену импульсом и энергией между потоком разреженного газа и поверхностью выполнено с целью выявления качественных особенностей влияния шероховатости на взаимодействие [2-5]. Число работ, где приводятся количественные оценки углов наклона неровностей на испытываемых моделях, крайне ограничено [6-8]. В [6] предложена интегральная мера оценки шероховатости, которая использована в настоящих исследованиях.

1. Методика определения потока импульса отраженных молекул. Поток импульса отраженных молекул извлекается из результатов измерений силы, переданной пластине в свободномолекулярном потоке. Методика аэродинамических испытаний основана на измерениях двух проекций F_n и F_τ действующей на пластину силы в зависимости от угла падения молекул θ и переносимого набегающими молекулами потока импульса F_∞ [9]. В случае параллельно летящих молекул газа составляющие отраженного от поверхности потока импульса равны: по нормали к поверхности $F_{nr} = F_n - F_\infty \cos^2 \theta$, вдоль поверхности $F_{tr} = F_\infty \cos \theta \sin \theta - F_\tau$.

Обработка результатов измерений, полученных автором, показала, что безразмерные соотношения вида

$$\alpha_{nr} = \frac{F_{nr}}{F_\infty \cos \theta}, \quad \alpha_{tr} = \frac{F_{tr}}{F_\infty \cos \theta \sin \theta}, \quad H = \frac{F_n}{F_\tau} \sin \theta - \cos \theta = \frac{F_y}{F_\tau}$$

имеют слабую зависимость от угла падения θ и их целесообразно привлекать в качестве величин, характеризующих силовое воздействие потока газа на поверхность. Только две из трех величин являются независимыми, так как существует связующее их выражение $\alpha_{nr} = (1 - \alpha_{tr})H - \alpha_{tr} \cos \theta$.

Исследования проводились в свободномолекулярном потоке, выделяемом скиммером из гиперзвуковой разреженной струи азота, ускоренного газодинамическим способом [10]. Температура торможения газа достигает ~ 6000 К, давление торможения $5 \cdot 10^4$ Па. Диаметр звукового сопла 1,2 мм, расстояние между соплом и скиммером 50 мм, давление остаточного газа в этом промежутке $\sim 0,3$ Па. Интенсивность молекул в пучке $(\rho/m)v_\infty \sim 10^{21}$ м $^{-2}$ с $^{-1}$.

Средняя скорость направленного движения молекул $v_{\infty}=4 \cdot 10^3$ м/с, скоростное отношение по потоку $S=v_{\infty}/\sqrt{2km^{-1}T_{\infty}}=5,5$ [11]. Давление остаточного газа в камере исследований $\sim 3 \cdot 10^{-3}$ Па, поперечный размер потока на расстоянии 500 мм от сопла ~ 100 мм.

Аэродинамические измерения проводились с помощью электромагнитных весов поплавкового типа [9]. Погрешность измерения сил была не более 1% от максимальной величины сигнала, получаемого с круглой пластины диаметром 50 мм на расстоянии 500 мм от сопла. Достоверность проведенных исследований подтверждается совпадением результатов измерений в нескольких повторных испытаниях.

2. Измерение шероховатости поверхности [8]. В метрологии под шероховатостью поверхности понимается совокупность выступов и впадин реальной поверхности тела, расположенных на базовой площади A_0 или базовой длине l на относительно малых расстояниях друг от друга. Неровности поверхности принято характеризовать шагом s и высотой R_a , а средний угол наклона их сторон γ численно равен $2R_a/s$. Интегральной мерой шероховатости может служить площадь поверхности A с учетом ее неровностей.

Известно несколько способов измерения реальной площади поверхности. Однако в рассматриваемом случае необходим экспериментальный метод, позволяющий чувствовать изменение площади поверхности на уровне микропозадаков размером $\leq 10^{-4}$ мкм². Был выбран один из электрохимических способов измерения, использующий импульсную поляризацию катода. Метод основан на сравнении емкости двойного электрического слоя C , образованного на исследуемом катоде площадью A_0 , с удельной емкостью двойного электрического слоя c_0 , измеренной на поверхности жидкого металла (ртути) в электролите при пропускании импульса тока. По измеренным величинам C , A_0 , c_0 находят значение фактора шероховатости поверхности катода $f=C/(c_0A_0)$.

Катоды изготавливались из химически чистого олова, и их поверхность обрабатывалась разными способами. Производились следующие операции: 1 – оплавление поверхности на воздухе, 2 – облуживание, 3 – полирование, 4 – шлифование, 5 – чистовое точение, 6 – нарезание рисок заданного размера на оплавленную поверхность. Последняя операция была предпринята с целью проверки метода: геометрические размеры поверхности были увеличены приблизительно в 2 раза.

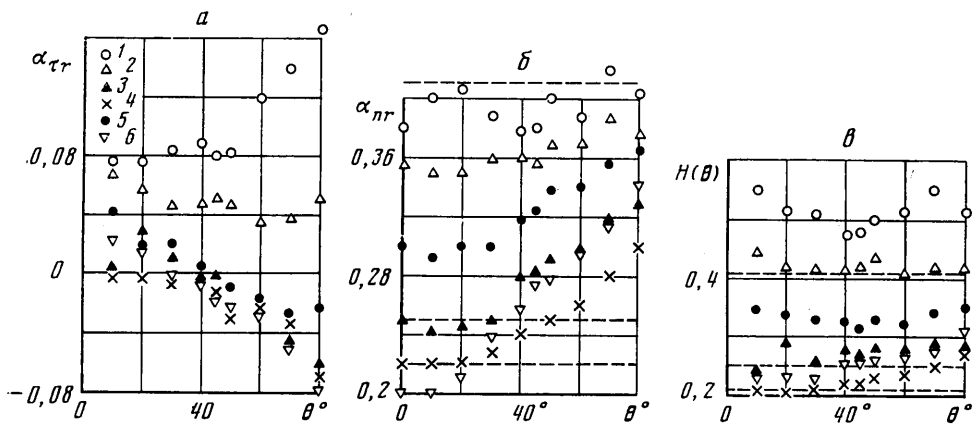
Результаты измерений фактора шероховатости исследуемых поверхностей приведены в таблице. Порядковые номера соответствуют номерам, присвоенным поверх-

№ п. п.	f	R_a , мкм	Класс	№ п. п.	f	R_a , мкм	Класс
1	$1,1 \pm 0,1$	0,25	9	4	$2,0 \pm 0,2$	1,1	7
2	$1,2 \pm 0,1$	0,31	9	5	$1,6 \pm 0,15$	—	—
3	$1,8 \pm 0,2$	0,7	7	6	$2,2 \pm 0,3$	—	—

ностям. Для некоторых образцов указаны измеренные щуповым методом высоты неровностей R_a и им соответствующие классы шероховатости. Видно, что реальная поверхность твердых тел существенно отличается от гладкой поверхности жидкой фазы. Шероховатость поверхности зависит от способа приготовления поверхности, и в данном случае фактор шероховатости f изменяется от 1,1 до 2,2. Эти же образцы поверхности были затем подвергнуты аэродинамическим испытаниям.

3. Полученные результаты. Обработка данных аэродинамических испытаний осуществлялась по изложенной методике. Значения коэффициентов $\alpha_{tr}(\theta)$, $\alpha_{nr}(\theta)$ и $H(\theta)$ для пяти пластин представлены на фиг. 1. Номера, присвоенные экспериментальным точкам, соответствуют номеру испытываемой поверхности. Штриховые линии соответствуют расчету по схеме диффузного отражения с неполной аккомодацией энергии налетающих молекул, задаваемой коэффициентом α_e , который принимает значение 0,558; 0,836; 0,873 сверху вниз. Наблюдаются следующие закономерности. Чем больше развит рельеф поверхности, тем меньше импульс, уносимый отраженными молекулами. Поверхности с малой шероховатостью ($f \leq 1,3$) отражают около 40% падающего потока импульса при всех углах падения пучка. Для более шероховатых поверхностей значения коэффициентов α_{nr} и $(1-\alpha_{tr})$ с увеличением угла падения имеют явно выраженную тенденцию к увеличению. Причем при углах $\theta > 30^\circ$ величины коэффициентов α_{tr} становятся отрицательными, что указывает на преимущественное отражение молекул против газового потока. Этот факт подтверждается изме-

ренными ранее индикатрисами рассеяния [8]. В диапазоне углов θ от 0 до 30° закон отражения от сильно шероховатых поверхностей близок к максвелловской функции распределения молекул по скоростям, так как здесь можно подобрать расчетный коэффициент аккомодации энергии α_e , согласующий экспериментальные данные со схемой диффузного отражения.



Фиг. 1

Характер зависимости коэффициентов α_{nr} и H от степени шероховатости поверхности f для угла падения пучка $\theta=45^\circ$ продемонстрирован на фиг. 2. Результаты эксперимента показывают, что реализованная шероховатость может изменить аэродинамическое сопротивление пластины приблизительно на 10%, а аэродинамическое качество — более чем в 2 раза.

4. О механизме взаимодействия газа с поверхностью. Прежде чем сравнить полученные экспериментальные результаты с известными теоретическими моделями, описывающими взаимодействие газа с шероховатой поверхностью, надо измеряемое значение величины f уметь переводить в средний угол наклона сторон неровностей γ или $\text{tg } \gamma$, используемый при теоретическом моделировании шероховатой поверхности. Обычно при выводе аналитического выражения пользуются теоретико-вероятностным подходом к моделированию шероховатости [12].

Пусть совокупность неровностей на базовой длине подчиняется нормальному и стационарному процессу $z(t)$. Производная от этого процесса совпадает с углом наклона касательной γ_t (или $\text{tg } \gamma_t$) в точке t . Средний угол наклона сторон неровностей равен математическому ожиданию

$$\text{tg } \gamma = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{+\infty} \text{tg } \gamma_t \exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma^2}\right) dz = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sigma \quad (4.1)$$

а искомая средняя длина реализации гауссовского процесса f равна

$$f = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{+\infty} (1+z^2)^{1/2} \exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma^2}\right) dz = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\beta}{\pi}} \times \left[K_0\left(\frac{\beta}{2}\right) + K_1\left(\frac{\beta}{2}\right) \right] \exp\left(\frac{\beta}{2}\right) \quad (4.2)$$

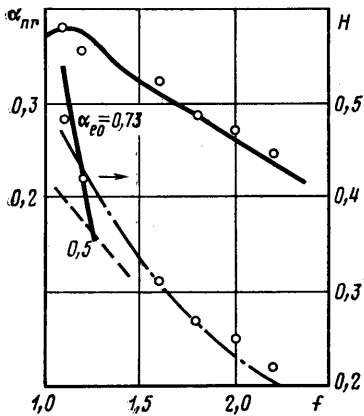
где $\beta=1/2\sigma^2$; $K_0(\beta/2)$ и $K_1(\beta/2)$ — модифицированные функции Бесселя.

$$f=1+0,5\sigma^2-0,125\sigma^4 \quad (4.3)$$

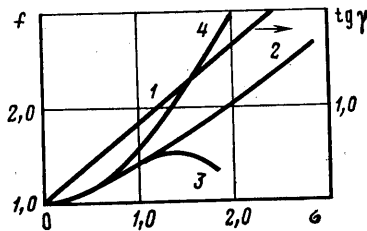
Приближенное выражение, справедливое при $\sigma \leq 1$, имеет вид [6]

Из соотношений (4.1) и (4.2) следует, что средний тангенс угла наклона неровностей $\operatorname{tg} \gamma$ и средняя длина линии профиля f связаны между собой через среднее квадратичное отклонение σ . На фиг. 3 приведены кривые, рассчитанные по формулам (4.1)–(4.3). Кривые 1–3 соответствуют формулам (4.1) (4.2) (4.3), а кривая 4 – формуле (4.3) с точностью до σ^2 .

Теперь найдем соответствие между средним числом столкновений молекул с поверхностью N и фактором шероховатости f . Искомое число было взято из численных расчетов, в которых передача импульса к поверхности описывается с помощью двух схем взаимодействия [1, 13]. В первой схеме предполагается зеркальное отражение молекул в каждом акте столкновения с поверхностью – локально-зеркальное отражение, во второй – локаль-



Фиг. 2



Фиг. 3

но-диффузное отражение. При каждом столкновении с поверхностью молекула теряет часть своей энергии, задаваемую локальным коэффициентом аккомодации энергии α_{e0} в обеих схемах. Когда молекула испытывает N столкновений, то импульс, с которым она отражается, уменьшается в $(1-\alpha_{e0})^{N/2}$ число раз. Кратность столкновений молекул с поверхностью увеличивается с шероховатостью во всем диапазоне углов падения в численных расчетах по схеме диффузного отражения, а по схеме зеркального – при углах падения от 0 до 45° , оставаясь постоянной величиной при $\theta > 45^\circ$. Анализ показал, что результаты численных расчетов допускают линейную аппроксимацию $N=1+b(f-1)$, где $b=0,65$ для диффузного и $b=0,9$ для зеркального отражения, которая была использована при анализе опытных данных на их соответствие теоретическим схемам взаимодействия. На фиг. 2 сплошные и штриховые линии соответственно. Удовлетворительное согласие с экспериментом расчетных значений, полученных в модели зеркального отражения с локальным коэффициентом аккомодации энергии $\alpha_{e0}=0,73$, указывает на преимущественную реализацию такого механизма отражения в опытах с потоками газа, имитирующими полет в верхней атмосфере. По этой модели отражения была построена эмпирическая зависимость $N(f)$

$$N = \frac{0,65(1-\alpha_{e0})^{N/2}}{1-0,65(1-\alpha_{e0})^{N/2}}$$

проходящая через экспериментальные точки (штрихпунктир). Наименьшее значение коэффициента $N=0,15$ получается для абсолютной шероховатой поверхности $f \rightarrow \infty$, при взаимодействии с которой молекулы потока приходят в термодинамическое равновесие с поверхностью и отражаются все в направлении нормали к ней.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ерофеев А. И.* О влиянии шероховатости на взаимодействие потока газа с поверхностью твердого тела.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1967, № 6, с. 82—89.
2. *Abuaf N., Marsden D.-G. H.* Momentum accommodation of Argon in the 0,06 to 5 eV range.— In: Rarefied Gas Dynamics. V. 1. New York — London: Acad. Press, 1967, p. 199—210.
3. *Омелик А. И.* Измерение коэффициентов передачи импульса к поверхностям различной структуры в гиперзвуковом свободномолекулярном потоке.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1977, № 4, с. 176—179.
4. *Steinheil E., Scherber V., Seidl M., Rieger H.* Investigations on the interaction of gases and well-defined solid surfaces with respect to possibilities for reduction of aerodynamic friction and aerothermal heating.— In: Rarefied Gas Dynamics. N. Y.: 1977, Pt 1, p. 589—602.
5. *Жиляев И. Р., Никифоров А. П.* Исследование передачи энергии к материалам покрытий орбитальных космических аппаратов в гиперзвуковом свободномолекулярном потоке.— Теплофизика высоких температур, 1980, т. 18, № 3, с. 650—652.
6. *Вигенберг Ю. Р., Терехов А. Л., Фролова Е. Н.* Микрогеометрия и теплоотдающие свойства поверхностей в разреженных газах.— В кн.: Микрогеометрия в инженерных задачах. Рига: Зинатне, 1973, с. 91—103.
7. *Musanov S. V., Nikiforov A. P., Omelik A. I., Freedlander O. G.* Experimental determination of impulse transfer coefficients in hypersonic free molecular flow and distribution function recovery of reflected molecules.— In: 13th Intern. Symp. Rarefied Gas Dynamics. Novosibirsk, July 5—9, 1982. Book of abstracts. V. 1. Novosibirsk: Inst. Thermophys., 1982, p. 136—137.
8. *Никифоров А. П.* Измерение индикатрис рассеяния от шероховатой поверхности в высокоскоростном молекулярном потоке.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1978, № 5, с. 174—177.
9. *Омелик А. И., Зименков В. И., Жиляев И. Р.* Методика экспериментального определения аэродинамических характеристик тел в гиперзвуковом свободномолекулярном потоке.— Тр. ЦАГИ, 1977, № 1853, с. 22—31.
10. *Баринов И. С., Жестков Б. Е., Омелик А. И., Орлова З. Т.* Аэродинамическая установка со свободномолекулярным потоком и высокой температурой торможения.— Теплофизика высоких температур, 1973, т. 11, № 3, с. 602—608.
11. *Жестков Б. Е., Никифоров А. П., Павлов Э. П.* Определение функции распределения молекул по скоростям в высокоскоростном молекулярном пучке механическим селектором.— Теплофизика высоких температур, 1982, т. 20, № 1, с. 119—124.
12. *Хусу А. П., Вигенберг Ю. Р., Пальмов В. А.* Шероховатость поверхностей. Теорет.-вероятностный подход. М.: Наука, 1975. 343 с.
13. *Smith M. C.* Computer study of gas molecule reflections from rough surfaces.— In: Rarefied Gas Dynamics. V. 2. New York — London: Acad. Press, 1969, p. 1217—1220.

Москва

Поступила в редакцию
25.V.1984