

Из сказанного следует, что в уравнении (1) при больших S форма контура влияет на течение только через $N_1(x)$, что и приводит к (4).

Из сформулированного закона подобия следует, что для любых промежуточных или больших значений S контуры сопел можно получать не решением интегрального уравнения (1), а с помощью пересчета уже найденных контуров.

Поскольку полученные контуры сопел оказались пологими, возникает предположение о возможности их замены соплами с контурами $r = \text{const}$. Примеры такой замены показаны на фиг. 2, где для $S=10$ приведены функции $N(\theta, \varphi)$ модельных потоков из цилиндрических сопел радиусами $r=1.392$ (кривая 5) и $r=1.077$ (кривая 6). Выбранные значения радиусов цилиндрических сопел соответствуют выходному и входному сечениям профилированного сопла, рассчитанного для потока с $S=10$. Из графика видно, что $N(\theta, \varphi)$ в этих случаях заметно отличается от соответствующей функции натурального потока.

Поступила 11 X 1977

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов Ю. Е., Флакман Я. Ш. Создание свободномолекулярного потока, предназначенного для специальных аэродинамических исследований. Изв. АН СССР, МЖГ, 1976, № 4.
2. Полак Э. Численные методы оптимизации. М., «Мир», 1974.

УДК 533.6.011.8

ИЗМЕРЕНИЕ ИНДИКАТРИС РАССЕЙЯНИЯ ОТ ШЕРОХОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ВЫСОКОСКОРОСТНОМ МОЛЕКУЛЯРНОМ ПОТОКЕ

А. П. НИКИФОРОВ

(Москва)

Одной из характеристик, от которой зависит взаимодействие молекул с твердой поверхностью, является ее шероховатость. При теоретическом рассмотрении влияния шероховатости на функцию рассеяния, на обмен импульсом и энергией между потоком газа и поверхностью был выявлен определяющий взаимодействие параметр σ_1 , который характеризует средний тангенс угла наклона сторон неровностей поверхности [1, 2]. Экспериментальные исследования в потоках с тепловыми скоростями молекул, проведенные с контролем шероховатости электронно-микроскопическим методом, подтверждают теоретический вывод о зависимости взаимодействия от параметра σ_1 [3]. Однако результаты опытов в высокоскоростных молекулярных потоках указывают на более слабое влияние шероховатости [4, 5]. Сведения о параметре σ_1 испытываемых поверхностей отсутствуют.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование влияния неровностей реальной поверхности на индикатрисы рассеяния в высокоскоростном свободномолекулярном потоке.

1. Известно, что площадь поверхности является интегральной характеристикой шероховатости и включает в себя дифференциальный параметр σ_1 [3]. Поэтому будем оценивать шероховатость поверхности величиной, являющейся отношением реальной площади поверхности к ее геометрической.

Для измерения реальной площади поверхности выбран электрохимический метод [6].

При погружении металлического электрода в электролит на границе раздела двух фаз, соответствующей реальной поверхности, образуется электрический слой в результате перехода заряженных частиц из одной проводящей фазы в другую. Структура двойного электрического слоя соответствует структуре плоского конденсатора, обкладки которого с размером сторон неровностей $\sim 10^{-3}$ мкм находятся на расстоянии радиуса гидратированного иона $\sim 10^{-4}$ мкм. Емкость двойного слоя с молекулярной чувствительностью реагирует на изменение площади поверхности металла, смачиваемой электролитом. Доказано, что в электролитах, не обладающих поверхностно-активными свойствами, емкость двойного слоя, приходящаяся на еди-

ницу поверхности, не зависит от рода химически чистого металла. При этом удельная емкость в концентрированных электролитах является функцией только потенциала электрода, зависимость от которого для абсолютно гладкого электрода (ртути) известна [6]. Таким образом, электрохимический метод позволяет определить реальную площадь поверхности с максимально возможным разрешением путем измерения емкости двойного электрического слоя: $s=c/c_0$, где c_0 — удельная емкость двойного слоя, c — емкость двойного слоя на исследуемой поверхности. Для измерения этой емкости применена методика и техника, описанная в [7]. Геометрическая площадь поверхности определяется с помощью обычных приборов для измерения линейных размеров.

Материал	Способ обработки	s / s_0	Источник
Олово	Оплавление на воздухе	1.2	Данные автора
Олово	Полирование	1.7	» »
Олово	Точение чистовое	2.4	» »
Ртуть	—	1	[6]
Висмут	Оплавление в H_2	1.05	[7]
Никель	Шлифование	9.7	[8]
Никель	Прокатка	3.5	[8]

В таблице приведены результаты измерений реальной площади поверхности s , отнесенной к их геометрической площади s_0 , для оловянной пластины, поверхность которой приготовлена разными способами. Для сравнения в таблице помещено несколько данных, взятых из других работ [6-8]. Видно, что любая механическая обработка металла увеличивает шероховатость поверхности в несколько раз по сравнению с гладкой.

2. Методика измерения индикатрис рассеяния в высокоскоростном свободномолекулярном потоке заключается в следующем. Из свободномолекулярной струи с помощью диафрагмы вырезается узкий пучок. Модель устанавливается после диафрагмы под углом β к падающему пучку. Рассеянный от поверхности поток молекул регистрируется детектором, который перемещается по радиусу r с центром в точке рассеяния. Площадь входного отверстия детектора A_d выбирается из условия $A_d \ll r$. Нетрудно видеть, что для данной геометрии эксперимента индикатриса рассеяния как функция распределения потока отраженных молекул по направлениям (θ, φ) представляется выражением $f(\theta, \varphi) = j_d r^2 / j_\infty A_\infty$, где j_d — поток молекул в направлении (θ, φ) , j_∞ — падающий поток, A_∞ — площадь отверстия диафрагмы.

Можно показать на примере максвелловского распределения, что методическая погрешность измерений индикатрис рассеяния, связанная с конечными размерами рассеивающей поверхности $A_\infty / \cos \beta$ и радиуса r , имеет порядок $\sqrt{A_\infty} / r \cos \beta$.

Эксперимент проводился на установке со свободномолекулярным потоком азота [9]. Основные параметры потока: скорость 4 км/сек, поток молекул $j_\infty = 2 \cdot 10^{17}$ см⁻² · сек⁻¹. Давление остаточного газа в рабочей камере $5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. Геометрия эксперимента: $A_d = A_\infty = 0.1$ см², $r = 8$ см, $\varphi = 0$, л. Методика и техника измерений потока молекул изложены в [10]. Случайная погрешность измерений $\pm 15\%$. Абсолютная погрешность определения углов β и θ не превышала $\pm 2^\circ$. В качестве моделей использовались пластины из олова чистоты 0.98.

3. Было испытано три модели с различной обработкой поверхности: 1 — оплавление, 2 — полирование, 3 — точение. Результаты измерений шероховатости приведены в таблице. Параметр шероховатости s/s_0 соответственно равен 1.2, 1.7, 2.4.

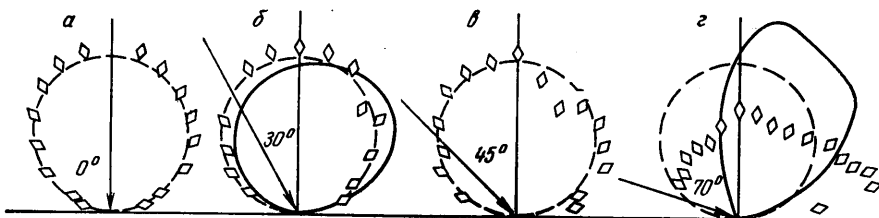
Индикатрисы рассеяния в плоскости падения пучка представлены на фиг. 1-3. Номер фигуры соответствует номеру поверхности. Сплошные линии соответствуют расчету, выполненному для шероховатой поверхности методом статистических испытаний с учетом зависимости коэффициентов обмена энергий и импульсом от угла падения [2]. На фиг. 1 кривые проведены для $\sigma_1 = 0.5$ ($s/s_0 = 1.25$), на фиг. 2, 3 — для $\sigma_1 = 1$ ($s/s_0 = 1.875$). Пунктирная линия соответствует отражению по закону косинуса.

Для слабошероховатой поверхности наблюдается сильная зависимость от угла падения β (фиг. 1). При малых углах падения отражение носит диффузный характер (фиг. 1, а, б). С увеличением угла падения появляется зеркальная компонента (фиг. 1, в), которая при больших углах падения становится преобладающей (фиг. 1, г).

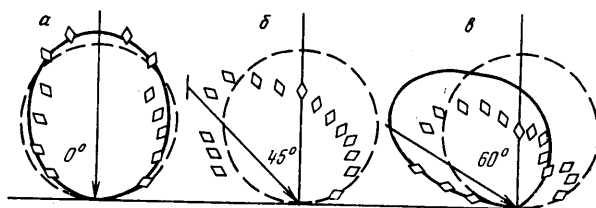
Вид индикатрисы рассеяния существенно меняется при переходе к сильношероховатым поверхностям. Подвергнутые механической обработке поверхности (полирование, точение) преимущественно рассеивают падающий поток в обратном направ-

лении при всех углах падения (фиг. 2, 3). При этом более грубая обработка приводит к увеличению доли частиц, рассеянных в направлении нормали (см. фиг. 2, б и 3, б), и уменьшению числа отраженных частиц по зеркальному лучу (см. фиг. 2, в и 3, в). Проявляется анизотропное расположение неровностей поверхности при обработке точением.

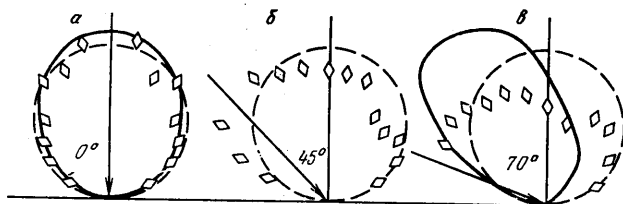
Опытные индикатрисы качественно совпадают с расчетными индикатрисами рассеяния, полученными от поверхностей, неровности которых моделируются случайными наклонами элементарных площадок с нормальным законом распределения, со средним, равным нулю, и дисперсией σ_1^2 .



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3

Таким образом, экспериментально подтверждена определяющая роль параметра σ_1 при взаимодействии высокоскоростного молекулярного потока с шероховатой поверхностью.

В заключение автор выражает благодарность М. Н. Когану за ценные замечания и А. И. Омелику за обсуждение работы.

Поступила 14 XI 1977

ЛИТЕРАТУРА

1. Баранцев Р. Г. Взаимодействие разреженных газов с обтекаемыми поверхностями. М., «Наука», 1975.
2. Ерофеев А. И. О влиянии шероховатости на взаимодействие потока газа с поверхностью твердого тела. Изв. АН СССР, МЖГ, 1968, № 6.
3. Вигенберг Ю. Р., Терехов А. Д., Фролова Е. Н. Микрогеометрия и теплоотдающие свойства поверхностей в разреженных газах. В кн. «Микрогеометрия в инженерных задачах». Рига, «Зинатне», 1973.
4. Alcalay J. A., Knuth E. L. Experimental study of scattering in particle-surface collisions with particle energies of the order of 1tv. Rarefied Gas. Dynam., vol. 1, New York — London, Acad. Press., 1967.

5. Омелик А. И. Измерение коэффициентов передачи импульса к поверхностям различной структуры в гиперзвуковом свободномолекулярном потоке. Изв. АН СССР, МЖГ, 1977, № 4.
6. Фрумкин А. Н., Багодский В. С., Иофа А. З., Кабанов Б. Н. Кинетика электродных процессов. МГУ, 1952.
7. Адсорбция и двойной электрический слой в электрохимии. М., «Наука», 1972.
8. Дэшман С. Научные основы вакуумной техники. М., «Мир», 1964.
9. Баранов 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.
10. Никифоров А. П., Омелик А. И. Дифференциальный измеритель удельного расхода для свободномолекулярных потоков. Тр. ЦАГИ, 1977, вып. 1853.

УДК 534.2

КОЛЕБАНИЯ ГАЗА В ТРУБАХ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПЕРИОДИЧЕСКИ МЕНЯЮЩЕГОСЯ ДАВЛЕНИЯ

Г. Е. ДУМНОВ

(Москва)

В работе рассматриваются колебания газа в трубе под действием периодически меняющегося давления на частоте ее линейного резонанса и разогрев газа возникающими ударными волнами. Задача решается численным методом, имеющим третий порядок точности по координате и по времени. Предложен разностный алгоритм для вычисления параметров на границе. Получены аппроксимационные соотношения, позволяющие определить поведение параметров системы в зависимости от времени.

Колебания газа в полых резонансных трубах имеют сложный характер. Среди многочисленных моделей этого явления можно выделить задачу о колебании газа в резонансной трубе под воздействием периодически меняющегося давления.

Считая газ совершенным и идеальным, пренебрегая двумерностью течения у устья, пограничным слоем внутри резонатора, а также не учитывая влияние вытекающего газа на внешнее течение, можно решать задачу в одномерном приближении, используя одномерные нестационарные уравнения Эйлера

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} = 0$$

$$f = \begin{vmatrix} \rho \\ \rho u \\ l \end{vmatrix}, \quad F = \begin{vmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ (l + p)u \end{vmatrix}, \quad l = \frac{p}{\gamma - 1} + \frac{1}{2} \rho u^2$$

Здесь ρ — плотность, p — давление, l — полная энергия на единицу объема, u — скорость, γ — постоянная адиабаты газа, x — координата, отсчитываемая от закрытого конца резонатора, t — время.

Уравнения дополняются следующими граничными условиями:

1) на закрытом конце резонатора ($x=0$) скорость газа равна нулю ($u=0$) — условие непротекания;

2) на устье резонатора ($x=L$, L — длина трубы) задается периодически меняющееся давление ($p=p_0(1+V_0 \sin(\omega t))$), p_0 — некоторое среднее давление, V_0 — безразмерная амплитуда колебаний, ω — частота).

Представляя решение в виде ряда по степеням амплитуды колебания давления и линеаризуя уравнения Эйлера, в первом приближении получим решение в виде