

О ПРИМЕНЕНИИ ДИФФУЗНОЙ СХЕМЫ ОТРАЖЕНИЯ  
ПРИ ОБТЕКАНИИ ПОВЕРХНОСТИ СВОБОДНОМОЛЕКУЛЯРНЫМ  
ПОТОКОМ СО СКОРОСТЬЮ 10 км/сек

Г. К. ВАРАКИН, В. Г. ФАРАФОНОВ

(Москва)

Экспериментально исследована применимость диффузной схемы отражения для условий, когда скорость бомбардирующих поверхность частиц равна 10 км/сек, а поверхность покрыта адсорбированным слоем. Показано, что применение диффузной схемы оправдано лишь в диапазоне углов падения от  $\theta=0$  до  $\theta \approx 40^\circ$ . При  $\theta > 40^\circ$  диффузная схема является грубым приближением, так как не учитывает вклада рассеянных частиц, которые отражаются квазизеркально и имеют скорость, приближающуюся к скорости падения.

**1. Постановка задачи.** Из экспериментальных и теоретических исследований взаимодействия атомных частиц с поверхностью твердого тела известно, что отраженный поток состоит в общем случае из двух компонент — рассеянной и десорбционной [1, 2].

Рассеянная компонента отраженного потока возникает в результате одного или нескольких последовательных соударений падающих частиц с атомами твердого тела, причем характер соударений почти упругий и близок к бинарному. Поэтому скорость частиц, рассеянных в фиксированном направлении, в значительной мере определяется отношением масс  $\mu = m_1 / m_2$ , где  $m_1$  — масса рассеиваемых частиц,  $m_2$  — масса рассеивающих частиц. Пространственное распределение потока рассеянных частиц (индикатриса отражения) при скользящих углах атаки имеет квазизеркальный характер.

Десорбционная компонента отраженного потока возникает в результате захвата падающих частиц на поверхности и последующей десорбции захваченных частиц. Средняя скорость десорбирующихся частиц — практически постоянная величина, не зависящая от параметров набегающего потока, а индикатриса отражения близка к диффузной (косинусоидальной).

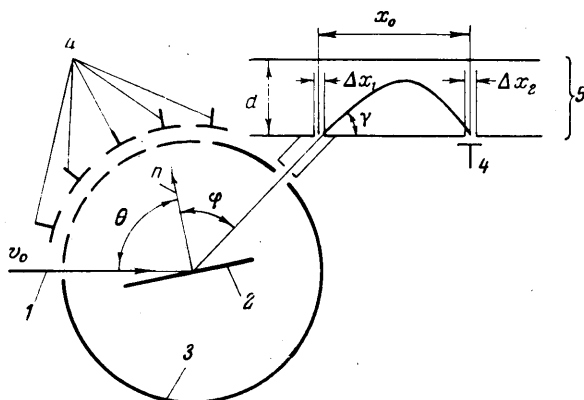
Однако во многих исследованиях двухкомпонентность реального отраженного потока не учитывается и отраженный поток аппроксимируется упрощенными схемами. Например, в [3, 4] при исследовании обтекания поверхности свободномолекулярным потоком со скоростью  $\sim 10$  км/сек применяется диффузная схема отражения с постоянным коэффициентом accommodations энергии. Одним из способов оценки применимости диффузной схемы отражения является оценка соответствующего вклада рассеянной компоненты, так как применение диффузной схемы оправдано при условии, что вклад рассеянной компоненты мал и можно считать, что отраженный поток состоит из одной десорбционной компоненты. Выполнимость этого условия в случае обтекания поверхности свободномолекулярным потоком со скоростью  $\sim 10$  км/сек в настоящее время не исследована.

Следует также отметить, что на поверхности, обтекаемой потоком разреженного газа со скоростью  $\sim 10$  км/сек, образуется адсорбционный слой [5], который в значительной мере экранирует атомы основного материала

поверхности от соударений с бомбардирующими частицами. При наличии адсорбционного слоя можно положить  $m_2 \approx m_1$ , а  $\mu \approx 1$ .

В данной работе исследуется применимость диффузной схемы отражения на основании экспериментального изучения склада рассеянной компоненты отраженного потока для условий, когда скорость бомбардирующих частиц  $10 \text{ км/сек}$ , а поверхность различных материалов покрыта адсорбированным слоем.

**2. Методика исследования.** В качестве бомбардирующих атомных частиц использовались ионы калия. Применение щелочных ионов позволяет



Фиг. 1

получить довольно общие закономерности отражения. Это связано с тем, что при скоростях  $\sim 10 \text{ км/сек}$  отражение атомных частиц от поверхности определяется законами классической механики [1, 2]. Если пространство в окрестности поверхности эквипотенциально, то заряд частиц не входит в уравнения движения и не влияет на закономерности отражения. Кроме этого, применение щелочных ионов значительно упрощает эксперимент по сравнению с нейтральными и заряженными частицами иного сорта, так как малая нейтрализация щелочных ионов на поверхности облегчает регистрацию отраженных частиц;

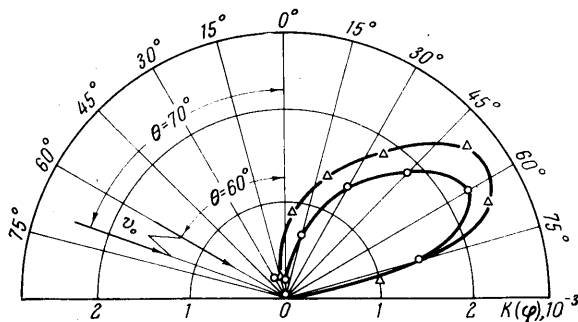
Применяемый в экспериментах ионный пучок имел следующие параметры. В диапазоне скоростей  $7 \div 15 \text{ км/сек}$  разброс частиц по скоростям был меньше 5%, диаметр пучка у мишени не превышал 3 мм, а интенсивность достигала  $10^{11} \div 10^{12} \text{ частиц/см}^2 \cdot \text{сек}$ .

Для моделирования эффекта экранирования основного материала поверхности адсорбированным слоем в экспериментах использовались не прогреваемые мишени. Давление в камере равнялось  $5 \cdot 10^{-6} \text{ мм рт.ст.}$  При таких условиях поверхности мишеней загрязнены окислами, остаточными газами и частицами бомбардирующего пучка. Однако ниже будет показано, что при бомбардировке таких поверхностей ионами калия среднее значение отношения масс  $\langle \mu \rangle \approx 1$ .

Для выяснения физической картины отражения в экспериментах измерялись индикатрисы отражения в плоскости падения, энергии отраженных ионов, общая величина потока отраженных ионов.

Данные об индикатрисах и общем потоке выражены через коэффициент отражения  $K = N / N_0$ , где  $N$  и  $N_0$  — отраженный и падающий потоки ионов. Так как величина потока заряженных частиц пропорциональна току, то коэффициенты отражения определялись из измерений соответствующих токов, причем погрешность  $\Delta K / K \approx 10\%$ .

Принципиальная схема эксперимента приведена на фиг. 1. Пучок 1 падает на мишень 2 со скоростью  $v_0$  под углом  $\theta$ . Угол падения  $\theta$  и угол отражения  $\varphi$  отсчитываются от нормали  $\mathbf{n}$  к поверхности. Мишень 2 окружена цилиндром 3 ( $\varnothing=45$  мм). На боковой поверхности цилиндра 3 через  $15^\circ$  вырезаны щели размером  $1 \times 8$  мм<sup>2</sup>. Ионы, отраженные от мишени в направлениях щелей, пролетают через них, улавливаются коллекторами 4, и соответствующие токи измеряются стандартным усилителем У1-6. Пространство внутри цилиндра эквипотенциально, поэтому траектории



Фиг. 2

ионов не искажаются и зависимость коэффициента отражения от угла  $\varphi$  представляет собой индикатрису отражения в плоскости падения.

Для измерения общего потока отраженных ионов использовалась сфера соответствующих размеров.

Для измерения энергии частиц, отраженных в направлении щелей, вместо коллектора тока 4 устанавливался энергоанализатор 5. Принцип действия анализатора известен [6] и состоит в том, что заряженные частицы, имеющие энергию  $E$  и вошедшие в плоский конденсатор под углом  $\gamma$  к плоскости пластин, смогут пройти через щели  $\Delta x_1$  и  $\Delta x_2$ , разделенные расстоянием  $x_0$ , лишь при определенной величине тормозящего поля в конденсаторе  $V/d$ , где  $V$  — разность потенциалов на обкладках конденсатора, а  $d$  — расстояние между ними. Если  $d=0.3x_0$ , а  $\gamma=45^\circ$ , то связь между неизвестной энергией  $E$  и измеряемой разностью потенциалов имеет простой вид

$$(2.1) \quad E=1.66eV$$

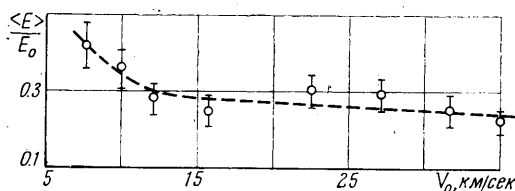
где  $e$  — заряд частицы.

Меняя  $V$ , можно последовательно пропустить через щели  $\Delta x_1$  и  $\Delta x_2$  группы частиц с определенной энергией и измерить, таким образом, спектр энергий. В данной работе при использовании на выходе анализатора усилителя У1-6 для регистрации сигналов погрешность измерений средних энергий отраженных ионов  $\pm 10\%$ .

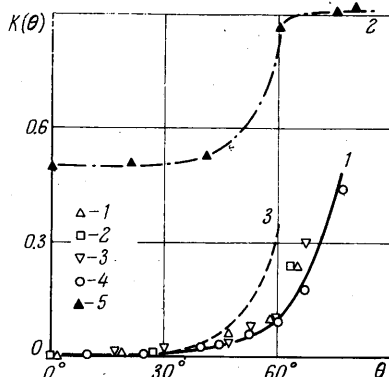
**3. Характерные результаты и их анализ.** На фиг. 2 в полярных координатах представлены индикатрисы отражения, измеренные при бомбардировке загрязненной никелевой мишени ионами калия со скоростью  $v_0=10$  км/сек под скользящими углами атаки  $\theta=60$  (кружочки) и  $70^\circ$  (треугольники). Квазизеркальность индикатрис отражения указывает, что для данных условий эксперимента отраженный поток состоит из рассеянной компоненты.

На фиг. 3 представлены результаты измерений относительной энергии  $\langle E \rangle / E_0$  ионов, рассеянных зеркально ( $\theta=\varphi=60^\circ$ ), в зависимости от скоро-

сти падения ионов калия на загрязненную никелевую мишень. Слабая зависимость относительной энергии  $\langle E \rangle / E_0$  ( $\langle E \rangle$  — средняя энергия рассеянных ионов, а  $E_0$  — энергия падения) от скорости  $v_0$  при значениях скоростей, больших по крайней мере 15 км/сек, свидетельствует о том, что атомные частицы поверхности твердого тела можно рассматривать как



Фиг. 3



Фиг. 4

свободные [1]. Из законов сохранения энергии и импульса известно, что энергия частицы  $E_1$ , рассеянной на угол  $\beta$  в результате однократного упругого соударения со свободной частицей, связана с энергией падения  $E_0$  соотношением

$$(3.1) \quad \frac{E_1}{E_0} = \left[ \frac{\mu}{1+\mu} \left( \cos \beta \pm \sqrt{\frac{1}{\mu^2} - \sin^2 \beta} \right) \right]^2$$

где угол рассеивания  $\beta = [\pi - (\theta + \varphi)]$  отсчитывается от направления падающих частиц. Из соотношения (3.1) при заданном  $\beta$  и измеренных значениях  $E_1$  и  $E_0$  определялось отношение масс  $\mu$ . В экспериментах при  $\beta = 60^\circ$  величина  $E_1 / E_0$  не превышала 0.25. При таком условии отношение масс изменяется от 1 до 1.15. Таким образом при бомбардировке загрязненной никелевой поверхности ионами калия моделировалось взаимодействие с  $\langle \mu \rangle \approx 1$ . Такой же результат был получен при взаимодействии ионов калия с мишенями из вольфрама, алюминия и нержавеющей стали.

На фиг. 4 показана зависимость коэффициента отражения  $K(\theta)$  от угла падения. Кривая 1 выражает характер изменения величины потока ионов калия, отраженных от различных загрязненных поверхностей в зависимости от угла падения при скорости  $v_0 = 10$  км/сек. Коэффициент отражения, представленный кривой 1, а также индикатрисы отражения не зависят в пределах погрешности измерений от атомного веса основного материала мишени в диапазоне от 27 до 184. Этот факт подтверждает постоянство  $\mu$  и свидетельствует о том, что падающие ионы взаимодействуют не с основным материалом мишени, а с поверхностным слоем загрязнений, т. е. в соответствии с поставленной задачей экранирующий эффект адсорбированного слоя также моделируется.

Характер изменения кривой 1 от угла падения  $\theta$  можно объяснить сильным влиянием бинарности соударения. При бинарных соударениях и  $\mu > 1$  падающие частицы не могут рассеяться за пределы мишени в результате однократного соударения, если  $\theta < \theta_c = \pi/2 - \arcsin 1/\mu$ . При  $\theta > \theta_c$  такое рассеяние возможно, что приводит к быстрому росту кривой  $K(\theta)$ . Влияние указанного эффекта бинарности подтверждается сравнением дан-

ных настоящей работы с данными [7]. На фиг. 4 кривая 2 построена по данным [7] и соответствует отражению ионов цезия от чистой молибденовой мишени, так что  $\mu=1.385$ , причем скорость ионов цезия  $8.5 \text{ км/сек}$ .

Таким образом, величина  $\mu$  и скорость падения для кривой 2 близки к соответствующим величинам для кривой 1. Для  $\mu=1.385$  теоретическое значение  $\theta_0 \approx 44^\circ$ , что хорошо согласуется с ходом экспериментальной кривой 2. При  $\theta < 44^\circ$   $K(\theta)$  — практически постоянная величина, но ее значение более чем на порядок превышает соответствующее значение  $K(\theta)$  на кривой 1. Это различие связано с тем, что в [7] отраженный ионный поток состоял не только из рассеянной компоненты, но и из десорбционной. Поэтому, чтобы сравнить кривые 1 и 2, необходимо из значений, соответствующих кривой 2, вычесть вклад десорбционной компоненты. В качестве приближенной оценки коэффициента отражения десорбционной компоненты для кривой 2 принималось значение  $K(\theta)$  при  $\theta < \theta_0 = 44^\circ$ , а коэффициент отражения десорбционной компоненты считался слабо зависящим от угла падения не только при  $\theta < \theta_0$ , но и при  $\theta > \theta_0$  по крайней мере до  $\theta \approx 60^\circ$ . Тогда разность  $[K(\theta) - 0.5]$ , где  $K(\theta)$  — значения кривой 2 на фиг. 4, дает приближенную оценку коэффициента отражения рассеянной компоненты для  $\mu=1.385$  и  $v_0=8.5 \text{ км/сек}$  (кривая 3 на фиг. 4). Как следует из сравнения кривых 1 и 3, имеет место качественное согласие полученных результатов с данными [7]. Точки 1–4 соответствуют вольфраму, алюминию, никелю и нержавеющей стали, точки 5 нанесены по данным [7].

Наличие в отраженном потоке значительного числа однократно рассеянных частиц и формирование рассеянных частиц в квазизеркальную индикатрису позволяет также сделать вывод, что реальная шероховатость исследуемых поверхностей не была существенным фактором, так как в противном случае число однократно рассеянных частиц было бы незначительным, а индикатриса носила бы квазидиффузный характер.

Таким образом, если поверхность с адсорбированным слоем бомбардируется атомными частицами со скоростью  $\sim 10 \text{ км/сек}$  и отношение масс  $\mu=1$ , то для указанных условий применение диффузной схемы отражения оправдано лишь для углов падения  $0 \leq \theta \leq 40^\circ$ , так как для этих углов вкладом рассеянной компоненты можно пренебречь. Однако при  $\theta > 40^\circ$  аппроксимация реального двухкомпонентного отраженного потока с помощью диффузной схемы является грубой, так как при  $\theta > 40^\circ$  вклад рассеянной компоненты возрастает и становится определяющим.

Поступила 17 IV 1973

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Арифов У. А. Взаимодействие атомных частиц с поверхностью твердого тела. М., «Наука», 1968.
2. Goodman O. Review of the theory of the scattering of gas atoms by solid surfaces. *Surface Sci.*, 1971, vol. 26, No. 1.
3. Кинг-Хили Д. Теория орбит искусственных спутников в атмосфере. М., «Мир», 1966.
4. Камеко В. Ф., Альбоха В. П., Ковтуненко В. М., Резниченко Ю. Т., Яскевич Э. П. Плотность верхней атмосферы по торможению ИСЗ серии «Космос». Космические исследования, 1971, т. 9, вып. 3.
5. Мое К. Recent experimental evidence bearing on satellite drag coefficients. *AIAA Journal*, 1968, vol. 6, No. 7. (Рус. перев.: Последние экспериментальные данные по коэффициентам сопротивления искусственных спутников. Ракетная техника и космонавтика, 1968, т. 6, № 7.)
6. Козлов И. Г. Методы энергетического анализа электронных потоков. М., Атомиздат, 1971.
7. Грунич Д. Д., Ермаков Г. Е., Арифов У. А. Исследование вторичной ионной эмиссии с W и Mo в зависимости от угла падения медленных щелочных ионов. В кн. «Взаимодействие газа с поверхностью твердого тела». Новосибирск, Ин-т теорет. и прикл. механ. СО АН СССР, 1971.