

- [2] Горынин И.В., Паршин А.М. // Атомная энергия. 1981. Т. 50. С. 319-324.
- [3] Паршин А.М., Трушин Ю.В. // Письма в ЖТФ. 1983. Т. 9. С. 561-564.
- [4] Орлов А.Н., Паршин А.М., Трушин Ю.В. // ЖТФ. 1983. Т. 53. С. 2367-2372.
- [5] Трушин Ю.В., Орлов А.Н. // ЖТФ. 1986. Т. 56. С. 1302-1310.
- [6] Трушин Ю.В. В кн.: Вопросы теории дефектов в кристаллах. Л.: Наука, 1987. С. 133-144.
- [7] Орлов А.Н., Трушин Ю.В. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. С. 1363-1366.
- [8] Турчин С.И., Альтовский И.В. В кн.: Вопросы атомной науки и техники, серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. Харьков, 1983. В. 4(27). С. 18-21.
- [9] Бакай А.С. // Письма в ЖТФ. 1983. Т. 9. С. 89-93.
- [10] Любов В.Я. Диффузионные процессы в неоднородных твердых телах, М.: Наука, 1981. 295 с.
- [11] Физическое металловедение. / Ред. Р. Кан. П. Хаазен. Т.1-3, М.: Металлургия, 1987.

Физико-технический институт  
им. А.Ф. Иоффе АН СССР,  
Ленинград

Поступило в Редакцию  
10 декабря 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 17, вып. 5

12 марта 1991 г.

05.1

© 1991

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПО СКОРОСТЯМ ВЕЩЕСТВА,  
ЭМИТТИРОВАННОГО В РЕЗУЛЬТАТЕ  
ГИПЕРСКОРОСТНОГО УДАРА

С.И. Анисимов, С.Б. Житенев,  
Н.А. Иногамов, А.Б. Константинов

Последнее время активно изучаются проблемы, связанные с ударом быстролетающих частиц. Это обусловлено как фундаментальностью проблем, так и широким кругом важных приложений, среди которых достаточно упомянуть такие, как пробой высоковольтных промежутков [1-3] вследствие пылевых ударов, ускорение пылевых частиц на линейных ускорителях [4-7], бомбардировку космических объектов микрометеоритами [8-12].

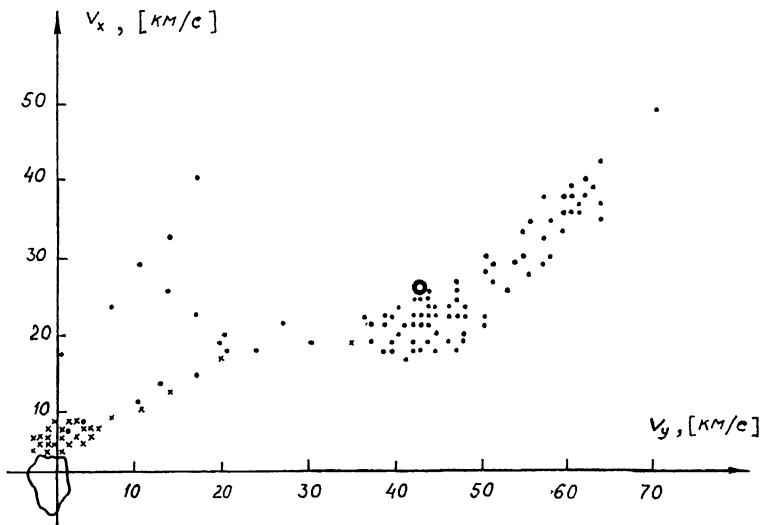


Рис. 1. Распределения  $f_{d,\rho}(\vec{v})$  - точки,  $f_{t,\rho}(\vec{v})$  - крестики. Кругом помечено положение центра масс вещества ударяющей частицы.

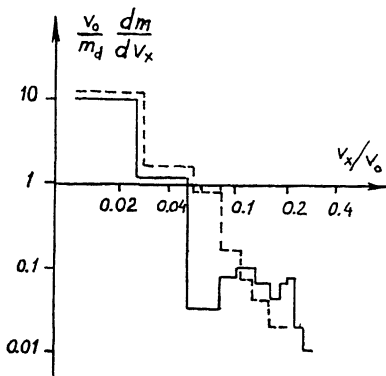
Гиперскоростной удар сопровождается разлетом вещества частицы и мишени. Асимптотические распределения по скоростям можно характеризовать функциями

$$f_{d,\rho}(v_x, v_y) = \frac{\partial^2 m}{m_d \partial v_x \partial v_y}, \quad f_{d,\alpha}(v_r, v_z) = \frac{\partial^2 m}{2\pi m_d v_r \partial v_r \partial v_z}, \quad (1)$$

где  $m_d$  - масса частицы, и аналогичными выражениями для функций распределения вещества мишени  $f_{t,\rho}$  и  $f_{t,\alpha}$ . Индексы  $d$  и  $t$  относятся к частице и мишени соответственно. Индексы  $\rho$  и  $\alpha$  - соответственно к случаям с плоской и осевой симметриями. Нормальные и тангенциальные к поверхности мишени координаты суть  $x, y$  и  $z, r$  в случаях с плоской и осевой симметриями соответственно.

Типичные распределения, полученные в результате численных расчетов, показаны на рис. 1. Расчет выполнен в случае, когда угол  $\alpha$  между вектором  $\vec{v}_0$  и поверхностью мишени составлял  $30^\circ$ , а отношение  $\mu = \rho_d / \rho_t$  (где  $\rho_d, \rho_t$  - начальные плотности веществ) равнялось 0.11. Рассматривалась частица квадратного сечения. Распределения показаны на момент  $t = 10 t_0$ . Сравнение распределений на моменты времени  $t_1 = 10 t_0$  и  $t_2 = 30 t_0$  показывает, что к  $t_1$  вещество, находящееся снаружи от области медленных движений, обозначенной контуром на рис. 1, достигает асимптотического распределения скоростей. Зоны сгущения маркеров соответствуют областям повышенной плотности. Одна

Рис. 2. Примеры распределений  $\varphi_x(v_x)$ : 1 - сплошная линия -  $\mu = 0.37$ , 2 - штриховая -  $\mu = 0.11$ ;  $\alpha = 30^\circ$ .



„точка“ содержит массу  $10^{-2} m_d$ , „крестик“ -  $4 \cdot 10^{-2} m_d$ . Внутри контура содержится столько много „крестиков“, что они сливаются в одно сплошное пятно.

В этой области содержится масса в  $170 m_d$ . Данный расчет проводился с двучленным уравнением состояния (УРС) типа Мн-Грюнайзена. Скорость  $v_0 = 80$  км/с. Рассматривался удар по алюминиевой мишени ударника из пористого алюминия. Расчет проводился по известному методу „частиц в ячейках“. Использовались сетки  $70 \times 70$ , на ударяющую частицу приходился участок  $10 \times 10$  ячеек сетки. Использовалось до 50000 частиц. Выполнялось до 3000 шагов по времени.

Распределения вещества по нормальной компоненте скорости даются функциями  $\varphi$ , имеющими вид:

$$\varphi_{d,p}(v_x, t) = \frac{dm}{m_d dv_x} = \int_{-\infty}^{+\infty} f(v_x, v_y, t) dv_y, \quad \varphi(v_x) = \varphi(v_x, t = \infty),$$

$$\varphi_{d,\alpha}(v_z, t) = \frac{dm}{m_d dv_z} = \int_{-\infty}^{+\infty} 2\pi v_r f(v_r, v_z, t) dv_r. \quad (2)$$

Аналогичным образом определены и распределения  $\varphi_z$ . Результаты расчетов представлены на рис. 2 в виде ступенчатых распределений.

Анализ результатов обнаруживает следующее. Распределение  $\varphi$ , а следовательно и  $f$ , складываются из трех участков. На высокоскоростном участке вещество разлетается со скоростями  $v \sim v_0$ . Здесь содержится вещество частицы и масса  $\sim m_d$  вещества мишени. Имеет место примерно автомоделный степенной участок  $c_s/v_0 \ll v/v_0 \ll 1$ , появляющийся при больших значениях параметра  $v_0/c_s$ , где  $c_s$  - скорость звука в мишени. Также существует и участок неавтомодельного, низкоскоростного выброса. Здесь вещество летит со скоростями  $\sim c_s$ . Этот участок ответствен за основной вклад в импульс отдачи и особенно в полную выброшенную массу.

Изучим зависимость скоростей разлета от параметров  $\mu$  и  $d$ . Значительный интерес представляют средние характеристики скоростей разлета. Для вещества ударяющей частицы вычислялись следующие величины:

$$\langle v_x \rangle = \frac{1}{m_d} \iint \rho_d(x, y, t) v_x dx dy, \quad \langle v_z \rangle = \frac{2\pi}{m_d} \iint \rho_d(x, z, t) v_x r dr dz,$$

$$\langle \Delta v_x \rangle = \sqrt{\langle (v_x - \langle v_x \rangle)^2 \rangle}$$

и аналогичные выражения для  $\langle \Delta v_z \rangle$ . Результаты расчетов приведены в таблице.

Расчеты были ограничены случаем  $\mu < 1$ . При этом характерные скорости разлета вещества частицы  $v_{hd}$  больше характерных скоростей разлета вещества мишени  $v_{ht}$ . При фиксированном значении  $\alpha$  функция  $v_{hd}$  убывающая, а  $v_{ht}$  — возрастающая функции параметра  $\mu$ . Такое поведение функций обусловлено увеличением передачи энергии в мишень с ростом  $\mu$ . Последнее подтверждается сравнением распределений 1 и 2 на рис. 2. Распределение 2, соответствующее меньшему значению  $\mu$ , имеет менее интенсивный хвост высокоскоростного распределения  $\varphi_t$ .

$\alpha \backslash \mu$	0.037	0.11	0.37
60°		23 16	12 19
45°		25 11	
30°	32 15	27 12	14 4

Асимптотические значения скоростей  $\langle v_x \rangle$  (верхние числа в клетках таблицы) и  $\sqrt{\langle (v_x - \langle v_x \rangle)^2 \rangle}$  для факела из вещества пылинки в зависимости от  $\mu$  и  $\alpha$ . Средние берутся по массе пылинки, см. текст. Скорости в км/с.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Месяц Г.А., Проскуровский Д.И. Импульсный электрический разряд в вакууме. Новосибирск: Наука, 1984. 256 с.
- [2] Сливков И.Н. Процессы при высоком напряжении в вакууме. М.: Энергоатомиздат, 1986. 256 с.
- [3] Латам Р. Вакуумная изоляция установок высокого напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1985. 187 с.
- [4] Акишин А.И., Кирюхин В.П., Новиков Л.С., Сливков И.Н. // ЖТФ, 1984, Т. 54, № 1. С. 179-181.
- [5] Slattery J.C., Friichtenicht J.F., Hansen D.O. // J. Spacecraft. 1966. V. 11. P. 1665-1668.

- [6] F e c h t i g H., G r u n e E., K i s s e l J.  
In: Cosmic Dust, ed. by J.A.M. Mc. Donnell, N.Y.,  
J. Wiley, 1978. 480 p.
- [7] K n a b e W., K f u e g e r F.R. // Z. Natur-  
forsch. 1982. V. 37a. P. 1335-1340.
- [8] K i s s e l J., S a g d e e v R.Z., B e r t a -  
u x J.L. et al. // Nature. 1986. V. 321. N 6067.  
P. 280-282.
- [9] А н и с и м о в С.И., Б у ш м а н А.В., К а н е л ь Г.И.  
и др. // Письма в ЖЭТФ. 1984. Т. 39. № 1. С. 9-12.
- [10] А н и с и м о в С.И., Д е м и д о в Б.А., Р у д а -  
к о в Л.И. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1985. Т. 41. В. 11.  
С. 455-457.
- [11] А г у р е й к и н В.А., А н и с и м о в С.И., Б у ш -  
м а н А.В. и др. // Теплофиз. высоких темп. 1984. Т. 22.  
№ 5. С. 964-983.
- [12] А н и с и м о в С.И., К а р я к и н В.П., К у д р я -  
ш о в В.А., О с и п ь я н Ю.А. и др. // Письма в ЖЭТФ.  
Т. 44. № 10. С. 477-480.

Поступило в Редакцию  
21 января 1991 г.

Письма в ЖТФ, том 17, вып. 5

12 марта 1991 г.

05.1; 11

© 1991

## АНОМАЛЬНОЕ НАКОПЛЕНИЕ ВОДОРОДА В РАСПЫЛЯЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОГО ТЕЛА

А.А. К о с я ч к о в, В.Т. Ч е р е п и н,  
С.М. Ч и ч к а н ь

Распыление многокомпонентных материалов ускоренными ионами приводит к изменению концентрации элементов в поверхности по сравнению с объемной концентрацией. Согласно общепринятым представлениям [1], поверхность должна обедняться компонентной, атомы которой обладают меньшей массой и меньшей энергией связи с поверхностью. Это положение является, по-видимому, справедливым и для твердых растворов, в частности, твердых растворов водорода в металлах. Можно ожидать, что поверхностная концентрация водорода - самого легкого из элементов должна уменьшаться в процессе ионной бомбардировки, тем более, что энергия связи атомов водорода с поверхностью металлов [2] меньше энергии