

УДК 523.6

## Концепция применения искусственных облачных образований в космических исследованиях.

В.А. Афанасьев, Г.М. Чудецкий

### Аннотация

Проведен анализ экспериментальных данных по моделированию метеоритного удара с целью использования их для определения взаимодействия частиц искусственных облачных образований с космическими телами. В результате получены эмпирические соотношения, которые рекомендуется использовать при расчетах воздействия на астероиды высокоскоростных частиц.

### Ключевые слова

кратер; ударно-взрывное воздействие; высокоскоростной удар;

### Введение

Ранее, в работе [1] было предложено воздействовать на космические тела, например астероиды, частицами искусственных облачных образований, которые создавались на их орбитах. Основная цель такого воздействия – изучение явлений, связанных с высокоскоростными ударами, в реальных космических условиях. Для предварительной количественной оценки такого взаимодействия использовалась ударно-взрывная аналогия, согласно которой высокоскоростной удар частицы, движущейся со скоростью, большей скорости звука в теле, подобен взрыву. В этом случае принимается, что если величина кинетической энергии частицы равна энергии (мощности) заряда, то диаметр кратера в теле можно определить согласно соотношению (1):

$$D_t = \frac{E}{W_0} D_0; \quad (1)$$

где  $D_t$  - диаметр кратера в теле после удара частицы;  $D_0$  – диаметр кратера в таком же теле, образованный зарядом мощностью  $W_0$ ;

$E$  – кинетическая энергия частицы.

При этом кинетическая энергия частиц массой  $m$  рассчитывается по уравнению (2):

$$E = \frac{1}{2} m u^2 \quad (2)$$

где  $u$  – скорость частицы относительно тела.

В случае встречного удара имеем:

$$u = u_p + u_t; \quad (3)$$

где  $u_p$  - скорость частицы;  $u_t$  - скорость космического тела.

При “догоняющем” ударе - соответственно:

$$u = u_t - u_p; \quad (4)$$

Следует отметить, что применение ударно-взрывной аналогии к случаю высокоскоростного удара весьма ограничено. Можно лишь с определенной осторожностью рассчитать размеры кратера в космическом теле после удара, но нельзя определить передаваемый телу механический импульс и выбрасываемую массу вещества тела при ударе. Отсутствие этих данных не позволяет использовать ударно-взрывную аналогию для количественных оценок взаимодействия частиц искусственных облачных образований с космическими телами в требуемом объеме.

Поэтому, целью данной работы является получение функциональных зависимостей, определяющих основные параметры взаимодействия частиц с космическими телами при высокоскоростном ударе.

#### 1. Обзор работ по экспериментальным исследованиям высокоскоростного удара.

Были рассмотрены результаты работ, где проводились эксперименты по удару частиц со скоростями 10-35 км/с применительно к моделированию метеоритного удара.[2-10] Частицы имели различную форму (шар, цилиндр) и были сделаны из материалов разной плотности. Модели, по которым наносился удар, изготавливались из металлов различной плотности. Исследовались также удары по образцам из горных пород, в том числе покрытых слоем базальтовой пыли разной толщины.

Основная цель испытаний заключалась в установлении соотношений между параметрами кратера и ударника в зависимости от скорости удара и отношения плотностей

частицы и модели. В результате были рекомендованы расчетные зависимости для определения глубины и диаметра кратера от плотности и скорости ударника.

Важный вывод был сделан в работе [2], что: “картина пробоя совсем не похожа на точечный поверхностный взрыв, а процесс взаимодействия ударника с преградой, в целом носит характер проникания”. Этот вывод подтверждает тот факт, что ударно-взрывная аналогия при расчетах высокоскоростного удара может использоваться с большой долей осторожности. К сожалению, методы оценки параметров кратеров не дают информации о разрушении горных пород.

В работе [9], где исследовался высокоскоростной удар по горным породам, была выполнена проверка предположения, что масса раздробленного и выброшенного материала из кратера пропорциональна кинетической энергии ударника  $E$ :  $M \sim E/\mathcal{E}$ , где  $\mathcal{E}$  – величина, характеризующая прочность материала горной породы. Результаты опытов представлялись в виде зависимостей  $M/M_1 = f(u_0^2/u_1^2)$ , где  $M_1$  – масса породы, выброшенной из кратера при скорости ударника  $u_1$  отнесен к единице массы ударника,  $M$  – то же при скорости  $u_0$ . Хотя в опытах наблюдалась зависимость выброшенной массы материала от кинетической энергии ударника, но получить обобщающие данные для всех видов испытанных горных пород не удалось.

В работе [8], где исследовался удар стальных частиц по моделям из базальта, покрытых базальтовой пылью, было установлено, что на поверхности образцов не образуется кратер, если произведение толщины слоя пыли на её плотность приблизительно равно произведению глубины кратера в незащищенном образце на его плотность.

В ряде работ на основе экспериментальных данных были предложены эмпирические соотношения, которые предлагалось использовать для различных условий соударений.

Так в работе [3] такое соотношение имело вид:

$$\frac{p}{d_p} = 2,28 \left( \frac{\rho_p}{\rho_t} \right)^{2/3} * \left( \frac{u \cos \theta}{C_o} \right)^{2/3}; \quad (5)$$

где  $p$  - глубина кратера;

$d_p$  - диаметр ударяющей частицы;

$\rho_p$  и  $\rho_t$  плотности ударника и тела;

$u$  – скорость частицы;

$C_o$  – скорость звука в теле;

$\theta$  - угол соударения (отсчитываемый от нормали).

Эту зависимость было рекомендовано использовать применительно к метеоритным ударам.

Были проведены исследования по воздействию высокоскоростных ударов на тела в зависимости от их температуры [10]. Эти эксперименты носили характер качественных оценок. При этом отмечены следующие особенности последствия удара при повышении температуры тела:

- размеры кратера увеличиваются;
- откольные явления сказываются слабее.

Таким образом, подводя итог сделанному обзору экспериментальных работ по высокоскоростному удару применительно к метеоритной проблеме, следует отметить следующее:

- большая часть экспериментов проведена при скоростях соударений не более 10 км/с;
- зависимости для определения параметров кратеров от условий воздействий рекомендованы в основном для ударов по металлам;
- результаты ударов по горным породам дают, как правило, качественную картину разрушения.

## 2. Высокоскоростной удар и кратерообразование.

В настоящее время на основе имеющихся представлений об кратерообразовании рекомендована следующая зависимость, которая дает единую формулу проникания при высокоскоростном ударе [11]:

$$\frac{p}{d} = K \left( \frac{\rho_p}{\rho_t} \right)^{1/3} * \left( \frac{u}{C_o} \right)^{0,58}; \quad (6)$$

где  $p$  - глубина или какой-либо характерный размер кратера;

$d$  – диаметр шара с массой, равной массе ударника;

$\rho_p$  и  $C_o$  плотность материала тела и скорость звука в нем;

$\rho_t$  и  $u$  – плотность ударника и скорость соударения;

$K$  – постоянная, которую необходимо определять из единственного ударного эксперимента.

При этом считается, что коэффициент  $K$  зависит лишь от прочности материала тела.

Формула проникания справедлива при выполнении следующих условий:

- скорость соударения превышает удвоенную скорость звука в теле;
- отношение характерных размеров ударяющей частицы не превосходит трех;
- плотность ударяющей частицы не более чем в 3 раза больше плотности тела.

Для определения коэффициента К в формуле проникания были использованы данные работы [4], где проводились исследования ударов частиц со скоростями 20-30 км/с по металлическим моделям. В таблице 1 приведены параметры ударника и экспериментальные данные по размерам кратера.

Значения коэффициента К, определенные для каждого металла, удовлетворительно согласуются между собой. При этом его значение зависит от прочности и твердости материала, что соответствует процессу ударного взаимодействия.

Таблица 1

Преграда			Ударник			Результаты				
Материал	$\rho_1$ , г/см <sup>3</sup>	$C_0$ , км/с	$d_1$ , мм	$\rho_1$ , г/см <sup>3</sup>	$u$ , км/сек	$d_2$ , мм	$h_2$ , мм	$V_2$ , см <sup>3</sup>	$h_2/d_1$	К
Al	2,7	5,1	5	1	20,6	30	82	41,3	16,4	10,2
-	2,7	5,1	10	0,25	20	33	73	37,5	7,3	7,3
Mg	1,8	4,6	5	1	20	26	82	35,4	16,4	8,4
-	1,8	4,6	5	1	20,6	26	79	32,9	15,8	8,0
-	1,8	4,6	10	0,25	17	33	68	35,1	6,8	6,1
Ti	4,5	4,1	5	1	19,8	18	38	5,2	7,6	5,0
-	4,5	4,1	5	1	17,2	17	29	4,6	5,8	4,2
Fe	7,89	6	5	1	26,6	31	29	11,3	5,8	4,9
-	7,89	6	10	0,25	26	33	28	12,9	2,8	3,8
-	7,89	6	15	0,1	23,8	34	25	13,2	1,7	3,2
-	7,89	6	5	1	24	31	28	12,2	5,6	5,0
-	7,89	6	5	1	24	23	28	9,7	5,6	5,0
-	7,89	6	5	1	19,8	18	21	3,4	4,2	4,2
Wo	19,3	5,1	5	1	21,6	24	20	4,7	4,0	4,6
-	19,3	5,1	10	0,25	20,8	26	19	5,2	1,9	3,6

В таблице 1 представлены также отношения глубины кратера к диаметру ударника, полученные в экспериментах. Эти величины были рассчитаны по уравнению (6). Сравнение показало значительное отличие экспериментальных величин от расчетных.

Было сделано предположение, что это отличие связано с тем, что эмпирическая зависимость (6) была получена для ударов со скоростями 1-4 км/с, а в табл. 1 приведены данные для скоростей порядка 20-26 км/с.

Анализируя данные этой таблицы, следует отметить, что там, в качестве плотности ударника указана плотность так называемого “сгустка” вольфрамовых частиц, который разгонялся в специальном устройстве. Плотность принималась равной 1 г/см<sup>3</sup>, что значительно отличается от плотности вольфрама 19,3 г/см<sup>3</sup>. Поэтому данные опытов, где плотность “сгустка” была принята равной 1 г/см<sup>3</sup> были использованы для определения его условной плотности, которая соответствовала бы параметрам, полученным в эксперименте согласно эмпирической зависимости (5). Проведенные расчеты позволили определить условную скорость “сгустка” равную  $\rho_p - 7,41 \text{ г/см}^3$ .

Задавая эту плотность сгустка, по уравнению (5) были определены значения  $\frac{p}{d_p}$ . В таблице 2 даны для сравнения, рассчитанные и опытные величины этого отношения. Совпадение удовлетворительное.

Таблица 2

Материал модели		Al	Mg	Ti	Fe	Wo
$\frac{p}{d_p}$	расчет по ур. (5)	11,4	16,1	9,2	5,5	3
	Эксперимент раб. [4]	16,4	16	6,8	5,6	4

Поэтому был сделан вывод о возможности использования зависимости (5) полученной для скоростей частиц 1-4 км/с, и для больших значений скоростей (предположительно до 80 км/с). С учетом условной плотности "сгустка" было уточнено значение коэффициента для стали (Fe) в уравнении (6):  $K=2,56$ .

Формула проникания была определена и для удара стального шара со скоростью 7,3 км/с по базальту из опытов работы [11]:

$$\frac{p}{d_p} = 1,37 \left( \frac{\rho_p}{\rho_t} \right)^{1/2} * \left( \frac{u}{C_o} \right)^{0,58}, \quad (7)$$

где  $\rho_t$ - плотность базальта 3 г/см<sup>3</sup>;  $C_o$ - скорость звука в базальте 6 км/с.

В работе [5] были экспериментально получены для скоростей удара 24 км/с по стальным преградам, реактивные импульс и потеря массы преградой. Это уникальный эксперимент, подобного ему нам не известно. Полученные данные позволяют определить важные характеристики высокоскоростного удара:

$M/M_y$  - отношение потери массы преградой к массе ударника (частицы);

$J/J_y$  - отношение реактивного (полного) импульса тела (мишени) к начальному импульсу ударника.

Особенность высокоскоростного удара состоит в том, что значение импульса, переданного мишени, может во много раз превосходить импульс ударника. Это возрастание объясняется тем, что масса выброса материала мишени в сторону, обратную направлению движения ударника существенно больше массы ударника.

В работах [11, 12] показано, что эти отношения изменяются пропорционально отношению скоростей:

$$\frac{M}{M_y} = f(u^2);$$

(8)

$$\frac{J}{J_y} = f(u^{0,9});$$

(9)

В работе [13] приведены зависимости этих отношений для разных скоростей, основываясь на результатах опытов при скоростях удара 20-30 км/с. Эти данные приведены в табл. 3

Таблица 3

Скорость ударника км/с	25	50	75
$M/M_y$	43	172	385
$J/J_y$	3,6	7	10

Следовательно, используя данные опытов по определению реактивного импульса и потери массы преграды при скорости 25 км/с, можно с определенной надежностью прогнозировать величины этих параметров для больших скоростей.

Таким образом рассмотренные результаты экспериментальных работ по высокоскоростному удару и их анализ позволяют рекомендовать указанные выше зависимости (5-8), для расчета основных параметров воздействия одной частицы на металлические и каменные тела.

Для определения же воздействия от множества частиц искусственного облачного образования следует принять концепцию, что эффект воздействия от всех частиц есть сумма их воздействий.

Концепция применения искусственных облачных образований общей массой  $M$ , будет состоять в том, что это воздействие следует рассматривать как сумму воздействий каждой отдельной частицы массой  $m$ .

Такой подход позволит определить общую потерю массы, изменение габаритов космических тел и суммарный реактивный импульс, на них действующий, при высокоскоростных ударах частиц искусственных облачных образований.

#### Библиографический список

1. В. А. Афанасьев, Г. М. Чудецкий, Ю. В. Чудецкий. Исследование комет и астероидов при ударно-взрывном воздействии. // Вестник Московского авиационного института. - 2011, т.18, № 2, с.52-55
2. М. М. Русаков. Опытное моделирование метеоритного удара. ПМТФ, 1966, №4, с. 167-168.
3. Charters A.C. and Summers J. L. (1959) Comments on phenomena of high-speed impact. U.S. Naval Ordnance Laboratory Report NORL, 1238, pp 200-221
4. М. М. Русаков, Б. К. Шайдуллин, Соотношение между параметрами кратера и ударника из опытов по ударам со скоростями до 30 км/с. Космич. исслед.; 17, №1, 172, 1979.
5. М. М. Русаков, М. А. Лебедев, Определение реактивного импульса при опытном моделировании метеоритного удара. Космич. исслед; 6, №4, 634, 1968.
6. М. М. Русаков, М. А. Лебедев, О выделении энергии при моделировании метеоритного удара. Космич. исслед.; 10, №1, 128, 1972.
7. М. М. Русаков, М. А. Лебедев, Ожидаемый размер кратера при ударе микрометеоритом. ФГВ, 1987, 23, 1, 95.
8. С. Н. Бондарев, Ю. И. Фадеев, В. П. Чистяков, Высокоскоростной удар по базальту. Космич. исслед.; 10, №1, 129, 1972
9. В. М. Титов, Ю. И. Фадеев, Г. А. Швецов, Удар тела с высокой скоростью. ДАН, 191, №2, 298 (1970)
10. Feldman J. G., Proc. Symp. Hypervelocity Impact, 4th, Eglin AFB, Florida, 2, APGC TR-60-39, Sept, 1960



11. Высокоскоростные ударные явления. Под ред. В. Н. Никольского, Изд. "Мир", Москва, 1973, с 533

12. Г. Мелош. Образование ударных кратеров: геологический процесс, Пер. с англ. - М.: Мир, 1994, 336с.

13. М. М. Русаков, М. А. Лебедев. Высокоскоростной удар в астероид. Тезисы докладов. Международная конференция "Космическая Защита Земли - 96", РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск, 1996.

Афанасьев Владимир Алексеевич, доцент Московского авиационного института (национального исследовательского университета), д.т.н. МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993 тел.: (499) 158-27-31

Чудецкий Глеб Михайлович, специалист по SMM, компания QIWI г. Москва, Варшавское шоссе 125; Тел.: (926) 559-41-64; e-mail: chudetsky@gmail.com