

УДК 550.348.425.4

ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСА МЕТЕОРИТА НА РАЗМЕРЫ УДАРНОГО КРАТЕРА

Н. И. Шишкин

Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики
им. Е. И. Забабахина, 456770 Снежинск
E-mail: shishkins@mail.vega-int.ru

Получены формулы для диаметра и глубины взрывного кратера, учитывающие энергию и импульс продуктов взрыва, прочность породы, глубину заложения заряда взрывчатого вещества и силу тяжести. С использованием ударно-взрывной аналогии полученные зависимости распространены на случай удара метеорита (ударника) о кору планеты (мишени). Показано, что в гравитационном режиме образования кратера влияние импульса ударника существенно и с увеличением его размеров возрастает. В прочностном режиме кратерообразования импульс практически не оказывает влияния на размеры кратера. Установлено, что в основном размеры кратера определяются величиной кинетической энергии ударника и в меньшей степени — импульсом.

Ключевые слова: метеорит, импульс, кинетическая энергия, удар, кратер.

Введение. Прогресс в изучении ударного кратерообразования в значительной мере обусловлен развитием физики взрыва. Исследование взрывного кратерообразования позволило выявить механизм процесса и получить формулы, определяющие параметры кратера в зависимости от параметров мишени и ударника. Изучение высокоскоростного удара с использованием экспериментальных данных, полученных при взрывах, основано на ударно-взрывной аналогии: высокоскоростной удар подобен взрыву. Однако при использовании этой аналогии не учитывается явно влияние количества движения (импульса) ударника, а в основном учитывается влияние энергии.

С начала изучения ударного кратерообразования ведется дискуссия о роли в этом процессе импульса и кинетической энергии ударника. В настоящее время считается, что ударное кратерообразование определяется некоторой комбинацией импульса и энергии ударника [1]. В работе [2] предложено выражение для объема ударного кратера $V \sim E^\alpha I^\beta$ (E — кинетическая энергия; I — импульс ударника; α, β — показатели степени), приведены возможные диапазоны значений α и β для случая ударных кратеров, но конкретные их значения не указаны. Параметр прочности Y не конкретизируется. Предполагается, что этим параметром может быть любая величина с размерностью напряжения. Кроме того, объем кратера определяется с точностью до произвольного множителя. В данной работе предпринята попытка на основе ударно-взрывной аналогии определить размеры кратера с помощью приведенной выше формулы и указать конкретные значения показателей степеней α, β и соответствующих коэффициентов пропорциональности для диаметра и глубины кратера.

В качестве прочностной характеристики изотропного материала мишени используется его общее сопротивление сдвигу τ_s , представляющее собой сумму прочности связей τ_0 и сопротивления трению скольжения $k p = p \operatorname{tg} \varphi$ ($p = \rho_t g h$ — литостатическое давление на глубине h ; ρ_t — плотность материала мишени; $k = \operatorname{tg} \varphi$ — коэффициент внутреннего

трения; φ — угол трения; g — ускорение свободного падения на поверхности планеты). Такой выбор прочности позволяет включить в число определяющих параметров кратерообразования плотность материала, силы сцепления, угол и коэффициент внутреннего трения, глубину, на которой расположен элемент среды, и силу тяжести. При этом количество определяющих параметров уменьшается за счет объединения их в физически содержательную комбинацию.

При описании ударного кратерообразования с использованием ударно-взрывной аналогии возникает проблема выбора вида взрыва-аналога (ядерный взрыв, взрыв конденсированного взрывчатого вещества (ВВ), электровзрыв, лазерный импульс). Необходимо также выбрать глубину заложения соответствующего заряда. При ударе метеорита о Землю (или кору другой планеты) он внедряется на глубину, приблизительно равную его диаметру. Желательно, чтобы заряд-аналог имел размер и плотность, близкие к соответствующим значениям для метеорита. Заглубление заряда должно быть порядка его диаметра. В наибольшей степени этим требованиям удовлетворяют заряды конденсированных ВВ типа тротила (ТНТ), взрывающиеся на малой глубине либо на поверхности контакта с преградой.

Также можно использовать ядерный заряд, если заглубление не очень мало, поскольку при малой глубине заложения большая часть энергии взрыва передается излучением в атмосферу (либо в вакуум на безатмосферных объектах), а не в грунт. Электровзрыв и лазерный импульс менее применимы в силу их “безмассовости”.

1. Размеры взрывных кратеров при малых глубинах заложения заряда ВВ.

Экспериментальные данные о размерах взрывных кратеров в зависимости от глубины заложения заряда в различных средах приведены в [3–7]. Анализ этих зависимостей показывает, что с увеличением глубины заложения заряда размеры кратеров увеличиваются, достигая максимума при так называемой оптимальной глубине заложения, после чего резко уменьшаются. При исследовании ударного кратерообразования представляют интерес начальные, восходящие участки этих кривых при малых глубинах заложения заряда. Однако систематические данные о размерах взрывных кратеров при малых глубинах заложения получены лишь для малопрочных грунтов (сухих озерных отложений, глин, песков и др.) [4] и для сравнительно прочной породы — сухого пустынного аллювия [5, 6]. В работе [4] отсутствуют количественные данные о физико-механических параметрах использованных грунтов (плотности, сжимаемости, прочности и др.), тем не менее, используя результаты [4], можно получить приближенную оценку линейных размеров кратеров при контактных взрывах. В частности, диаметр D_{c0} и глубина h_{c0} кратера определяются зависимостями

$$D_{c0} \sim (60 \div 80) E^{1/3,4} \text{ м/КТ}^{1/3,4}, \quad h_{c0} \sim (8 \div 18) E^{1/3,4} \text{ м/КТ}^{1/3,4}.$$

Здесь E — энергия взрыва заряда ВВ, измеряемая в килотоннах ТНТ ($1 \text{ кТ ТНТ} \approx 4,18 \cdot 10^{12} \text{ Дж}$). Из [5, 6] следует, что при глубинах заложения $h/E^{1/3,4} \lesssim 30 \text{ м/КТ}^{1/3,4}$ (менее трех диаметров заряда ВВ) размеры кратеров в аллювии можно описать линейными зависимостями вида

$$\begin{aligned} D_c/E^{1/3,4} &= 71,6 \text{ м/КТ}^{1/3,4} + 1,2h/E^{1/3,4}, \\ h_c/E^{1/3,4} &= 10,5 \text{ м/КТ}^{1/3,4} + 0,6h/E^{1/3,4}, \end{aligned} \tag{1.1}$$

где величины h , h_c , D_c измеряются в метрах.

Формулы (1.1) не содержат явно зависимость размеров кратера от импульса продуктов взрыва (ПВ). Чтобы получить формулы, содержащие зависимость размера кратера не только от энергии, но и от импульса, исследуем явление взрыва на выброс с помощью анализа размерностей физических величин [8]. Будем полагать, что при малых глубинах