

Взаимодействие высокоскоростных частиц с твердой преградой

Н. П. Чирская,^{*} И. К. Ермолаев,[†] Л. С. Новиков[‡]

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына

Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Статья поступила 05.03.2018; Подписана в печать 13.03.2018)

В работе приведены расчетные и экспериментальные данные о величинах диаметра и глубины кратеров, образующихся в алюминиевой мишени при ударах стальных шариков со скоростями $\sim 0.1\text{--}3\text{ км/с}$. Обнаружено хорошее согласие двух групп данных при определении глубины кратеров, но их существенное расхождение при определении диаметра. Основной причиной расхождения является непостоянство отношения диаметра кратера к его глубине в рассматриваемом диапазоне скоростей удара, что не учитывается в использованной расчетной модели.

PACS: 81.40.Lm УДК: 531.58

Ключевые слова: высокоскоростной удар, кратер, лабораторный эксперимент, параметрическое моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Высокоскоростное соударение частицы с твердой преградой инициирует ряд физических процессов, приводящих в конечном итоге к образованию кратера в мишени. Протекающие в области соударения процессы, такие как деформация частицы и мишени, их механическое разрушение, разогрев и плавление вещества в зоне соударения, весьма сложны. Поэтому для математического моделирования образования кратеров чаще всего используются параметрические уравнения, основанные на экспериментальных данных. Помимо параметрических уравнений, для описания указанных процессов могут использоваться гидродинамические модели, однако такое моделирование существенно сложнее и требует значительных вычислительных ресурсов. В настоящей работе приведены в сопоставлении с экспериментальными данными результаты математического моделирования образования кратеров в толстой алюминиевой мишени при ударах стальных шариков со скоростями $\sim 0.1\text{--}3\text{ км/с}$.

1. МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ

Расчеты проводились с помощью модели ESABASE2 [1], входящей в состав онлайн-ресурса SPENVIS [2]. Параметрические уравнения, используемые в этой модели, можно разделить на две группы. К первой относятся уравнения для расчета критических параметров частицы-снаряда и мишени, приводящих к различным видам повреждения. Вторая группа объединяет уравнения для расчета параметров кратеров или отверстий, возникающих в мишени при столкновении.

Для расчета диаметра кратера, образующегося в толстой алюминиевой мишени при столкновении с ней стального снаряда, в данной работе было использовано следующее параметрическое уравнение:

$$D = K_1 K_C d_p^\lambda \rho_p^\beta v^\gamma (\cos \alpha)^\xi \rho_t^\kappa, \quad (1)$$

где d_p — диаметр частицы-снаряда, ρ_p — плотность частицы-снаряда, ρ_t — плотность мишени, α — угол падения частицы-снаряда на мишень, v — скорость соударения, K_1 , K_C , β , λ , γ , ξ , κ — параметры уравнения, величины которых приведены в табл. I.

Использованные в расчетах уравнения разработаны для характерных скоростей удара в космических условиях, величина которых лежит в диапазоне $4\text{--}20\text{ км/с}$. Предполагается, что при таких скоростях форма кратера почти не зависит от скорости ударника и отношение диаметра кратера к его глубине практически постоянно [3].

Глубина кратера определяется следующим соотношением:

$$h = \frac{D}{2K_C}, \quad (2)$$

Данные соотношения справедливы для случаев, когда толщина мишени много больше размеров частицы-снаряда, и при ударе не происходит разрушения снаряда или мишени.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лабораторные эксперименты проводились на импульсной газодинамической установке [4], обеспечивавшей получение скоростей метаемых тел диаметром $1\text{--}4\text{ мм}$ в диапазоне $\sim 0.05\text{--}5.0\text{ км/с}$. Измерение скоростей метаемых тел осуществлялось бесконтактным способом с помощью индукционных датчиков, принцип действия которых описан в [4].

Заряд, образующийся на металлическом шарике при его движении в разгонном канале, индуцировал

^{*}E-mail: chirskaya.sinp@yandex.ru

[†]E-mail: ermolaev19@yandex.ru

[‡]E-mail: novikov@sinp.msu.ru

Таблица I: Используемые при расчетах параметры

Мишень	K_1	K_C	λ	β	γ	ξ	κ
алюминий	0.66	2	1.056	0.519	0.667	0.667	0

Таблица II: Размеры кратеров, показанных на рис. 1

Скорость удара, м/с	Диаметр кратера D , мм	Глубина кратера h , мм	Отношение D/h
71	3.25	0.83	3.92
259	3.90	1.40	2.79
639	4.00	3.00	1.33
1714	5.05	6.10	0.82
2490	4.75	6.70	0.71
2950	5.10	8.20	0.62

на датчиках электрические импульсы, которые регистрировались запоминающим осциллографом Tektronix TDS2024B. При известном расстоянии между кольцами (11 мм) по временному сдвигу между сигналами с колец определялась скорость шарика (рис. 1).

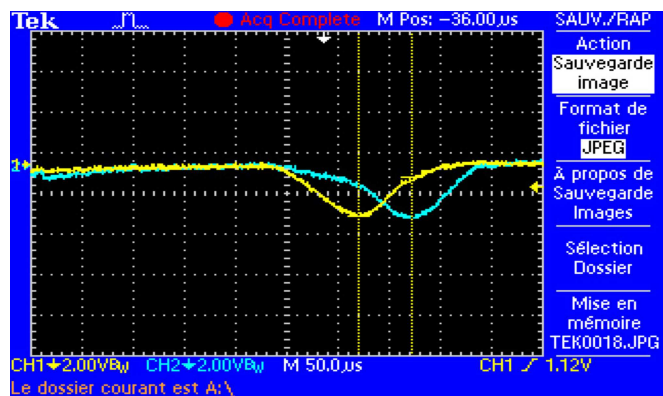


Рис. 1: Осциллограмма сигналов индукционных датчиков

Эксперименты проводились как при атмосферном давлении в разгонном канале, так и при его откачке форвакуумным насосом. В последнем случае удалось достигать максимальных скоростей в указанном диапазоне.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На рис. 2 представлены в сопоставлении с полученными экспериментальными данными результаты расчетов глубины h и диаметра D кратера, образующегося в толстой алюминиевой мишени при ударе стального шарика с различными кинетическими энергиями. Видно, что расчетные значения глубины кратера хо-

рошо согласуются с экспериментальными данными во всем рассматриваемом диапазоне энергий, в то время как расчетные значения диаметра кратера лежат значительно выше экспериментальных величин при энергиях ударника более 10 Дж.

В связи с выявленным расхождением рассмотрим полученные в ряде экспериментов данные о конфигурации кратеров, приведенные на рис. 3.

Все кратеры, изображенные на рис. 3, получены при ударе стального шарика диаметром 4 мм для диапазона скоростей $\sim 100\text{--}3000$ м/с. Рис. 3,а–д показывают поверхность мишени, подвергшейся удару при нормальном угле падения шарика, а на рис. 3,е приведен поперечный разрез одного из кратеров. Результаты измерения диаметра и глубины кратеров, изображенных на рис. 3, приведены в табл. II.

Данные табл. II показывают, что отношение диаметра кратера к его глубине изменяется достаточно сильно в диапазоне скоростей удара $\sim 100\text{--}3000$ м/с, причем это отношение уменьшается с ростом скорости удара. Рис. 4, на котором приведены значения D/h , рассчитанные для большого массива полученных экспериментальных данных, подтверждает выявленную зависимость.

Возвращаясь к приведенному выше уравнению, использованному для расчета диаметра кратеров, видим, что в нем задается постоянная величина отношения $D/h = 4$ (табл. I) для всего рассмотренного диапазона скоростей удара, не соответствующая полученным экспериментальным данным. Это является основной причиной различия расчетных и экспериментальных значений диаметра кратера, приведенных на рис. 2.

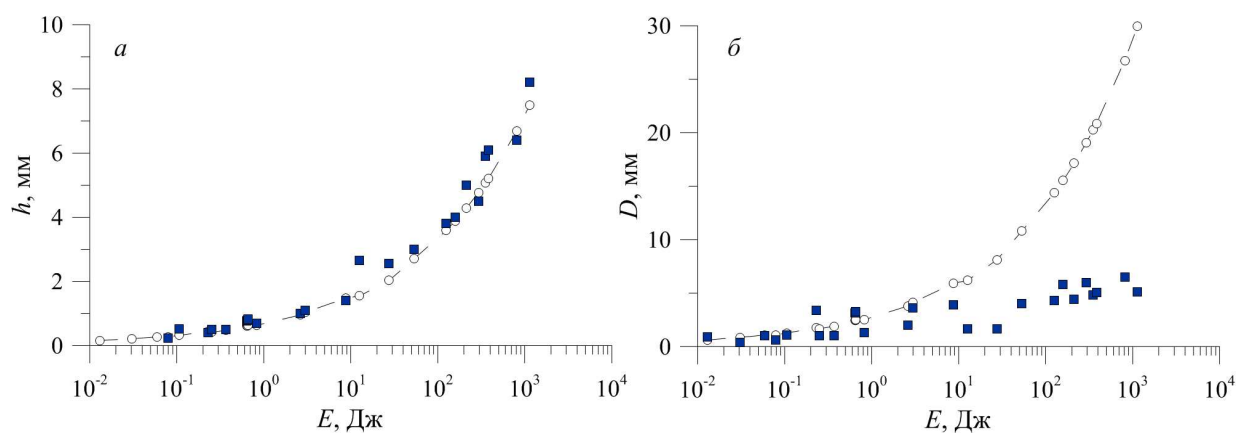


Рис. 2: Зависимость глубины h (а) и диаметра кратера D (б) в толстой алюминиевой мишени от кинетической энергии стального ударника. Темные значки — результаты эксперимента, светлые значки — расчетные значения

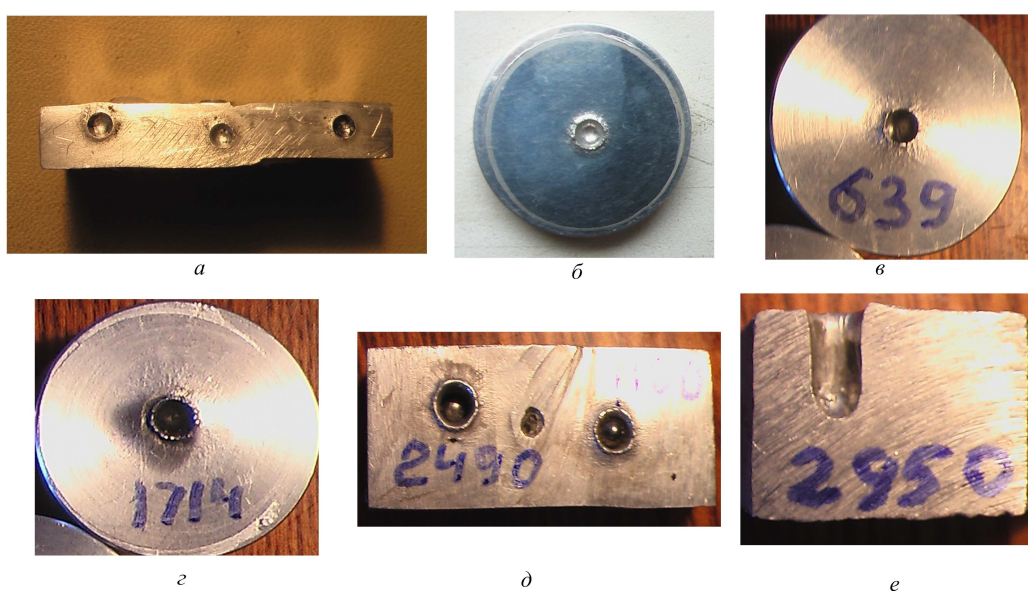


Рис. 3: Фотографии кратеров в алюминиевой мишени, образованных стальным шариком при разных скоростях удара, м/с: а — 71; б — 259; в — 639; г — 1714; д — 2490; е — 2950

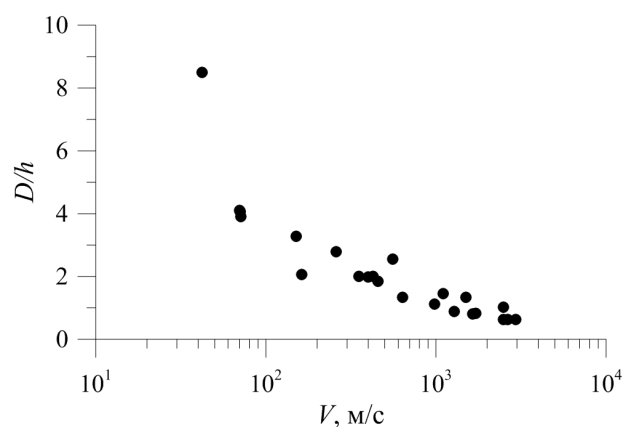


Рис. 4: Зависимость отношения диаметра кратера в алюминиевой мишени к его глубине от скорости стального ударника

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в настоящей работе расчетные и экспериментальные данные о величинах диаметра и глубины кратеров, образующихся в толстой алюминиевой мишени при ударах стальных шариков диаметром 4 мм со скоростями $\sim 0.1\text{--}3\text{ км/с}$, продемонстрировали хорошее согласие результатов расчета и эксперимента

при определении глубины кратеров, но существенное расхождение двух групп данных при определении диаметра кратеров. Основной причиной наблюдаемого расхождения является непостоянство отношения диаметра кратера к его глубине в рассматриваемом диапазоне скоростей удара.

-
- [1] Ruhl K., Bunte K.D., Gaede A., Miller A. PC Version of DEBRIS Impact Analysis Tool—Technical Description. 2013.
[2] ESA's Space Environment Information System Progr. [Электронный ресурс]. URL: www.spenvis.oma.be.
[3] Horz F. Meteor Planet. Sci. 2012. textbf47. P. 763.
[4] Новиков Л.С., Семкин Н.Д., Ермолаев И.К., Пилюгин Н.Н., Иванов Л.И., Никитушкина О.Н., Янушкевич В.А. Модель космоса. 2. КДУ, 2007.

Interaction of high-speed particles with a solid barrier

N. P. Chirskaya^a, I. K. Ermolaev^b, L. S. Novikov^c

Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University
Moscow 119991, Russia

E-mail: ^achirskaya.sinp@yandex.ru, ^bermolaev19@yandex.ru, ^cnovikov@sinp.msu.ru

The paper presents calculated and experimental data on the diameter and depth of craters formed in an aluminum target during impacts of steel balls with velocities $\sim 0.1\text{--}3\text{ км/с}$. There is a good agreement between the two groups of data in determining the depth of the craters, but also there is significant disagreement in the diameter values. The main reason for the discrepancy is the incompleteness of the used calculation model

PACS: 81.40.Lm.

Keywords: high-speed impact, crater, laboratory experiment, parametric modeling.

Received 05 March 2018.

Сведения об авторах

1. Чирская Наталья Павловна — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник; тел.: (495) 939-31-92, e-mail: chirskaya.sinp@yandex.ru.
2. Ермолаев Игорь Константинович — канд. техн. наук, науч. сотрудник; тел.: (495) 939-31-92, e-mail: ermolaev19@yandex.ru.
3. Новиков Лев Симонович — доктор физ.-мат. наук, профессор, гл. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-10-07, e-mail: novikov@sinp.msu.ru.