

Б.Г. Жуков, к. ф-м. н.
Р.О. Куракин,
Б.И. Резников, к. ф-м. н.
С.И. Розов, к. ф-м. н.
(Санкт-Петербургский Физико-технический
институт им. А.Ф. Иоффе)

ВЫСОКОСКОРОСТНОЕ СОУДАРЕНИЕ ПЛАСТИКОВЫХ УДАРНИКОВ ММ-РАЗМЕРА С РЕГОЛИТОВЫМИ И БАЗАЛЬТОВЫМИ МИШЕНЯМИ РАЗНОЙ ПЛОТНОСТИ

Досліджено високошвидкісне співударяння пластикових ударників з мішенями, хімічний склад і фізичні параметри яких близькі до властивостей місячного ґрунту. Ударники прискорювалися малогабаритним рельсотроном, що розганяє кубики 2-мм розміру, масою 10 мг до швидкостей близько 5 км/с. Реєструвалися швидкість ударника у вільному польоті, кінограма розльоту речовини при ударі, форма і об'єм кратера і маса речовини, що вилетіла з мішені. Встановлено, що при співударянні з мішенями різної густини і вологості, величина втраченої маси і характер витікання речовини сильно відрізняються.

HIGH-SPEED IMPACT OF MM-SIZE PLASTIC PELLET WITH REGOLITH AND BASALT TARGETS OF DIFFERENT DENSITY

Under study is a high-speed impact of the plastic pellets with targets of which composition and parameters are similar to those of a lunar ground. To accelerate the pellets, being the 2-mm cubes of 10 mg in weight, up to the velocities of about 5 km/s, the small size rail gun is used. Under registration are the pellet's velocity in a free-flight, a film on target's matter outflow as well as crater's shape, volume, and outcoming mass. The impacts with targets of different density and humidity result in the greatly different amounts of outflow mode.

1. Введение.

В современной космофизике важными фундаментальными проблемами являются вопросы о составе и структуре кометных ядер и физических механизмах трансформации вещества малых (луноподобных) тел Солнечной системы. Основным фактором формирования поверхностных слоев малых планет и Луны является бомбардировка метеоритами, при этом удельная мощность энерговыделения при ударе меняется в широких пределах в зависимости от скорости и массы налетающих тел (скорость 2-70 км/с, масса 10^{-8} - 10^8 г) [1].

Для получения информации используется запуск космических аппаратов к исследуемым объектам, забор и доставка ґрунта на Землю [2], а также активный космический эксперимент, когда высокоскоростное столкновение ударника с поверхностью исследуемого тела производит выброс глубинных слоев и дает прямую информацию о плотности и составе внутренних слоев объектов (ударные миссии – Deep Impact, LCROSS).

Данные о космических телах, полученные при высокоскоростных соударениях, являются важными также для решения проблемы астероидной опасности и физики высокоскоростного удара. Численное моделирование с использованием реальных данных о составе и плотности астероидов и комет, характере истечения вещества после соударения позволяет уточнить теоретические модели удара,

дать оценки по методикам воздействий на космические тела с целью их разрушения и предсказать ряд наблюдательных эффектов [3].

Нижняя граница диапазона мощности удельных энерговыделений (до 10^8 Вт/см²) соответствуют скоростям метеоритов 2-5 км/с и моделируется в лабораторных условиях. Цель настоящей работы – исследование процессов при высокоскоростном соударении пластиковых ударников мм-размера с реголитовыми и базальтовыми мишенями разной плотности. Работа продолжает ранее проведенные исследования образования кратеров при высокоскоростных соударениях твердых тел с ледяными мишенями разной плотности при скоростях 4-5 км/с [4]. Исследование проводилось в сотрудничестве с ИПХФ РАН (Черноголовка).

2. Описание эксперимента.

2.1. Для проведения исследований разработана технология создания мишеней, близких по химическому составу, плотности и пористости к лунному грунту. Для разгона ударников использовался малогабаритный рельсотрон оригинальной конструкции со специальной геометрией электродов и наложением дополнительного внешнего магнитного поля. Источником этого поля служат две одновитковые катушки, расположенные по обе стороны канала и подключаемые к отдельному источнику тока с энергией 25 кДж (рис. 1). Оригинальная геометрия рельсового канала способствует концентрации в нем магнитного поля. Внешнее поле устанавливается ранее тока в плазменном поршне (рис. 2) и ускоряет тело на стадии катастрофической эрозии электродов. Применяемая технология позволяет разогнать лексановые кубики с ребром 2-мм и массой 10мг до скоростей свыше 5 км/с [5].

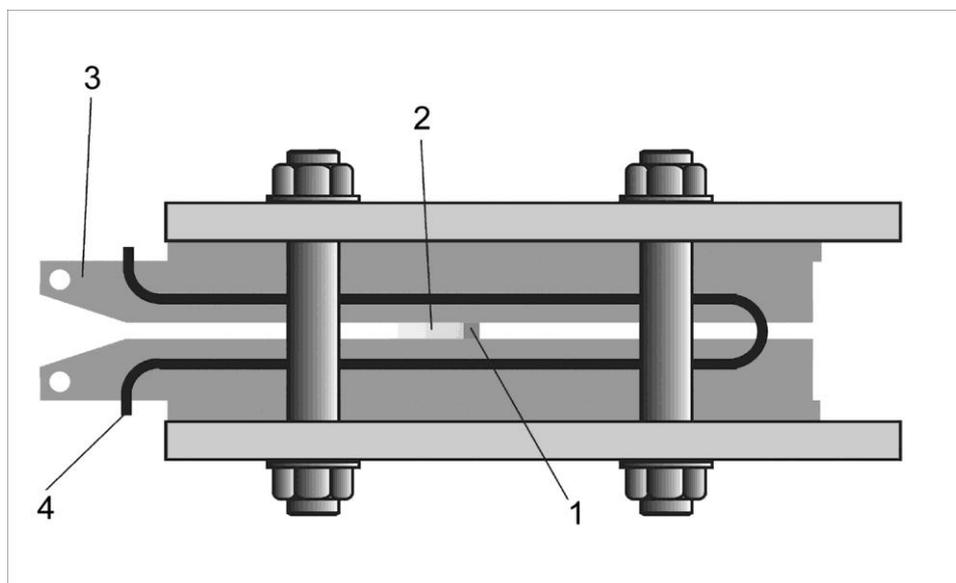


Рис.1 — Конструкция малогабаритного рельсотрона. 1-ускоряемое тело, 2- плазменный поршень, 3- рельсы, 4-витки дополнительного магнита

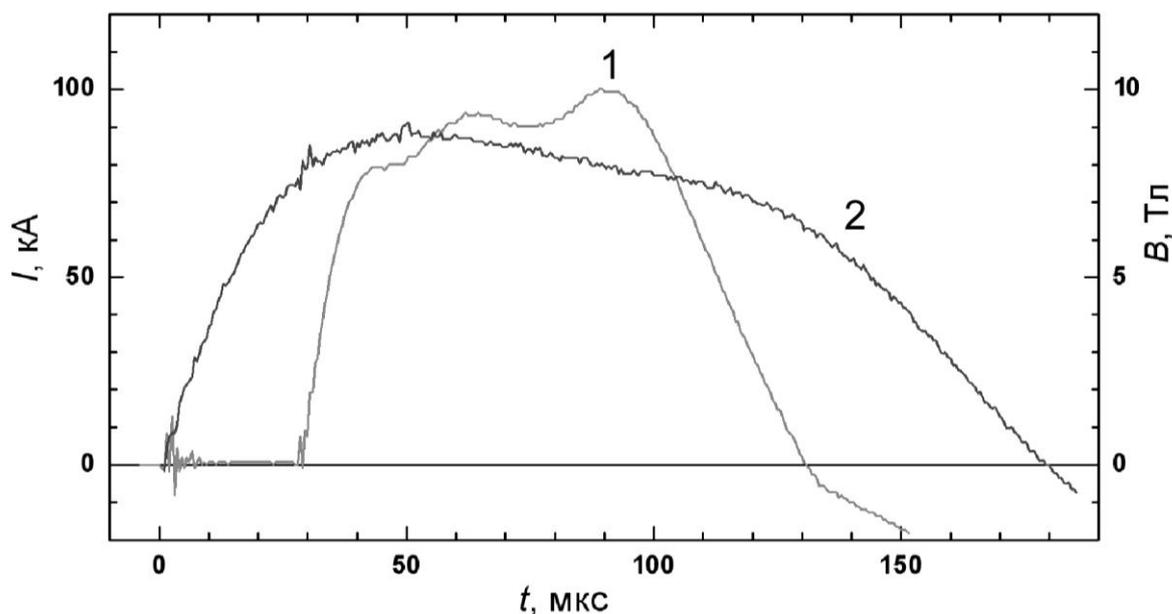


Рис.2 — Зависимость от времени тока I через плазменный поршень — 1 и индукции дополнительного магнитного поля B — 2

2.2. Ударники представляли собой кубики с ребром 2 мм и изготавливались из поликарбоната плотностью $1,21 \text{ г/см}^3$. Скорости соударения с мишенями находились в диапазоне 3,7-4,9 км/с. В эксперименте регистрировались СФР-грамма разлета вещества при ударе, форма и объем образовавшегося кратера, масса вещества, вылетевшего из мишени. Скорость кубика в свободном полете, измерялась системой тонкопленочных датчиков [6]. Фотография полета 2 мм ударника со скоростью 5,7 км/с в атмосферном воздухе приведена на рис. 3.



Рис. 3 — Полет 2 мм ударника со скоростью 5.7 км/с в атмосферном воздухе

2.3. Луна имеет кору толщиной ~ 65 км, покрытую рыхлым обломочным материалом - реголитом, толщина слоя которого колеблется в диапазоне 3–15 м. На поверхности реголит – это слабо связанный разнотельный материал со средним размером зерен значительно меньшим 1 мм и значительным количеством обломков разных горных пород более крупных размеров. Плотность самого верхнего слоя составляет $1,1-1,2 \text{ г/см}^3$. Этот слой, очень пористый и сжимаемый, выдерживает нагрузку до 1 кг/см^2 . На глубине в несколько дециметров плотность и твердость материала значительно возрастают [1].

Технология изготовления мишеней, близких по составу к лунному грунту, основывалась на трех положениях: расчет количества исходных компонент для получения заданного процентного содержания элементов; измельчение исходной смеси, перемешивание порошка, формование мишеней и сушка; изменение плотности, пористости, твердости, влажности мишеней варьированием соотношения порошка SiO_2 , кварцевого песка и воды. Мишени изготавливались цилиндрической формы с плоскими торцами диаметром 90–95 мм. При неизменном химическом составе плотность и твердость материала мишеней варьируются в диапазоне $0.8\text{--}3 \text{ г/см}^3$ и $1\text{--}50 \text{ кг/см}^2$ соответственно. Размер пор не превышал 0,5 мм. В эксперименте использовались мишени, которые имитировали по химическому составу 2 типа лунного реголита (материковый и морской).

3. Результаты эксперимента.

3.1. Параметры экспериментов, в которых исследовалось влияние плотности мишени на процесс выброса вещества из кратера, представлены на рис.4. Типичные СФР-граммы разлета вещества из зоны удара для мишеней разной плотности (R5 и R7) представлены на рис.5. Длительность экспозиции кадра на рисунке – 4 мкс, интервал между кадрами 8 мкс. Рисунок демонстрирует динамику развития струи выброшенного материала и ее расширение. Для менее плотных мишеней (R7) распределение вещества в потоке из кратера более изотропно, форма струи близка к сферической, а передний фронт облака имеет более гладкую границу. Для более плотных мишеней (R5) струя имеет форму воронки. При примерно одинаковых скоростях соударений для менее плотных мишеней фиксируется заметно больший объем получаемого кратера. В этом случае кратер не имеет осевой симметрии. Максимальная скорость вещества на начальных стадиях разлета ($t \leq 10$ мкс) для более плотной мишени примерно равна 1,5 км/с, а для менее плотной – 1,2 км/с. Через 30 мкс скорость выброса вещества уменьшается до значений 0,5 км/с (R5) и 0,2 км/с (R7).

3.2. В ряде экспериментов изучалось влияние влажности на процесс кратерообразования для мишеней примерно одинаковой средней плотности $1,2 \text{ г/см}^3$. Это достигалось варьированием содержания воды в материале мишени. На рис.6 представлена диаграмма масса выброшенного материала – скорость соударения для экспериментов с мишенями различной влажности. Числа слева от крестика – номер эксперимента, справа – процентное содержание воды в мишени. Масса выброшенного материала определялась путем взвешивания мишени до и после удара. Видно, что несмотря на относительное постоянство средней плотности мишеней, скорости удара и химического состава мишеней, количество выброшенного из кратера материала, а следовательно и объем кратера меняется в несколько раз. Максимальный выброс наблюдается у наиболее «мокрой» мишени, содержащей 14.8% воды.

На рис.7 представлены форма образовавшегося в мишени кратера при соударении на скорости 4.3 км/с с мишенью, содержащей 6.3% воды. Форма кратера фиксировалась путем снятия с кратеров гипсовых слепков, которые затем обмерялись с получением наборов профилей параллельных сечений,

находящихся на различных расстояниях от оси кратера. Размер ячейки масштабной сетки - $1 \times 1 \text{ мм}^2$. Шаг сечений профиля - 1 мм. Более светлые оттенки (холодные цвета на цветном рисунке) соответствуют сечениям наиболее удаленным от оси кратера. Максимальная глубина кратера 0,8 см, диаметр 3 см, потеря массы примерно 1,5 г.

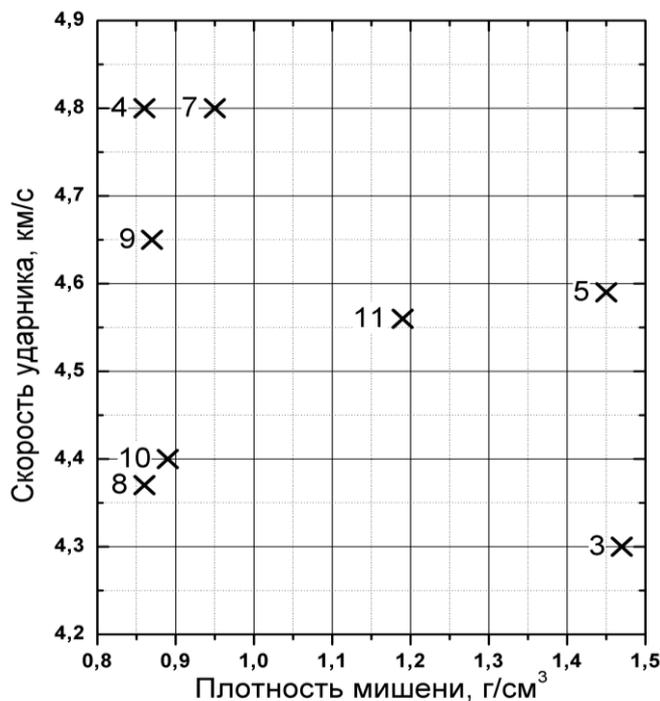


Рис.4— Диаграмма параметров удара (числа слева от крестика — номер эксперимента)

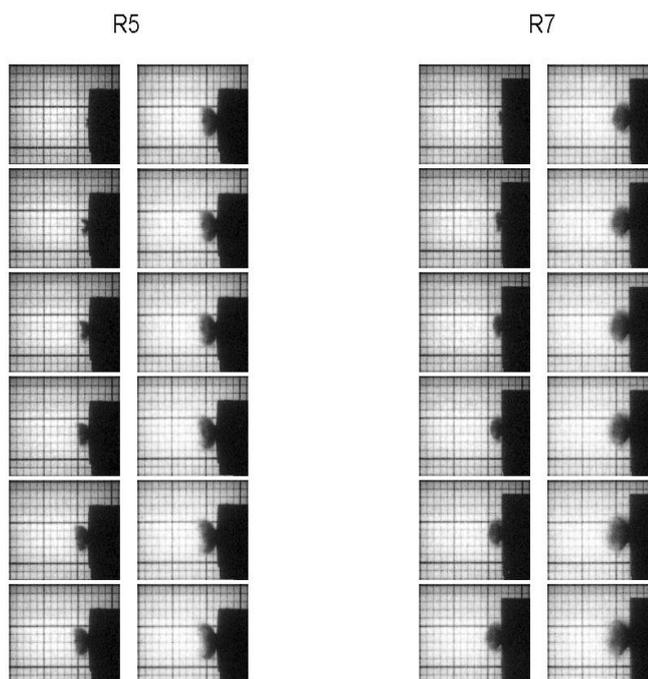


Рис.5 – СФР-граммы разлета вещества в экспериментах 5 и 7 при соударении с реголитовыми мишенями

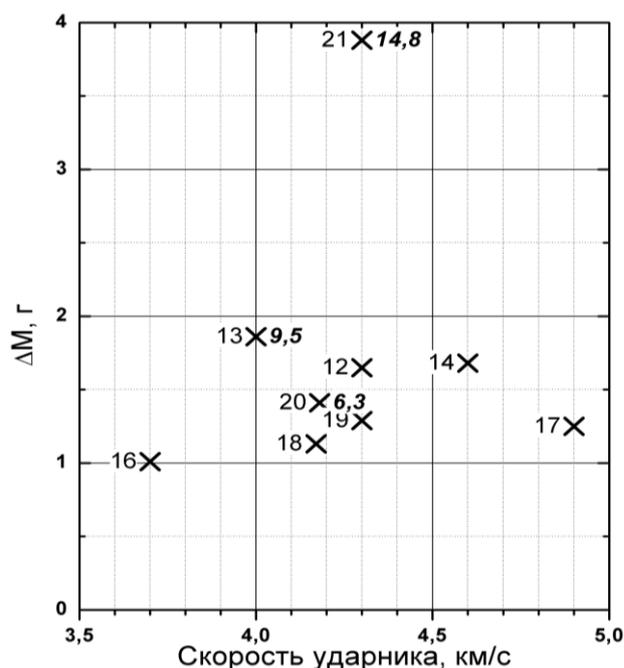


Рис.6 — Диаграмма: масса выброшенного материала — скорость соударения.

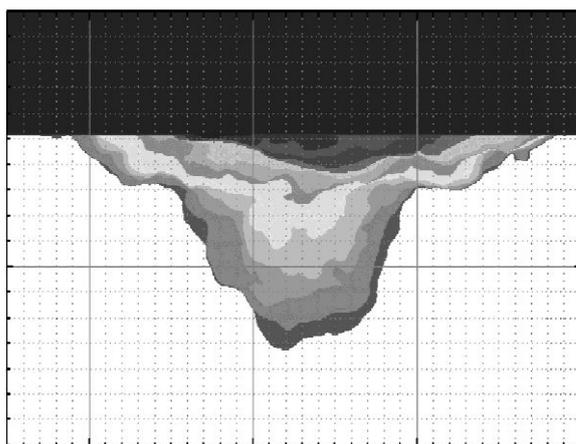


Рис. 7 — Профиль кратера мишени (эксперимент номер 20)

Авторы благодарят И.В. Ломоносова за постановку задачи, обсуждение результатов и внимание к работе.

Работа выполнена по программе Президиума РАН П-12.

Статья подготовлена по материалам доклада Международной научной конференции «Импульсные процессы в механике сплошных сред» (17-21 августа 2009, г. Николаев).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Физика космоса. Под ред. С.В.Пикельнера, Советская энциклопедия, М., 1976, 656с.
2. Э.М. Галимов Состояние и перспективы исследования Луны и планет. Вестник РАН, 2004, 74, № 12, с. 1059-1081.
3. Б.А.Клумов, В.В.Ким, И.В. Ломоносов, В.Г. Султанов, А.В. Шутов, В.Е.Фортон. Возможные наблюдательные эффекты в эксперименте Deep Impact. УФН, 2005, т.175, №7, с.767-777.
4. Б.Г.Жуков, Р.А.Куракин, Б.И.Резников, С.И.Розов «Исследование образования кратеров при высокоскоростных соударениях (4-5 км/с) твердых тел с ледяными мишенями разной плотности». Материалы VII

Международной научной школы-семинара "Импульсные процессы в механике сплошных сред», Николаев 2007, с.111-113.

5. Б.Г.Жуков Компактные рельсовые ускорители плазмы и твердых тел (обзор). Материалы Международной научной конференции "Физика импульсных разрядов в конденсированных средах", Николаев (17-21 августа 2009), с 101-103.

6. Э.М.Дробышевский, Б.Г.Жуков, В.А.Сахаров. Измерение высоких скоростей тел малых геометрических размеров. Письма в ЖТФ, 1993, т.19, №17, с.44-47.

Рекомендовано до публікації д.т.н. К.К. Софійським 18.08.09