

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОВРЕЖДЕНИЙ НЕУДАЛЯЕМЫХ И УДАЛЯЕМЫХ ОКОН ПЕРСПЕКТИВНЫХ ПЕНЕТРАТОРОВ ОТ УДАРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЧАСТИЦ РЕГОЛИТА ПРИ УДАРНОМ ВНЕДРЕНИИ В ГРУНТ ЛУНЫ

Д. Б. Добрица, Е. В. Леун

АО «НПО Лавочкина»,  
Россия, 141402, Московская область, г. Химки, ул. Ленинградская, 24

**В статье рассмотрены перспективные пенетраторы с неудаляемыми прозрачными и удаляемыми непрозрачными окнами, созданными преимущественно из корундов и льдокомполита, соответственно. Их применение позволит расширить научную программу исследований за счет возможностей визуализации для видеорегистрации движения пенетратора в подповерхностных слоях грунта и их оптических методов изучения, а также прямого непосредственного контакта с ними. Обсуждаются методика расчета и полученные с помощью численного моделирования или на основе инженерной модели расчетные значения повреждений этих окон от ударного воздействия сферических частиц лунного реголита диаметрами 1,0 и 1,5 мм, соударяющихся с ними со скоростями до 1 км/с в угловом диапазоне от 70° до 80°.**

**Ключевые слова:** космические исследования, Луна, реголит, пенетратор, высокоскоростное внедрение, сапфир, льдокомполит, метод Уилкинса.

## Введение

Расширение научной программы, решаемой перспективными пенетраторами, возможно за счет увеличения перечня задач для изучения подповерхностных сред исследуемых небесных тел (ИНТ) в естественных условиях «in situ» за счет введения дополнительных защитных окон пенетратора из высокопрочных прозрачных и/или удаляемых материалов [1].

Это может быть достижимо за счет реализации визуализации для осуществления видеорегистрации и последующего видеоанализа особенностей ударного проникновения пенетратора и траектории его движения в подповерхностных слоях грунта. Также интересно использование оптических методов изучения подповерхностных слоев грунта, а именно для анализа химического состава входящих в вещество элементов, поиска наличия признаков жизни, определения структуры и компонентного состава веществ, по которым породу относят к вулканической, осадочной или метаморфной, восстанавливая картину прежних геологических процессов [2]. Одними из лучших материалов по доступности, технологической обработке и своим оптико-механическим характеристикам для изготовления и использования высокопрочных прозрачных окон перспективных пенетраторов можно считать корунды ( $Al_2O_3$ ): сапфиры (естественный или искусственный — лейкосапфир), рубины.

Кроме того, возможность прямого непосредственного контакта с окружающей средой после остановки пенетратора может быть осуществлена при использовании удаляемого окна, например, на основе материалов, обладающих высокой прочностью и возможностью удаления. Наиболее перспективно использование для этих целей льдокомполита, создаваемого введением в воду химических

добавок в виде синтетического полимера на основе поливинилового спирта и порошка из перемолотого высокопористого ракушечника. Так, прочность пресноводного льда может быть повышена до 50–70 раз, достигая значений в таком создаваемом льдокомполите 1–1,2 ГПа [3].

Для успешного проектирования перспективных пенетраторов и использования в них вышеупомянутых конструкционных материалов важно понимать результаты воздействия высокоскоростных частиц реголита при ударном внедрении в грунт разных ИНТ начиная с Луны. Для этого нужно провести расчет и проанализировать глубины царапин (микроратеров) и их площади на поверхности окон из сапфира и льдокомполита, возникающих от высокоскоростных ударов частиц лунного реголита.

## Постановка задачи

Задачей данной работы является определение глубины царапин и их площади на поверхности окон из сапфира и льдокомполита, возникающих от высокоскоростных ударов частиц лунного реголита.

## Теория

Решение поставленной задачи осуществляется с помощью численного моделирования [4] (сапфировое окно) и с использованием инженерной модели (окно из льдокомполита). Выбор инженерной модели для задачи с окном из льдокомполита обусловлен недостаточностью исходных данных для построения уравнения состояния и модели разрушения этого материала.

В обоих случаях решается группа задач для заданного набора исходных данных (скорость соударения, угол полета, диаметр частицы), реше-

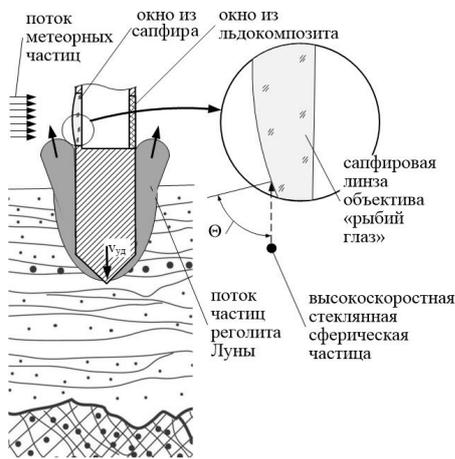


Рис. 1. Появление потока частиц реголита при ударном внедрении penetrатора в грунт Луны  
Fig. 1. The appearance of a flow of regolith particles during the impact penetration of a penetrator into the soil of the Moon

ние которых позволяет определить искомые параметры.

#### 1. Исходные данные.

При разработке перспективных penetrаторов цилиндрической формы диаметром не более 0,5 м и длиной 2 м с коническим наконечником форма неудаляемого сапфирового прозрачного окна может иметь цилиндрическую внешнюю поверхность, соответствующую форме поперечного сечения penetrатора и выступать за пределы penetrатора подобно оптической системе типа «рыбий глаз» с максимально широким полем обзора вплоть до значений (вдоль  $x$  поперек корпуса penetrатора):  $180^\circ \times 210^\circ$ .

Внешняя поверхность неудаляемого окна из льдокомпозита преимущественно имеет цилиндрическую внешнюю поверхность, соответствующую форме поперечного сечения penetrатора.

На стадии перелёта к Луне или другому ИНТ воздействию потока спорадических метеороидов и частиц, принадлежащих метеорным потокам, может быть исключено за счет применения специальных защитных устройств. Поэтому воздействиями этого типа частиц можно пренебречь.

В соответствии с вышесказанным основное воздействие на окна penetrатора возникают в процессе ударного внедрения в грунт Луны (рис. 1). При этом формируется поток грунтовых частиц, лунного реголита со скоростями, которые можно считать равными текущей скорости penetrатора, уменьшающимися от начального значения скорости удара  $v_{yg}$ , обычно не более 1–2 км/с, до нуля.

В работе рассмотрены задачи воздействия частиц грунта (лунного реголита) на сапфировое и льдокомпозиционное окна с целью оценки возможности повреждения их при проникании в грунт.

Так, согласно работе [5], при проникании в грунтовые преграды со скоростью взаимодействия до 1 км/с деформации металлических ударников малы, что позволяет рассматривать их как недеформируемые. Частицы грунта, в свою очередь, согласно двум наиболее распространенным гипотезам, при проникании движутся либо прямолинейно в направлениях, перпендикулярных к оси ударника (гипотеза «плоских сечений»), применяемая для тонких заостренных ударников), либо по нормали к по-

верхности головной части ударника (гипотеза «нормальных траекторий»), применяемая для ударников с затупленным наконечником).

При достаточно высокой скорости проникающего penetrатора, когда  $v > v_{зв}$ , где  $v_{зв}$  — скорость звука в деформируемой среде, из-за явления кавитации вокруг и сзади него возникает свободное пространство в виде т.н. кавитационной полости [6]. Значение пороговой скорости penetrатора  $v_t$ , начиная с которого образуется кавитационная полость, может быть определено соотношением [5]:

$$v_t = \frac{(C/A)^{0,5}}{\sin \lambda}, \quad (1)$$

где  $v_t$  — расчетное значение пороговой скорости penetrатора,  $\lambda$  — половина угла заострения кавитатора,  $A$  и  $C$  — характеристики сопротивляемости реголита внедрению penetrаторов. При  $A \approx 1700$  кг/м<sup>3</sup>,  $C \approx 10^8$  Па и  $\lambda = \pi/4$  расчетное значение пороговой скорости для реголита составляет  $v_t = 300–500$  м/с [7].

В таких условиях у неудаляемого сапфирового окна отсутствует трение о грунт, но оно находится под воздействием отдельных высокоскоростных частиц грунта, соударяющихся с ним под значительным углом  $\Theta$  (рис. 1), и возникает актуальная задача определения его повреждений, которая и является целью данного исследования. Здесь и далее под углом соударения, удара, подлета частицы к окну понимается угол  $\Theta$  по отношению к его нормали.

Можно рассматривать процесс взаимодействия с окном отдельных частиц только под значительным углом соударения в диапазоне  $70^\circ–80^\circ$ , двигающихся с предельной скоростью (превышающей  $v_t$ ). Таких частиц, случайным образом выбитых из грунта, может быть небольшое количество (не более нескольких тысяч). Из них для определения возможности нанесения повреждения выбираются частицы предельного размера, количество которых незначительно (его можно предварительно оценить в пределах нескольких десятков), как будет показано ниже на основе характеристик лунного грунта.

Выбор материала и размеров частиц осуществлен на основе данных о характеристиках лунного грунта, приведенных в статье [8]. Поверхность Луны вследствие отсутствия у нее атмосферы подвергается ударам метеороидов различных размеров. Поэтому лунный грунт представляет собой покров из рыхлого материала (реголита), состоящего из обломков подстилающих горных пород, фрагментов минералов и вторичных частиц, образованных в результате высокоскоростного воздействия, в число которых входят частицы стекла. Реголит покрывает почти всю поверхность Луны, его толщина составляет от 3 до 11 м в морских районах и 1–18 м в материковых районах. Кумулятивное весовое содержание частиц в лунном реголите (процент частиц размером более заданного) описывается уравнением (рис. 2) [8]:

$$N_{>d} \% \approx -23,205 \ln(d) + 143,586, \quad (2)$$

где  $d$  — размер частицы в мкм.

Для дальнейших расчетов рассматриваются сферические частицы из кремниевого стекла в виде шариков диаметром 1,0 мм и 1,5 мм (диаметр выбран с запасом с учетом возможности слипания двух

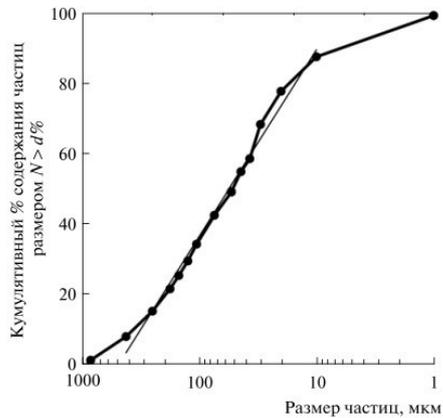


Рис. 2. Кумулятивное содержание частиц больше заданного размера [8]  
Fig. 2. The cumulative particle content is greater than a specified size [8]

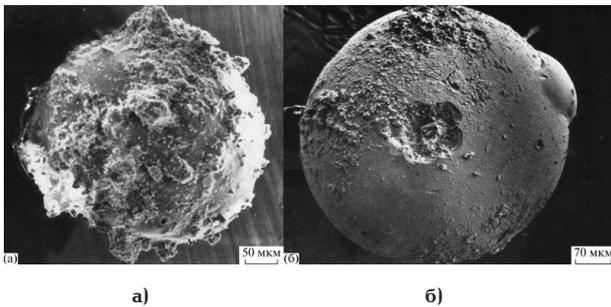


Рис. 3. Фотографии поверхностей стеклянных сферических частиц реголита Луны [8]: со спекшимися более мелкими частицами реголита (а) и ударным микрократером (б)  
Fig. 3. Photographs of the surfaces of glass spherical particles of regolith of the Moon [8]: with sintered smaller regolith particles (a) and an impact microcrater (b)

и более мелких частиц), ударяющие по неудаляемому сапфировому прозрачному окну и неудаляемому окну из льдокомпозита, которые являются типовыми для лунного реголита, доставленного в 1970 году автоматической станцией Луна-16 из района Моря Изобилия [8]. Две фотографии поверхностей стеклянных сферических частиц из этой доставленной партии реголита Луны со спекшимися более мелкими частицами реголита и ударным микрократером показаны на рис. 3 [8].

Расчеты проведены для скоростей движения частиц 500 м/с, 750 м/с и 1000 м/с и углов подлета  $\Theta$  70°, 75°, 80°, их результаты представлены в табл. 1. Принимается, что вероятность соударения с окном пенетратора при внедрении частиц подобного размера, двигающихся в предельном скоростном режиме, незначительна. Рассмотрению одиночного соударения частицы по неудаляемому сапфировому прозрачному окну и неудаляемому окну из льдокомпозита посвящены первая и вторая группы задач соответственно.

Для решения первой группы задач (взаимодействие частицы с сапфировым окном) разработана методика расчета, основанная на использовании программного комплекса [4], реализующего численное моделирование высокоскоростного удара методом Уилкинса в лагранжевой 3D-постановке. Вторая группа задач (взаимодействие частицы с окном из льдокомпозита) решается с использованием инженерной модели, определяющей параметры кратера, возникающего в хрупком материале при высокоскоростном ударе.

Для первой группы задач численного моделирования принимается, что фрагмент сапфирового окна представлял собой сферический сегмент внешним радиусом 20 см и толщиной стенки 0,4 см. Численное решение представленных задач моделирования

Таблица 1. Результаты расчетов на основе численного моделирования параметров повреждений сапфирового окна от соударения одиночной частицы грунта

Table 1. Calculation results based on numerical modeling of the parameters of damage to a sapphire window from the impact of a single soil particle

Задача №	Диаметр частицы $d$ , мм	Скорость удара частицы $v_{yA}$ , м/с	Угол подлета (к нормали окна) $\Theta$ , °	Максимальная глубина царапины в сапфировом окне $h_{cp}$ , мм	Площадь повреждения $S_{cp}$ , $10^{-2}$ мм <sup>2</sup>
1	1,0	500	70	0,042	1,434
2			75	0,03	0,478
3			80	0,000	0,000
4	1,5		70	0,075	2,390
5			75	0,06	0,956
6			80	0,015	0,239
7	1,0	750	70	0,067	2,151
8			75	0,052	0,956
9			80	0,01	0,239
10	1,5		70	0,11	3,824
11			75	0,078	1,673
12			80	0,025	0,478
13	1,0	1000	70	0,09	3,346
14			75	0,067	1,673
15			80	0,02	0,478
16	1,5		70	0,13	6,453
17			75	0,1	2,151
18			80	0,04	0,717

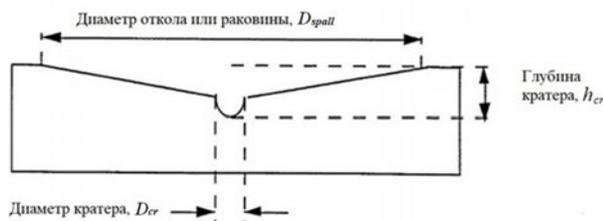


Рис. 4. Морфология хрупкой преграды после высокоскоростного удара одиночной частицей

Fig. 4. Morphology of a brittle barrier after a high-speed impact with a single particle

процессов высокоскоростного взаимодействия тел осуществлялось на основе лагранжева способа описания среды в предположении отсутствия массовых сил и теплопроводности. Для описания процессов деформирования и дробления твердых тел использовалась модель прочного сжимаемого идеально упругопластического тела.

Откольная прочность сапфира  $\sigma_{sp} \sim 8-13$  ГПа, в зависимости от кристаллографической ориентации, относительной плотности (при  $\rho_0 = 3,977$  г/см<sup>3</sup>) [9]. Ударная адиабата сапфира взята из работы [10].

Для второй группы задач с расчетами воздействий соударений частиц лунного реголита по окну из льдокомпозиата принято, что плотность льдокомпозиата можно оценивать на основе анализа состава его компонент (лед + поливиниловый спирт + порошок из ракушечника) как  $\approx 1030-1070$  кг/м<sup>3</sup>. Как показано выше, его прочностные характеристики в десятки раз превышают прочность речного льда и сопоставимы с наиболее прочными марками бетона, таким образом, этот материал по физическим свойствам приближается к прочным горным породам, таким как базальт, гранит, кремнезем.

Для этих материалов и различных видов стекла разработаны инженерные модели в виде эмпирических уравнений, определяющих параметры кратера в хрупкой преграде, в том числе откольной зоны на поверхности преграды при ударе сферического снаряда (рис. 4). Эмпирические (или полуэмпирические) инженерные модели определяют соотношения между интегральными характеристиками соударения, которые были получены на основе статистического анализа экспериментальных результатов и не основаны непосредственно на физических законах.

Для расчетов принимается усредненная плотность льдокомпозиата (преграда), равная  $\rho_t = 1,05$  г/см<sup>3</sup>, плотность ударной частицы (ударник) из стекла  $\rho_p = 2,2$  г/см<sup>3</sup>, а параметры соударения аналогичны расчетам для сапфирового окна (диаметр частиц 1,0 и 1,5 мм, скорость соударения 1000 м/с, угол соударения 70°–85°).

2. Основные соотношения в задачах численного моделирования.

Основные соотношения, используемые для численного моделирования, базируются на законах сохранения массы, импульса и энергии и замыкаются соотношениями Прандтля–Рейсса при условии текучести Мизеса. Расчет напряженно-деформированного состояния ударника и преграды проведен с использованием сеточного лагранжева метода Уилкинса в 3D-постановке [11], реализованного на тетраэдрических ячейках.

Считаем, что рассматриваемая среда сжимаема, изотропна, отсутствуют массовые силы, внутренние источники тепла и теплопроводность. В этом слу-

чае система уравнений для описания деформаций такой среды включает уравнения неразрывности, движения, энергии:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) &= 0; \\ \rho \dot{u}_i &= \sigma_{ij,j}; \\ \rho \dot{e} &= \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\rho$  — текущая плотность среды,  $\sigma_{ij}$ ,  $\epsilon_{ij}$ ,  $\dot{\epsilon}_{ij}$  — компоненты тензора напряжений, деформаций и скоростей деформаций,  $\mathbf{u}$  — вектор скорости материальной частицы с компонентами  $u_i$ ,  $e$  — удельная внутренняя энергия;  $i, j = 1, 2, 3$ , по повторяющимся индексам производится суммирование; индекс после запятой — производная по соответствующей координате; точка над символом — производная по времени [12].

К этим уравнениям добавляются уравнения, учитывающие термодинамические эффекты, связанные с адиабатным сжатием среды и прочностью среды, необходимые для замыкания системы уравнений, описывающей движение прочной сжимаемой среды.

Тензор напряжений определяется в виде девиаторной и шаровой составляющих:

$$\sigma_{ij} = s_{ij} - P \delta_{ij}, \quad (4)$$

где  $P$  — давление,  $s_{ij}$  — девиатор тензора напряжений,  $\delta_{ij}$  — символ Кронекера.

Тензор скоростей деформаций имеет вид:

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}). \quad (5)$$

Для описания сопротивления тела сдвигу используются соотношения Прандтля–Рейсса

$$s_{ij}^J + \lambda s_{ij} = 2\mu (\dot{\epsilon}_{ij} - \dot{\epsilon}_{ij} \delta_{ij} / 3), \quad (6)$$

при условии пластичности Губера–Мизеса

$$2J_2 = s_{ij} s_{ij} \leq 2\sigma_T^2 / 3, \quad (7)$$

где  $\mu$  — модуль сдвига,  $\sigma_T$  — динамический предел текучести материала, а для определения скалярного множителя  $\lambda$  используется процедура приведения напряжений к кругу текучести.  $s_{ij}^J$  — производная Яуманна, учитывающая поворот элемента среды во время его перемещения:

$$s_{ij}^J = \dot{s}_{ij} - \omega_{ik} s_{kj} - \omega_{jk} s_{ki}, \quad \omega_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} - u_{j,i}), \quad (8)$$

где  $\omega_{ij}$  — тензор скоростей вращения.

Уравнение состояния твердого тела выбиралось в форме Ми–Грюнайзена

$$\begin{aligned} P &= \frac{K(1 - \Gamma_0 \xi / 2)}{(1 - c\xi)^2} \xi + \rho_0 \Gamma_0 E, \\ \xi &= 1 - \rho_0 / \rho. \end{aligned} \quad (9)$$

В качестве критериев разрушения выбраны максимальные растягивающие (а также сжимающие для рассматриваемых в задачах хрупких тел) деформации и напряжения, максимальные сдвиговые деформации:

$$|\varepsilon_i| < \varepsilon^*, \quad |\sigma_i| < \sigma^*, \quad |\gamma_i| < \gamma^* \quad (10)$$

Построение тетраэдрической сетки осуществлялось на основе прямых методов с использованием шаблонов [13]. Для реализации контактных взаимодействий использовался метод расчета поверхности контакта соударяющихся тел с симметричным учетом действующих границ [12]. При взаимодействии осколков и для контактных поверхностей применялось условие идеального скольжения и непроникания по нормали. Механизм образования трещин реализован путем раздвоения сетки в узле с образованием свободной поверхности, моделирующей микротрещину, нормаль к которой максимально приближена к направлению главного напряжения  $\sigma_1$  в узле.

3. Эмпирические уравнения, характеризующие кратерообразование в хрупких материалах.

Формальные параметры кратера с учетом морфологии откола на внешней поверхности хрупкой преграды, образующегося в результате высокоскоростного соударения по ней сферической частицей, показаны на рис. 4 [14].

Воспользуемся для оценки диаметра откольной зоны, образовавшейся при высокоскоростном соударении частицы из плавленого кварца с преградой из льдокомполита одним из наиболее известных эмпирических уравнений [15]:

$$D_{spall} = 5 \cdot 10^{-4} d_p^{1,076} \rho_p^{0,784} \rho_t^{-0,5} v_p^{0,727} (\cos \theta)^{0,601}, \quad (11)$$

где  $D_{spall}$  — диаметр откольной зоны,  $\rho_p$  — плотность частицы,  $\rho_t$  — плотность преграды,  $v_p$  — скорость частицы,  $d_p$  — диаметр частицы (все параметры за-

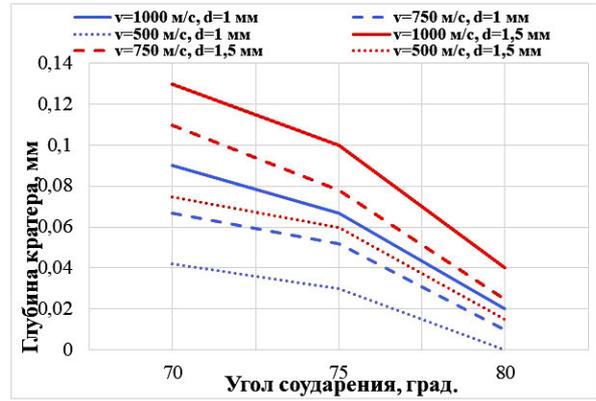


Рис. 5. График зависимости глубины кратера от угла соударения с частицей диаметром 1,0 мм и 1,5 мм  
Fig. 5. Dependence of the crater depth on the impact angle of a particle with a diameter of 1,0 mm and 1,5 mm

даются в единицах СГС),  $\theta$  — угол соударения, измеряемый от нормали к преграде.

Глубина кратера  $h_{cr}$  может быть оценена по уравнению высокоскоростного удара для гранитов и базальтов из работы [16]:

$$h_{cr} = 3,548 \cdot 10^{-4} E_c^{0,357} \rho_p^{1/6} \rho_t^{-1/2} (\cos \theta)^{0,66},$$

где  $E_c$  — кинетическая энергия ударника (частицы), выражая которую через скорость и массу, получим

$$h_{cr} = 2,2 \cdot 10^{-4} d_p^{1,07} \rho_p^{0,524} \rho_t^{-0,5} v_p^{0,714} (\cos \theta)^{0,66}, \quad (12)$$

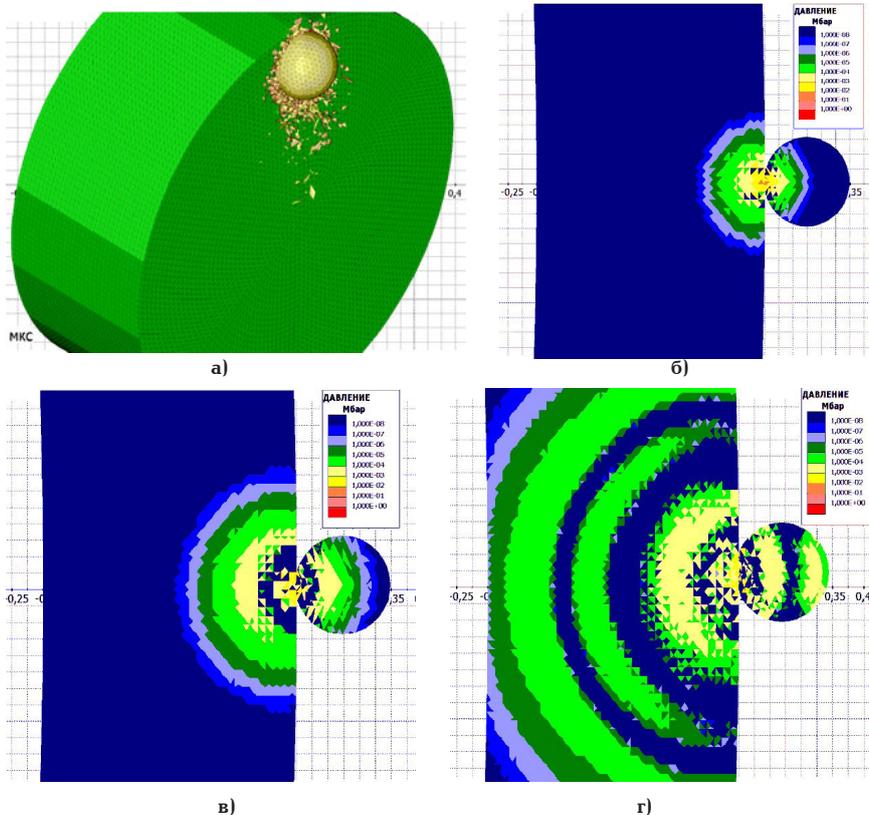


Рис. 6. Решение задачи соударения частицы с сапфировым окном: в 3D-виде на момент времени после удара частицы  $t = 6$  мкс (а), распространение ударной волны,  $t = 0,05$  мкс (б),  $t = 0,1$  мкс (в) и  $t = 0,32$  мкс (г)

Fig. 6. Solution of the problem of collision of a particle with a sapphire window: in 3D form at the time after the particle impact  $t = 6$   $\mu$ s (a), shock wave propagation,  $t = 0,05$   $\mu$ s (b),  $t = 0,1$   $\mu$ s (v) and  $t = 0,32$   $\mu$ s (r)

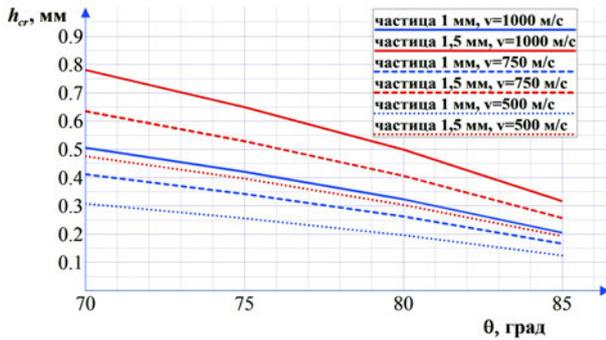


Рис. 7. График зависимости глубины проникания частицы в льдокомпозит от угла удара к нормали  
Fig. 7. Graph of the dependence of the depth of penetration of a particle into the ice composite from the angle of impact to the normal

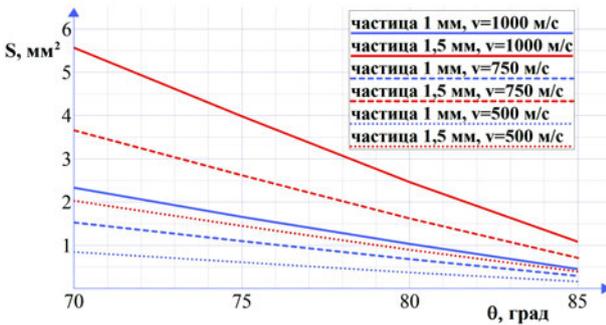


Рис. 8. График зависимости площади повреждения в льдокомпозите от угла удара к нормали  
Fig. 8. Graph of the dependence of the damage area in the ice composite on the impact angle to the normal

где все параметры задаются в единицах СГС, а уравнение применимо для углов соударения до  $75^\circ$ .

В соответствии с вышеприведенными параметрами плотности преграды из льдокомпозита и ударника в виде сферической частицы (диаметром 1,0 и 1,5 мм) из стекла, а также заданными значениями скоростей и углов соударения, по формулам (11) и (12) были проведены расчеты глубины проникания  $h_{cr}$  и площади откольной зоны  $S$ , результаты которых представлены далее.

#### Результаты решения задач

При решении задач высокоскоростного соударения с помощью численного моделирования (1-я группа) и на основе инженерной модели (2-я группа) получены следующие результаты:

1. При ударе сферической частицей лунного реголита диаметром 1,5 мм из кремниевое стекла со скоростью 1000 м/с под углом соударения  $70^\circ$  с неудаляемым сапфировым окном на основе численного моделирования определены следующие параметры повреждения (рис. 5): глубина кратера (царапины)  $h_{cr} \approx 0,13$  мм, площадь на поверхности окна  $S_{cr} \approx 0,0645$  мм<sup>2</sup>, что эквивалентно диаметру круга  $\approx 0,28$  мм. Ударяемая частица в результате взаимодействия с преградой будет в значительной степени разрушена, процесс разрушения показан на рис. 6.

2. При решении задачи удара сферической частицей лунного реголита диаметром 1,5 мм из кремниевое стекла со скоростью 1000 м/с под углом

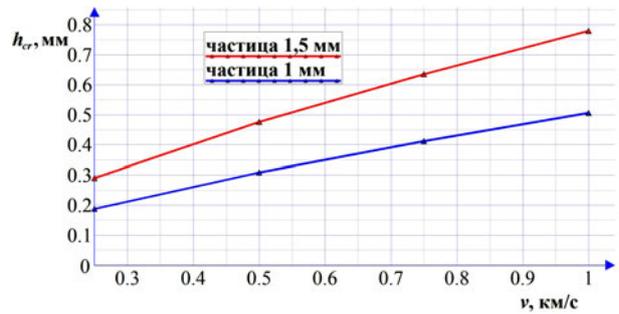


Рис. 9. График зависимости глубины проникания частицы в льдокомпозит от скорости удара для угла  $\theta = 70^\circ$   
Fig. 9. Graph of the dependence of the depth of penetration of a particle into the ice composite on the impact speed for an angle  $\theta = 70^\circ$

соударения  $70^\circ$  с удаляемым льдокомпозитным окном с использованием инженерной модели определены следующие параметры повреждения: глубина кратера  $h_{cr} \approx 0,8$  мм, площадь откольной зоны на поверхности окна  $S \approx 5,5$  мм<sup>2</sup>, что соответствует диаметру круга  $D_{spall} \approx 2,6$  мм.

3. Значения глубины кратера  $h_{cr}$  (рис. 7) и площадь откольной зоны на поверхности  $S_{cr}$  (рис. 8) удаляемого льдокомпозитного окна почти линейно уменьшаются при увеличении угла соударения  $\theta$  частиц лунного реголита диаметрами 1,0 мм и 1,5 мм в диапазоне от  $70^\circ$  до  $85^\circ$ .

4. При возрастании скорости удара сферических частиц лунного реголита диаметрами 1,5 мм и 1,0 мм в диапазоне от 300 м/с до 1000 м/с с углом удара  $\theta = 70^\circ$  глубина проникания в окно из льдокомпозита почти линейно возрастает со значений  $\approx 0,33$  мм и  $\approx 0,22$  мм до  $\approx 0,77$  мм и  $\approx 0,5$  мм соответственно (рис. 9).

#### Обсуждение результатов

Для расчетов и анализа последствий соударения сферической частицей лунного реголита с неудаляемым сапфировым и удаляемым льдокомпозитным окнами выбрана ее скорость до 1000 м/с и диаметр до 1,5 мм, превышающие с запасом значение начальной скорости внедрения и характерный диаметр частиц лунного реголита. Такой выбор показал следующее.

1. Зависимость глубины кратера в сапфировом окне от угла соударения в диапазоне от  $70^\circ$  до  $85^\circ$  частицей диаметром 1,0 мм и 1,5 мм имеет нелинейно спадающий характер (рис. 5).

2. Общий характер последствий для удаляемого льдокомпозитного окна свидетельствует о пробиравании поверхностного слоя и погружении частицы в льдокомпозит.

3. Повреждения удаляемого льдокомпозитного окна по глубине и площади на поверхности окна существенно больше повреждений неудаляемого сапфирового окна.

#### Выводы и заключение

1. Задача соударения одиночной сферической частицы лунного реголита с неудаляемым сапфировым и удаляемым льдокомпозитным окном перспективного пенетратора решена в первом случае с помощью численного моделирования, во втором — с использованием инженерной модели кратерообразования.

2. При проектировании перспективных пенетраторов толщина неудаляемых сапфировых и удаляемых льдокомпозиционных окон должна выбираться с учетом проведенных расчетов глубины и площади повреждений от высокоскоростных соударений одиночных сферических частиц лунного реголита.

3. Уменьшение повреждений неудаляемых сапфировых и удаляемых льдокомпозиционных окон от высокоскоростных соударений одиночных сферических частиц лунного реголита возможно за счет использования дополнительных специальных конструктивных решений, например, формой пенетратора с обратным конусом и созданием формы близкой каплевидной, использованием защитных удаляемых покрытий/пленок, совершенствованием носовой части с формированием потока частиц с минимизацией ударного воздействия на окна и др. Эти задачи требуют дополнительной конструктивной проработки.

4. Результаты расчетов, полученные численным моделированием для льдокомпозиционных окон, требуют дополнительного уточнения из-за недостаточного экспериментального изучения и неполных данных по физико-механическим свойствам этого материала.

5. Полученные расчетные значения глубины проникания и площади повреждения по сапфировым и льдокомпозиционным преградам позволяют подобрать толщину окна из соответствующего материала для инерционных пенетраторов с использованием оптически прозрачных или удаляемых перегородок. Толщина перегородки, необходимая для предотвращения возникновения осколков или трещин на тыльной стороне преграды, по найденной глубине проникновения оценивается как  $s \approx 7h_{cr}$  [17].

#### Примечания

\*результат не превосходит заданную точность 0,0001.

#### Благодарности

Работа выполнена в инициативном порядке.

#### Список источников

1. Леун Е. В., Добрица Д. Б., Поляков А. А. [и др.]. К вопросу выбора конструкционных материалов для создания многофункциональных инерционных пенетраторов // Вестник НПО им. С. А. Лавочкина. 2023. № 4 (62). С. 80–86. DOI: 10.26162/LS.2023.62.4.011. EDN: WGHDNK.
2. Korablev O. I., Ivanov A. Y., Kozlov O. E. [et al.]. Microscope spectrometer for the Phobos-Grunt mission // Solar System Research. 2010. Vol. 44, no. 5. P. 431–436. DOI: 10.1134/S0038094610050072. EDN: OHPPHV.
3. АС 1649218 СССР, МПК F 25 C 1/00, С 09 К 3/24. Способ получения искусственного льда / Рогожин С. В., Чеве-рев В. Г., Вайнерман Е. С. [и др.]. № 4694538/13; заявл. 23.05.89; опубл. 15.05.91, Бюл. № 18.
4. Добрица Д. Б., Яценко Б. Ю. Численное моделирование процесса взаимодействия высокоскоростного ударника с преградой с использованием трехмерной тетраэдральной разностной сетки // Сб. тр. X Всерос. науч. конф., посвященной 140-летию ТГУ и 50-летию НИИ ПММ ТГУ. Томск, 03–05 сентября 2018 г. Томск: Изд-во ТГУ, 2018. С. 94–96. DOI: 10.18698/2309-3684-2018-1-7089. EDN: ZDTARV.
5. Велданов В. А., Федоров С. В. Особенности поведения грунта на границе контакта с недеформируемым ударником при проникании // Прикладная механика и техническая физика. 2005. Т. 46, № 6. С. 116–127. EDN: MUCMXF.

6. Садретдинова Э. Р. Метод выбора проектных параметров реактивных пенетраторов для движения в лунном грунте: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2014. 136 с.

7. Veldanov V. A., Smirnov V. E., Khavroshkin O. B. Lunar Penetrator: Reducing Overloading and Penetration Control // Solar System Research. 1999. Vol. 33, no. 5. P. 432–436.

8. Slyuta E. N. Physical and mechanical properties of the lunar soil (a review) // Solar System Research. 2014. Vol. 48, no. 5. P. 330–353. DOI: 10.1134/S0038094614050050. EDN: SENWRV.

9. Черепанов И. А., Савиных А. С., Разоренов С. В. Откол в сапфире при ударном сжатии в различных кристаллографических направлениях // Журнал технической физики. 2020. Т. 90, № 6. С. 961–964. DOI: 10.21883/JTF.2020.06.49283.368-19. EDN: LPJYJ.

10. Maevskii K. K. Numerical investigations of oxides and silicates under shockwave loading // IOP Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 894, no. 1. P. 012057. DOI: 10.1088/1742-6596/894/1/012057.

11. Wilkins M. L. Computer simulation of dynamic phenomena. Springer Science & Business Media, 1999. 246 p.

12. Фомин В. М., Гулидов А. И., Сапожников Г. А. [и др.]. Высокоскоростное взаимодействие тел. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. 600 с. ISBN 5-7692-0237-8.

13. Галанин М. П., Щеглов И. А. Разработка и реализация алгоритмов трехмерной триангуляции сложных пространственных областей: прямые методы. Москва: Изд-во ИПМ им. М. В. Келдыша РАН, 2006. 32 с. URL: [https://keldysh.ru/papers/2006/prep09/prep2006\\_09.html](https://keldysh.ru/papers/2006/prep09/prep2006_09.html) (дата обращения: 23.11.2023).

14. Taylor E. A. Experimental Hypervelocity and Computational Impact on Brittle Study of and Materials Composites. United Kingdom, 1998. 238 p. DOI: 10.22024/UniKent/01.02.86024.

15. Paul K., Berthoud L. Scaling Crater and Particle Sizes for Impacts into Solar Cells // IKI Moscow Workshop on Space Debris. 1995. P. 1–10. DOI: 10.1017/S0252921100501572.

16. Gault D. E. Displaced mass, depth, diameter and effects of oblique trajectories for impact craters formed in dense crystalline rocks // The Moon. 1973. Vol. 6, P. 32–44. DOI: 10.1007/BF02630651.

17. IADC-04-03. Protection manual. Inter-agency space debris coordination committee. Prepared by the IADC WG3 members. 2012. URL: [http://www.iadc-online.org/Documents/IADC-04-03\\_Protection\\_Manual\\_v5.pdf](http://www.iadc-online.org/Documents/IADC-04-03_Protection_Manual_v5.pdf). (дата обращения: 25.12.2023).

**ДОБРИЦА Дмитрий Борисович**, кандидат технических наук, ведущий математик АО «НПО Лавочкина», г. Химки.

SPIN-код: 4802-1841

AuthorID (РИНЦ): 829318

**ЛЕУН Евгений Владимирович**, кандидат технических наук, ведущий инженер АО «НПО Лавочкина», г. Химки.

SPIN-код: 6060-8056

AuthorID (РИНЦ): 367560

AuthorID (SCOPUS): 57200722184

Адрес для переписки: [stankin1999@mail.ru](mailto:stankin1999@mail.ru)

#### Для цитирования

Добрица Д. Б., Леун Е. В. Определение повреждений неудаляемых и удаляемых окон перспективных пенетраторов от ударного воздействия высокоскоростных частиц реголита при ударном внедрении в грунт Луны // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2024. Т. 8, № 1. С. 69–77. DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-1-69-77

Статья поступила в редакцию 08.02.2024 г.

© Д. Б. Добрица, Е. В. Леун

# DETERMINATION OF DAMAGE TO UNDELETABLE AND DELETABLE WINDOWS OF PROMISING PENETRATORS FROM THE IMPACT OF HIGH-SPEED REGOLITH PARTICLES DURING IMPACT PENETRATION INTO THE SOIL OF THE MOON

D. B. Dobriza, E. V. Leun

Lavochkin Association,  
Russia, Moscow region, Khimki, Leningradskaya St., 24, 141402

The article discusses promising penetrators with non-removable transparent and removable opaque windows, created mainly from corundum and ice composite, respectively. Their use will expand the scientific research program due to visualization capabilities for video recording of the movement of the penetrator in the subsurface layers of soil and their optical methods of studying, as well as direct contact with them. The calculation method and the calculated values of damage to these windows from the impact of spherical particles of lunar regolith with diameters of 1,0 and 1,5 mm, colliding with them at speeds of up to 1 km/s in the angular range from 70° to 80°, obtained using numerical modeling or based on an engineering model, are discussed.

**Keywords:** space research, Moon, regolith, penetrator, high-speed penetration, sapphire, ice composite, Wilkins method.

## Acknowledgments

The work was done on an initiative basis.

## References

1. Leun E. V., Dobriza D. B., Polyakov A. A. [et al.]. K voprosu vybora konstruktsionnykh materialov dlya sozdaniya mnogofunktsional'nykh inertsionnykh penetratorov [On the question of the choice of structural materials for the creation of multifunctional inertial penetrators] // Vestnik NPO im. S. A. Lavochkina. *Vestnik NPO Im. S. A. Lavochkina*. 2023. Vol. 4 (62). P. 80–86. DOI: 10.26162/LS.2023.62.4.011. EDN: WGHDK. (In Russ.).
2. Korablev O. I., Ivanov A. Y., Kozlov O. E. [et al.]. Microscope spectrometer for the Phobos-Grunt mission // Solar System Research. 2010. Vol. 44, no. 5. P. 431–436. DOI: 10.1134/S0038094610050072. EDN: OHPPHV. (In Engl.).
3. Patent 1649218 SSSR, IPN F 25 C 1/00, S 09 K 3/24. Sposob polucheniya iskusstvennogo l'da [Method of producing artificial ice] / Rogozhin S. V., Cheverev V. G., Vaynerman E. S. [et al.]. No. 4694538/13. (In Russ.).
4. Dobriza D. B., Yashchenko B. Yu. Chislennoye modelirovaniye protsessa vzaimodeystviya vysokoskorostnogo udarnika s pregradoy s ispol'zovaniyem trekhmernoy tetraedral'noy raznostnoy setki [Numerical modeling of the process of interaction of a high-speed striker with an obstacle using a three-dimensional tetrahedral difference mesh] // Sbornik trudov X Vseros. nauch. konf., posvyashchennoy 140-letiyu TGU i 50-letiyu NII PMM TGU. *Collection of Works X All-Russian Scientific Conf., Dedicated to the 140th Anniversary of TSU and the 50th Anniversary of the Research Institute of Mechanical Engineering and Mechanics of TSU*. Tomsk, 2018. P. 94–96. DOI: 10.18698/2309-3684-2018-1-7089. EDN: ZDTARV. (In Russ.).
5. Veldanov V. A., Fedorov S. V. Osobennosti povedeniya grunta na granitse kontakta s nedeformiruyemym udarnikom pri pronikanii [Peculiarities of soil behavior at the boundary of contact with a non-deformable impactor during penetration] // Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2005. Vol. 46, no. 6. P. 116–127. EDN: MUCMXF. (In Russ.).
6. Sadretdinova E. R. Metod vybora proyektnykh parametrov reaktivnykh penetratorov dlya dvizheniya v lunnom grunte [Method for selecting design parameters of reactive penetrators for movement in lunar soil]. Moscow, 2014. 136 p. (In Russ.).
7. Veldanov V. A., Smirnov V. E., Khavroshkin O. B. Lunar Penetrator: Reducing Overloading and Penetration Control // Solar System Research. 1999. Vol. 33, no. 5. P. 432–436. (In Engl.).
8. Slyuta E. N. Physical and mechanical properties of the lunar soil (a review) // Solar System Research. 2014. Vol. 48, no. 5. P. 330–353. DOI: 10.1134/S0038094614050050. EDN: SENWRV. (In Engl.).
9. Cherepanov I. A., Savinykh A. S., Razorenov S. V. Otkol v sapfire pri udarnom szhatii v razlichnykh kristallograficheskikh napravleniyakh [Spalling in sapphire in different crystallographic directions under shock compression] // Zhurnal tekhnicheskoy fiziki. *Technical Physics*. 2020. Vol. 90, no. 6. P. 961–964. DOI: 10.21883/JTF.2020.06.49283.368-19. EDN: LPJYJ. (In Russ.).
10. Maevskii K. K. Numerical investigations of oxides and silicates under shockwave loading // IOP Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 894, no. 1. P. 012057. DOI: 10.1088/1742-6596/894/1/012057. (In Engl.).
11. Wilkins M. L. Computer simulation of dynamic phenomena. Springer Science & Business Media, 1999. 246 p. (In Engl.).
12. Fomin V. M., Gulidov A. I., Sapozhnikov G. A. [et al.]. Vysokoskorostnoye vzaimodeystviye tel [High-speed interaction of bodies]. Novosibirsk, 1999. 600 p. ISBN 5-7692-0237-8. (In Russ.).
13. Galanin M. P., Shcheglov I. A. Razrabotka i realizatsiya algoritmov trekhmernoy triangulyatsii slozhnykh prostranstvennykh oblastey: pryamyye metody [Development and implementation of algorithms for three-dimensional triangulation of complex spatial regions: direct methods]. Moscow, 2006. 32 p. URL: [https://keldysh.ru/papers/2006/prep09/prep2006\\_09.html](https://keldysh.ru/papers/2006/prep09/prep2006_09.html) (accessed: 23.11.2023). (In Russ.).
14. Taylor E. A. Experimental Hypervelocity and Computational Impact on Brittle Study of and Materials

Composites. United Kingdom, 1998. 238 p. DOI: 10.22024/UniKent/01.02.86024. (In Engl.).

15. Paul K., Berthoud L. Scaling Crater and Particle Sizes for Impacts into Solar Cells // IKI Moscow Workshop on Space Debris. 1995. P. 1–10. DOI: 10.1017/S0252921100501572. (In Engl.).

16. Gault D. E. Displaced mass, depth, diameter and effects of oblique trajectories for impact craters formed in dense crystalline rocks // The Moon. 1973. Vol. 6, P. 32–44. DOI: 10.1007/BF02630651. (In Engl.).

17. IADC-04-03. Protection manual. Inter-agency space debris coordination committee. Prepared by the IADC WG3 members. 2012. URL: [http://www.iadc-online.org/Documents/IADC-04-03\\_Protection\\_Manual\\_v5.pdf](http://www.iadc-online.org/Documents/IADC-04-03_Protection_Manual_v5.pdf). (accessed: 25.12.2023). (In Engl.).

---

**DOBRIZA Dmytry Borisovich**, Candidate of Technical Sciences, Lead Mathematician, Lavochkin Association, Khimki.

SPIN-code: 4802-1841

AuthorID (RSCI): 829318

**LEUN Evgeny Vladimirovich**, Candidate of Technical Sciences, Lead Engineer, Lavochkin Association, Khimki.

SPIN-code: 6060-8056

AuthorID (RSCI): 367560

AuthorID (SCOPUS): 57200722184

Correspondence address: [stankin1999@mail.ru](mailto:stankin1999@mail.ru)

#### For citations

Dobriza D. B., Leun E. V. Determination of damage to undeletable and deletable windows of promising penetrators from the impact of high-speed regolith particles during impact penetration into the soil of the Moon // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2024. Vol. 8, no. 1. P. 69–77. DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-1-69-77.

Received February 08, 2024.

© D. B. Dobriza, E. V. Leun