

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИНЕРЦИОННЫХ РАЗДЕЛЯЮЩИХСЯ ПЕНЕТРАТОРОВ ПУТЕМ УЧЕТА ОСОБЕННОСТЕЙ ИХ УДАРНОГО ВНЕДРЕНИЯ В ИССЛЕДУЕМЫЕ НЕБЕСНЫЕ ТЕЛА

Е. В. Леун, С. А. Чалов

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

В статье рассматриваются факторы, способные негативно повлиять на создание надежной радиосвязи инерционного разделяющегося пенетратора после его ударного внедрения в грунт исследуемого небесного тела с орбитальным аппаратом. Проведен расчет и анализ перегрузок, действующих на носовую головную и антенную части и показано, что перегрузка на вторую может быть в десятки раз больше, чем на первую. Проведен расчет и анализ входных диаметров воронок, образующихся от ударного внедрения пенетратора в разные грунты исследуемого небесного тела. Рассмотрены возможности совершенствования пенетраторов за счет использования сегментированных, телескопических и гибридных наконечников, а также обратного отстрела антенны, позволяющие снизить скорость удара и перегрузки при ударном внедрении пенетратора в грунт исследуемого небесного тела.

Ключевые слова: космические исследования, небесное тело, реголит, пенетратор, ударное внедрение, сегментированный наконечник, телескопический наконечник, гибридный наконечник.

Введение

Использование контактных методов изучения Луны, Марса и других исследуемых небесных тел (ИНТ) перспективно для космических исследований. Наиболее перспективными малыми космическими аппаратами для этого можно считать инерционные пенетраторы (в дальнейшем — пенетратор) с разделением в процессе ударного внедрения (проникания) головной (носовой) и антенной (хвостовой) частей (в дальнейшем — антенна) [1, 2]. Для космических исследований обычно достаточно погружения головной части в образующуюся воронку, каверну, кратер (в дальнейшем — воронка) глубиной около 5 м в лед, песчаный, каменистые и скальные грунты в зависимости от ИНТ. При этом связанная кабелем с погруженной головной частью антенна нижней частью частично погружена в воронку, но приемозлучательной частью остается на поверхности ИНТ, на входе воронки, как «пробка, вставленная в горлышко бутылки», для обеспечения радиосвязи с орбитальным аппаратом (ОА) как одного из важных условий успешной реализации всей научной миссии.

Ударное внедрение пенетратора в грунт ИНТ с одновременным отделением антенны от головной части — очень сложный многофакторный процесс с высокими перегрузками на головную часть, антенну и необходимостью обеспечения нацеливания антенны на ОА после ударного внедрения. Его возможными негативными последствиями, приводящими к потере радиосвязи, могут быть:

1) ударная перегрузка, превышающая предельную ударостойкость антенны, приводящая к нарушению ее целостности и выходу из строя;

2) возможный отскок антенны от входного прохода воронки с ее угловым поворотом при падении

на поверхность ИНТ, приводящим к нарушению нацеленности антенны на ОА;

3) образование воронки диаметром, превышающим поперечные размеры антенны, в том числе с неровными наклонными краями, с ее возможным западанием (заваливанием) во входной проход воронки с угловым поворотом, приводящим к нарушению нацеленности антенны на ОА.

Следовательно, целью исследований является совершенствование схемы ударного внедрения, конструкции и конструктивных характеристик пенетраторов для уменьшения негативных последствий вышеприведенных особенностей ударного внедрения в грунт ИНТ.

Постановка задачи

В связи с поставленной целью задачами данной работы являются расчет и анализ перегрузок, действующих на антенну и диаметры воронок в разные грунты ИНТ и образующихся в результате ударного внедрения в них пенетраторов. Также к задачам исследования следует отнести совершенствование конструкции пенетраторов и рассмотрение альтернативной схемы ударного внедрения пенетраторов для снижения ударных перегрузок и предотвращения нарушения радиосвязи с ОА после ударного внедрения в грунт ИНТ.

Теория

1. Критически важные факторы, способные негативно повлиять на создание радиосвязи между ОА и пенетратором после его ударного внедрения в грунт ИНТ.

Для традиционной схемы расположения частей пенетратора после его ударного внедрения в грунт

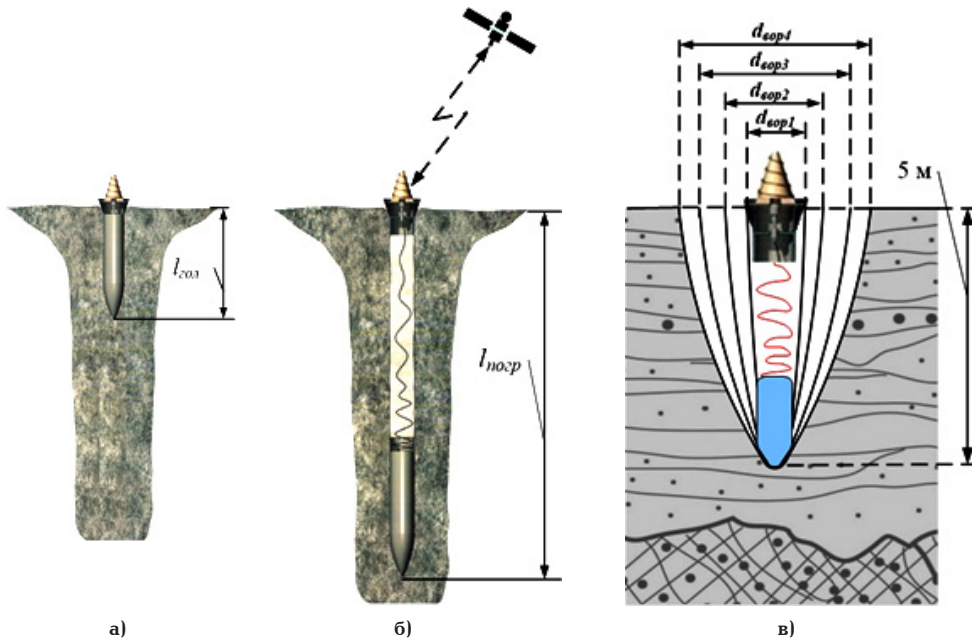


Рис. 1. Параметры ударного внедрения пенетратора в грунт ИНТ: погружение на длину головной части пенетратора $I_{порп} = I_{гол}$ с цилиндрической воронкой (а), погружение пенетратора на необходимую глубину $I_{порп} = I_{вор} = 5$ м с цилиндрической воронкой (б), разные диаметры входных отверстий конических воронок (в)

Fig. 1. Parameters of impact penetration of the penetrator into the SCB soil: immersion to the length of the head of the penetrator $I_{порп} = I_{гол}$ with a cylindrical funnel (a), immersion of the penetrator to the required depth $I_{порп} = I_{вор} = 5$ m with a cylindrical funnel (b), different diameters of the input openings of the conical funnels (v)

ИНТ характерно «насаживание» антенны на воронку подобно пробке на горлышко бутылки (рис. 1) [1]. Для такой схемы три группы критически важных факторов могут негативно повлиять на создание надежной радиосвязи с ОА.

Во-первых, перегрузки, действующие на антенну, и необходимость обеспечения ее достаточной ударостойкостью.

Во-вторых, превышение диаметра, создаваемой воронки поперечных размеров (диаметр антенны) $d_{ант}$ и возможность заваливания антенны в воронку с возможным ее переворачиванием и перенацеливанием в сторону от траектории полета ОА, существенно ухудшающим или даже исключающим возможности надежной радиосвязи. Для предупреждения этого необходимо обеспечение условия, при котором поперечные размеры (диаметр антенны) $d_{ант}$ будет превышать диаметр входного отверстия воронки $d_{вор}$ (рис. 1в).

$$d_{ант} > d_{вор}. \quad (1)$$

В-третьих, возможность отскока антенны от грунта с ее последующим переворачиванием и перенацеливанием в сторону от траектории полета ОА. Эти факторы рассмотрены далее более подробно.

2. Перегрузки, действующие на разделяющиеся части пенетратора при ударном внедрении в ИНТ.

При ударном внедрении пенетратора в грунт ИНТ значения перегрузки для антенны $G_{ант}$ примут два значения.

Процесс ударного внедрения пенетратора в грунт ИНТ можно разделить на два этапа. Первый этап начинается с момента ударного внедрения и до отделения антенны от головной части, когда глубина погружения пенетратора $I_{порп}$ не превышает длину его головной части $I_{гол}$ (рис. 1а):

$$I_{порп} \leq I_{гол}. \quad (2)$$

На первом этапе перегрузки антенны $G_{ант}(I_{порп} \leq I_{гол})$ и головной части $G_{гол}$ равны, максимальное значение которого определяется с помощью выражения:

$$G_{ант}(I_{порп} \leq I_{гол}) = G_{гол} = \frac{v_{уг}^2}{2gl_{порп}}, \quad (3)$$

где $v_{уг}$ — скорость удара пенетратора о поверхность ИНТ при ударном внедрении.

Второй этап возникает после отделения антенны от головной части с начала вдавливания антенны в грунт ИНТ, достигающего максимального значения $I_{гр}$, и до ее остановки, когда глубина погружения головной части пенетратора $I_{порп}$ больше ее длины $I_{гол}$ (рис. 1б):

$$I_{порп} > I_{гол}. \quad (4)$$

Для глубины воронки $I_{вор}$ максимальную перегрузку антенны $G_{ант}(I_{порп} > I_{гол})$ с уже сниженной скоростью движения до значения $v_{уг} \sqrt{1 - \frac{I_{гол}}{I_{вор}}}$ можно рассчитать по формуле:

$$G_{ант}(I_{порп} > I_{гол}) = \frac{\left(1 - \frac{I_{гол}}{I_{вор}}\right) v_{уг}^2}{2gl_{гр}}, \quad (5)$$

где $I_{гр}$ — максимальная глубина вдавливания антенны в грунт, м.

Для значений $I_{гол} = 2$ м, $I_{вор} = 5$ м, скорости удара $v_{уг}$, изменяющейся в диапазоне от 100 до 1000 м/с, и двух значений максимальных глубин вдавлива-

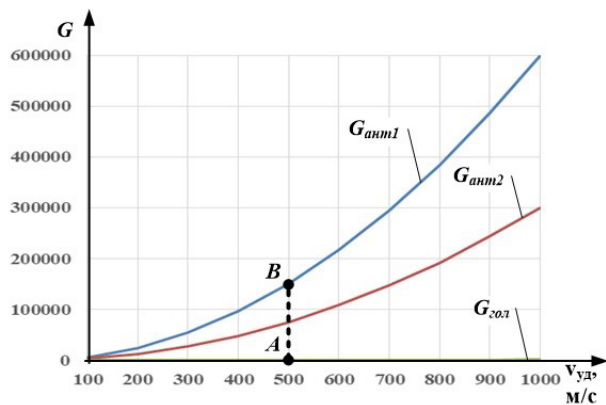


Рис. 2. Графики перегрузок, действующих на антенну $G_{ант1}$ и $G_{ант2}$ при вдавливании в грунт на 0,05 и 0,1 м соответственно, а также действующих на головную часть $G_{гол}$
 Fig. 2. Graphs of overloads acting on the $G_{ант1}$ and $G_{ант2}$ antenna when pressed into the ground by 0,05 and 0,1 m, as well as acting on the $G_{гол}$ head part

ния антенны в грунт $l_{гр1} = 0,05$ м и $l_{гр2} = 0,1$ м были рассчитаны значения перегрузок на головную часть $G_{гол}$ и на антенну $G_{ант1}$ и $G_{ант2}$ соответственно, представлены в виде графиков на рис. 2.

Если в качестве максимальной перегрузки, действующей на антенну, принять значение 100 000, то максимальная скорость удара v_{yg} составит 400 м/с и ≈ 550 м/с соответственно для вышеприведенных значений параметров. При увеличении максимальной перегрузки до 200 000 максимальные скорости удара v_{yg} возрастут до ≈ 580 м/с и ≈ 800 м/с соответственно.

Отношение перегрузок $k_{ант/гол}$ антенны $G_{ант}$ к головной части $G_{гол}$ после отделения первой от второй можно записать в виде соотношения:

$$k_{ант/гол} = \frac{G_{ант}(l_{пор} > l_{гол})}{G_{гол}} = \left(1 - \frac{l_{гол}}{l_{вор}}\right) \frac{l_{вор}}{l_{гр}} = \frac{l_{вор} - l_{гол}}{l_{гр}} \quad (6)$$

Для вышеприведенных данных и, в том числе, глубин вдавливания антенны в грунт $l_{гр}$, равных 0,05 м и 0,1 м, значения такого отношения составили 60 и 30. Как видно, антенна является существенно более уязвимой к перегрузкам, обуславливая более тщательное внимание к вопросам ее проектирования и конструктивной проработки для обеспечения требуемой ударостойкости.

Характерно, что в момент отделения антенны от головной части воздействие на первую резко, почти скачкообразно, увеличивается на $\Delta G_{разг}$ со значения $G_{ант}(l_{пор} \leq l_{гол})$ до значения $G_{ант}(l_{пор} > l_{гол})$:

$$\Delta G_{разг} = G_{ант}(l_{пор} > l_{гол}) - G_{ант}(l_{пор} \leq l_{гол}) = \left(1 - \frac{l_{гол}}{l_{вор}}\right) v_{yg}^2 - \frac{v_{yg}^2}{2gl_{пор}} \quad (7)$$

Пример такого скачкообразного повышения нагрузки $\Delta G_{разг}$ показан на рис. 2 с помощью отрезка [A; B].

В зависимости от различных параметров значение такого скачкообразного удара может достигать

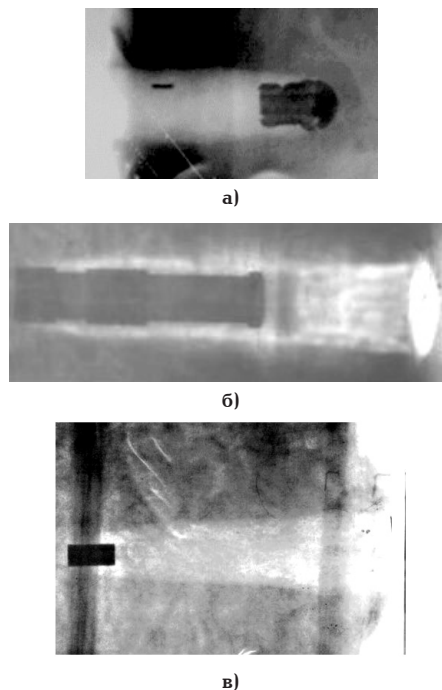


Рис. 3. Рентгенограммы воронок при пробитии ударником преграды: среда — песок, $v_{ya} = 1214$ м/с (а) [4], среда — песок, $v_{ya} = 174$ м/с, $W = 0,3\%$ (б) [3], среда — соленый лед, $v_{ya} = 800-1500$ м/с (в) [5]
 Fig. 3. X-ray images of craters when a striker penetrates barriers: medium — sand, $v_{ya} = 1214$ m/s (a) [4], medium — sand, $v_{ya} = 174$ m/s, $W = 0,3\%$ (b) [3], medium — salt ice, $v_{ya} = 800-1500$ m/s (v) [5]

100 000 и даже более, приводя как минимум к отскоку от грунта антенны и ее возможному переворачиванию, делая радиосвязь с ОА проблематичной.

3. Расчет и анализ диаметров входного отверстия воронки, образующейся от ударного внедрения пенетратора в различные ИНТ.

Для определения требуемых поперечных размеров (диаметров) антенны $d_{ант}$, соответствующих вышеприведенному условию (1), в данном разделе анализируются диаметры воронок, образуемых в результате ударного проникания ударников в различные типы грунтов, а именно в грунты, близкие к песчаным, подобные лунному, в грунты на основе водного льда, прочные каменные и скальные грунты.

3.1. Параметры воронки в грунтах, близких к песчаным, подобных лунному.

В [3, 4] анализируются результаты ударного внедрения различных ударников в песчаные грунты с помощью импульсного рентгеновского аппарата и последующим анализом рентгенограмм. Грунтовая преграда представляет собой контейнер, заполненный песком, шириной 5–10 см в зависимости от диаметра проникающего ударника. В опытах в основном использовался мелкозернистый песок, по свойствам близкий к лунному реголиту (прочность 10 МПа), плотностью $\rho \approx (1,6-1,8)$ г/см³ и влажностью $W \leq (8-12)\%$.

Как видно из полученных рентгенограмм на рис. 3а, б, в песчаных грунтах формируются воронки с нулевой или малой конусностью [3, 4]. Рентгенограмма воронки для соленого льда приведена на рис. 3в.

3.2. Параметры воронки в грунтах на основе водного льда.

В связи с отсутствием достаточной информации о солености льдов на ИНТ для объективности далее рассматриваются пресный и соленый льды. В [5] проанализированы профили воронок, образующиеся при пробитии преград из пресного и соленого (с соленостью $s = 10\%$) льдов и были введены два безразмерных параметра, а именно относительный радиус воронки $r'_{вор}$

$$r'_{вор} = \frac{r_{вор}}{r_{уг}} - 1, \quad (8)$$

а также относительное расстояние от переднего торца ударника до входа в ледяную преграду $l'_{вор}$:

$$l'_{вор} = \frac{l_{вор}}{r_{уг}}, \quad (9)$$

где $r_{вор}$ и $r_{уг}$ — радиусы воронки и ударника.

Для этих безразмерных параметров на основе экспериментальных данных определена зависимость $r'_{вор}(l'_{вор})$ также в безразмерных единицах:

$$r'_{вор}(l'_{вор}) = 3,6 - \frac{a_{лег}}{l'_{вор} + b_{лег}}. \quad (10)$$

После преобразований выражений (8)–(10) формируется уравнение

$$r_{вор} = \frac{23r_{уг} + r_{уг}^2(4,6b_{лег} - a_{лег})}{5 + b_{лег}r_{уг}}. \quad (11)$$

С учетом этого из формулы (11) можно создать два уравнения для пресного и соленого льдов, в которых вместо радиусов воронки $r_{вор}$ и ударника $r_{уг}$ используются диаметр воронки $d_{вор}$ и диаметр пенетратора $d_{пен}$. С учетом глубины воронки $l_{вор} = 5$ м и значений коэффициентов $a_{лег}$ и $b_{лег}$ для двух типов льда, равных 82,5 и 24,3 для пресного льда и 60,7 и 18 для соленого льда соответственно [5], получаем два уравнения:

для пресного льда

$$d_{вор} = \frac{d_{пен}(23 + 14,64d_{пен})}{5 + 12,15d_{пен}}, \quad (12)$$

для соленого льда

$$d_{вор} = \frac{d_{пен}(23 + 11,05d_{пен})}{5 + 9d_{пен}}. \quad (13)$$

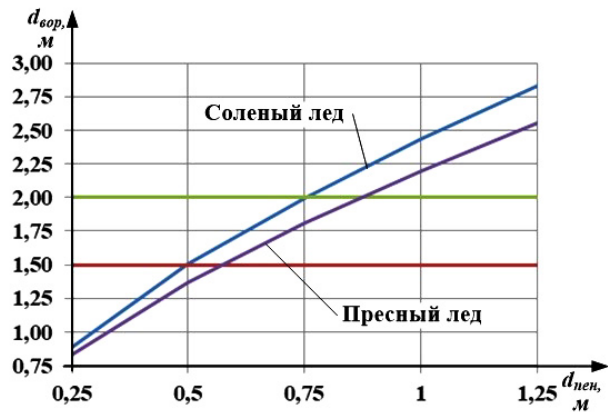


Рис. 4. Графики зависимостей входных диаметров воронки $d_{вор}$ от диаметра пенетратора $d_{пен}$ в соленом и пресном льдах для глубины воронки 5 м

Fig. 4. Graph of the dependence of the inlet diameters of the $d_{вор}$ funnel diameter on the $d_{пен}$ penetrator diameter in salt and fresh ice for the 5 m funnel depth

На основе этих формул рассчитаны значения диаметров воронок $d_{вор}$ для двух типов льдов и диаметров пенетраторов в диапазоне от 0,25 до 1,25 м, графики которых приведены на рис. 4. На этих графиках выделены границы приемлемого диапазона диаметров воронок $d_{вор}$ от 1,5 до 2 м, определяющие максимальные диаметры пенетраторов $d_{пен}$ не более 0,5–0,75 м для соленого льда и не более $\approx 0,6$ –0,88 м для пресного льда.

Также установлено [5], что с учетом погрешности измерений размеры образующейся в соленом льду каверны при реализованных в экспериментах условиях внедрения практически не зависят от температуры. В соленом льду ширина каверны в среднем на 20 % больше, чем в пресном.

3.3. Параметры воронки в мерзлых грунтах на основе водного льда и частиц реголита, прочных каменных и скальных грунтах.

Известно, что упрочнение льда может происходить за счет влияния дополнительных факторов, таких как низкие температуры [6], а также наличия в нем частиц реголита ИНТ. На примере фотографии частицы лунного реголита (рис. 5а) [7] видно, что она имеет пещеристую мелкопористую форму, во многом подобную структуре земного ракушечника (рис. 5б), добавление которого в воду может приводить к упрочнению льда не менее чем в 5 раз [2, 8]. Таким образом, можно предположить, что прочность льда с частицами реголита, в частности в полярных и/или околополярных районах Луны и в так называемых кратерах вечной тьмы, подоб-

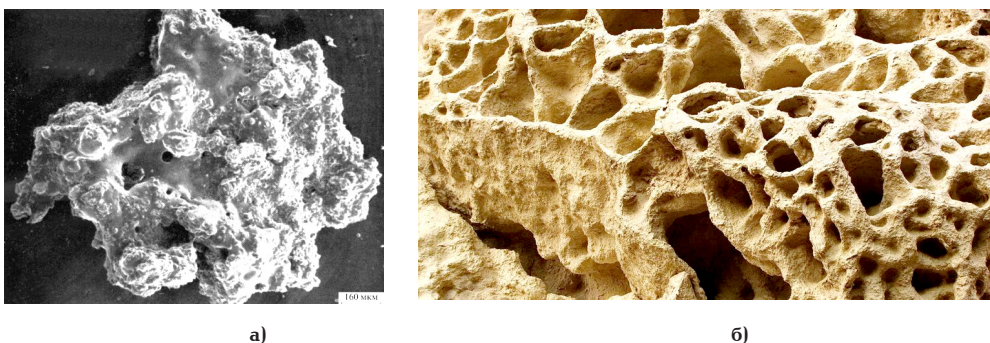


Рис. 5. Фотографии частицы лунного реголита (а) [7] и земного ракушечника (б)

Fig. 5. Photographs of a particle of lunar regolith (a) [7] and terrestrial shell rock (b)

ных лунному кратеру Шеклон, в отдельных местах может достигать значений 75–90 МПа, приближаясь к прочным каменистым и/или скальным грунтам, ударное внедрение в которые рассмотрено далее.

В [9] показано, что форма воронки во многом определяется отношением плотностей и прочностных параметров материалов ударника и преграды, расширяясь с ростом скорости. Значительное влияние на процесс расширения воронки, приближая ее к полусферической, может оказывать проявление взрывного характера ударного внедрения. При отсутствии взрывчатых веществ так называемый инерциальный взрыв при ударном внедрении может быть инициирован металлами [10], например, металлом, из которого изготовлен наконечник пенетратора. В основе такого взрыва лежит инерциально-электронная эмиссия [11], заключающаяся в инерционном выходе из тела подвижных заряженных частиц — электронов за счет резкого торможения при ударе. Критическое число вышедших электронов и опустошение кристаллической решетки металла одновременно с локальным разогревом от резкой деформации приводят к взрыву. В [11] показано, что значения максимальной скорости удара $v_{уг}$, приводящей к такому взрыву, связаны со скоростью звука в металлах $v_{зв}$. Поэтому предотвращение возникновения инерциального взрыва и значительного расширения образующейся воронки предполагает, помимо учета прочностных свойств, выбор металлов или их сплавов для наконечника пенетратора с высокой скоростью звука, например, титан ($v_{зв} = 4140$ м/с), вольфрам ($v_{зв} = 4310$ м/с), железо ($v_{зв} = 5170$ м/с), молибден ($v_{зв} = 6190$ м/с).

Для расчетов входных диаметров воронок принципиальное значение приобретает вопрос о ее форме, если необходимо экстраполировать экспериментальные результаты на более высокий, чем достигнутый в экспериментах диапазон скоростей удара. Как следует из [9], при соблюдении условий, исключающих инерциальный взрыв, и во многих случаях при скоростях менее 1,5–2 км/с низшее значение отношения глубины воронки к ее диаметру $l_{вор}/d_{вор}$ уменьшается до 1–2.

Консервативную оценку значения диаметра воронки с учетом всех возможных неидеальностей можно провести на основе уравнения из [12], где рассмотрено проникание пенетраторов с кавитатором в прочную каменистую среду. При некотором упрощении кавитатор можно считать головной частью пенетратора, а диаметр образуемой воронки — зависящей от диаметра кавитатора. Используя полученные результаты, представляем выражение для диаметра воронки $d_{вор}$, формируемой таким кавитатором диаметром d_c и с углом заострения 2λ :

$$d_{вор} = 2 \cos \lambda \left(2x \sin \lambda \left(\frac{d_c}{2 \cos \lambda} \right)^{1,5} + \left(\frac{d_c}{2 \cos \lambda} \right)^{2,5} \right)^{0,4}, \quad (14)$$

где x — расстояние от вершины кавитатора до рассматриваемого сечения воронки.

Это выражение сформировано на основе зависимостей инерционного расширения несжимаемой среды, полученных для случая сферической симметрии. Здесь диаметр воронки $d_{вор}$ увеличивается в направлении хвостовой части пенетратора.

В [8] рассмотрены пенетраторы гладкой, ступенчатой и конической форм. На рис. 6 представле-

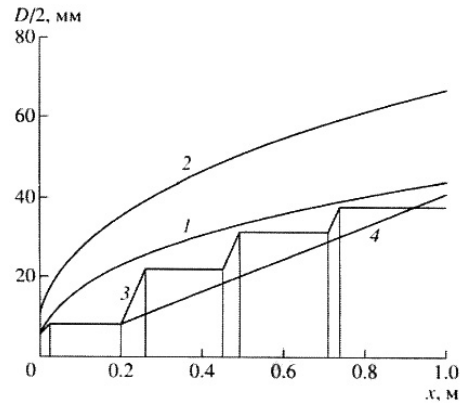


Рис. 6. Графики зависимостей полу диаметра воронки от расстояния относительно вершины кавитатора при проникании в реголит: 1 — $m = 5$ кг; 2 — $m = 20$ кг; 3 — ступенчатый пенетратор, 4 — конический пенетратор [12]
 Fig. 6. Graphs of the dependence of the funnel half-diameter on the distance relative to the top of the cavitator during penetration into the regolith: 1 — $m = 5$ kg; 2 — $m = 20$ kg; 3 — stage penetrator; 4 — conical penetrator [12]

ны графики зависимостей полу диаметра воронки от ее глубины (расстояния относительно вершины кавитатора при проникании в реголит): 1 и 2 — зависимости гладких пенетраторов с массой 5 кг и 20 кг; 3 — ступенчатый пенетратор; 4 — конический пенетратор.

На основе полученных данных были определены аппроксимирующие функции для двух значений массы пенетратора и диаметров их кавитаторов: $d_{вор1}(m_{пен1}; d_{c1})$ и $d_{вор2}(m_{пен2}; d_{c2})$ на участках погружения (глубин воронки) 0,2–1 м в прочную каменистую среду плотностью $\rho = 1700$ кг/м³ и прочностью $C = 100$ МПа. Так, для двух пенетраторов с массой $m_{пен1} = 5$ кг и диаметром кавитатора $d_{c1} = 0,0095$ м, а также с массой $m_{пен2} = 20$ кг и диаметром кавитатора $d_{c2} = 0,019$ м при условии $2\lambda = \pi/2$ использовались аппроксимирующие функции для случая линейной регрессии:

$$d_{вор} = a_1 l_{вор} + b_1, \quad (15)$$

где a_1 — безразмерный коэффициент, b_1 — коэффициент с размерностью в метрах. После проведенных расчетов с помощью решателя [13] две аппроксимирующие функции для $d_{вор1}$ и $d_{вор2}$ по формуле (15) со средней ошибкой аппроксимации $\approx 4,6\%$ и $\approx 2,5\%$ соответственно приняли вид:

$$d_{вор1} = 0,048 l_{вор} + 0,04, \quad (16)$$

$$d_{вор2} = 0,076 l_{вор} + 0,0596. \quad (17)$$

Эти аппроксимирующие функции использованы для расчетов значений диаметров входа (входного диаметра) воронки от ее глубины в диапазоне от 0,5 до 5 м. Согласно расчетным данным, соотношения диаметров $d_{вор2}$ к $d_{вор1}$ изменяются в диапазоне от 1,53 до 1,57. Принимая во внимание допущение о подобии, можно предположить, что при увеличении диаметра кавитатора в пять раз с $d_{c1} = 0,0095$ м до $d_{c3} \approx 0,05$ м и с $d_{c2} = 0,019$ м до $d_{c4} \approx 0,1$ м расчетные значения диаметров соответствующих воронок $d_{вор3}$ и $d_{вор4}$ вырастут также

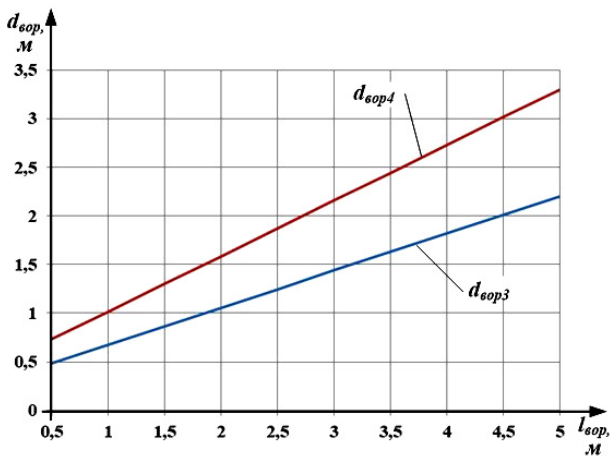


Рис. 7. Зависимости входных диаметров воронок $d_{вор3}$ и $d_{вор4}$ от ее глубины $l_{вор}$
 Fig. 7. Dependence of the inlet diameters of the $d_{вор3}$ and $d_{вор4}$ funnels and on the $l_{вор}$ depth

примерно в пять раз, подобно меняясь в соотношении диаметров $d_{вор2}$ к $d_{вор1}$ в диапазоне от 7,63 до 7,85. С учетом этого были рассчитаны диаметры воронок $d_{вор3}$ и $d_{вор4}$, представленные в виде графиков на рис. 7. Они показали, что для глубины воронки $l_{вор} = 5$ м их входные диаметры составят $d_{вор3} \approx 2,2$ м и $d_{вор4} \approx 3,3$ м. На основе проведенных расчетов получаем $l_{вор}/d_{вор3} = 5/2,2 \approx 2,27$ и $l_{вор}/d_{вор4} = 5/3,3 \approx 1,51$. Как видно, полученные данные не ниже 1 и удовлетворяют вышеприведенному результату проведенных ранее исследований. Однако полученные значения для диаметров воронок $d_{вор3}$ и $d_{вор4}$ делают проблематичным на практике выполнение условия (1).

Радикальными способами преодоления ограничений и улучшения тактико-технических характеристик в сложном многофакторном процессе ударного внедрения в грунт ИНТ, связанных с перегрузками, обеспечением гарантированной нацеленности антенны, можно считать реализацию альтернативного способа. Он заключается в реализации возможностей снижения перегрузок путем повышения глубины проникания без увеличения скорости удара, а также обратного отстрела антенны, обладающей возможностью адаптивного нацеливания на движущийся ОА.

4. Возможности совершенствования пенетратора в целях предотвращения негативного влияния факторов для создания надежной радиосвязи.

Снижение перегрузок от ударного внедрения пенетраторов в ИНТ возможно при уменьшении скорости удара с одновременным повышением глубины проникания за счет использования наконечников пенетраторов оживальной формы и специальных конструкций: сегментированных, телескопических или сегментированных телескопических (в дальнейшем — гибридные). Такие возможности рассмотрены далее.

4.1. Результаты исследований внедрения сегментированных, телескопических и гибридных ударников.

Глубина воронки $l_{вор}$ пропорциональна скорости удара $v_{уг}$, но также зависит от конструктивных параметров пенетратора. Зависимость от последних можно выразить упрощенным эмпирическими выражением:

$$l''_{вор} = k_{кон} l_{вор} = k_{нак} k_{форм} l_{вор} \quad (18)$$

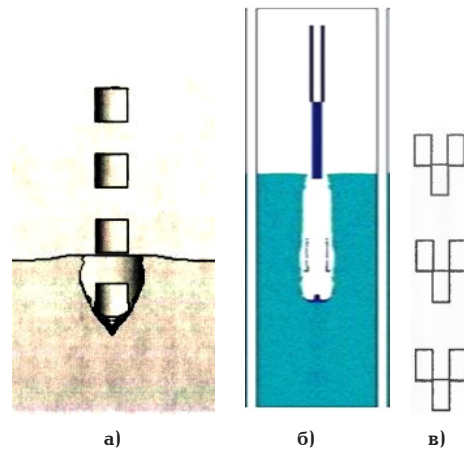


Рис. 8. Схематичное изображение сегментированного (а) [14], телескопического (б) [15] и гибридного (в) [9] ударников
 Fig. 8. Schematic representation of segmented (a) [14], telescopic (b) [15] and hybrid (v) [9] impactors

где $l''_{вор}$ — увеличенная глубина воронки от изменения конструктивных параметров пенетратора; $k_{кон}$, $k_{нак}$ и $k_{форм}$ — коэффициенты конструкции, наконечника и формы головной части.

Так, ранее в работах [14–16] рассматривались особенности внедрения в преграду сегментированных (рис. 8а), телескопических (рис. 8б) и гибридных (рис. 8в) ударников. Было показано, что использование сегментированных наконечников позволяет повысить глубину проникания в грунт до 80 %, т.е. $k_{нак1} \approx 1,8$ [14–16]. Ударники телескопической конструкции также увеличивают глубину проникания в грунт до 50 %, т.е. $k_{нак2} \approx 1,5$ [14–16].

В [17] представлены исследования по влиянию формы головной части ударника на глубины воронок на примере льда. По полученным результатам исследований можно определить аппроксимирующие функции для случая линейной регрессии для отношений оживальной головной части к конической и плоской $k_{ож/кон}$ и $k_{ож/плос}$ соответственно:

$$k_{ож/кон} = a_2 v_{уг} + b_2 \quad (19)$$

$$k_{ож/плос} = a_3 v_{уг} + b_3 \quad (20)$$

где a_2 и a_3 — коэффициенты с размерностью с/м; b_2 и b_3 — безразмерные коэффициенты.

Расчеты, проведенные с помощью решателя [13], позволили определить две искомые функции:

для отношения оживальной головной части к конической $k_{ож/кон}$ со средней ошибкой аппроксимации $\approx 1,37$ %

$$k_{ож/кон} = -0,0004v_{уг} + 1,5548 \quad (21)$$

и для оживальной головной части к плоской $k_{ож/плос}$ со средней ошибкой аппроксимации $\approx 3,9$ %

$$k_{ож/плос} = -0,0014v_{уг} + 2,0357 \quad (22)$$

Полученные формулы (21) и (22) показывают спадающий характер функций и то, что с ростом скорости удара влияние формы головной части постепенно снижается. Эти функции можно экстраполировать как минимум до скорости удара $v_{уг} = 500$ м/с. Рассчитанные значения функций $k_{ож/кон}$

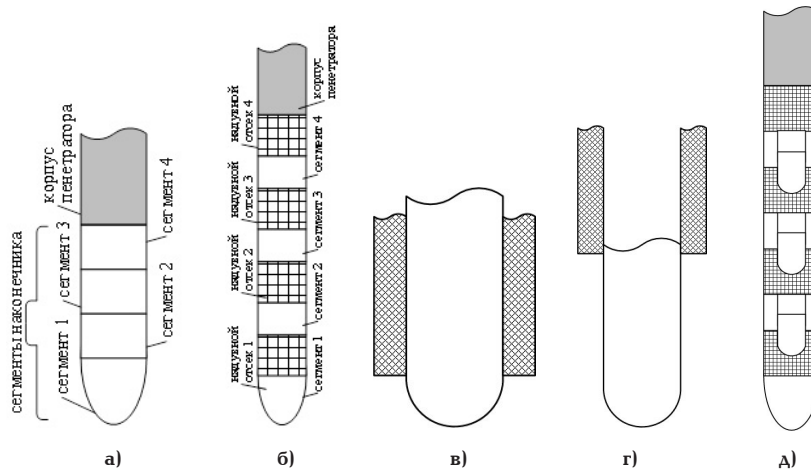


Рис. 9. Пенетратор с сегментированными наконечниками: в сложенном состоянии (а), в раздвинутом состоянии с надувными отсеками (б), пенетраторы телескопической конструкции в сложенном состоянии (в) с раздвинутыми частями (г), гибридная конструкция пенетратора (д)

Fig. 9. Penetrator with segmented tips: in the folded state (a), with inflatable sections (b), penetrators of telescopic design in the folded state (v) with extended parts (r), hybrid design of the penetrator (A)

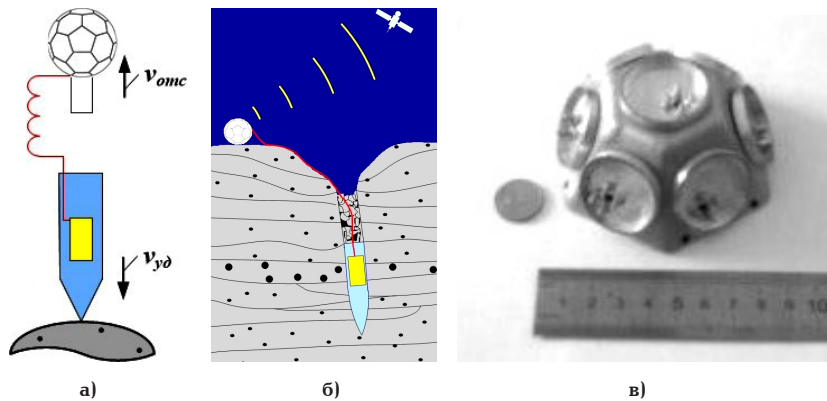


Рис. 10. Обратный отстрел антенны (а) и использование антенны после обратного отстрела для радиосвязи с ОА (б, научные приборы обозначены прямоугольником) и общий вид прототипа антенны (в) [21]

Fig. 10. Reverse firing of the antenna (a) and the use of the antenna after reverse firing for radio communication with OA (b, scientific instruments are indicated by a rectangle) and a general view of the prototype antenna (v) [21]

и $k_{ож/плос}$, начиная от скорости удара 150 м/с, уменьшаются с 1,495 до 1,355 и с 1,826 до 1,336. Несмотря на это, степень влияния формы головной части достаточно большая в диапазоне от $\approx 35\%$ до $\approx 50\%$ и от $\approx 35\%$ до $\approx 83\%$ для оживальной формы по отношению к конической и плоской соответственно.

Как следует из вышеизложенного, целенаправленным конструктивным совершенствованием наконечника пенетратора можно достичь повышение глубины (или уменьшение скорости удара $v_{уг}$) в два и более раз. Такие исследования создают основу для совершенствования пенетраторов. Наиболее удобным материалом для изготовления дискретных сегментов пенетраторов, а также внешней или внутренней цилиндрических частей телескопической конструкции, может быть лед из дистиллированной воды. После ударного внедрения в грунт ИНТ он удаляется за счет нагрева и сублимации.

Подготовка к ударному внедрению пенетратора с сегментированным наконечником в основном заключается в следующем. Изначально доставляемый на ОА для сброса пенетратор представляет сложную конструкцию (рис. 9а). Далее, перед отстрелом от ОА пенетратор «раскладывается» за счет

раздвижения сегментов приводами, реализованными, например, на основе элементов с памятью формы [18], на основе пружин и давления подаваемого газа в надуваемых конструкциях [19] (рис. 9б). Последний способ, вероятно, можно считать наиболее «экологичным» для последующих научных исследований с точки зрения минимизации воздействия на грунт ИНТ. Таким образом, ударное внедрение в грунт ИНТ осуществляется наконечником пенетратора, реализованного в виде разнесенных с определенным интервалом ледяных сегментов. Телескопический (в сложенном и раздвинутом состоянии) и гибридный наконечники пенетраторов показаны на рис. 9в, г и д.

4.2. Снижение перегрузки антенны за счет ее обратного отстрела.

Снижения перегрузки антенны $G_{ант}$ можно достичь за счет снижения ее скорости удара о грунт ИНТ, которое можно реализовать ее обратным отстрелом (рис. 10а, научные приборы пенетратора обозначены желтым прямоугольником). Наиболее предпочтительно осуществлять обратный отстрел антенны на этапе максимального снижения скорости пенетратора в процессе его погружения в грунт

ИНТ. Это удобнее реализовать непосредственно перед отделением антенны от головной части (рис. 1а) в идеале при глубине погружения, равного длине головной части: $l_{погр} \approx l_{гол}$. При таком варианте перегрузка антенны $G'_{ант1}$ будет зависеть от разностной скорости, равной разности текущей скорости движения головной части в грунте $v_{yg} \sqrt{1 - \frac{l_{гол}}{l_{вор}}}$, и скорости отстрела $v_{омс}$ в выражении

$$G'_{ант1} = \frac{\left(v_{yg} \sqrt{1 - \frac{l_{гол}}{l_{вор}}} - v_{омс} \right)^2}{2gl_{rp}}. \quad (23)$$

Для выбранных ранее значений $l_{гол} = 2$ м, $l_{вор} = 5$ м имеем $v_{yg} \sqrt{1 - \frac{l_{гол}}{l_{вор}}} \approx 0,77v_{yg}$. Тогда формула упрощается к следующему виду:

$$G'_{ант1} = \frac{(0,77v_{yg} - v_{омс})^2}{2gl_{rp}}. \quad (24)$$

Расчеты показывают, что при росте скорости удара v_{yg} от 500 до 1000 м/с и скорости обратного отстрела антенны 300 м/с и для двух значений глубин вдавливания антенны в грунт $l_{rp1} = 0,05$ м и $l_{rp2} = 0,1$ м перегрузка $G'_{ант1}$ увеличивается с 7225 до 220900 и с ≈ 3613 до 110450.

С учетом современного научно-технического задела в направлении повышения ударостойкости блоков такие значения не являются запредельными. Например, как следует из [20], для наиболее ответственного узла в виде генератора частоты на поверхностных акустических волнах и для микросхем ведущих западных стран в 2010 г. значение G достигало 100 тыс. и 100 тыс. в течение 1 мс соответственно. Современные темпы прогресса позволяют уверенно предполагать достижение значений максимальной перегрузки до 300 тыс. к настоящему времени.

Тем не менее дополнительное снижение перегрузки антенны до значения $G'_{ант2}$ можно обеспечить, используя вышеописанные конструктивные способы повышения проникания и изменив формулу (24) к следующему виду:

$$G'_{ант2} = \frac{\left(\frac{0,77}{k_{кон}} v_{yg} - v_{омс} \right)^2}{2gl_{rp}}. \quad (25)$$

Расчеты показывают, что при условии $k_{кон} = 2$ для двух значений глубин вдавливания антенны в грунт $l_{rp1} = 0,05$ м и $l_{rp2} = 0,1$ м перегрузки $G'_{ант2}$ равны ≈ 100000 и ≈ 50000 соответственно с возможностью достижения скорости удара 1600 м/с. При более низкой скорости удара, например 1000 м/с, перегрузки $G'_{ант2}$ уменьшаются до значений ≈ 7200 и ≈ 3600 соответственно, существенно снижая ударную нагрузку и демонстрируя высокую эффективность такого подхода.

Коэффициент снижения перегрузок k_{G1} , достигаемых с использованием обратного отстрела антенны, можно рассчитать как отношение $G_{ант}(l_{погр} > l_{гол})$, определяемое по выражению (5), к $G'_{ант}$, рассчитываемой с помощью формулы (24), для ранее уже заданных значений $l_{гол} = 2$ м, $l_{вор} = 5$ м:

$$k_{G1} = \frac{G_{ант}(l_{погр} > l_{гол})}{G'_{ант1}} = \frac{0,6v_{yg}^2}{(0,77v_{yg} - v_{омс})^2} = \left(\frac{0,77v_{yg}}{0,77v_{yg} - v_{омс}} \right)^2. \quad (26)$$

Расчеты показывают, что при изменении скорости удара v_{yg} в диапазоне от 500 до 1000 м/с и скорости отстрела 300 м/с коэффициент снижения перегрузок k_{G1} снижается с 20,76 до 2,72.

Аналогично можно определить коэффициент снижения перегрузок k_{G2} , достигаемых с использованием обратного отстрела антенны в сочетании с конструктивными способами повышения проникания, как отношение формулы (5) к формуле (25) при условии $k_{кон} = 2$, формируя уравнение для расчета:

$$k_{G2} = \frac{G_{ант}(l_{погр} > l_{гол})}{G'_{ант2}} = \frac{0,6v_{yg}^2}{\left(\frac{0,77}{2} v_{yg} - v_{омс} \right)^2} = \left(\frac{0,77v_{yg}}{0,385v_{yg} - v_{омс}} \right)^2. \quad (27)$$

Расчеты показывают, что при изменении скорости удара v_{yg} в диапазоне от 800 до 1600 м/с и скорости отстрела 300 м/с коэффициент снижения перегрузок k_{G2} снижается с 6000 до 15,4.

Как видно из рассчитанных выше значений коэффициентов снижения перегрузок k_{G1} и k_{G2} , при относительно низких скоростях удара v_{yg} эффективность двух подходов, а именно обратного отстрела антенны и обратного отстрела антенны с конструктивными способами повышения глубины проникания, максимальны, постепенно ослабевающие по мере роста скоростей удара v_{yg} .

Кроме того, для дальнейшего снижения значения и соответствующей перегрузки антенны можно обеспечить обратный отстрел на этапе еще большего погружения и снижения скорости головной части, т.е. максимального приближения глубины ее погружения $l_{погр}$ к глубине воронки $l_{вор}$ с условием $l_{погр} \rightarrow l_{вор}$. Однако такой вариант предполагает реализацию пенетратора новой конструкции с вынесенной (удаленной) антенной от тыльной стороны головной части пенетратора и возможностью ее отстрела, сильно отличающейся от конструкций на рис. 1, что требует дополнительной конструктивной проработки, выходит за рамки данного исследования. Он будет рассмотрен в одной из будущих публикаций.

4.3. Обеспечение нацеленности антенны на ОА при использовании обратного отстрела при ударном внедрении в грунт ИНТ.

Один из важных вопросов пространственной нацеленности (диаграммы направленности по двум осям) антенны связан с ее угловым пространственным положением после обратного отстрела и пригрунтовывания. Для исключения неопределенности предлагается реализовать антенну на основе коммутируемой антенной системы (КАС), выполненной в виде усеченного полукосаэдра [21]. Его внешнюю форму можно описать сферой, а наиболее понятный и распространенный образ связан с классическим футбольным мячом (рис. 10б). Грани такой фигуры выполнены в виде пяти- и шестиугольников с заданным пространственным углом, каждый

из которых является излучателем, например, щелевым, вибраторным, патчевым или микрополосковым.

В соответствии с экспериментальными исследованиями из [21] данная КАС (рис. 10в) может работать на частоте 8,43 ГГц с коэффициентом усиления 6 дБ, осуществляя передачу информации со скоростью до 0,5 Мбит/с на дальностях до 30000 км. Представляется, что вес такой КАС, изготовленной из легких и высокопрочных материалов, может составлять не более 1,5 кг, позволяя достичь скорости отстрела до 300 м/с.

Таким образом, независимо от положения сферической антенны после обратного отстрела и пригрунтовывания нужная диаграмма направленности будет сформирована требуемой коммутацией одного или нескольких излучателей с формированием потока радиоволн нужного нацеливания в пределах рабочей полусферы и с возможностью адаптивного перенацеливания для отслеживания текущего положения ОА.

Результаты расчетов и их обсуждение

1. Для значений $l_{гол} = 2$ м, $l_{вор} = 5$ м и скорости удара v_{yg} , изменяющейся в диапазоне от 100 до 1000 м/с, и для двух значений глубин вдавливания антенны в грунт $l_{rp1} = 0,05$ м и $l_{rp2} = 0,1$ м были рассчитаны значения перегрузок, действующих на антенну, $G_{ант1}$ и $G_{ант2}$. При максимальной перегрузке, равной 100 000, максимальная скорость удара v_{yg} не должна превышать 400 м/с и ≈ 550 м/с. При увеличении максимальной перегрузки до 200 000 максимальные скорости удара v_{yg} возрастут до ≈ 580 м/с и ≈ 800 м/с.

2. При росте скорости удара v_{yg} от 500 до 1000 м/с и скорости обратного отстрела антенны 300 м/с, а также для двух значений глубин вдавливания антенны в грунт $l_{rp1} = 0,05$ м и $l_{rp2} = 0,1$ м, перегрузка $G_{ант}$ увеличивается с 7 225 до 220 900 и с ≈ 3 613 до 110 450. Этим подтверждается эффективность использования обратного отстрела антенны для повышения скорости удара v_{yg} .

3. Расчеты показывают, что при значении коэффициента конструкции $k_{кон} = 2$ для двух значений глубин вдавливания антенны в грунт $l_{rp1} = 0,05$ м и $l_{rp2} = 0,1$ м перегрузки $G_{ант}$ равны ≈ 100 000 и ≈ 50 000 с возможностью достижения скорости удара 1 600 м/с. При более низкой скорости удара 1 000 м/с перегрузки уменьшаются до значений ≈ 7 200 и ≈ 3 600, существенно снижая ударную нагрузку и демонстрируя высокую эффективность совместного использования обратного отстрела антенны и наконечников пенетраторов оживальной формы, а также специальных конструкций: сегментированных, телескопических или гибридных.

Выводы и заключение

1. В соответствии с задачами исследования проведены расчеты и анализ перегрузок, действующих на головную часть и антенну пенетратора, а также диаметры воронок, образующиеся в результате ударного внедрения в грунт ИНТ. Также рассмотрены возможности совершенствования пенетраторов для предотвращения нарушения радиосвязи с ОА после ударного внедрения в грунт ИНТ.

2. С точки зрения перегрузок, антенна является самым уязвимым элементом, требующим особого внимания и принятия специальных мер по ее защи-

те, для обеспечения радиосвязи с ОА после ударного внедрения пенетратора в грунт ИНТ.

3. В дальнейшем требуется подробная конструкторско-технологическая проработка и исследование пенетраторов в следующих направлениях:

— реализация сегментированных, телескопических и гибридных наконечников;

— осуществление обратного отстрела антенны;

— реализация вынесенной (удаленной) антенной от тыльной стороны головной части пенетратора и с возможностью ее обратного отстрела.

Благодарности

Работа выполнена в инициативном порядке.

Список источников

1. Леун Е. В., Нестерин И. М., Пичхадзе К. М., Поляков А. А. [и др.]. Обзор схем пенетраторов для контактных исследований космических объектов // Космическая техника и технологии. 2022. № 2. С. 103–117. EDN: AMJBCU.

2. 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.

3. Писецкий В. В. Высокоскоростное проникание пенетратора в различных режимах его деформирования в песчаный грунт: дис. ... канд. техн. наук. Саров, 2021. 132 с.

4. Герасимов С. И., Травов Ю. Ф., Иоилев А. Г. [и др.]. Экспериментальное и теоретическое исследование высокоскоростного проникания длинных стержневых ударников в песок // Журнал технической физики. 2022. Т. 92, № 3. С. 392–404. DOI: 10.21883/JTF.2022.03.52134.275-21. EDN: CBCTJR.

5. Герасимов С. И., Зубанков А. В., Калмыков А. П. [и др.]. Экспериментальное исследование движения ударника в соленом льду // Прикладная механика и техническая физика. 2020. Т. 61, № 4 (362). С. 54–58. DOI: 10.15372/PMTF20200407. EDN: FECVWQ.

6. Petovic J. J. Review Mechanical properties of ice and snow // January Journal of Materials Science. 2003. Vol. 38. P. 1–6. DOI: 10.1023/A:1021134128038.

7. 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.

8. А. с. 1649218 СССР, МПК F 25 C 1/00, C 09 K 3/24. Способ получения искусственного льда / Рогожин С. В., Чеве-рев В. Г., Вайнерман Е. С. [и др.]. № 4694538; заявл. 23.05.1889; опубл. 15.05.1991. EDN: BMVUOZ.

9. Керкхоф Ф., Гольке В., Гольдсмит В. [и др.]. Физика быстротекающих процессов: пер. / под ред. Н. А. Златина. Москва: Мир, 1971. 352 с.

10. Марахтанов М. К., Велданов В. А., Духопельников Д. В. [и др.]. Моделирование механизма разрушения космических аппаратов в результате инерциального взрыва их металлических узлов при столкновении // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24, № 1. С. 17–25. EDN: YGSBOV.

11. Леун Е. В., Добрица Д. Б., Поляков А. А., Сысоев В. К. Анализ особенностей возникновения инерциального взрыва в задачах высокоскоростных ударов металлических пенетраторов в исследуемое небесное тело и метеорно-техногенных частиц в элементы космических аппаратов // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2022. Т. 6, № 2. С. 99–110. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-2-99-110. EDN: GOWALR.

12. Велданов В. А., Смирнов В. Е., Хаврошкин О. Б. Лунный пенетратор: снижение перегрузок, управление проника-

нием // *Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы*. 1999. Т. 33, № 5. С. 490.

13. Аппроксимация функции одной переменной. URL: <https://planetcalc.ru/5992/> (дата обращения: 10.02.2025).

14. Глазырин В. П. Деформирование и разрушение неоднородных материалов и конструкций при ударе и взрыве: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Томск, 2008. 249 с.

15. Федоров С. В., Ведданов В. А., Гладков Н. А., Смирнов В. Е. Численный анализ проникания в стальную преграду сегментированных и телескопических ударников из высокоплотного сплава // *Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия Машиностроение*. 2016. № 3 (108). С. 100–117. EDN: WBKDOT.

16. Федоров С. В. Высокоскоростное проникание в грунтово-скальные преграды удлиненных и сегментированных ударников // *Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского*. 2011. № 4-4. С. 1819–1821. EDN: TBGQHP.

17. Орлова Ю. Н. Комплексное теоретико-экспериментальное исследование поведения льда при ударных и взрывных нагрузках: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 2014. 189 с.

18. Папченко Б. П., Хегай Д. К., Сысоев В. К., Юдин А. Д. [и др.]. Трансформируемая мачта солнечного паруса на основе приводов из материалов с эффектом памяти формы // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2021. Т. 64, № 1. С. 71–76. DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-1-71-76. EDN: PCSIRH.

19. Финченко В. С., Пичхадзе К. М., Ефанов В. В. Надувные элементы в конструкциях космических аппаратов — прорывная технология в ракетно-космической технике: моногр. Химки: Научно-производственное объединение им. С. А. Лавочкина, 2019. С. 488. EDN: KKDBIZ.

20. Ляшук А. Н., Завьялов С. А., Лепетаев А. Н. Проектирование высокочастотного автогенератора для ударостойких

применений // *Динамика систем, механизмов и машин*. 2014. № 4. С. 43–46. EDN: SYOTQN.

21. Брагин И. В., Моисеев М. В., Истяков И. В. [и др.]. Система глобального телеметрического контроля изделий ракетно-космической техники на основе бортовых фазированных антенных решеток или многолучевых коммутируемых антенных систем // *Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника*. 2013. № 1. С. 60–69. EDN: QCICJH.

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

ЧАЛОВ Сергей Александрович, ведущий инженер АО «НПО Лавочкина», г. Химки.

Адрес для переписки: chalovs@mail.ru

Для цитирования

Леун Е. В., Чалов С. А. Совершенствование инерционных разделяющихся пенетраторов путем учета особенностей их ударного внедрения в исследуемые небесные тела // *Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение*. 2025. Т. 9, № 1. С. 101–112. DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-1-101-112. EDN: SRXHZC.

Статья поступила в редакцию 10.02.2025 г.

© Е. В. Леун, С. А. Чалов

IMPROVING INERTIAL SEPARATING PENETRATORS CONSIDERING THE FEATURES OF THEIR IMPACT PENETRATION INTO THE STUDIED CELESTIAL BODIES

E. V. Leun, S. A. Chalov

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

The article considers factors that can negatively affect the creation of reliable radio communication between an inertial separating penetrator after its impact penetration into the soil of the studied celestial body and an orbital vehicle. The authors conduct the calculation and analysis of overloads acting to the forward head and antenna parts. Moreover, the research demonstrates that the overload on the antenna part can be dozens of times greater than on the forward head. The authors also present the calculation and analysis of the input diameters of the funnels formed from the impact penetration of the penetrator into different soils of the studied celestial body. The research considers possibilities of improving penetrators by using segmented, telescopic and hybrid tips, as well as reverse shooting of the antenna, which allow reducing the impact speed and overloads during impact penetration of the penetrator into the soil of the studied celestial body.

Keywords: space research, celestial body, regolith, penetrator, impact penetration, segmented tip, telescopic tip, hybrid tip.

Acknowledgments

The work was done on an initiative basis.

References

1. Leun E. V., Nesterin I. M., Pichkhadze K. M., Polyakov A. A. [et al.]. Obzor skhem penetratorov dlya kontaktnykh issledovaniy kosmicheskikh ob'yektov [Review of penetrator designs for contact studies of space objects]. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii. Space Technique and Technologies*. 2022. No. 2. P. 103–117. EDN: AMJBCU. (In Russ.).
2. Leun E. V., Dobritsa D. B., Polyakov A. A. [et al.]. K voprosu vybora konstruksionnykh 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*. 2023. Vol. 4 (62). P. 80–86. DOI: 10.26162/LS.2023.62.4.011. EDN: WGHDK. (In Russ.).
3. Pisetsky V. V. Vysokoskorostnoye proniknoveniye penetratora v razlichnykh rezhimakh yego deformatsii v peschanyy grunt [High-speed penetration in various modes of its deformation into sandy soil]. Sarov, 2021. 132 p. (In Russ.).
4. Gerasimov S. I., Zubankov A. V., Kalmykov A. P. [et al.]. Eksperimental'noye issledovaniye dvizheniya udarnika v solenom l'du [Experimental and theoretical study of high-velocity penetration of long rod projectiles into sand]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki. Technical Physics*. 2022. Vol. 92, no. 3. P. 392–404. DOI: 10.21883/JTF.2022.03.52134.275-21. EDN: CBCTJR. (In Russ.).
5. Gerasimov S. I., Zubankov A. V., Kalmykov A. P. [et al.]. Eksperimental'noye issledovaniye dvizheniya udarnika v solenom l'du [Experimental study of impactor motion in salt ice]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2020. Vol. 61, no. 4 (362). P. 54–58. (In Russ.).
6. Petorvic J. J. Review Mechanical properties of ice and snow. *January Journal of Materials Science*. 2003. Vol. 38. P. 1–6. DOI: 10.1023/A:1021134128038. (In Engl.).
7. 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.).
8. SU 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.).
9. Kerckhoff F., Gohlke W., Goldsmith W. [et al.]. *Fizika bystroprotekeyushchikh protsessov [Physics of Fast Processes]* / Ed. by N. A. Zlatin. Moscow, 1971. 352 p. (In Russ.).
10. Marakhtanov M. K., Veldanov V. A., Dukhopel'nikov D. V. [et al.]. Modelirovaniye mekhanizma razrusheniya kosmicheskikh apparatov v rezul'tate inertsiyal'nogo vzryva ik hmetallicheskih uzlov pri stolknovenii [Modeling a spacecraft fracture mechanism occurring as a result of its metal components inertial explosion at collision] // *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo institute. Aerospace MAI Journal*. 2017. Vol. 24, no. 1. P. 17–25. EDN: YGSBOV. (In Russ.).
11. Leun E. V., Dobritsa D. B., Polyakov A. A., Sysoev V. K. Analiz osobennostey vozniknoveniya inertsiyal'nogo vzryva v zadachakh vysokoskorostnykh udarov metallicheskih penetratorov v issleduyemoye nebesnoye telo i meteornotekhnogennykh chastits v elementy kosmicheskikh apparatov [The analysis of features of occurrence of inertial explosion in problems of high-speed impact of metal penetrators into the studied celestial body and meteor-technogenic particles into elements of spacecraft]. *Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatsonno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2022. Vol. 6, no. 2. P. 99–110. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-2-99-110. EDN: GOWALR. (In Russ.).

12. Veldanov V. A., Smirnov V. E., Khavroshkin O. B. Lunnyy penetrator: snizheniye peregruzok, upravleniye pronikaniyem [Lunar penetrator: reducing overload, controlling penetration]. *Astronomicheskii Vestnik. Issledovaniye Solnechnoy Sistemy*. 1999. Vol. 33, no. 5. P. 490. (In Russ.).

13. Approksimatsiya funktsii odnoy peremennoy [Approximation of one variable function]. URL: <https://planetcalc.ru/5992/> (accessed: 10.02.2025). (In Russ.).

14. Glazyrin V. P. Deformatsiya i razrusheniye neodnorodnykh materialov i konstruktivnykh pri udare i vzryve [Deformation and destruction of heterogeneous materials and structures under impact and explosion]. Tomsk, 2008. 249 p. (In Russ.).

15. Fedorov S. V., Veldanov V. A., Gladkov N. A., Smirnov V. E. Chislennyy analiz proniknoveniya v stal'nyuyu pregradu segmentirovannykh i teleskopicheskikh udarnikov iz vysokoplotnogo splava [Numerical analysis of penetration of segmented and telescopic projectiles of high density alloy into the steel target]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N. E. Baumana. Seriya Mashinostroyeniye. Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*. 2016. No. 3 (108). P. 100–117. EDN: WBKDOT. (In Russ.).

16. Fedorov S. V. Vysokoskorostnoye proniknoveniye v gruntovo-skal'nyye pregrady protyazhennykh i segmentirovannykh udarnikov [High-velocity penetration of elongated and segmented projectiles into soil-rock targets]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N. I. Lobachevskogo. Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod*. 2011. No. 4-4. P. 1819–1821. EDN: TBGQHP. (In Russ.).

17. Orlova Yu. N. Kompleksnoye teoretiko-eksperimental'noye issledovaniye povedeniya l'da pri udarnykh i vzryvnykh nagruzkakh [Complex theoretical and experimental study of ice under impact and explosive loads]. Tomsk, 2014. 189 p. (In Russ.).

18. Papchenko B. P., Khegay D. K., Sysoev V. K., Yudin A. D. [et al.]. Transformiruyemaya machta ul'trafiolotovogo parusa na osnove privodov iz materialov s efektom pamyati formy [Transformable solar sail mast based on drives made of shape memory materials]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroyeniye. Journal of Instrument Engineering*. 2021. Vol. 64, no. 1. P. 71–76. DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-1-71-76. EDN: PCSIRH. (In Russ.).

19. Finchenko V. S., Pichkhadze K. M., Efanov V. V. Naduvnyye elementy v konstruktivnykh oblachnykh apparatov —

proryvnaya tekhnologiya v raketno-kosmicheskoy tekhnike [Inflatable elements in spacecraft structures — breakthrough technology in rocket and space sphere]. *Khimki*, 2019. 488 p. EDN: KKDBIZ. (In Russ.).

20. Lyashuk A. N., Zavyalov S. A., Lepetaev A. N. Proyektirovaniye vysokochastotnogo avtogeneratora dlya udarostoykikh primeneniy [Design of high frequency oscillator for high shock applications]. *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin. Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*. 2014. No. 4. P. 43–46. EDN: SYOTQN. (In Russ.).

21. Bragin I. V., Moiseev M. V., Istyakov I. V. [et al.]. Sistema global'nogo teletmetricheskogo kontrolya izdeliy raketno-kosmicheskoy tekhniki na osnove bortovykh fazirovannykh antenykh reshetok ili mnogoluchevykh kommutiruyemykh antenykh sistem [Global system of telemetric control products rocket and space technology on the basis of airborne phased antenna arrays or multibeam switched antenna systems]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy Rossii. Radioelektronika. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2013. No. 1. P. 60–69. EDN: QCICJH. (In Russ.).

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

CHALOV Sergey Alexandrovich, Lead Engineer, Lavochkin Association, Khimki.

Correspondence address: chalovs@mail.ru

For citations

Leun E. V., Chalov S. A. Improving inertial separating penetrators considering the features of their impact penetration into the studied celestial bodies. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2025. Vol. 9, no. 1. P. 101–112. DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-1-101-112. EDN: SRXHZC.

Received February 10, 2025.

© E. V. Leun, S. A. Chalov