

Возможности моделирования проникания тел в грунтовые среды

© В.А. Велданов, А.Ю. Даурских, А.С. Карнейчик, М.А. Максимов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Рассмотрены критерии моделирования проникания тел в грунтовые среды. Показано влияние масштабного фактора на глубину проникания и испытываемые перегрузки. Приведены результаты экспериментального и численного исследования процесса высокоскоростного проникания ударников в песок. Экспериментально и с помощью численных расчетов исследовано влияние формы кавитатора в головной части ударника на характер взаимодействия с преградой.

Ключевые слова: ударник, преграда, песок, грунт, проникание, баллистическая установка, кавитатор, кавитационная полость, высокоскоростное проникание.

В настоящее время одним из возможных способов изучения свойств грунтов Земли и других планет является использование зондирующих устройств — пенетраторов, содержащих в качестве полезной нагрузки приборный отсек с аппаратурой для определения физико-механических свойств грунтов и кинематических характеристик проникания. Необходимым условием функционирования пенетраторов является проникание на значительные глубины, сопровождаемое большими перегрузками, превосходящими допустимые для приборного отсека значения. Возможным путем снижения перегрузок при высоких скоростях взаимодействия является выполнение кавитатора в вершине головной части проникающего модуля, обеспечивающего образование кавитационной полости и уменьшение зоны контакта модуля с грунтом [1]. При разработке подобных пенетраторов большое значение имеют вопросы экспериментального и численного моделирования таких процессов.

При выборе толщин модельных преград из грунта и горных пород при значительном уменьшении (в 8–15 раз) характерных размеров моделей ударников относительно натуральных изделий необходимо учитывать масштабный эффект. Его проявление состоит в увеличении [2] удельного сопротивления (давления) со стороны преграды в модельном эксперименте при тех же скоростях взаимодействия, что и в натурном эксперименте. Теоретическое изучение масштабного эффекта в широком диапазоне изменения условий взаимодействия и физико-механических свойств материалов преград представляет серьезную проблему и в настоящее время построение законченной

теории, посвященной этому вопросу, еще далеко от завершения. Вместе с тем накоплен определенный экспериментальный материал о влиянии геометрических размеров ударников на результат взаимодействия с грунтовыми преградами, представленный в виде эмпирических зависимостей, которые могут быть использованы для оценок размеров модельных преград при значительном уменьшении размеров модельных ударников относительно натуральных.

В общем случае сила сопротивления прониканию определяется через нормальные σ_n и касательные τ_n удельные сопротивления, действующие со стороны среды на ударник в зонах их контакта. Экспериментально установлено [3], что независимо от формы проникающего тела удельные сопротивления σ_n и τ_n в какой-либо точке поверхности тела являются функциями физико-математических свойств сопротивляющейся среды и проекции v_n скорости v рассматриваемой точки на вектор нормали к поверхности тела в данной точке. В общем случае эти функции для грунтовых сред можно записать в виде квадратного трехчлена:

$$\begin{aligned}\sigma_n &= Av_n^2 + Bv_n + C; \\ \tau_n &= \mu\sigma_n,\end{aligned}\tag{1}$$

где A, B, C — коэффициенты, характеризующие сопротивление среды; μ — коэффициент трения материала преграды о корпус тела; v_n — проекция скорости на нормаль к поверхности тела. При проникании с нулевым углом атаки в случае выполнения головной части в виде конуса с углом 2λ при вершине для всех точек на поверхности головной части эта проекция одинакова и определяется зависимостью $v_n = v \sin \lambda$.

Первый член в квадратном трехчлене (1) обычно связывают с инерционным сопротивлением среды, второй — с вязкостным, третий — с прочностным. При определенных условиях взаимодействия один или два из членов могут отсутствовать.

Для моделирования процесса проникания необходимо выполнить построение безразмерных параметров, которые могут быть получены по π -теореме или путем приведения уравнений движения к безразмерному виду. Второй путь является предпочтительным, так как полученные безразмерные параметры несут физический смысл, определяемый структурой используемого уравнения. Задавая масштабы приведения к безразмерному виду по глубине проникания d (диаметр тела или кавитатора), по скорости встречи с преградой v_0 , можно привести уравнения движения к безразмерному виду, безразмерные

коэффициенты в котором и будут представлять искомые безразмерные параметры.

При прямолинейном движении в грунте тела с конической головной частью система безразмерных параметров принимает следующий упрощенный вид:

$$\frac{\mu}{\operatorname{tg} \lambda}; \frac{Ad^3 \sin^2 \lambda}{m}; \frac{Bd^3 \sin \lambda}{mv_0}; \frac{Cd^3}{mv_0^2}. \quad (2)$$

Здесь m — масса тела; v_0 — скорость встречи тела с преградой; d — диаметр тела; λ — половина угла при вершине конуса головной части; μ — коэффициент трения корпуса тела о грунт.

Если среда в модельных и натуральных условиях одинакова, то эти безразмерные параметры будут выполняться только при совпадении скоростей взаимодействия модели и натурального образца, т. е. $v_{0m} = v_{0n}$, где индексы « m » и « n » относятся к модели и натурному образцу соответственно. При этом масса модели должна определяться зависимостью

$$m_m = m_n \frac{d_m^3}{d_n^3}. \quad (3)$$

Пересчет перегрузки n_n натурального образца на модель n_m проводится по зависимости

$$n_m = n_n \frac{d_n}{d_m}, \quad (4)$$

т. е. перегрузки, испытываемые моделью, в $\frac{d_n}{d_m}$ раз превышают перегрузки, испытываемые натурным образцом.

Таким образом, возможно моделирование по глубине проникания с помощью моделей меньшего диаметра, чем натура. Глубины проникания (пробития) будут уменьшены пропорционально снижению диаметра модели, а масса — пропорционально кубу отношения диаметров модели и натурального образца. Перегрузки должны быть пересчитаны с модели на натуральный образец по приведенной выше зависимости (4). При этом должны быть по возможности сохранены особенности схемы взаимодействия, параметры и характеристики окружающих условий и среды, в которую проникает тело.

Для определения нагрузок на проникающее тело при проникании в скалистый грунт закон сопротивления (1) принимается [3, 4] в виде следующей двучленной зависимости:

$$\begin{aligned}\sigma_n &= Av_n^2 + C; \\ \tau_n &= \mu\sigma_n.\end{aligned}\tag{5}$$

Интегрирование выражений (5) по поверхности конической головной части проникающего тела в случае его прямолинейного движения в преграде и решение дифференциального уравнения движения определяют глубину L проникания модели и натурального образца в безразмерном виде:

$$L = Lr / d,\tag{6}$$

где Lr — размерная глубина проникания; d — диаметр контактирующей с преградой части тела (корпуса или его кавитатора).

Зависимость L от начальной скорости встречи имеет вид

$$L = \frac{2m}{A\pi d^3 \sin^2 \lambda (1 + \mu / \operatorname{tg} \lambda)} \ln \left(1 + \frac{Av_0^2 \sin^2 \lambda}{C} \right).\tag{7}$$

В случае совпадения формы модели и изделия, а также равенства коэффициента трения и скорости встречи глубина проникания в безразмерном виде для них будет одинаковой при равенстве в натурном и модельном экспериментах безразмерных параметров и является частным случаем системы безразмерных параметров (2):

$$\frac{m}{Ad^3}, \quad \frac{Av_0^2}{C}.\tag{8}$$

При различии этих параметров соответствие модельного и натурального эксперимента по безразмерной глубине проникания будет определяться зависимостью

$$L_m = KL_n.\tag{9}$$

Здесь $K = \frac{m_m d_n^3 A_n \sin^2 \lambda_n (1 + \mu_n / \operatorname{tg} \lambda_n)}{m_n d_m^3 A_m \sin^2 \lambda_m (1 + \mu_m / \operatorname{tg} \lambda_m)} \cdot \frac{\ln \left(1 + \frac{A_m v_{0m}^2 \sin^2 \lambda_m}{C_m} \right)}{\ln \left(1 + \frac{A_n v_{0n}^2 \sin^2 \lambda_n}{C_n} \right)},$

где L_m, L_n — безразмерные глубины проникания модели и натурального образца соответственно.

Результаты численного моделирования. На глубину и устойчивость проникания в песок оказывает влияние отношение размеров диаметров кавитатора и проникающего тела [5]. При относительном диаметре кавитатора (по отношению к диаметру тела) менее 0,4 отмечается неустойчивое движение тела: криволинейность траектории и разворот его относительно центра масс. По мере увеличения относительного диаметра кавитатора более 0,4 движение тела становится устойчивым, но при этом наблюдается увеличение сопротивления преграды.

Для определения влияния диаметра d_k кавитатора и длины $h_{г.ч}$ его головной части на сопротивление прониканию проведены расчеты для ударников (рис. 1) с кавитаторами различных диаметров и длин. Геометрические параметры проникающего тела представлены в табл. 1. Масса ударников принималась равной 45 г, скорость встречи — 800 м/с. Численное моделирование проводилось с использованием программного комплекса Ansys Autodyn. Для моделирования песка используется уравнение состояния Compaction EOS, которое является модифицированным уравнением состояния Pogos EOS для пористых сред, но в отличие от него позволяет более точно задавать кривые нагружения и разгрузки. В данном уравнении состояния плотность не интерполируется между полностью сжатым и начальным состояниями, вместо этого скорость звука задается как кусочно-линейная функция плотности. Давление вычисляется по коэффициенту объемного сжатия и текущей плотности. Уравнение прочности для песка MO Granular — модифицированная версия критерия Друкера — Прагера, учитывающая все особенности сыпучих материалов.

Таблица 1

Геометрические параметры проникающего тела

Номер варианта	L , мм	$h_{г.ч}$, мм	D , мм	d , мм	d_k , мм	l_k , мм	l_k/d_k
1	80	35	14,5	10,5	4	0	0
2					4	5	1,25
3					4	10	2,5
4					6	0	0
5					6	8	1,25
6					6	16	2,5

При расчетах задавали следующие 10-точечные кусочно-заданные зависимости:

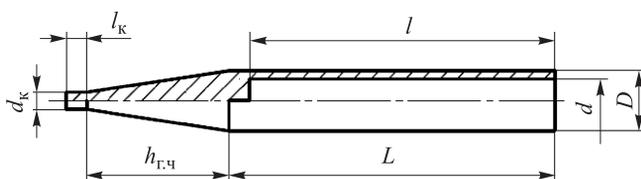


Рис. 1. Модель проникающего тела:

d_k, l_k — диаметр и длина кавитатора; d, l — диаметр и длина полости корпуса; L, D — длина и диаметр цилиндрической части корпуса; $h_{г.ч}$ — длина головной части

- предела текучести от давления (упрочнение от давления);
- предела текучести от плотности (упрочнение от плотности);
- модуля сдвига от давления (переменный модуль сдвига).

Прочность для материала ударника задается уравнением Мизеса, поскольку температурные эффекты имеют пренебрежимо малое влияние для данной задачи. В соответствии с работой [6] решались классические уравнения прикладной механики сплошных сред для упругопластической среды.

Для ударника с кавитатором диаметром 4 мм (рис. 2) при $l_k/d_k = 0$ по поверхности головной части идет контакт с объемно-разрушенной областью материала, затем наблюдается отрыв материала среды от основания головной части и формирование каверны. Контакта по боковой поверхности нет. Для ударников с удлинениями кавитатора $l_k/d_k = 1,25$ и $l_k/d_k = 2,5$ каверна возникает позже, но контакт по головной части все равно присутствует. Кавитационная полость формируется за основанием головной части, в дальнейшем полость не схлопывается и контакт по цилиндрической части ударника отсутствует.

Для ударника с кавитатором диаметром 6 мм (рис. 3) при $l_k/d_k = 0$ имеется контакт по нижней трети конуса и основанию головной части, затем наблюдается отрыв каверны от основания головной части и ее расширение. При $l_k/d_k = 1,25$ контакт возникает по узкой полосе цилиндрической части и диаметр каверны меньше, чем при $l_k/d_k = 0$. В случае $l_k/d_k = 2,5$ контакта с поверхностью модели нет и диаметр каверны наименьший.

Из сравнения скоростей проникания (рис. 4) следует, что тело с кавитатором диаметром 6 мм тормозится сильнее несмотря на исключение контакта с основанием головной части. Таким образом, сопротивление движению в случае контакта с неразрушенным материалом намного больше сопротивления при контакте с материалом в объемно-разрушенном состоянии. Даже в случае большой площади контакта со средой ударник с $d_k = 4$ мм тормозится меньше, чем с $d_k = 6$ мм.

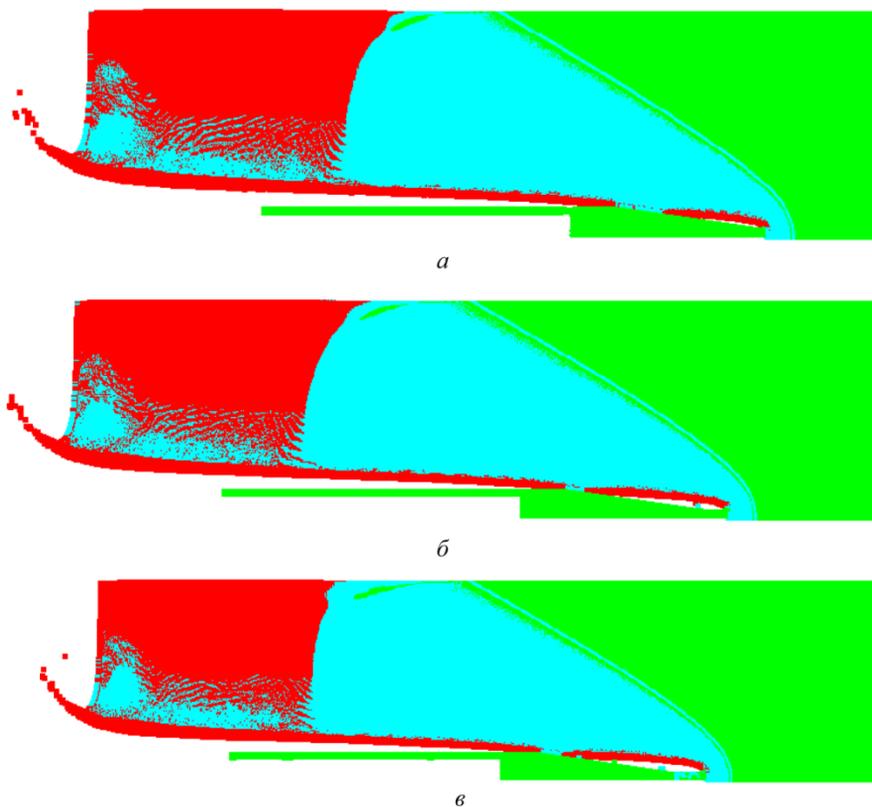


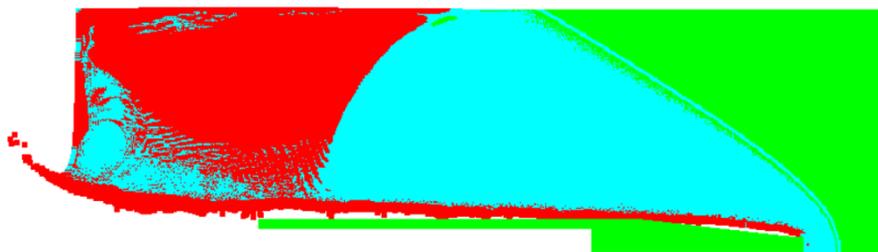
Рис. 2. Форма каверны для кавитатора диаметром 4 мм в момент времени $t = 0,2$ мс при различных значениях его относительной длины l_k/d_k :
 $a — 0$; $б — 1,25$; $в — 2,5$

Согласно результатам расчетов (табл. 2), перегрузки, испытываемые телами с кавитатором диаметром 4 мм, при удлинении кавитатора 1,25 и 2,5 в 1,5 — 2,5 раза меньше перегрузок, испытываемых телом с кавитатором с $l_k/d_k = 6$ мм.

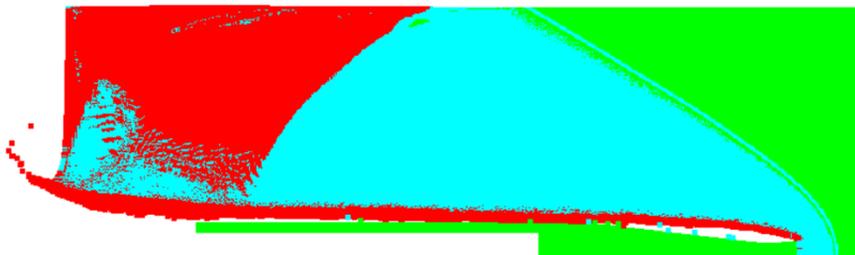
Таблица 2

Расчетные перегрузки

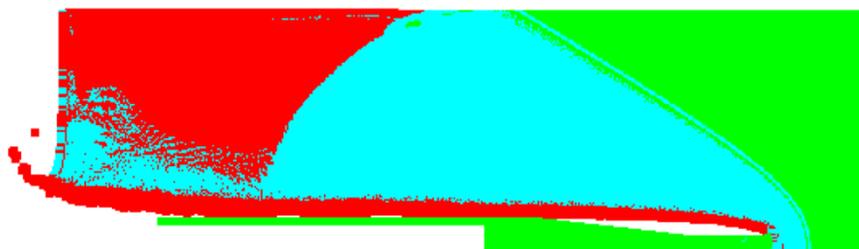
Параметры	Диаметр кавитатора d_k , мм					
	4			6		
l_k/d_k	0	1,25	2,5	0	1,25	2,5
Минимальная/максимальная перегрузка, 10^3	14/33	14/27	10/27	35/47	27/40	25/40



а



б



в

Рис. 3. Форма каверны для кавитатора диаметром 6 мм в момент времени $t = 0,2$ мс при различных значениях его относительной длины l_k/d_k :

а — 0; б — 1,25; в — 2,5

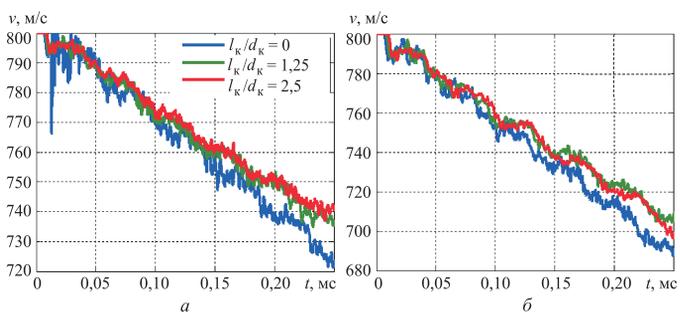


Рис. 4. Зависимость скорости проникания от времени при различных значениях относительной длины кавитатора:

а — $d_k = 4$ мм; б — $d_k = 6$ мм

Экспериментальные исследования. Для проведения стрельбовых экспериментов использовали ударники массой 45 г, диаметром 14,5 мм с кавитаторами диаметрами 4 мм и 6 мм различного удлинения (рис. 5). Скорости встречи с преградой составляли 700...800 м/с. Мишенная обстановка состояла из ящиков, заполненных песком (рис. 6, а). Выстрелы проводились из гладкоствольной пушки калибром 14,5 мм, расстояние от дульного среза пушки до торца первого ящика в различных экспериментах составляло 1...1,5 м. Для последующего построения траектории движения ударника во времени в среде устанавливали картонные свидетели с закрепленными на них рамами-мишенями из металлической фольги, работающими на замыкание при пробитии их ударником. Фиксация скорости ударника и его углового положения в момент встречи с преградой проводилась с помощью цифровой видеокамеры FASTCAM SA-5. Частота кадров съемки составляла 100 000 кадров/с, что позволяло определять с большой точностью скорость и углы атаки ударника в момент встречи с преградой. Практически во всех экспериментах ударник взаимодействовал с преградой с начальными углами атаки 1...3° (рис. 6, б). Это приводило к искривлению траектории движения ударника в преграде на конечном ее участке и вылету его за пределы преграды через боковую поверхность ящика. Замер времени пробития рам-мишеней, установленных в преграде (табл. 3), позволял определять среднюю скорость ударника между рамами-мишенями и опорные точки для проверки результатов расчетов пространственной траектории движения ударников, получаемой с помощью расчетной методики МГТУ им. Н.Э. Баумана [3]. Время пробития пластин рам-мишеней в песке

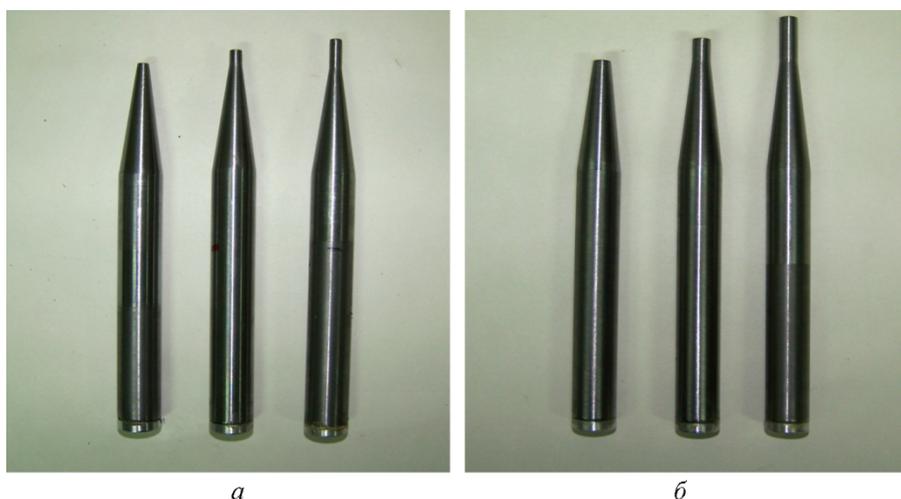
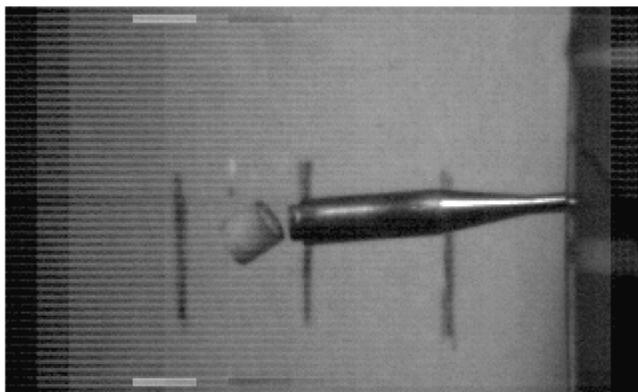


Рис. 5. Модели ударников для экспериментальных исследований:

a — $d_k = 4$ мм; *б* — $d_k = 6$ мм



а



б

Рис. 6. Мишенная обстановка (а) и высокоскоростная фотосъемка ударника в момент встречи с преградой (б)

при $d_k = 6$ мм, $l_k/d_k = 2,5$ и $v_0 = 830$ м/с для пластин составляла от момента инициирования t , мкс, I — 43,48; II — 455,99; III — 97243 (рис. 7).

Расчеты показали закономерность искривления траектории в преграде при наличии начальных углов атаки у ударника в момент встречи (см. рис. 7). На рис. 8, а представлены проекции траектории ударника на боковую (справа) и лицевую (слева) поверхности преграды. Для исключения или уменьшения влияния углов атаки на проникание необходимо применять различные конструктивные приемы, например выполнение хвостовой части в виде расширяющейся к заднему торцу «юбочки». Такое решение рассматривалось при разра-

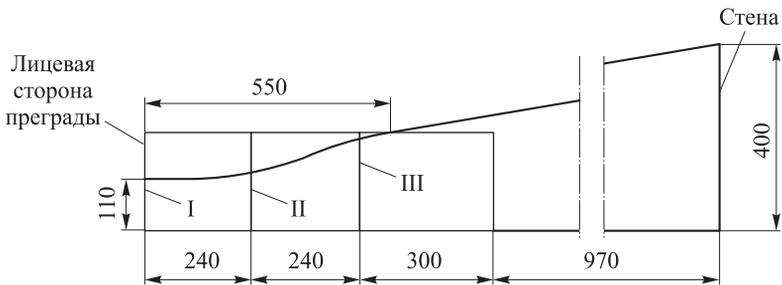


Рис. 7. Расположение пластин рам-мишеней внутри преграды из песка и траектория ударника в преграде (вид сбоку)

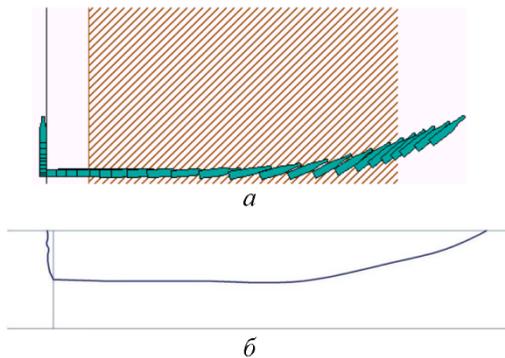


Рис. 8. Расчетная (а) и экспериментальная (б) траектория ударника при $d_k = 6$ мм, $l_k/d_k = 2,5$

ботке британского лунного пенетратора, создаваемого по концепции малого скоростного пенетратора [1].

Результаты, полученные на моделях с помощью зависимостей (2)—(9), можно перенести на натурные образцы. Например, для британского лунного пенетратора [1] массой 13 кг, используя зависимость (3), определим диаметр его кавитатора. Для того чтобы пенетратор был подобен ударнику массой 45 г с диаметром кавитатора 4 мм, его кавитатор должен иметь диаметр 26,4 мм. При этом перегрузка, испытываемая им в случае проникания с такой же скоростью, что и у модельного (табл. 2) ударника (830 м/с), определенная с использованием зависимости (4), составит $2,1 \cdot 10^3 \dots 4,1 \cdot 10^3$ отн. ед., что для современной аппаратуры, находящейся в пенетраторе, является вполне допустимой. Значение глубины проникания пенетратора при этом, измеренное в диаметрах его кавитатора, должно быть таким же, что и для модельного ударника (в диаметрах кавитатора ударника). Если скорости в модельном и натурном экспериментах будут различ-

ными, глубину проникания пенетратора следует определять с использованием зависимости (9).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Велданов В.А., Смирнов В.Е., Хаврошкин О.Б. Лунный пенетратор: снижение перегрузок, управление прониканием. *Астрономический вестник*, 1999, т. 33, № 5, с. 490—494.
- [2] Маэно Н. *Наука о льде*. Москва, Мир, 1988, 231 с.
- [3] Велданов В.А., Исаев А.Л., Маринчев Д.В. Программа расчета на ПЭВМ параметров процесса взаимодействия ударника с преградой. *Материалы XXII Всесоюз. конф. «Численные методы решения задач теории упругости и пластичности»*. Новосибирск, ИТПМ СО АН СССР, 1992, с. 65—72.
- [4] Златин Н.А., Мишин Г.И. *Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях*. Москва, Наука, 1974, 344 с.
- [5] Заявка 2004/0231552. США МКИ F42 В 30/00 Kinetic Energy cavity penetrator weapon. Joseph R. Mayersak (США). 10/433, 621, заявл. 23.05.2003, опубл. 25.11.2004.
- [6] Бабкин А.В., Селиванов В.В. *Прикладная механика сплошных сред. Т. 1: Основы механики сплошных сред*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006, 376 с.

Статья поступила в редакцию 26.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Велданов В.А., Даурских А.Ю., Карнейчик А.С., Максимов М.А. Возможности моделирования проникания тел в грунтовые среды. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 9. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/947.html>

Велданов Владислав Антонович родился в 1945 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1968 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 200 научных работ в области конечной баллистики и механики деформируемого твердого тела. e-mail: vevladi@mail.ru

Даурских Анна Юрьевна родилась в 1986 г., окончила МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2011 г. Аспирантка кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 15 научных работ в области конечной баллистики и механики деформируемого твердого тела. e-mail: Anna.Daurskikh@gmail.com

Карнейчик Александр Сергеевич родился в 1948 г., окончил Куйбышевский политехнический институт в 1972 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Ракетные и импульсные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 80 научных работ в области вооружения, специальных баллистических измерительных приборов и проектирования ствольных систем.

Максимов Михаил Александрович родился в 1955 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1978 г. Заведующий сектором Специального конструкторско-технологического бюро прикладной робототехники МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 30 научных работ в области динамики и механики сплошных сред.