

УДК 531.58

## ВЫСОКОСКОРОСТНОЕ ПРОНИКАНИЕ В ГРУНТОВО-СКАЛЬНЫЕ ПРЕГРАДЫ УДЛИНЕННЫХ И СЕГМЕНТИРОВАННЫХ УДАРНИКОВ

© 2011 г.

*С.В. Федоров*

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

sergfed-64@mail.ru

Поступила в редакцию 15.06.2011

На основе численного моделирования проанализированы особенности формирования каверны в грунтово-скальных преградах при проникании сплошных удлиненных и сегментированных металлических ударников, имеющих скорость от 2 до 7 км/с. Показано, что за счет сегментирования удлиненного ударника глубина каверны может быть увеличена более чем в два раза. Исследовано влияние на прирост глубины проникания количества элементов и их разнесения.

*Ключевые слова:* проникание, ударник сегментированный, преграда, многокомпонентная среда, каверна, глубина, диаметр.

Исследования гиперсверхзвукового взаимодействия (скорости в несколько километров в секунду) металлических ударников с грунтовыми преградами могут представлять интерес в приложениях к исследованиям строения небесных тел (планет, астероидов и комет) с помощью космических аппаратов. Такие ударники могут быть использованы для образования в грунте канала (каверны) определенной глубины и поперечного размера для последующего заглубления по этому каналу приборного модуля с регистрирующими датчиками различного назначения. При указанных скоростях взаимодействия влияние прочностных свойств материала ударника и грунта несущественно, и проникание происходит в режиме, близком к гидродинамическому (с уменьшением длины ударника в результате растекания его материала) [1].

Увеличение глубины каверны, образующейся в прочной среде при проникании удлиненного ударника в гидродинамическом режиме, может быть достигнуто путем разделения (сегментирования) ударника на отдельные элементы, движущиеся последовательно на некотором удалении (разнесении) друг за другом. Исследования проводились на основе численного моделирования в рамках двухмерной осесимметричной задачи механики сплошных сред. Для описания поведения материалов ударника и преграды использовалась модель сжимаемой упругопластической среды. Давление определялось по баротропным зависимостям. Для металла использовалась ударная адиабата в форме Тэта [1]. Уравнение сжимаемости для грунта записывалось как для многокомпонен-

тной среды, включающей в себя воздушные поры, жидкую и твердую составляющие [2]. Расчеты выполнялись для грунтовых преград типа плотного грунта (плотность 2000 кг/м<sup>3</sup>, сдвиговая прочность 15 МПа) и типа скальной породы (плотность 2600 кг/м<sup>3</sup>, сдвиговая прочность 100 МПа). В качестве материала ударников рассматривалась в основном сталь с пределом текучести 400 МПа.

К числу факторов, определяющих прирост глубины проникания при сегментировании ударника длиной  $l_0$  и диаметром  $d_0$ , относятся количество элементов  $n$ , на которые разделяется удлиненный ударник ( $l_e = l_0/d_0$  – продольный размер отдельного элемента) и разнесение элементов  $h_e$  (расстояние между соседними элементами вдоль направления движения). Максимальный потенциально достижимый за счет сегментирования ударника эффект зависит при этом от скорости взаимодействия  $v_0$  [3].

Из рис. 1, иллюстрирующего проникание удлиненного ( $l_0 = 4d_0$ ) и сегментированного на четыре элемента ( $l_e = d_0$ ) стальных ударников, видно, что с увеличением разнесения  $h_e$  элементов глубина проникания растет, а средний диаметр каверны уменьшается. Увеличение скорости взаимодействия от 3 до 5 км/с как для удлиненного, так и для сегментированных ударников слабо сказывается на глубине каверны в плотном грунте и приводит в основном к возрастанию ее поперечных размеров. Для скальной породы повышение скорости ударников приводит к более заметному возрастанию поперечных размеров каверны по сравнению с грунтом и к некоторому увеличению ее глубины. Сегментирование рассматриваемого

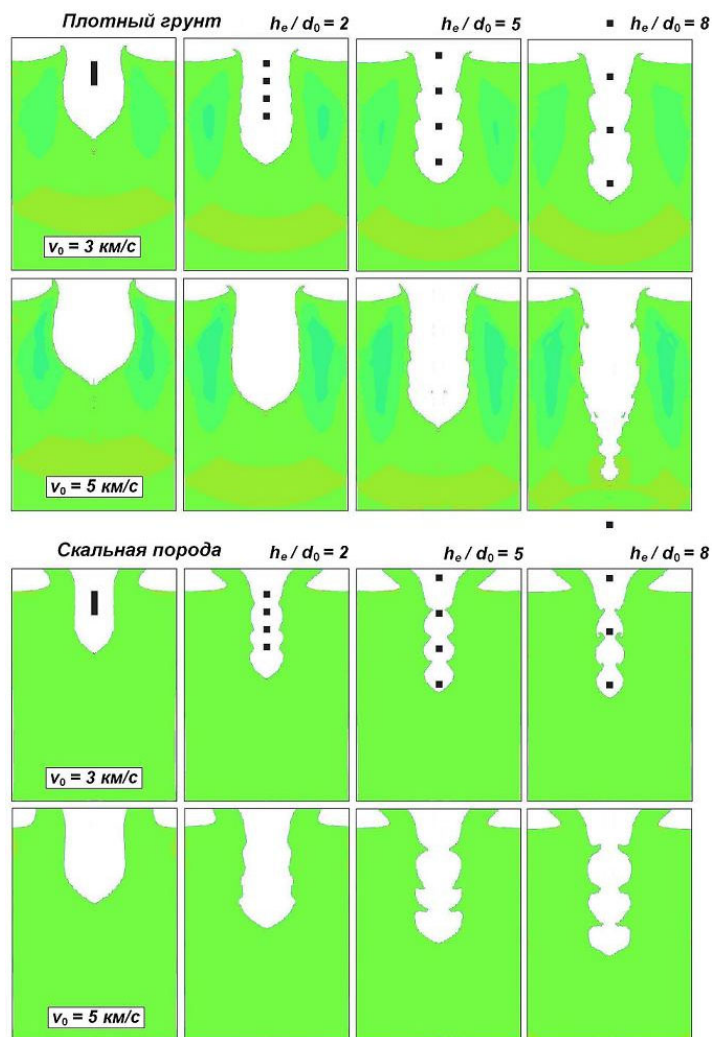


Рис. 1

удлиненного ударника на четыре элемента при их движении с разнесением  $h_e = 8d_0$  увеличивает глубину каверны как в плотном грунте, так и в скальной породе примерно на 80%. Очевидно рост глубины каверны с увеличением разнесения сегментов (при фиксированном их количестве) будет происходить лишь до определенного предела, при достижении которого наступает «насыщение» эффекта (дальнейшее увеличение разнесения перестает сказываться на глубине каверны). Признаком достижения «насыщения» является характерная волнистая форма боковой поверхности каверны (явно выделяются участки каверны, формируемые отдельными элементами). С увеличением скорости взаимодействия  $v_0$  должно возрастать и разнесение сегментов, при котором достигается максимальная глубина проникания. Соответственно, чем выше скорость  $v_0$ , тем больший прирост глубины проникания за счет сегментирования ударника потенциально может быть получен.

К увеличению глубины проникания (сопровожаемому уменьшением поперечных размеров каверны) приводит и увеличение числа сегментов  $n$ , на которые разделяется удлиненный ударник. Для рассмотренного стального удлиненного ударника ( $l_0 = 4d_0$ ) при его разделении на десять элементов ( $l_e = 0.4d_0$ ) с разнесением  $h_e = 4d_0$  глубина каверны и в плотном грунте, и в скальной породе возросла более чем в два раза.

*Работа выполнена при поддержке АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» (проект 2.1.2/2792) и РФФИ (грант №11-08-01038а).*

#### Список литературы

1. Фомин В.М. и др. Высокоскоростное взаимодействие тел. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999.
2. Вовк А.А. и др. Поведение грунтов под действием импульсных нагрузок. Киев: Наук. думка, 1984.
3. Федоров С.В., Велданов В.А. // Журнал технической физики. 2006. Т. 76. Вып. 7. С. 134–137.

**HIGH-VELOCITY PENETRATION OF ELONGATED AND SEGMENTED PROJECTILES  
INTO SOIL-ROCK TARGETS**

*S.V. Fedorov*

Based on numerical modeling, features of cavern formation in soil-rock media during the penetration of elongated and segmented metal projectiles with the velocities between 2 and 7 km/s are analyzed. It is shown that due to segmenting of an elongated projectile, cavern depth could be increased by more than two times. The influence of a number of elements and the spacing distance on the penetration depth increase was studied.

*Keywords:* penetration, segmented projectile, target, multicomponent medium, cavern, depth, diameter.