

01;05

## Численное моделирование формирования каверны в грунте при воздействии потока высокоскоростных металлических ударников

© С.В. Федоров, В.А. Велданов

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,  
105005 Москва, Россия  
e-mail: sm4@sm.bmstu.ru

(Поступило в Редакцию 25 ноября 2005 г.)

На основе численного моделирования в рамках двумерной осесимметричной задачи механики сплошных сред рассмотрены особенности формирования каверны в плотном грунте при проникании сплошных удлиненных и сегментированных металлических ударников, имеющих скорость от 3 до 5 км/с. Показано, что за счет сегментирования удлиненного ударника глубина каверны в грунте может быть увеличена более чем в два раза. Исследовано влияние на прирост глубины проникания количества элементов, на которое разделяется удлиненный ударник, и их удаления друг от друга вдоль направления движения.

PACS: 81.70.Bt

Увеличение глубины каверны, образующейся в прочной среде при проникании удлиненного ударника в гидродинамическом режиме (со „срабатыванием“ материала ударника и соответствующим уменьшением его длины в процессе проникания), может быть достигнуто путем разделения (сегментирования) ударника на отдельные элементы, движущиеся последовательно на некотором удалении (разнесении) друг за другом. Применительно к прониканию металлических ударников в металлические преграды данный эффект исследовался в работах [1,2], где экспериментальным и расчетным путем было показано, что глубина каверны в металле при переходе от сплошного удлиненного ударника к сегментированному (при той же суммарной длине всех элементов, что и у сплошного) может быть увеличена на несколько десятков процентов.

В настоящей работе рассматривается проникание сплошных и сегментированных металлических ударников в грунтовые преграды. Исследования проводились на основе численного моделирования в рамках двумерной осесимметричной задачи механики сплошных сред с использованием модели сжимаемой упруго-пластической среды для описания поведения материалов ударника и преграды. Давление в металле и грунте определялось по баротропным зависимостям: для металла использовалась ударная адиабата в форме Тэта [1], а уравнение сжимаемости для грунта записывалось как для многокомпонентной среды, включающей воздушные поры, жидкую и твердую составляющие [3].

В расчетах был рассмотрен диапазон начальных скоростей взаимодействия  $v_0$  от 3 до 5 км/с (в случае сегментированного ударника скорость всех его элементов полагалась одинаковой). В качестве материала ударника в основном рассматривалась сталь с пределом текучести 200 МПа. Характеристики материала преграды соответствовали плотному грунту (плотность 2000 кг/м<sup>3</sup>, сдвиговая прочность 15 МПа). Как видно из рис. 1, иллюстрирующего результаты расчета проникания в

грунтовую преграду удлиненного и уплощенного стальных ударников, отношение глубины образованной каверны к продольному размеру ударника (его длине или толщине) для уплощенного ударника существенно выше, чем для удлиненного. На этом и основывается идея сегментирования удлиненного ударника на отдельные элементы малого удлинения для увеличения общей глубины проникания. „Платой“ за увеличение глубины каверны при проникании сегментированного ударника является уменьшение ее диаметра: отношение поперечного размера каверны к диаметру ударника для уплощенного ударника, напротив, существенно ниже, чем для удлиненного (рис. 1).

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

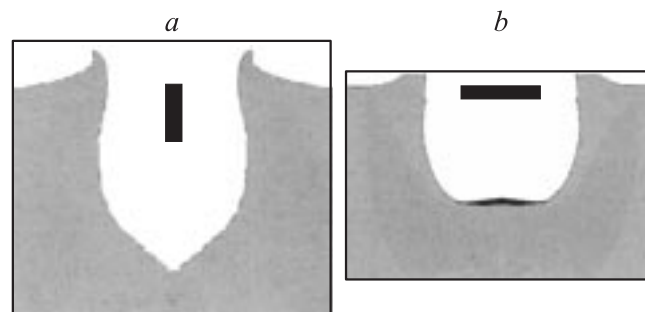


Рис. 1. Форма каверны при проникании удлиненного (а) и уплощенного (b) стальных ударников в плотный грунт (скорость 3 км/с).

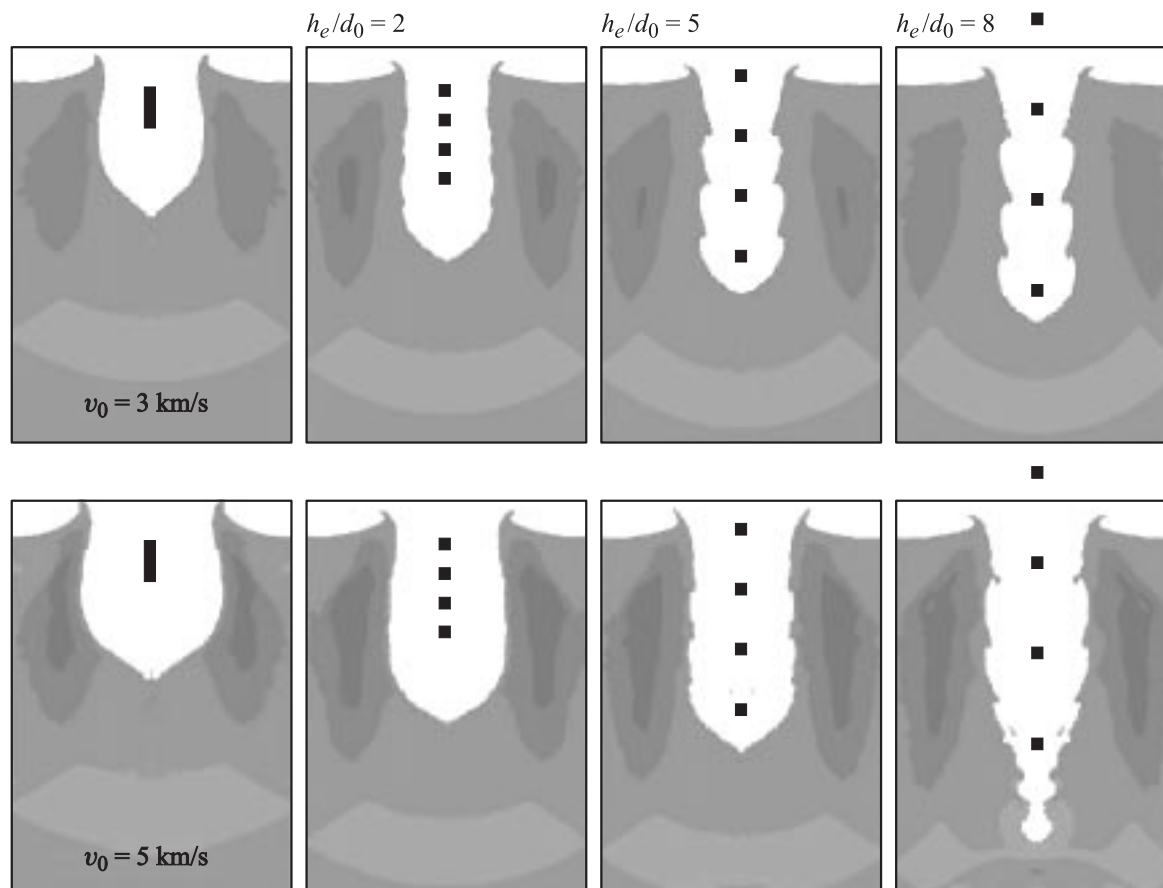
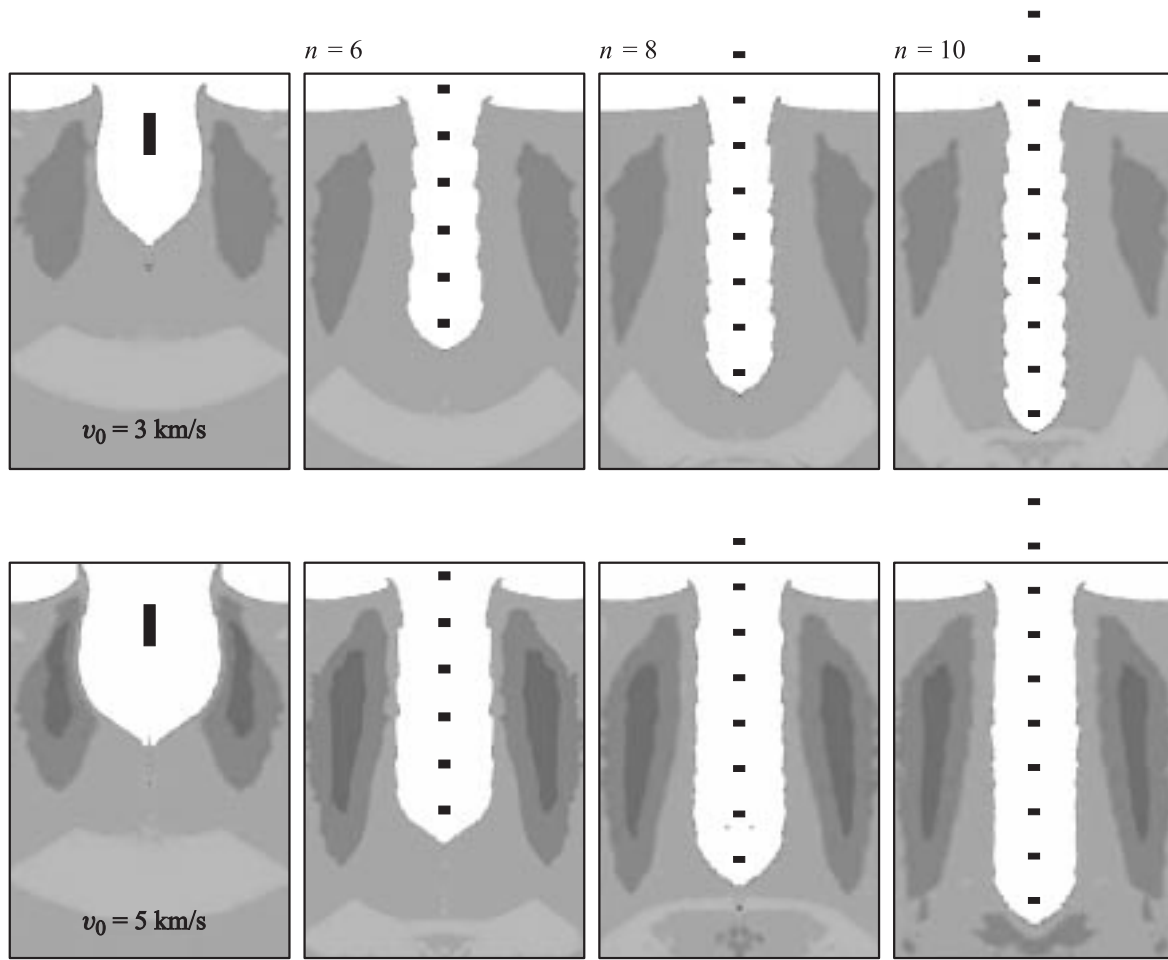


Рис. 2. Влияние разнесения элементов сегментированного ударника на размеры каверны в грунте.

Из рис. 2, иллюстрирующего проникание в плотный грунт удлиненного ( $l = 4d_0$ ) 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 (на рис. 2 приведены формы каверн на момент полного прекращения движения среды, внутри каверн условно показана конфигурация системы ударников перед началом взаимодействия). Для удлиненного ударника глубина каверны составляет около  $3l$  (это примерно в полтора раза больше, чем дает гидродинамическая теория [1] при имеющемся соотношении плотностей ударника и преграды). Отметим, что полному „срабатыванию“ ударника (исчерпанию его длины) в расчетах соответствовала глубина проникания около  $2l$ , практически не отличающаяся от результата, предсказываемого гидродинамической теорией. Дальнейшее же увеличение размеров каверны происходило уже вследствие инерционного движения материала преграды. Увеличение скорости  $v_0$  удлиненного ударника с 3 до 5 km/s слабо сказывается на глубине каверны, но приводит к существенному возрастанию ее поперечных размеров (рис. 2). При сегментировании же данного удлиненного ударника на четыре элемента и их движении с разнесением  $h_e = 8d_0$  глубина каверны возрастает почти на 80%.

Очевидно, рост глубины каверны с увеличением разнесения  $h_e$  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 может быть получен.

К увеличению глубины проникания (сопровожаемому уменьшением поперечных размеров каверны) приводит и увеличение числа сегментов  $n$ , на которые разделяется удлиненный ударник. Это видно из рис. 3, где проиллюстрированы формы каверн (на момент полного прекращения движения среды), полученные в расчетах с разбиением одного и того же ударника на различное количество сегментов при фиксированном их разнесении. Для рассматриваемого стального удлиненного ударника ( $l = 4d_0$ ) при его разделении на десять элементов



**Рис. 3.** Влияние количества элементов, на которое разделяется удлиненный ударник, на размеры каверны в грунте (разнесение элементов во всех случаях  $h_e = 4d_0$ ).

( $l_e = 0.4d_0$ ) с разнесением  $h_e = 4d_0$  глубина каверны в плотном грунте возрастает более чем в два раза. Отметим, что при фиксированном количестве сегментов и их разнесении увеличение скорости сегментов  $v_0$  от 3 до 5 km/s так же, как и в случае несегментированных удлиненных ударников, приводит к возрастанию лишь поперечных размеров каверны, практически не сказываясь на ее глубине (рис. 2 и 3, о причинах, приведших к формированию длинного узкого канала в донной части каверны при  $v_0 = 5$  km/s и  $h_e = 8d_0$  на рис. 2, будет сказано ниже).

При моделировании взаимодействия с плотным грунтом удлиненных и сегментированных ударников из других металлов [4] (рассматривались металлы с большей и меньшей, чем у стали, плотностью — свинец и алюминий) был получен примерно тот же прирост глубины проникания сегментированного ударника (по отношению к несегментированному), что и в аналогичных условиях для стального ударника.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что в грунтовых преградах за счет сегментирования удлиненного ударника может быть достигнут

существенно больший прирост глубины образующейся каверны по сравнению с металлическими преградами. Очевидно, это обусловлено меньшими, по сравнению с металлами, плотностью и прочностью грунта. Однако, как выяснилось, эти свойства грунта при определенных условиях могут сыграть и отрицательную роль. При численном моделировании проникания в грунт был выявлен эффект (не наблюдавшийся в металлических преградах), способный привести к снижению эффективности проникания сегментированного ударника [4]. Вследствие малой прочности грунта взаимодействие каждого сегмента с дном формирующейся каверны сопровождается мощным выплеском материала внутрь каверны. При определенных условиях (скорости, размерах сегментов, их разнесении) материал в этих выплесках может приобретать радиальную составляющую скорости, направленную к оси каверны, что мешает свободному движению внутри каверны последующих сегментов, приводя к их преждевременному „срабатыванию“.

Подобное наблюдалось, например, при моделировании проникания четырех элементов со скоростью 5 km/s, движущихся с разнесением  $h_e = 8d_0$  (чем и объясняется

необычная, отличная от других, форма каверны, образованной в данном случае, рис. 2). Последний, четвертый, элемент за счет взаимодействия со стороны боковой поверхности с движущимся на него выплеском грунта существенно деформировался (его как бы обжало — диаметр уменьшился, длина увеличилась). Вследствие этого сформированный данным элементом участок каверны существенно сужается (хотя его протяженность и возрастает). Ясно, что, если бы за этим элементом двигался еще один, он мог бы полностью „сработаться“ вследствие взаимодействия со стенками узкого „прохода“, не дав дополнительного прироста глубины каверны. Возможность проявления при проникании в грунт описанного эффекта необходимо учитывать при выборе рациональной схемы сегментирования удлиненного ударника.

## Список литературы

- [1] *Фомин В.М., Гулидов А.И., Сапожников Г.А.* и др. Высоко-скоростное взаимодействие тел. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. 600 с.
- [2] *Weihrauch G., Wollmann E.* // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 1993. N 18. P. 270–274.
- [3] *Вовк А.А., Замышляев Б.В., Евтерев Л.С.* и др. Поведение грунтов под действием импульсных нагрузок. Киев: Наук. думка, 1984. 288 с.
- [4] *Велданов В.А., Федоров С.В.* // Тр. Междунар. конф. „Харитоновские тематические научные чтения“. Саров: РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2005. С. 551–556.