

УДК 531.552

## ВНЕДРЕНИЕ МЕДНОГО СТЕРЖНЯ В ПЕСЧАНУЮ ПРЕГРАДУ

М. В. Каминский, Г. Ф. Копытов, В. А. Могилев,  
Ю. Ф. Травов, Ю. И. Файков

Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,  
607190 Саров  
E-mail: tilkunova@dep16.vniief.ru

Представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований высокоскоростного внедрения в песок медных цилиндрических стержней. Усовершенствована модифицированная гидродинамическая теория Алексеевского — Тейта, что позволяет определять глубину проникания и скорость уноса материала стержня, внедряющегося в грунтовую преграду, на пластической и гидродинамической стадиях проникания. Рассмотрен случай, когда материал преграды является существенно менее прочным по сравнению с материалом стержня (ударника).

**Ключевые слова:** высокоскоростное проникание, пластическое деформирование, гидродинамический переход, пластическая волна, предел текучести.

**Введение.** При высокоскоростном внедрении длинных стержней (ударников) в плотные среды имеют место две стадии деформирования [1–3]: 1) пластическая стадия, когда уменьшение длины твердой части ударника происходит со скоростью, равной скорости продольной пластической волны  $C_p$ ; 2) гидродинамическая стадия, когда скорость срабатывания ударника  $V-U$  превышает скорость продольной волны пластических деформаций ( $V$  — скорость хвостовой недеформированной части ударника;  $U$  — скорость проникания).

На гидродинамической стадии процесс высокоскоростного проникания удовлетворительно описывается модифицированной гидродинамической теорией (МГТ) Алексеевского — Тейта [4–8], основанной на результатах экспериментальных исследований проникания металлических стержней в высокопрочные (в основном металлические) преграды. Однако высокоскоростное внедрение металлических стержней в пористые мягкие грунтовые среды изучено недостаточно (см., например, [9]).

Одним из основных параметров, характеризующих высокоскоростное взаимодействие ударника с преградой на гидродинамической стадии проникания, является коэффициент относительного проникания  $K = h/\Delta L$  ( $h$  — текущая глубина внедрения;  $\Delta L$  — укорочение (срабатывание) ударника). Коэффициент  $K$  позволяет предсказывать полную глубину срабатывания ударника на гидродинамической стадии в случае его стационарного проникания. Стационарность обеспечивается достаточно большим удлинением ударника (не менее семи) (см., например, [7]). Согласно схеме Алексеевского — Тейта величина  $K$  зависит от скорости внедрения  $V_0$ . При увеличении  $V_0$  значение  $K$  уменьшается, приближаясь к асимптотическому значению, определяемому известной формулой М. А. Лаврентьева [10] для случая идеальной несжимаемой жидкости:  $K = \sqrt{\rho_p/\rho_t}$ .

Целью настоящей работы является экспериментальное определение критической скорости  $V_*$ , при которой начинается пластическое деформирование, скорости гидродинамического перехода  $V_{ht}$  и скорости продольной пластической волны в медном стержне при его внедрении в песок  $C_p$ , а также усовершенствование МГТ, что позволяет описать процесс

высокоскоростного проникания с учетом двух стадий деформирования ударника, в случае когда материал преграды существенно менее прочный по сравнению с материалом ударника.

**1. Результаты экспериментов.** Выстреливаемые из баллистических установок в грунт медные цилиндрические ударники имели диаметр  $d = 1$  см, длину  $L_0 = 8,22$  см и массу  $m = 57,5$  г. Использовался медный сплав М1 с условным пределом текучести при сжатии  $\sigma_{0,2} \approx 290$  МПа [11] и плотностью  $\rho_p = 8,9$  г/см<sup>3</sup>. Экспериментальные данные получены на основе метода рентгенографирования процесса проникания. Грунтовая преграда представляла собой заполненный песком контейнер, имеющий следующие размеры: ширина  $(8 \div 10)d$ , высота не менее  $30d$ , длина приблизительно равна  $50d$ . Использовался мелкозернистый песок плотностью  $\rho_t = 1,65 \div 1,75$  г/см<sup>3</sup> и влажностью  $W = 5 \div 10$  %. По рентгенограмме, полученной в момент времени  $t$ , определялись следующие параметры: текущая глубина проникания  $h$ , текущая длина ударника  $L$ , длина хвостовой недеформированной части ударника  $L_p$ . По этим параметрам определялись укорочение ударника  $\Delta L = L_0 - L$  и длина его деформированной части  $\Delta L_p = L_0 - L_p$  (рис. 1). Значение  $L_p$  отсчитывалось от заднего торца ударника до сечения, в котором радиус ударника превышал начальное значение на 5 %. Использование данного способа измерения может приводить к некоторому систематическому завышению значений  $L_p$  и соответственно к занижению значений  $\Delta L_p$ . Предполагалось, что на гидродинамической стадии проникания  $L_p = L$  ( $\Delta L_p = \Delta L$ ), что обусловлено незначительной (по сравнению с длиной стержня) толщиной жидкой фазы материала ударника на контактной границе.

На рис. 2 представлена характерная рентгенограмма процесса проникания ударника на пластической стадии деформирования. На стержне видна резьба, на которую навинчивалась лепестковая обкладка для разгона и удержания стержня в канале ствола. Критическая скорость определяется при условии  $V = U = V_*$  из уравнения [4, 5], представляющего собой равенство давлений в носике стержня со стороны грунта и со стороны стержня:

$$\rho_p(V - U)^2/2 + Y_p = C_0\rho_tU^2/2 + R_t. \quad (1)$$

Здесь  $Y_p$  — динамический предел текучести материала ударника, при превышении которого он переходит в пластическое или жидкое состояние [4] ( $Y_p$  зависит от давления);  $R_t$  — динамическая твердость материала преграды [4–7], значение которой по сравнению с  $Y_p$

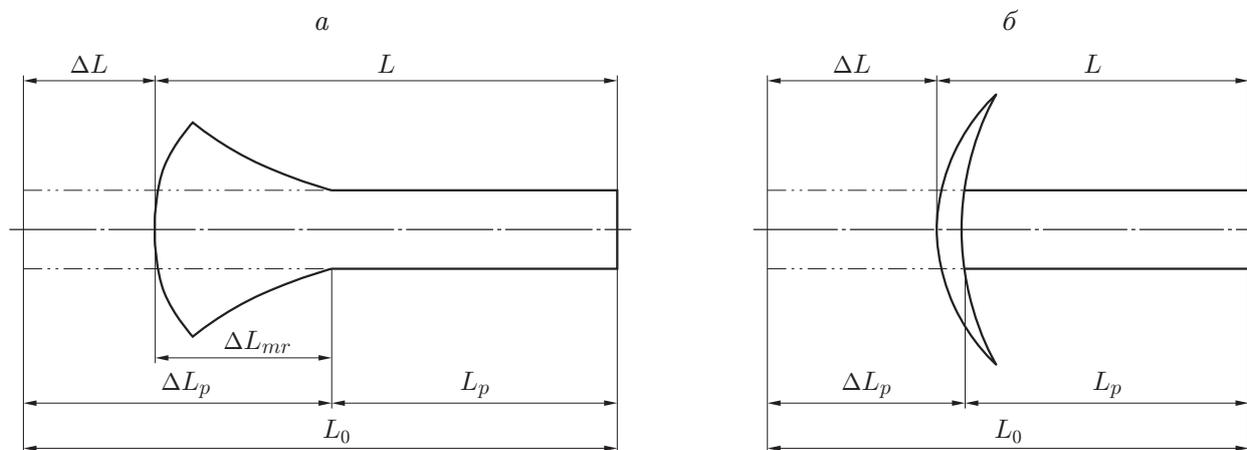


Рис. 1. Схема деформирования ударника при высокоскоростном проникании в песок:  
 а — пластическая стадия проникания, б — гидродинамическая стадия проникания

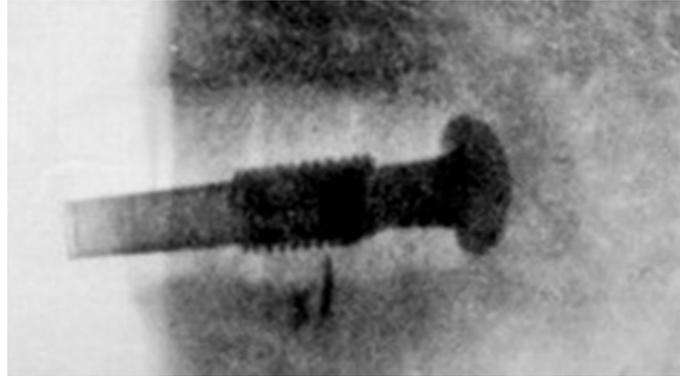


Рис. 2. Рентгенограмма процесса внедрения в песок медного стержня ( $V_0 \approx 1040$  м/с)

пренебрежимо мало. Вследствие существенной сжимаемости грунтовой преграды в предлагаемой модели, в отличие от модели идеальной несжимаемой жидкости, учитывается коэффициент давления торможения  $C_0$ , значение которого превышает единицу. Критическая скорость равна

$$V_*^2 = 2(Y_* - R_t)/(\rho_t C_0)$$

( $Y_*$  — предел текучести материала ударника при критической скорости внедрения). Коэффициент давления торможения может быть определен различными способами, например приближенно с учетом отношения плотности невозмущенного слоя преграды к плотности в ударно-сжатом слое [7]. Известно также, что значение коэффициента давления  $C_0$  близко к значению коэффициента лобового сопротивления  $C_x$  плоского торца цилиндра. Установлено, что для используемого в опытах песка коэффициент сопротивления плоского торца цилиндра в диапазоне скоростей  $100 \div 1000$  м/с равен  $C_x = 1,50 \pm 0,09$  ( $\pm 0,09$  — среднеквадратичное отклонение) [12]. В расчетах вместо значения  $C_0$  будем использовать экспериментально полученное значение  $C_x$  для плоского торца. В этом случае отсутствует необходимость учитывать значение  $R_t$ , поскольку оно уже учтено в значении коэффициента полного сопротивления. Путем увеличения в экспериментах скорости внедрения получено значение  $V_* \approx 500$  м/с и соответственно (при  $R_t \ll Y_*$ )  $Y_* \approx 320$  МПа. Это значение  $Y_*$  хорошо согласуется со значением предела текучести при сжатии [11] для полученной скорости деформации, приближенно равной  $V_*/L_0$ . Считается, что гидродинамический режим начинается при превышении скоростью ударника скорости гидродинамического перехода  $V_{ht}$ , которая определяется из соотношения (1) при  $V - U = C_p$  [1]. В случае если предел текучести имеет постоянное значение, скорость  $V_{ht}$  определяется по формуле [1]

$$V_{ht} = C_p + \left[ V_*^2 + \frac{1}{C_0} \left( \frac{C_p}{\mu} \right)^2 \right]^{1/2},$$

где  $\mu = (\rho_t/\rho_p)^{1/2}$ .

В табл. 1, 2 приведены результаты измерений  $\Delta L$  и  $\Delta L_p$ . Скорость продольной пластической волны  $C_p$  определялась с помощью рентгенограмм по формуле  $C_p = \Delta L_p/t$ . По данным 10 опытов получено значение  $C_p = (437 \pm 9)$  м/с. В опытах не выявлено зависимости  $C_p$  от скорости удара в рассмотренном диапазоне скоростей. Полученное значение достаточно хорошо согласуется со значением скорости продольной пластической волны, определяемым по формуле  $C_p = \sqrt{E_y/\rho_p}$ . Здесь  $E_y$  — модуль пластического упрочнения (в [1] для меди приведено значение  $E_y = 1,86$  ГПа, т. е.  $C_p = 456$  м/с). В табл. 1, 2 приведены также значения коэффициента деформирования  $K_p = h/\Delta L_p$  (на пластической стадии) и коэффициента относительного проникания  $K = h/\Delta L$  на обеих стадиях.

Таблица 1

Результаты исследований проникания медного ударника в песчаный грунт на пластической стадии

$V_0$ , м/с	Экспериментальные данные							Расчет по УМГТ				
	$h$ , мм	$t$ , мкс	$\Delta L$ , мм	$\Delta L_p$ , мм	$K_p$	$K$	$C_p$ , м/с	$t$ , мкс	$\Delta L$ , мм	$\Delta L_p$ , мм	$K_p$	$K$
703	27,5	44,2	5,5	20	1,37	5,00	452	48,1	5,7	21,0	1,31	4,82
853	70,0	96,8	19,0	42	1,67	3,68	434	109,4	19,3	47,8	1,46	3,63
879	65,0	93,8	20,0	41	1,58	3,25	437	98,9	18,7	43,2	1,51	3,48
965	62,0	81,9	19,5	35	1,77	3,18	427	87,4	19,7	38,2	1,62	3,15
1080	57,0	67,8	19,0	30	1,90	3,00	442	72,9	19,3	31,8	1,79	2,95
1125	53,0	61,0	18,0	27	1,89	2,94	443	65,3	18,9	28,5	1,86	2,80
1214	125,0	136,0	48,0	58	2,15	2,60	426	149,4	45,3	65,3	1,91	2,76
1218	120,0	141,0	45,0	60	2,00	2,67	426	142,5	43,7	62,2	1,93	2,75
1225	90,0	96,0	32,0	42	2,14	2,81	438	104,4	33,2	45,6	1,97	2,71
1330	102,0	104,0	38,5	46	2,21	2,65	442	110,3	39,0	48,2	2,12	2,62

Таблица 2

Результаты исследований проникания медного ударника в песчаный грунт на гидродинамической стадии

$V_0$ , м/с	Экспериментальные данные				Расчет по УМГТ		
	$h$ , мм	$t$ , мкс	$\Delta L$ , мм	$K$	$t$ , мкс	$\Delta L$ , мм	$K$
1544	105	104,0	44	2,39	98,8	42,3	2,48
1590	155	153,0	62	2,50	145,3	62,4	2,48
1636	65	58,4	28	2,32	57,0	26,7	2,43
1639	63	60,0	25	2,52	55,2	25,9	2,43
1650	105	97,0	42	2,50	92,8	43,0	2,44
2000	125	102,0	52	2,40	92,5	53,2	2,35
2006	135	110,0	58	2,33	100,2	57,4	2,35

**2. Усовершенствованная МГТ.** Согласно приближенной теории система уравнений, описывающая процесс внедрения ударника наряду с уравнением (1), имеет вид

$$\frac{dh}{dt} = U, \quad \rho_p L_p \frac{dV}{dt} = -Y_p(V),$$

$$\frac{dL_p}{dt} = -C_p \quad \text{при} \quad V_* \leq V < V_{ht}, \quad L_p = L \quad \text{при} \quad V \geq V_{ht}, \quad (2)$$

$$\frac{dL}{dt} = -(V - U).$$

В отличие от классической модифицированной гидродинамической теории в (2) учтена пластическая стадия проникания, а также зависимость предела текучести материала ударника от скорости проникания (при движении ударника скорость его твердой части уменьшается), т. е. учтено упрочнение материала стержня. Таким образом, система уравнений (2) описывает также пластическую стадию деформирования стержня. Для получения зависимости  $Y_p(V)$  использованы результаты экспериментов по определению предела текучести для меди, представленные в работе [13]. Используя условие для одномерной деформации  $\sigma_x = P + 2Y_p/3$ , можно получить зависимость  $Y_p(P)$ . На рис. 3 представлены экспериментальная зависимость  $Y_p(P)$  и ее линейная аппроксимация. В проведенных экспериментах давление, возникающее при проникании ударника в песчаный грунт (без учета ударной нестационарной стадии), не превышало 10 ГПа. При  $Y_p \geq Y_*$  и нагрузке

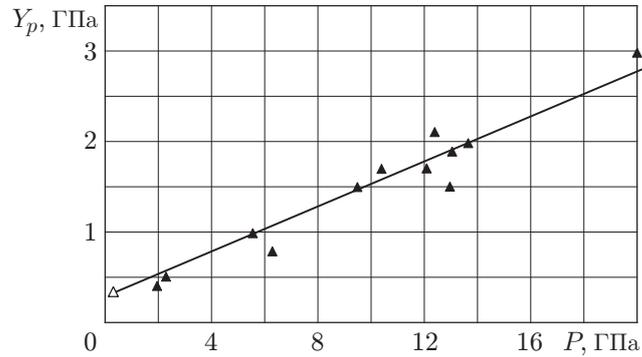


Рис. 3. Зависимость предела текучести меди от давления:  
 точки — экспериментальные данные для сплава меди М1 [13], сплошная линия — результаты расчета по формуле (3)

нии до относительно небольших осевых напряжений ( $\sigma_x \leq 20 \div 25$  ГПа), когда влияние температуры несущественно, зависимость  $Y_p(P)$  можно считать линейной [13, 14]:

$$Y_p = Y_0 + kP \quad (3)$$

( $k = 0,125$ ;  $Y_0 = 280$  МПа). Значения  $Y_0$  и  $k$  определены методом наименьших квадратов. Светлая точка на рис. 3 соответствует значению  $Y_p = Y_* = 320$  МПа, при котором наступает пластическая стадия деформирования. Согласно (3) давление в этой точке равно  $P = 320$  МПа. В соотношении (3) давление, при котором начинается пластическое деформирование материала стержня при данной скорости внедрения, можно вычислить приближенно по формуле

$$P = C_0 \rho_t V^2 / 2. \quad (4)$$

Значению  $P = 320$  МПа соответствует  $V = 500$  м/с, т. е. полученное в эксперименте значение  $V_*$ . Соотношения (3), (4) определяют зависимость  $Y_p(V)$ . В процессе проникания при наличии деформирования ударника скорость его твердой части  $V$  может изменяться от  $V_0$  до  $V_*$ . При этом будет изменяться и предел текучести материала ударника. Таким образом, система уравнений (1)–(4) полностью описывает процесс проникания ударника как на пластической стадии, так и на гидродинамической. С учетом упрочнения материала ударника  $Y_p(V)$  скорость гидродинамического перехода определяется из уравнения

$$V_{ht} = \frac{C_p}{1-k} + \left[ V_*^2 + \frac{C_p^2}{(1-k)^2} \left( k + \frac{1-k}{C_0 \mu^2} \right) \right]^{1/2}.$$

При проникании медного ударника в песчаный грунт скорость гидродинамического перехода с учетом упрочнения материала равна  $V_{ht} = 1521$  м/с.

**3. Расчетные параметры процесса проникания медного стержня.** Результаты расчетов по усовершенствованной модифицированной гидродинамической теории (УМГТ) также приведены в табл. 1, 2. Проведено сравнение с экспериментальными данными при фиксированных значениях  $V_0$  и  $h$ . В целом различие расчетных значений  $t$  и  $\Delta L$  ( $\Delta L_p$ ) не превышает 10 %, т. е. находится в пределах погрешности измерения параметров. Таким образом, представленная теория УМГТ удовлетворительно описывает процесс проникания на обеих стадиях деформирования материала ударника. На основе представленной выше теории определен ряд качественных и количественных характеристик процесса проникания. В качестве исходных параметров ударника и преграды в расчетах использовались те же данные, что и в экспериментах.

В общем случае процесс проникания ударника в малопрочную преграду может включать гидродинамическую, пластическую и твердую стадии. Под твердой стадией понимается движение ударника по окончании процесса его деформирования как жесткого тела с деформированной носовой частью. Если на гидродинамической стадии процесс укорочения ударника сопровождается срабатыванием, т. е. уменьшением его массы, то на пластической стадии (в случае медного ударника) происходит его пластическое сжатие без изменения массы.

Ниже определяется глубина проникания  $H$ , соответствующая окончанию деформирования, т.е. переходу стержня либо в твердый остаток, либо в пластически деформированный остаток. На гидродинамической стадии величина  $H$  является глубиной полного срабатывания. В работе [7] приведена зависимость конечной глубины проникания от начальной скорости ударника, а также выделены пять характерных областей. Эта зависимость является обобщением многочисленных экспериментов, в основном для случая проникания в прочные преграды. В случае проникания металлического ударника в песчаный грунт расчеты по УМГТ позволили выделить четыре характерных диапазона скоростей внедрения (диапазон скоростей, соответствующий движению твердого тела, в данной работе не рассматривается):  $V_* \leq V_0 < V_p$  (область I),  $V_p \leq V_0 < V_{ht}$  (область II),  $V_{ht} \leq V_0 < V_{sht}$  (область III),  $V_0 \geq V_{sht}$  (область IV).

В области I пластическая стадия внедрения всегда переходит в твердую стадию, в области II реализуется только пластическая стадия проникания. По окончании деформирования ударника в области II остается пластически сжатый медный ударник, имеющий ту же массу, что и первоначальный. В области III гидродинамическая стадия срабатывания ударника переходит в пластическую стадию деформирования, на которой происходит его окончательное пластическое сжатие. При скорости внедрения  $V_0 \geq V_{sht}$  происходит полное гидродинамическое срабатывание ударника. В расчетах получены значения  $V_p = 1,7V_* = 850$  м/с,  $V_{sht} = 2100$  м/с. В случае  $V_0 = V_{sht}$  ударник тормозится до скорости, равной скорости гидродинамического перехода  $V_{ht}$ , и при этом полностью срабатывается. В расчетах полагалось, что медный ударник полностью срабатывается, когда твердый остаток составляет менее 3 % первоначальной длины. На рис. 4 приведены расчетные и экспериментальные зависимости глубины, соответствующей окончанию деформирования ударника, от скорости внедрения во всех четырех областях. При  $V_0 \geq V_{sht}$  величина  $H$  соответствует полному срабатыванию ударника и практически равна глубине полного проникания. Максимальное значение глубины, соответствующей окончанию деформирования, имеет место в области III при  $V_0 \approx 1750$  м/с, т. е. при значении  $V_0$ , равном среднему значению скорости в области III. На рис. 4 показаны также значения глубины проникания, определенные по формуле М. А. Лаврентьева с учетом пористости песка:

$$\frac{H}{L_0} = \sqrt{\frac{\rho_p}{C_0 \rho_t}} = 1,87. \quad (5)$$

Следует отметить, что глубина срабатывания, определяемая по теории М. А. Лаврентьева, существенно отличается от значения, полученного с использованием УМГТ, что свидетельствует о значительной роли прочности ударника в рассматриваемом диапазоне скоростей при внедрении в малопрочную преграду.

Результаты расчетов коэффициента деформирования  $K_p = h/\Delta L_p$  и коэффициента относительного проникания  $K = h/\Delta L$  показывают, что при  $V_0 > V_p$   $K_p$  и  $K$  слабо зависят от глубины проникания (рис. 5). На гидродинамической стадии проникания в силу сделанного выше предположения о том, что  $\Delta L_p = \Delta L$ , имеет место равенство  $K = K_p$ .

Таким образом, глубина, соответствующая окончанию деформирования, может быть рассчитана по формуле  $H = K_p L_0$  (точки на рис. 4). Рассчитанные значения глубины удо-

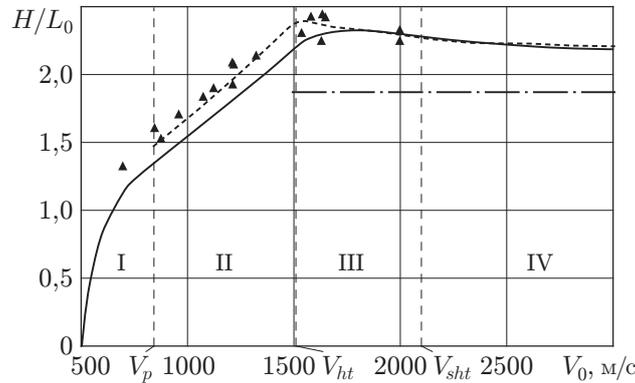


Рис. 4. Зависимости глубины деформирования от скорости ударника: сплошная линия — расчет по УМГТ; штриховая — оценка по формуле (8) с учетом (6), (7); штрихпунктирная — оценка по формуле М. А. Лаврентьева (5); точки — экспериментальные данные; I —  $V_* \leq V_0 < V_p$ ; II —  $V_p \leq V_0 < V_{ht}$ ; III —  $V_{ht} \leq V_0 < V_{sht}$ ; IV —  $V_0 \geq V_{sht}$

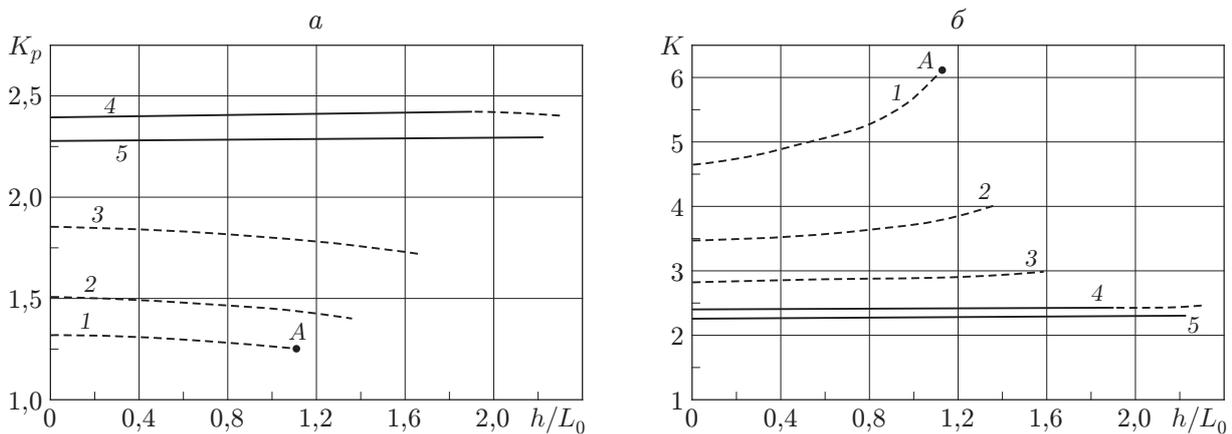


Рис. 5. Зависимости коэффициента деформирования  $K_p$  (а) и коэффициента относительного проникания  $K$  (б) от глубины проникания ударника в песчаный грунт: сплошные линии — гидродинамическая стадия деформирования, штриховые — пластическая стадия; 1 —  $V_0 = 700$  м/с, 2 —  $V_0 = 850$  м/с, 3 —  $V_0 = 1100$  м/с, 4 —  $V_0 = 1750$  м/с, 5 —  $V_0 = 2500$  м/с; А — точка, соответствующая переходу в режим твердого тела

влетворительно согласуются с экспериментальными значениями  $H/L_0$ , а различие объясняется, в частности, тем, что при выполнении оценки значений  $H/L_0$  по экспериментальным значениям  $K_p$  не учитывалась нестационарность процесса.

Кроме того, из системы уравнений (2) следует, что при  $h \rightarrow 0$  коэффициент деформирования  $K_p$  можно вычислить по следующим формулам:

— на пластической стадии

$$K_{p0} = \frac{dh}{d(\Delta L_p)} = \frac{U_0}{C_p}; \quad (6)$$

— на гидродинамической стадии

$$K_{p0} = K_0 = \frac{dh}{d(\Delta L)} = \frac{U_0}{V_0 - U_0} \quad (7)$$

( $U_0$  определяется из (1) с учетом зависимости  $Y_p(V_0)$ ). Расчеты показывают, что в процессе проникания ударника различие значений  $K_p$  и  $K_{p0}$  не превышает 5–8 % на пластической

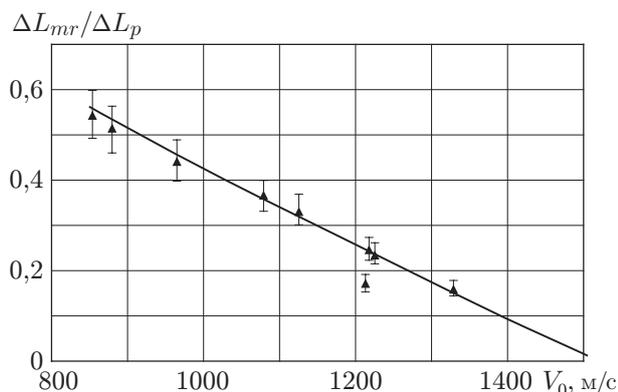


Рис. 6

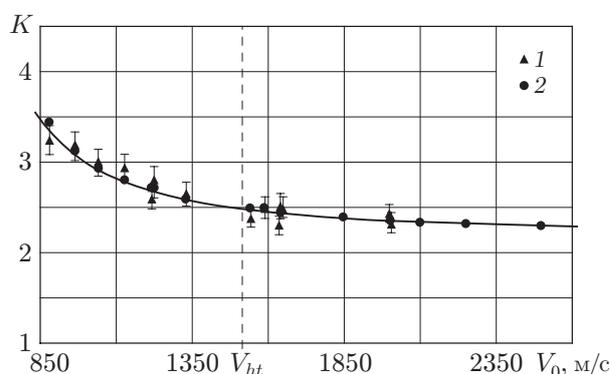


Рис. 7

Рис. 6. Зависимость относительной длины области пластической деформации ударника от скорости внедрения:

сплошная линия — расчет по аналитической зависимости (9); точки — экспериментальные данные

Рис. 7. Зависимость коэффициента относительного проникания от скорости внедрения:

1 — экспериментальные данные, 2 — расчет по УМГТ, сплошная линия — расчет по аналитической зависимости  $K = U_0/(V_0 - U_0)$

стадии (область II на рис. 5,а) и 1 % на гидродинамической стадии (области III и IV). С учетом указанных различий для определения глубины, соответствующей окончанию деформирования в областях II, III, IV (в этих областях твердая часть ударника “исчезает”), можно использовать приближенное соотношение (см. рис. 4)

$$H/L_0 = K_{p0}(V_0). \quad (8)$$

Длина пластически сжатой части стержня (так называемый гриб на рис. 1,а) в области  $V_p < V_0 < V_{ht}$  равна

$$\Delta L_{mr} = h \left( \frac{1}{K_{p0}} - \frac{1}{K_0} \right) = \Delta L_p \left( 1 - \frac{K_{p0}}{K_0} \right), \quad (9)$$

т. е. пропорциональна глубине проникания. На рис. 6 значения  $\Delta L_{mr}$ , определенные по зависимости (9), показаны в сравнении с экспериментальными данными (см. табл. 1). Зависимость коэффициента относительного проникания  $K$  медного ударника от  $V_0$  при  $V_0 > V_p$  представлена на рис. 7.

**4. Выводы.** Проведено экспериментальное исследование высокоскоростного внедрения медных ударников в песок с использованием рентгенографирования, позволившее определить скорость и характер процесса деформирования стержня.

Предложена усовершенствованная модифицированная гидродинамическая теория, описывающая как пластическую, так и гидродинамическую стадию проникания ударника в малопрочную преграду. Эффективность теории подтверждена результатами сравнения расчетных и экспериментальных данных.

Определены границы четырех диапазонов скоростей внедрения медного ударника в малопрочную пористую (песчаную) преграду, в которых характер процесса деформирования ударника и глубина, соответствующая окончанию деформирования, существенно различаются.

Показано, что в диапазоне скоростей внедрения, при которых происходит полное деформирование стержня, коэффициенты относительного проникания и деформирования слабо зависят от глубины проникания. Это позволяет при выполнении приближенной оценки глубины, соответствующей окончанию деформирования, использовать аналитическое соотношение (8).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Tate A.** A possible explanation for the hydrodynamic transition in high speed impact // Intern. J. Mech. Sci. 1977. V. 19, N 2. P. 121–123.
2. **Tate A.** Long rod penetration models. 2. Extension to the hydrodynamic theory of penetration // Intern. J. Mech. Sci. 1986. V. 28, N 9. P. 599–612.
3. **Recht R. F.** Taylor ballistic impact modeling applied to deformation and mass loss determination // Intern. J. Engng Sci. 1978. V. 16. P. 809–827.
4. **Алексеевский В. П.** К вопросу проникания стержня в преграду с большой скоростью // Физика горения и взрыва. 1966. № 2. С. 99–106.
5. **Тейт А.** Теория торможения длинных стержней после удара по мишени // Механика. 1968. № 5. С. 125–137.
6. **Tate A.** Further results in the theory of long rod penetration // J. Mech. Phys. Solids. 1969. V. 17, N 3. P. 141–150.
7. **Лазарев В. Б.** Структурная устойчивость и динамическая прочность неорганических материалов / В. Б. Лазарев, А. С. Баланкин, А. Д. Изотов, А. А. Кожушко. М.: Наука, 1993.
8. **Сагомоян А. Я.** Проникание. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1974.
9. **Копытов Г. Ф., Могилев В. А., Снопков А. П.** Экспериментальное исследование высокоскоростного взаимодействия ударника из сплава ВНЖ с мишенью // Изв. РАН. 2006. Вып. 4. С. 31–33.
10. **Лаврентьев М. А.** Кумулятивный снаряд и принцип его работы // Успехи мат. наук. 1957. Т. 12, № 4. С. 41–52.
11. **Большаков А. П., Новиков С. А., Синицын В. А.** Исследование динамических диаграмм одноосного растяжения и сжатия меди и сплава АМг6 // Пробл. прочности. 1979. № 10. С. 87–88.
12. **Бердников В. А., Копытов Г. Ф., Травов Ю. Ф. и др.** Экспериментальное исследование движения конусов и цилиндра в песчаной среде // Сб. материалов 2-й науч. конф. РАН “Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения”. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 2002. С. 276–281.
13. **Батьков Ю. В., Глушак Б. Л., Новиков С. А.** Прочность алюминия, меди и стали за фронтом УВ // Физика горения и взрыва. 1989. Т. 25, № 5. С. 126–131.
14. **Глушак Б. Л.** Исследование прочности материалов при динамических нагрузках / Б. Л. Глушак, В. Ф. Куропатенко, С. А. Новиков. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1992.

*Поступила в редакцию 19/VI 2009 г.*