

УДК 539.3

А.А. КОНЯЕВ, А.В. ГЕРАСИМОВ*, Т.М. ПЛАТОВА**, С.В. ПАШКОВ***ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОНИКАНИЯ КОМПАКТНЫХ И УДЛИНЁННЫХ УДАРНИКОВ В МЯГКИЙ И ПРОЧНЫЙ ГРУНТ¹**

Приведены результаты экспериментального и компьютерного моделирования закономерностей проникания металлических шаров и стержней в мелкий сухой песок, сырую глину, гранит при ударном нагружении. На этой основе проведено сравнение применимости эмпирических формульных соотношений для расчёта глубины проникания компактных и удлинённых ударников в грунты, отличающиеся по физико-механическим свойствам.

Ключевые слова: эксперимент, компьютерное моделирование, металлический стержень, шар, удар, глубина проникания, грунт.

Введение

Прогнозирование закономерностей проникания компактных и удлинённых ударников в мягкие и прочные грунты представляет актуальную и с учётом масштабных эффектов до конца не решённую проблему конечной баллистики. Существующие в настоящее время отечественные и зарубежные экспериментальные данные о закономерностях проникания металлических ударников в грунты показывают сложный вид зависимости глубины сформировавшегося кратера от скорости соударения. Начальный участок быстрого нарастания глубины внедрения в грунт соответствует режиму проникания недеформируемого ударника. Однако наблюдается некоторая критическая величина скорости удара, зависящая от геометрии и прочностных свойств соударяющихся тел, при которой регистрируется снижение глубины проникания. При дальнейшем росте скорости удара выше критической ударник разрушается, но глубина проникания вновь начинает расти. Для мелкого сухого песка [1] критическая скорость равна 1,6–1,8 км/с, для крупнозернистого литейного сухого песка [2] – 0,4–0,5 км/с. В лёгком пористом материале – пенопласте – плотностью 0,11 г/см³ при ударе стальными шарами [3] критическая скорость составляет 4–5 км/с, в свинце 0,4–0,5 км/с.

Существование критических скоростей внедрения для столь различных сред свидетельствует о подобии процессов деформирования и разрушения соударяющихся материалов. Целью работы является исследование возможностей количественного описания закономерностей проникания ударников в грунты, отличающиеся по физико-механическим свойствам. В данной работе реализован экспериментально-теоретический способ получения информации о закономерностях внедрения компактных и удлинённых металлических ударников в песчаный и глинистый грунты, гранит при скоростях, предшествующих критической скорости взаимодействия.

Объекты и методы исследования

В качестве образцов грунта использовался мелкий сухой речной песок плотностью 1,7 г/см³, бетон марки 400 плотностью 2,2 г/см³. При компьютерном моделировании брали сырую глину плотностью 2,2 г/см³, гранит плотностью 2,66 г/см³. Размеры образцов грунта подбирались такими, чтобы исключить влияние краевых эффектов на глубину проникания. В качестве ударников использовались стержни диаметром 7,6 мм переменной высоты 7,6; 22,8 и 30,0 мм из стали Ст. 3, алюминиевого сплава Д16, титана ВТ1–0. Ускорение компактных и удлинённых стержней производилось на гладкоствольной баллистической установке калибром 7,65 мм в диапазоне скоростей 0,08–0,8 км/с. Специальное устройство экспериментальной сборки позволяло контролировать в каждом опыте определяющий параметр – отсутствие вращения стержня в процессе проникания.

На баллистической трассе и внутри экспериментальной сборки монтировался ряд разнесённых листов ватмана. По симметричной форме пробитых отверстий в листах ватмана делалось заключение об осесимметричном, без перекоса, проникании стержня.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 10-08-00633, 10-08-00398.

Схема эксперимента по измерению глубины проникания стального стержня в сыпучую среду – сухой речной песок – приведена на рис. 1. Цифрами обозначены: 1 – ударник в виде стержня (Ст. 3) длиной 22,8 мм, диаметром 7,6 мм; 2–4 – листы ватмана для крепления песка и регистрации угла вращения стержня; 5 – демпфер. В данной постановке эксперимента стержень при проникании в песок не вращается. При скорости удара 401 м/с глубина проникания в песок составила 73 мм, а при скорости 678 м/с – 195 мм. Остаточная длина стержня при скорости 678 м/с равна 22,6 мм. Диаметр головной части – 7,9 мм.

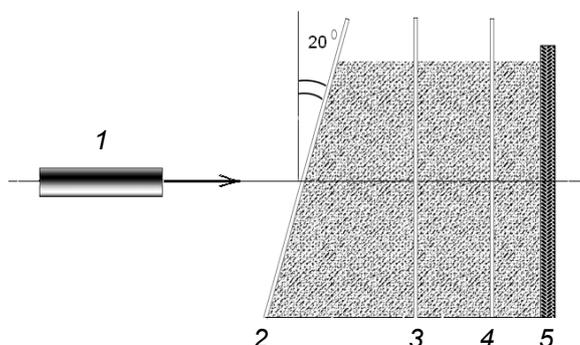


Рис. 1. Схема эксперимента по измерению глубины проникания стального стержня в песок

Можно предположить, что объём кратера в песке, как и в твёрдых телах, пропорционален кинетической энергии ударника и обратно пропорционален работе вытеснения единицы объёма песчаной преграды. Для согласования расчетной и измеренной глубины проникания проведены эксперименты по определению работы вытеснения единицы объёма при проникании недеформируемого стержня. При докритических скоростях соударения площадь поперечного сечения недеформируемого ударника близка к площади поперечного сечения цилиндрического кратера. В этих условиях его объём W_k , как и для полусферического кратера, пропорционален подводимой кинетической энергии:

$$W_k = \frac{m_c V_0^2}{2a}, \quad (1)$$

где m_c – масса стержня; a – работа вытеснения единицы объёма материала преграды.

Если диаметр стержня совпадает с диаметром кратера, то для такой схемы проникания относительная глубина кратера, как это следует из (1), равна

$$\frac{L_k}{l_c} = \frac{\rho_c V_0^2}{2a}, \quad (2)$$

где L_k – глубина кратера; l_c – длина ударника (стержня); ρ_c – плотность стержня. Подставляя в (2) экспериментальные значения L_k/l_c , ρ_c , V_0 , получаем величину работы вытеснения единицы объёма.

Тогда работу вытеснения единицы объёма песка можно найти из соотношения

$$a = \frac{\rho_c V_0 l_c}{2L_k}, \quad (3)$$

где ρ_c , l_c – соответствуют начальным условиям; V_0 , L_k – измеряются в каждом эксперименте.

Результаты и их обсуждение

Средняя величина работы вытеснения единицы объёма песка по пяти экспериментальным точкам в диапазоне скоростей соударения 0,4–0,8 км/с составила $a = (203 \pm 7)$ МПа, отклонение от средней величины – 3,4 %.

Относительная и абсолютная глубина проникания стального стержня длиной 22,8 мм и диаметром 7,6 мм в сухой речной песок, рассчитанная по формуле (2) для средней величины работы вытеснения единицы объёма (203 ± 7) МПа, приведены в таблице.

Глубина проникания стального стержня в сухой речной песок

V_0 , км/с	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
L_k / l_c	3,07	4,80	6,92	9,41	12,3
L_k , мм	70,1	109,5	157,7	214,0	280,3

Зависимость от скорости удара относительной и абсолютной глубины проникания стального стержня в сухой речной песок по найденной из экспериментов средней величине работы вытеснения единицы объёма приведена на рис. 2.

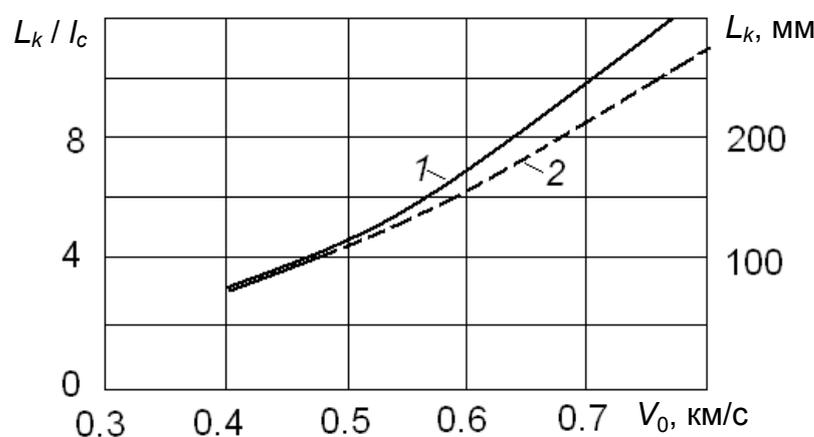


Рис. 2. Зависимость от скорости удара относительной (кр. 1) и абсолютной (кр. 2) глубины проникания стержня в сухой песок

Структура соотношения (2) для глубины проникания в песок недеформируемых металлических ударников соответствует эмпирически установленной пропорциональности объёма кратера от кинетической энергии ударника.

Существенное расхождение по глубине проникания расчёта с экспериментом может возникнуть, если распределение подведённой кинетической энергии ударника в грунте будет отлично от схемы, заложенной при выводе соотношения (2). Действительно, формула (2) не зависит от диаметра ударника и предполагает форму кратера цилиндрической. При скоростях соударения, равных и больших критической, алгоритм расчёта глубины проникания в грунт, как и для металлов, потребует существенной корректировки.

Отсутствие экспериментальных данных об эволюции формы кратера в грунтах в процессе проникания ударника вынуждает использовать компьютерное моделирование как источник недостающей информации. С этой целью проведены компьютерные расчёты проникания ударников различных типов в глинистый грунт и гранит.

Уравнения, описывающие пространственное адиабатное движение прочной сжимаемой среды, являются дифференциальными следствиями фундаментальных законов сохранения массы, импульса и энергии. В общем случае они включают следующие уравнения: уравнение неразрывности; уравнения движения; уравнение энергии. Для описания сопротивления тела сдвигу использовались соотношения Прандтля – Рейсса, а также условие пластичности Мизеса. В численных расчётах применялась процедура приведения напряжений к кругу текучести. Уравнение состояния ударника выбиралось в форме Ми – Грюнайзена, уравнение состояния грунта бралось из [1].

Процесс разрушения реальных материалов всегда определяется неоднородной структурой среды. Поэтому для адекватности результатов численного моделирования процесса разрушения экспериментальным данным необходимо внести соответствующие возмущения в физико-

механические характеристики рассматриваемой среды, т.е. задать случайное распределение факторов, определяющих прочностные свойства материала. В работе физико-механические характеристики среды, отвечающие за прочность, считаются распределенными случайным образом по объему материала. Плотность вероятности распределения данных параметров выбирается в виде различных законов распределения, в общем случае зависящих от табличного (среднего) значения распределяемого параметра, варьируемой дисперсии распределения данного параметра, и других характеристик среды. Такие параметры, как предел текучести, предел прочности, максимальные деформации и прочие константы, определяющие момент наступления разрушения в различных теориях прочности и критериях разрушения, напрямую зависят от числа и размера дефектов и должны быть распределены по объему случайным образом, с дисперсией, зависящей от однородности материала. Начальные неоднородности для ударника моделировались распределением предельной эквивалентной пластической деформации по ячейкам расчетной сетки с помощью модифицированного генератора случайных чисел, выдающего случайную величину, подчиняющуюся выбранному закону распределения. В данной работе плотности вероятности случайных величин брались в виде нормального гауссовского распределения со средним арифметическим, равным табличному значению и варьируемой дисперсией.

Для расчета упругопластических течений использовалась трехмерная методика, реализованная на тетраэдрических ячейках и базирующаяся на совместном использовании метода Уилкинса для расчета внутренних точек тела и метода Джонсона для расчета контактных взаимодействий.

Система основных уравнений дополняется начальными и граничными условиями. В начальный момент времени все точки ударника имеют осевую скорость с учетом ее знака, а состояние преграды предполагается невозмущенным. На свободных границах выполняются условия равенства нулю нормальных и тангенциальных компонент вектора напряжений. На участке контакта между телами ставится условие идеального скольжения одного материала относительно другого вдоль касательной и условие непротекания по нормали.

На рис. 3 приведена трехмерная картина взаимодействия медного шарика диаметром $D = 12,8$ мм с гранитной преградой в момент времени 68,4 мкс, скорость соударения 690 м/с. Плотность гранита $\rho_0 = 2,66$ г/см³.

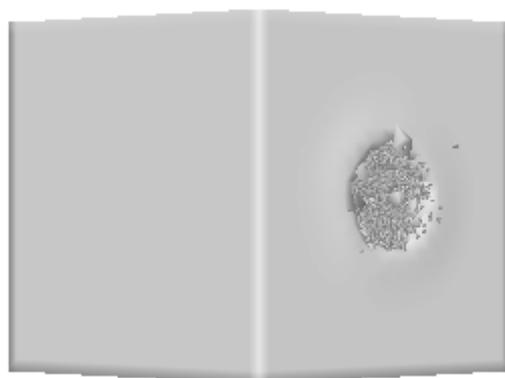


Рис. 3. 3D-картина взаимодействия шарика с гранитной преградой

Как видно на рис. 3, пробитое отверстие частично заполнено разрушенным материалом. Двумерный разрез трехмерной расчетной области взаимодействия, а также распределение трещин в граните при формировании ударного кратера и разлет образовавшихся фрагментов преграды из кратера приведены на рис. 4. Расчетная глубина кратера 14 мм, экспериментальные данные [7] дают сопоставимую величину.

Поле скоростей в расчетной области показано на рис. 4 для момента времени 68,4 мкс. К этому моменту медный шар уже значительно деформировался и затормозился до скорости 20 м/с, т.е. процесс внедрения практически завершился.

В докритической области скоростей соударения представляет практическую ценность сравнение предлагаемого алгоритма расчёта глубины проникания цилиндрического ударника в грунт (2) с существующими экспериментальными формульными соотношениями и результатами компьютерных расчётов.



Рис. 4. Поле скоростей в граните на завершающей стадии кратерообразования. Двумерный разрез трехмерной расчетной области взаимодействия

При ударе в мелкий сухой песок ударника из стали и сплава ВНЖ на основе вольфрама предлагается [1] глубину проникания рассчитывать по формуле

$$L_k = 0,1\rho_c \left(26,2\sqrt{d} - \frac{1}{\lambda} + 1,75l_c = 5,3 \right) \left(\frac{V_0}{V} \right)^{0,4}, \quad (4)$$

где L_k – глубина проникания, см; ρ_c – начальная плотность ударника, г/см³; l_c – длина ударника-стержня, см; d – диаметр стержня, см; λ – отношение длины стержня к диаметру; V_0 – скорость соударения, км/с; $V = 1$ км/с – корректирующий множитель.

Эмпирическая формула для глубины проникания в песок, глину, гранит в виде логарифмической функции от квадрата скорости удара имеет вид [5]

$$L_k = 0,0008SN \left(\frac{m_0}{A} \right)^{0,7} \ln \left(1 + 2,15V_0^2 10^{-4} \right), \quad (5)$$

где L_k – глубина проникания, м; S – безразмерный коэффициент проникаемости; N – безразмерный коэффициент формы головной части; m_0 – масса ударника, кг; A – площадь поперечного сечения ударника, м²; V_0 – скорость удара, м/с.

В формуле (5) размерности левой и правой частей не совпадают. Безразмерный коэффициент проникаемости для мелкого сухого песка при ударе стальным стержнем удлинением 3 равен 2,18, а для сырой глины 6,10. При ударе стальным шаром по сырой глине безразмерный коэффициент проникаемости равен 5,73.

Экспериментальная логарифмическая аппроксимация экспериментальных данных по прониканию в сырую глину и глинистый грунт [6] записывается в виде

$$L_k = \frac{m_0}{2bA} * \ln \left(1 + \frac{b}{a} V_0^2 \right), \quad (6)$$

где L_k – глубина проникания, см; m_0 – масса ударника, кг; A – площадь поперечного сечения ударника, мм²; V_0 – скорость удара, см/с; a – постоянная, зависящая от свойств грунта, кг·см²; b – постоянная, зависящая от свойств грунта, кгс²·см⁻⁴.

Для стальных ударников, сырой глины и глинистого грунта постоянные a равны соответственно 26,4 и 34,2. Постоянные b численно равны соответственно $0,0168 \cdot 10^{-3}$ и $0,0216 \cdot 10^{-3}$.

Для мелкого сухого песка по полученным в данной работе экспериментальным данным постоянные a и b равны соответственно 42,0 и $0,0690 \cdot 10^{-3}$.

Результаты сравнения экспериментальных данных и расчётов глубины проникания компактных и удлинённых ударников в мелкозернистый сухой песок, мокрый песок, глину и гранит приведены на рис. 5.

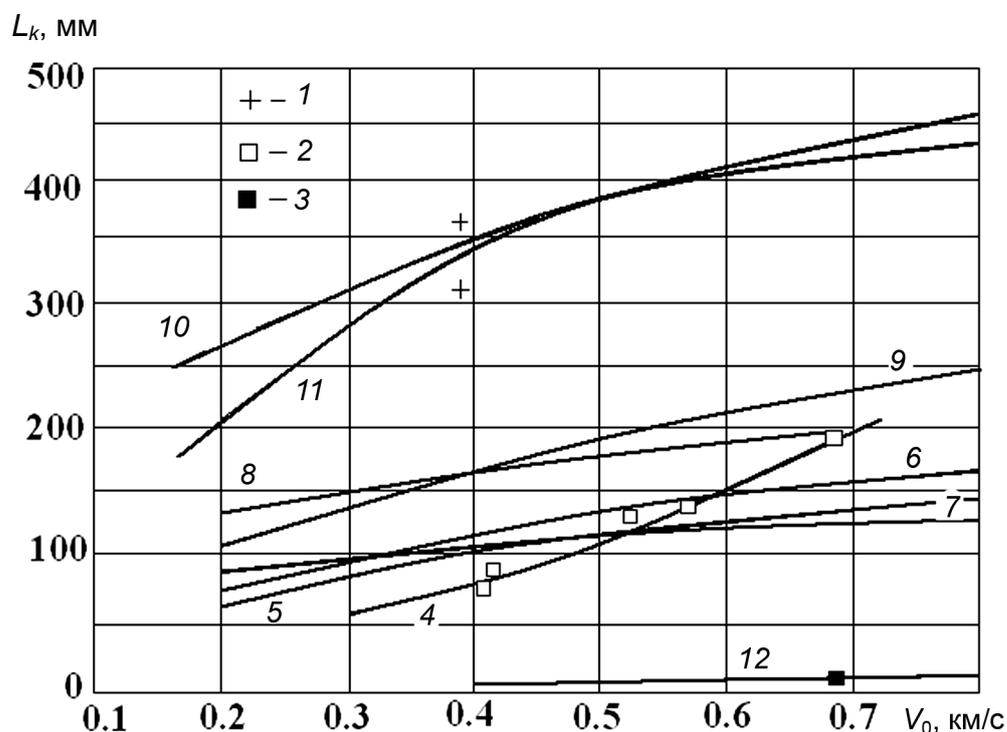


Рис. 5. Сравнение экспериментальных данных и расчётов глубины проникания

Обозначения на рис. 5 соответствуют следующим условиям расчётов и экспериментов: 1 – экспериментальные точки [1] для мокрого песка, ударник – стальной шар массой 8 г, диаметром 12 мм, скорость удара равна 0,4 км/с; 2 – оригинальные экспериментальные точки для мелкозернистого сухого песка, ударник – стальной цилиндр массой 8,1 г; 3 – экспериментальная точка для проникания медного шара диаметром 12,8 мм в гранит [7]; кр. 4 – расчёт глубины проникания в сухой песок по формуле (2) стального стержня массой 8,1 г; кр. 5 – расчёт глубины проникания в сухой песок по формуле (6) стального стержня массой 8,1 г; кр. 6 – расчёт глубины проникания в сухой песок по формуле (5) стального стержня массой 8,1 г; кр. 7 – аппроксимация эксперимента [6] для глубины проникания в сухой песок стального стержня массой 8,1 г; кр. 8 – компьютерный расчёт проникания медного шара диаметром 15,06 мм в сырую глину; кр. 9 – расчёт проникания стального шара диаметром 15,06 мм в сырую глину по формуле (6); кр. 10, 11 – расчёт проникания в сырую глину стального цилиндра массой 8,1 г по формулам соответственно (6) и (5); кр. 12 – компьютерный расчёт проникания медного шара диаметром 12,8 мм в гранит.

Заключение

Предложенная формула (2) расчёта глубины проникания стальных стержней в сухой песок описывает результаты эксперимента в диапазоне скоростей соударения до 0,7 км/с. Компьютерное моделирование как способ получения недостающей информации позволило дополнить эмпирически установленные закономерности глубокого проникания в глину и гранит и визуально изучить эволюцию процесса внедрения ударника на всех стадиях вплоть до завершения кратерообразования.

Комплекс эмпирических соотношений (2), (4) – (6) для глубины проникания компактных и удлинённых ударников в мягкий и прочный грунт нашёл подтверждение в оригинальных баллистических экспериментах и компьютерных расчётах, а также в известных литературных данных, в докритической области скоростей взаимодействия.

