

УДК 539.3:620.17.254

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРОНИКАНИЯ СФЕРОКОНИЧЕСКИХ ТЕЛ В ПЕСЧАНУЮ ПРЕГРАДУ

В.В. Баландин, А.М. Брагов, С.В. Крылов, Е.В. Цветкова

Научно-исследовательский институт механики Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

Приводятся результаты серии лабораторных прямых и обращенных экспериментов по нормальному соударению сфероконических тел с преградами из песка, засыпанного в металлические цилиндрические контейнеры. Экспериментальные данные сопоставляются с данными расчетов, основанных на применении модифицированного разностного метода С.К. Годунова. В качестве модели динамического поведения песчаной среды используется модель С.С. Григоряна с достаточно простыми уравнениями состояния, базирующимися на результатах проведенных плосковолновых экспериментов и экспериментов с использованием модифицированного метода Кольского. Анализируется поведение сил и коэффициентов сопротивления прониканию на разных стадиях процессов ударного взаимодействия.

Ключевые слова: проникание, сухой песок, сила сопротивления, модель Григоряна

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDY OF PENETRATION OF SPHEROCONICAL BODIES INTO A SAND TARGET

V.V. Balandin, A.M. Bragov, S.V. Krylov and Ye.V. Tsvetkova

Research Institute of Mechanics, Nizhny Novgorod Lobachevsky State University, Nizhny Novgorod, Russia

The results of direct and reverse normal impact laboratory experiments performed to study spheroconical bodies with barriers of sand filled in metal cylindrical containers are given. The data are compared with the numerical simulation results obtained based on the modified Godunov difference method. S.S. Grigoryan's model with relatively simple equations of state is used as a model of the dynamic behavior of sandy media. The model parameters are based on the results of the plane-wave experiments and the experiments with a modified Kolsky method. The behavior of forces and coefficients of resistance to penetration at different phases of impact interaction is analyzed.

Key words: penetration, dry sand, resistance force, Grigoryan's model

1. Введение

Исследование процессов ударного взаимодействия твердых деформируемых тел и конструкций с преградами из грунта является сложной и важной научно-технической проблемой, для решения которой используются теоретические, расчетные и экспериментальные методы. Теоретические и расчетные методы позволяют получать параметры проникания различных тел в грунтовые преграды в широком диапазоне скоростей удара [1–4]. Однако многообразие свойств и сложное поведение грунтовых сред, которые не учитываются в полном объеме при решении задач ударного взаимодействия, может приводить к значительным погрешностям в результатах. Существующие же на сегодняшний день экспериментальные методы дают возможность определять такие характеристики процесса взаимодействия, как глубину и траекторию проникания, интегральные нагрузки, но они достаточно сложны и дороги в реализации

[5–12]. К тому же экспериментальные результаты зачастую подвержены влиянию ограниченных размеров используемых грунтовых мишеней. Поэтому наиболее перспективным, на наш взгляд, является сочетание модельных экспериментов и расчетных методов [12, 13], позволяющее с большей полнотой устанавливать основные закономерности проникания твердых деформируемых тел в грунтовые среды.

В работах [12, 13] проведено комплексное исследование проникания ударников с различными головными частями канонической формы — конусом, полусферой и цилиндром — в сухой песок. Несомненный интерес представляет изучение основных закономерностей проникания тел более сложной формы, в частности сфероконических. Основное содержание настоящей работы составляет описание экспериментального и численного подходов к решению этой задачи.

2. Математическая постановка задачи

Осесимметричная задача взаимодействия сфероконического тела с мишенью — мягкой грунтовой средой, помещенной в контейнер, формулируется в цилиндрической системе координат rOz . Ось Oz является осью симметрии и проходит через ось вращения ударника, ось Or перпендикулярна ей и направлена вдоль невозмущенной свободной поверхности грунта. Система уравнений, описывающая динамику взаимодействующих сред и выражающая законы сохранения массы и импульса, выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned}(\rho)_{,t} + (\rho u)_{,r} + (\rho v)_{,z} &= -(\rho u) / r, \\ (\rho u)_{,t} + (\rho u^2 + p - s_{rr})_{,r} + (\rho uv - s_{rz})_{,z} &= (2s_{rr} + s_{zz} - \rho u^2) / r, \\ (\rho v)_{,t} + (\rho vu - s_{rz})_{,r} + (\rho v^2 + p - s_{zz})_{,z} &= (s_{rz} - \rho vu) / r.\end{aligned}\quad (1)$$

Принятые обозначения: t — время; ρ — плотность соответствующей среды; u, v — компоненты вектора скорости в направлении осей r, z соответственно; s_{ij} — компоненты девиатора тензора истинных напряжений Эйлера. Символ после запятой обозначает дифференцирование по соответствующей переменной.

Для описания объемной сжимаемости мягкой грунтовой среды при разгрузке, то есть при $\rho < \rho^*$, используется следующее уравнение:

$$(\rho \rho^*)_{,t} + (\rho \rho^* u)_{,r} + (\rho \rho^* v)_{,z} = -(\rho \rho^* u) / r, \quad (2)$$

где ρ — текущая плотность грунта, ρ^* — максимальная плотность, достигнутая в процессе активного нагружения грунта. Уравнение (2) учитывает перенос «истории нагружения» материальной частицы. Определяющие соотношения между объемной деформацией $\varepsilon = 1 - \rho_0 / \rho$ и давлением p в грунте базируются на результатах плосковолновых экспериментов [14, 15] и экспериментов с использованием модифицированного метода Кольского [16]. Предполагается линейная зависимость скорости ударной волны D и массовой скорости за фронтом волны U :

$$D = A + B U, \quad (3)$$

где A и B — константы, описывающие состояние песка.

Ударная адиабата (3) с помощью соотношений Гюгонио может быть преобразована к виду:

$$p = \rho_0 A^2 \varepsilon / (1 - B\varepsilon)^2, \quad (4)$$

где ρ_0 — начальная плотность грунта; ε — объемная деформация. При $\rho \geq \rho_g$ (ρ_g — это плотность, соответствующая началу обратимой гидродинамической ветви диаграммы нагружения) разгрузка частиц грунта описывается уравнением (4); при $\rho < \rho_g$ разгрузка имеет линейный характер и представляется формулой: $p = p^* - \rho_0 A^2 (\varepsilon^* - \varepsilon) / (1 - q)$. Здесь p^* — максимальное давление, достигнутое в предыдущем процессе активного нагружения; $\varepsilon^* = 1 - \rho_0 / \rho^*$; q — безразмерный коэффициент интенсивности разгрузки ($0 \leq q < 1$). Компоненты девиатора тензора напряжений рассчитываются исходя из обобщенного закона Гука:

$$\begin{aligned} s_{rr,r} + \left(u \left(s_{rr} - \frac{4}{3} \mu \right) \right)_{,r} + \left(v \left(s_{rr} + \frac{2}{3} \mu \right) \right)_{,z} &= s_{rr} (u_{,r} + v_{,z}) + s_{rz} (u_{,z} - v_{,r}) - \lambda s_{rr} - \frac{2\mu u}{3r}, \\ s_{zz,r} + \left(u \left(s_{zz} + \frac{2}{3} \mu \right) \right)_{,r} + \left(v \left(s_{zz} - \frac{4}{3} \mu \right) \right)_{,z} &= s_{zz} (u_{,r} + v_{,z}) + s_{rz} (v_{,r} - u_{,z}) - \lambda s_{zz} - \frac{2\mu v}{3r}, \\ s_{rz,r} + (u s_{rz} - \mu v)_{,r} + (v s_{rz} - \mu u)_{,z} &= -s_{rr} (u_{,z} - v_{,r}) + s_{zz} (u_{,z} - v_{,r}) + s_{rz} (u_{,r} - v_{,z}) - \lambda s_{rz}. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь μ — модуль сдвига; λ — параметр, характеризующий работу пластических деформаций.

Критерием перехода из упругого напряженно-деформированного состояния в пластическое является условие текучести Мизеса

$$J_2 = \frac{1}{2} s_{ij} s^{ij} = \frac{1}{3} \sigma_T^2, \quad (6)$$

где J_2 — второй инвариант девиатора тензора напряжений s_{ij} ; σ_T — предел текучести грунтовой среды, который полагается переменным, зависящим от давления p : $\sigma_T = \sigma_T(p) = \sigma_0 + kp / (1 + kp / (\sigma_M - \sigma_0))$, σ_0 , σ_M , k — константы грунтовой среды (σ_0 — сцепление; σ_M — предельная прочность; k — коэффициент внутреннего трения).

Для описания поведения материалов ударника и контейнера используется система уравнений (1), (5), (6); шаровые компоненты тензоров напряжений и деформаций связаны линейно

$$p = K\varepsilon,$$

где K — объемный модуль упругости. Приведенные выше уравнения решаются при следующих начальных и граничных условиях:

- в начальный момент времени проникающее тело и мишень с контейнером находятся в ненапряженном состоянии; задается начальная скорость движения v_0 (в прямом эксперименте — ударника, в обратном — мишени и контейнера);
- на свободных границах тела и грунта нормальные и сдвиговые напряжения равняются нулю;

– на контактных границах ставится условие «непроникания» по нормали $v_{n1} = v_{n2}$ и «проскальзывания с кулоновским трением» в касательном направлении.

Для решения системы уравнений (1)–(6) применяется численная методика, основанная на модифицированной схеме С.К. Годунова [17], которая подробно изложена в [18]. Особенностью метода является использование произвольных подвижных эйлерово–лагранжевых разностных сеток для описания движения взаимодействующих объектов.

3. Экспериментальные и расчетные результаты в прямой постановке

Экспериментальное исследование взаимодействия проводилось в прямой и обращенной постановках. В прямых экспериментах разогнанный ударник взаимодействовал с неподвижной преградой, в обращенных ударник (по крайней мере, в начальный момент времени) был неподвижен, а удар наносился разогнанной до нужной скорости преградой.

В прямых экспериментах в качестве преграды использовался сухой песок (с влажностью менее 0,1%), засыпанный в цилиндрический контейнер. Контейнер, сделанный из стальной трубы (наружный диаметр 140 мм, внутренний диаметр 130 мм, длина 350 мм) с одного торца был заглушен стальной пластиной (толщиной 5 мм), с другого торца закрывался натянутой лавсановой пленкой толщиной 0,01 мм. Из песка естественного состава удалялись частицы с размерами более 1 мм и менее 0,1 мм. Средняя плотность песка в контейнере составляла 1780 кг/м³. Пленка препятствовала высыпанию песка из контейнера и, в то же время, практически не создавала дополнительного сопротивления внедрению ударника в песок. В качестве тела, внедряющегося в песок, использовался сфероконический ударник с диаметром цилиндрической части 19,8 мм, углом конусности 20° и диаметром полусферического притупления 10 мм. Ударник был изготовлен из стали 45 и в опытах практически не деформировался. Его масса составляла 54,1 г.

Эксперименты проводились на установке, описанной в работе [19]. Процесс фиксировался с помощью высокоскоростной киносъемки, по результатам которой строились зависимости глубины проникания ударников от времени. Из полученных экспериментальных зависимостей время–глубина проникания с помощью формулы из работы [5] определялись коэффициенты сопротивления прониканию на стадии, следующей за внедрением головной части ударника:

$$X = \frac{2m}{\rho_0 S C_x} \ln \left(\frac{\rho_0 S C_x}{2m} V_0 t + 1 \right),$$

где $X(t)$ — глубина внедрения; характеристики ударника: m — масса, V_0 — начальная скорость, S — площадь поперечного сечения; C_x — безразмерный коэффициент сопротивления; ρ_0 — плотность песка в контейнере.

После каждого эксперимента на головной части ударника наблюдались области, где оставалась корка из измельченного и уплотненного песка. Местами корка легко облетала с поверхности ударника, а местами имела достаточно прочное сцепление с поверхностью головной части. Было замечено следующее: песок как бы спекался и прилипал к поверхности ударника в двух областях. Первая область находилась на полусферическом притуплении вблизи носика; диаметр носового пятна составлял 6,5–7 мм. Вторая область спеченного песка располагалась на конической поверхности на расстоянии 10–12 мм от носика ударника и имела длину 10–18 мм.

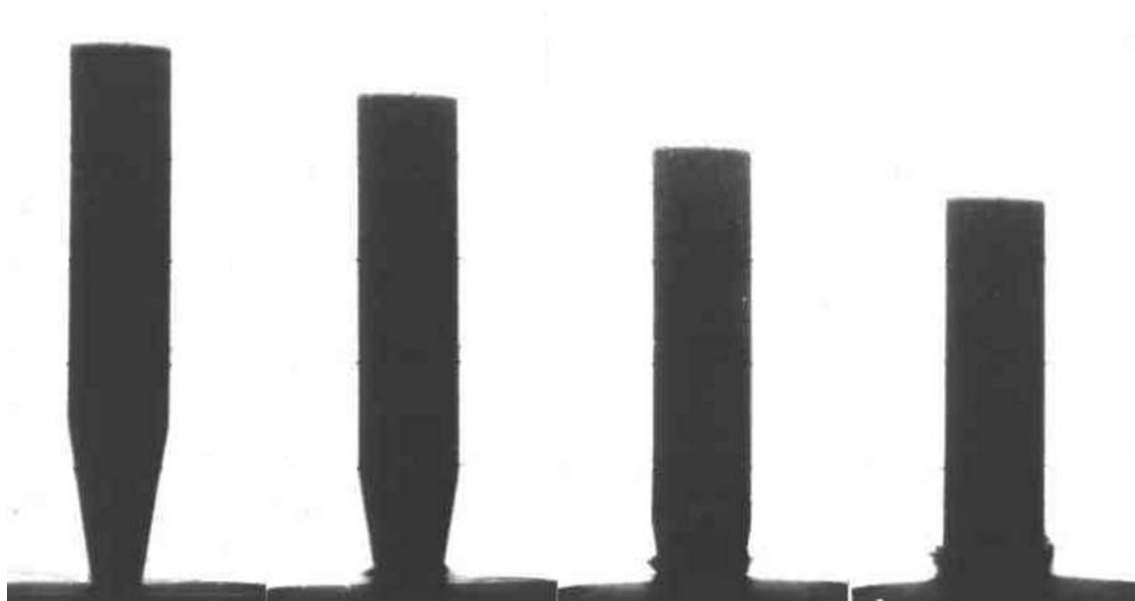


Рис. 1. Начальные кадры кинограммы проникания ударника при скорости внедрения 438 м/с

Во всех экспериментах отсутствовали следы взаимодействия с песком (царапины) на цилиндрических поверхностях ударников. В то же время вблизи носика ударников и на конических поверхностях головных частей под слоем спеченного песка и далее до основания головной части были обнаружены царапины; и они были достаточно глубокими.

На наш взгляд, объяснение этого явления может быть следующим: при внедрении сфероконических ударников около притупления (кавитатора) образуется каверна; однако при небольших размерах кавитатора каверна не успевает достаточно быстро расшириться из-за противодействия основной массы песка; коническая поверхность головной части ударника догоняет стенки каверны и ударяется о них; в этих областях происходит интенсивное разрушение частиц песка и образование корки из них; далее происходит течение песка по конической поверхности головной части; при отрыве потока у основания конической поверхности ударника происходит образование другой каверны. Это хорошо видно на рисунке 1, который содержит начальные кадры кинограммы проникания при скорости внедрения 438 м/с. Интервал между кадрами составляет 22,5 мкс. Сначала после внедрения полусферического кавитатора образуется небольшой вал из выбрасываемого грунта, а затем через 35–40 мкс после начала соударения при внедрении примерно на 15 мм происходит столкновение конической поверхности головной части с этим валом, и от конической поверхности песок начинает разлетаться под небольшим (порядка 20°) углом.

Поскольку в проведенных опытах ударник практически не деформировался, то в расчетах его жесткостные характеристики намеренно завышались до значений, при которых отсутствовали потери в величине выбираемого для интегрирования временного шага. Цилиндрическая часть ударника не принималась во внимание, а плотность его материала назначалась исходя из заданной массы ударника. Таким образом, в решаемой задаче расчетная область состояла из следующих подобластей: головной части ударника, песчаной мишени и контейнера. Каждая из частей покрывалась не зависимой друг от друга невырожденной сеткой из топологических четырехугольных ячеек. Сила сопротивления прониканию подсчитывалась путем интегрирования контактных усилий на поверхности «головная часть ударника–мишень». При этом

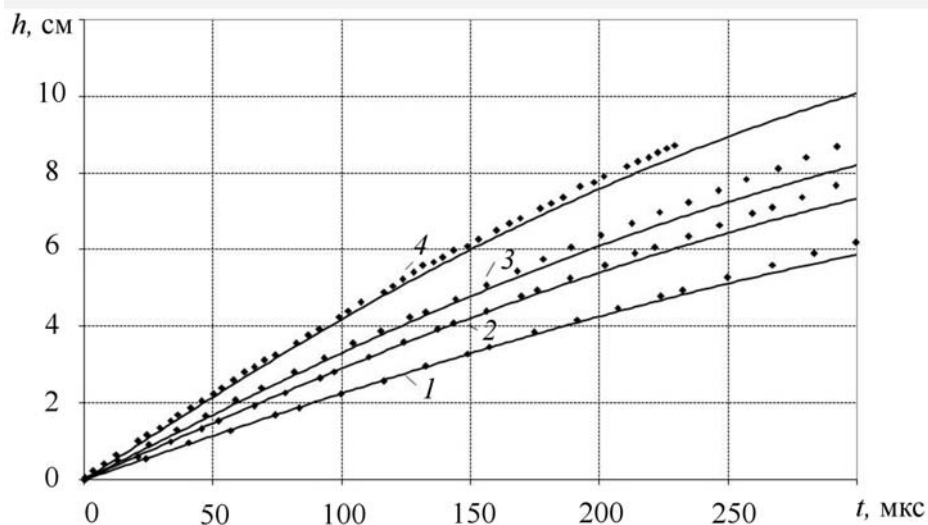


Рис. 2. Зависимости глубины проникания от времени в прямых экспериментах (сплошные линии) и расчетах (♦) при различных скоростях соударения (м/с): 232 (кривая 1), 300 (2), 343 (3), 438 (4)

подобласть песка покрывалась сеткой из 60×240 ячеек, контейнер — сеткой из 300 ячеек, сфероконический оголовок — сеткой из 2352 ячеек. Константы уравнения состояния песка (3) были следующими: $A = 387,3$ м/с; $B = 1,94$; коэффициент кулоновского трения 0,3.

Исследовались такие параметры ударного взаимодействия, как глубины проникания, силы и коэффициенты сопротивления при различных скоростях соударения. Расчеты проведены для скоростей соударения, соответствующих экспериментальным: 232 м/с; 300 м/с; 343 м/с; 438 м/с. На рисунке 2 представлены результаты сравнения зависимости глубин проникания от времени, полученные в расчетах и эксперименте.

На рисунке 3 приведены коэффициенты сопротивления внедрению, полученные в результате расчетов и обработки экспериментов, при различных скоростях соударения. Из рисунка видно также хорошее совпадение результатов численных расчетов и экспериментальных данных.

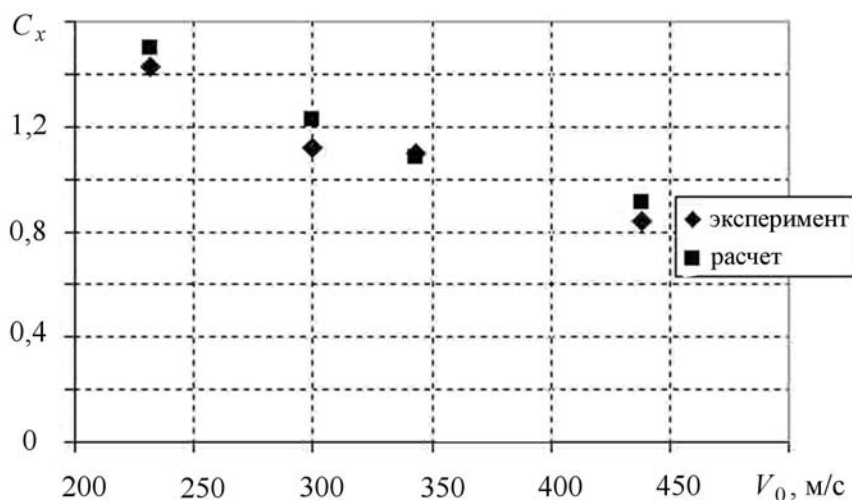


Рис. 3. Зависимость коэффициента сопротивления от скорости проникания

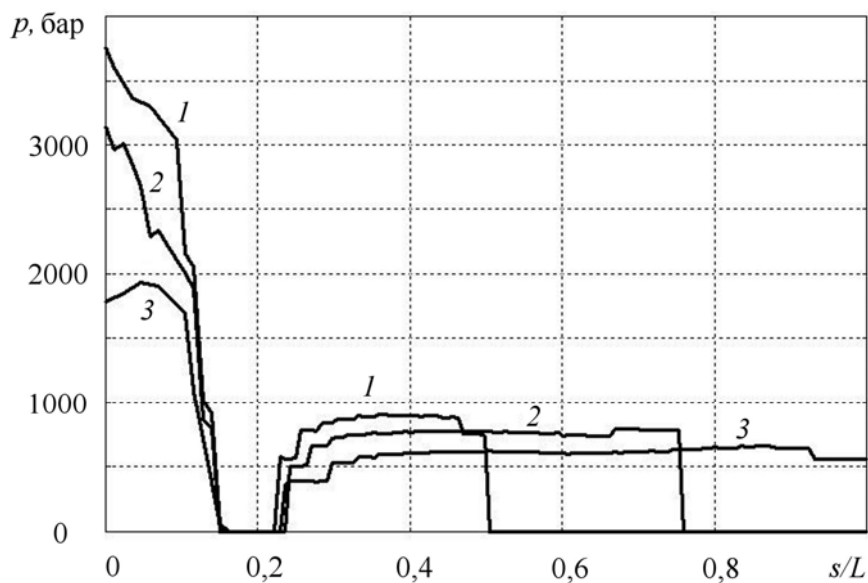


Рис. 4. Распределение контактных давлений вдоль образующей сфероконического ударника

Расчетные распределения контактных давлений вдоль образующей сфероконического ударника от лобовой его точки к периферии в различные моменты времени после удара с начальной скоростью 438 м/с содержит рисунок 4. Здесь L — полная длина образующей, s — текущая длина дуги. Цифрами 1, 2, 3, соответственно, отмечены моменты времени 50, 75 и 150 мкс после удара. Отчетливо прослеживается зона образующейся каверны, которая замыкается на конической части ударника, что в экспериментах подтверждалось образованием корки из прилипших частиц песка.

4. Обращенные эксперименты

Обращенные эксперименты проводились на установке, описанной в [12]; сила сопротивления внедрению измерялась с помощью методики мерного стержня. В проведенной серии экспериментов дюралевые контейнеры заполнялись сухой песчаной смесью того же состава и влажности, что и в прямых экспериментах. Средняя плотность песка составляла 1760 кг/м^3 . Исследование ударного взаимодействия проводилось в диапазоне скоростей от 80 до 370 м/с. Размеры контейнеров составляли: наружный диаметр 56,8 мм; внутренний диаметр 54–54,6 мм; высота засыпки песка колебалась в пределах 55–65 мм. Оголовок был выполнен из стали 45 и имел диаметр основания 19,8 мм, диаметр кавитатора 10 мм, угол полураствора 10° и полностью соответствовал форме головной части ударника, использованного в прямых экспериментах.

После проведения обращенных экспериментов на сфероконических оголовках наблюдались области налипания измельченного песка, аналогичные полученным в прямых экспериментах, что также подтверждает вывод об отрывном характере процесса проникания. Об этом же свидетельствовал и характер изменения силы сопротивления внедрению: на начальном участке внедрения происходило быстрое ее нарастание, связанное с взаимодействием кавитатора с песком; за время от 15 до 50 мкс она достигала максимума (с увеличением скорости интервал времени уменьшался); далее следовал небольшой спад или участок с медленно меняющейся силой; затем, когда коническая поверхность ударника начинала взаимодействовать с песком, вылетающим из каверны, сила снова росла, причем характер нарастания был близок к параболическому; максимум силы сопротивления внедрению с 1,5 кН при скорости

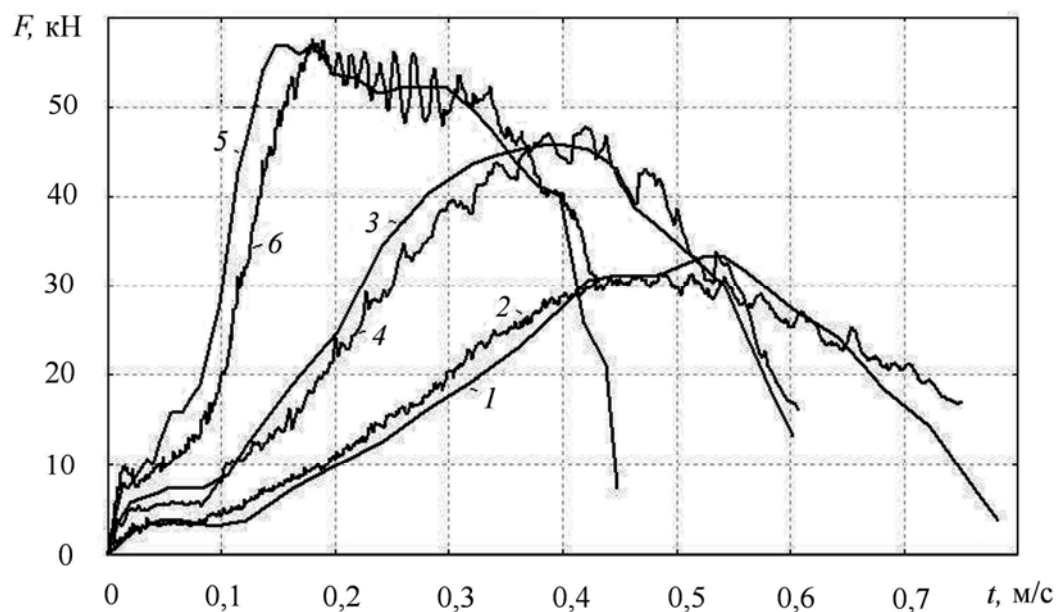


Рис. 5. Сила сопротивления при скоростях соударения (м/с): 103, 160 и 250 (кривые 1, 3, 5 – обращенный эксперимент; 2, 4, 6 – расчет).

92 м/с увеличивался до 18 кН при скорости 338 м/с. В то же время максимум силы взаимодействия сфероконического оголовка с преградой в этом диапазоне скоростей изменялся от 0 до 55 кН. Причем основной рост происходил в диапазоне скоростей от 92 до 180 м/с. При больших скоростях сила практически не увеличивалась, что, возможно, связано с влиянием стенок контейнера. Вероятнее всего, с ростом скорости удара происходило нарастание упругопластических деформаций контейнера (вплоть до его разрушения), которое приводило к снижению влияния стенок контейнера на силу сопротивления внедрению.

При численном решении подобласть песка покрывалась сеткой из 30×60 ячеек, контейнер — сеткой из примерно 300 ячеек, сфероконический оголовок — сеткой из 2352 ячеек. Мерный стержень не рассчитывался, а сила сопротивления определялась путем интегрирования избыточного давления вдоль переменной поверхности контакта оголовка с песком с учетом кулоновского трения.

На рисунке 5 приведены значения силы сопротивления внедрению, полученные экспериментально и рассчитанные численно для скоростей соударения 103, 160 и 250 м/с соответственно. Графики свидетельствуют о вполне удовлетворительном совпадении расчетных и экспериментальных данных.

Таким образом, представленные результаты свидетельствуют, что реализованная в расчетах модель грунтовой среды с достаточно простым уравнением состояния позволяет вполне удовлетворительно описывать лабораторные эксперименты по соударению сфероконических ударников с преградами из песка. Проведенный в работе совместный численный и экспериментальный анализ процесса проникания деформируемых ударников в грунтовую среду дает возможность более детально исследовать эти процессы.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 10-08-00376_a, 09-08-00711_a, 09-08-00228_a).

Литература

1. Сагомонян А.Я. Проникание. – М.: Изд-во МГУ, 1974. – 300 с.
2. Сагомонян А.Я. Удар и проникание тел в жидкость. – М.: Изд-во МГУ, 1986. – 172 с.
3. Григорян С.С. Приближенное решение задачи о проникании тела в грунт // Механика жидкости и газа. – 1993. – № 4. – С. 18-24.
4. Баженов В.Г., Зефирова С.В., Кочетков А.В., Крылов С.В., Фельдгун В.Р. Пакет программ «Динамика-2» для решения плоских и осесимметричных задач нестационарного взаимодействия конструкций со сжимаемыми средами // Мат. моделирование. – 2000. – Т. 12, № 6. – С. 67-72.
5. Аллен У., Мэйфилд Э., Моррисон Г. Динамика проникания снаряда в песок // Механика. Сб. переводов. – М.: ИЛ, 1957. – № 6. – С. 125-137.
6. Бивин Ю.К., Викторова В.В., Степанов Л.П. Исследования движения твердого тела в глинистой среде // Изв. АН СССР. МТТ. – 1978. – № 2. – С. 159-165.
7. Бердникова В.А., Каминский М.В., Киселев Ю.Г., Копытов Г.Ф., Могилев В.А., Травов Ю.Ф., Файков Ю.И., Фатеев Ю.А. Экспериментальное исследование движения конусов и цилиндра в песчаной среде // Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения: Сб. докл. II науч. конф. Волжского регион. центра РАН. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2003. – С. 276-279.
8. Forrestal M.J., Lee L.M., Jenrette B.D., Setchell R.E. Gas-gun experiments determine forces on penetrators into geological targets // J. Appl. Mech. – 1984. – V. 51, № 3. – P. 602-607.
9. Forrestal M.J., Lee L.M., Jenrette B.D. Laboratory-scale penetration experiments into geological targets to impact velocities of 2.1 km/s // J. Appl. Mech. – 1986. – V. 53, № 2. – P. 317-320.
10. Frew D.J., Forrestal M.J., Cargile J.D. The effect of concrete target diameter on projectile deceleration and penetration depth // Int. J. of Impact Eng. – 2006. – V. 32. – P. 1584-1594.
11. Forrestal M.J., Frew D.J., Hickerson J.P., Rohwer T.A. Penetration of concrete targets with deceleration-time measurements // Int. J. of Impact Eng. – 2003. – V. 28. – P. 479-497.
12. Баженов В.Г., Баландин В.В., Брагов А.М., Бухарев Ю.Н., Гандурин В.П., Котов В.Л., Крылов С.В., Ломунов А.К. Экспериментально-теоретическое исследование процессов взаимодействия ударников различной формы с преградой из песка // Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения: Сб. докл. II науч. конф. Волжского регион. центра РАН. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2003. – С. 334-339.
13. Баженов В.Г., Брагов А.М., Котов В.Л., Кочетков А.В. Исследование удара и проникания тел вращения в мягкий грунт // ПММ. – 2003. – Т. 67, вып. 4. – С. 686-697.
14. Лагунов В.А., Степанов В.А. Измерение динамической сжимаемости песка при высоких давлениях // ПМТФ. – 1963. – Т. 88, № 1. – С. 88-96.
15. Брагов А.М., Грушевский Г.М. Влияние влажности и гранулометрического состава на ударную сжимаемость песка // Письма в ЖТФ. – 1993. – Т. 19, вып. 12. – С. 70-72.
16. Bragov A.M., Lomunov A.K., Sergeichev I.V., Tsembelis K., Proud W.G. Determination of physicomaterial properties of soft soils from medium to high strain rates // Int. J. of Impact Eng. – 2008. – V. 35, № 9. – P.967-976.
17. Численное решение многомерных задач газовой динамики / Под ред. С.К. Годунова. – М.: Наука, 1976. – 400 с.
18. Абузьяров М.Х., Баженов В.Г., Котов В.Л. и др. Метод распада разрывов в динамике упругопластических сред // ЖВМиМФ. – 2000. – Т. 40, № 6. – С. 940-953.
19. Баландин В.В., Брагов А.М. Лабораторная установка для изучения процессов соударения // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Численное моделирование физико-механических процессов: Всесоюз. межвуз. сб. / Горьк. ун-т. – 1990. – С. 112-115.

Поступила в редакцию 02.11.09

Сведения об авторах

Баландин Владимир Васильевич, кфмн, внс, Научно-исследовательский институт механики Нижегородского государственного университета им. Н.И.Лобачевского» (НИИ механики ННГУ), Россия, 603950, Н.Новгород, ГСП-1000, пр. Гагарина, 23, корп. 6; E-mail: balandin@mech.unn.ru

Брагов Анатолий Михайлович, дтн, зав.лаб., НИИ механики ННГУ; E-mail: bragov@mech.unn.ru

Крылов Сергей Валерьевич, кфмн, внс, НИИ механики ННГУ; E-mail: krylov@dk.mech.unn.ru

Цветкова Елена Валерьевна, кфмн, снс, НИИ механики ННГУ; E-mail: tsvetkova@dk.mech.unn.ru