

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОНИКАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО УДАРНИКА В ГРУНТОВЫЙ МАССИВ

***В. В. Бойко, докт. техн. наук, Н. С. Ремез, докт. техн. наук, Д. А. Ремез, инж.
(ИГМ НАН Украины)***

Запропонована математична модель проникнення ударника в ґрунтова середовище, яка дозволяє описувати напружено-деформований стан ґрунту навколо нього. Наведено результати чисельних розрахунків динамічної взаємодії циліндричного ударника з ґрунтовим масивом.

Задачи по исследованию особенностей взаимодействия проникающего ударника и природной среды часто возникают на практике: при добыче полезных ископаемых ударным бурением горной породы долотами различных разновидностей; в инженерном и гражданском строительстве при забивании свай, при создании оснований фундаментов сооружений; при возведении новых автомагистралей на месте старых, разрушаемых падающими ударниками и т.п.

Этой теме посвящены многочисленные исследования [1–5], где принимаются различные упрощающие процесс гипотезы о взаимодействующих объектах.

В статье ударник моделируется бесконечно длинным цилиндрическим поршнем, который расширяется с постоянной скоростью w_p в безграничной ґрунтовой среде и совершает поступательное движение также с постоянной скоростью u_p вдоль своей оси. Головная часть ударника рассматривается конической. Скорость u_p полагается равной скорости проникания, а в зависимости от угла полураствора β головной части ударника радиальная скорость расширения поршня определяется как $w_p = u_p \operatorname{tg} \beta$.

Ударник при проникании в ґрунт рассматривается как абсолютно жесткое тело [6]. При этом принимается гипотеза «плоских сечений» и «нормальных траекторий» [7], согласно которым движение частиц ґрунта происходит прямолинейно в направлениях перпендикулярном и нормальном к поверхности головной части ударника. При таком подходе параметры движения ґрунта зависят только от радиальной координаты. За счет контакта частиц ґрунта с движущимся поршнем вектор скорости состоит из двух компонент – радиальной w и осевой u . Напряженное состояние среды характеризуется тензором напряжений с тремя нормальными составляющими (σ_{rr} , σ_{zz} , $\sigma_{\theta\theta}$) и одним касательным напряжением τ_{rz} (рис. 1).

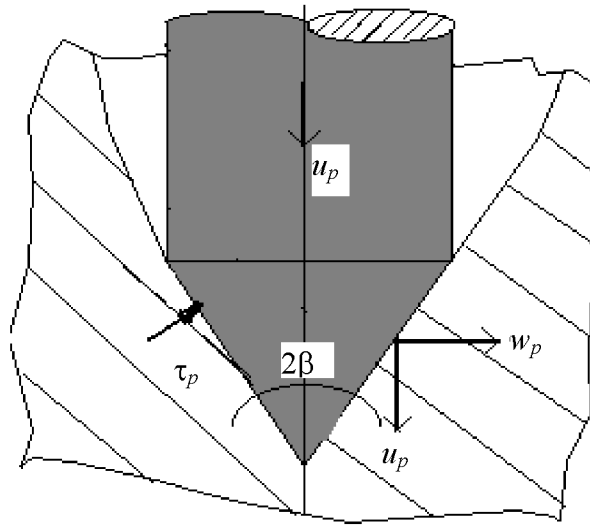


Рис. 1. Схема проникновения недеформируемого ударника в грунтовой массив

Движение грунта в цилиндрической системе координат r, z описывается в радиальном и осевом направлениях законами сохранения импульса и уравнениями неразрывности:

$$\frac{\partial \tau_{zr}}{\partial r} + \frac{\tau_{zr}}{r} = \rho \frac{du}{dt}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}}{r} = \rho \frac{dw}{dt}; \quad (2)$$

$$\frac{1}{V} \frac{dV}{dt} = \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{w}{r}, \quad (3)$$

где $V = \frac{\rho_0}{\rho}$ – относительный удельный объем; ρ_0, ρ – начальная и текущая плотность среды.

Динамическое поведение грунта описывается в рамках модели твердой пористой многокомпонентной вязкопластической среды с переменным коэффициентом объемной вязкости $\eta(\varepsilon)$ [8]. Уравнение сжатия среды имеет одинаковый вид для нагрузки и разгрузки

$$\dot{\varepsilon} = j(P, \varepsilon) \dot{P} - \frac{\alpha_1 \lambda(P, \varepsilon)}{\eta(P, \varepsilon)} \psi(P, \varepsilon) \cdot \eta(\varepsilon), \quad (4)$$

но функции, входящие в него, различны для этих двух режимов деформирования. Для нагрузки:

$$j(p, \varepsilon) = \alpha_1 \left(\frac{df_D}{d\varepsilon_1} \right)^{-1} - \sum_{i=2}^3 \alpha_i B_i [A_i (P - P_0) + 1]^{-k_i - 1};$$

$$\lambda(p, \varepsilon) = 1 - \left(\frac{df_D}{d\varepsilon_1} \right)^{-1} \frac{df_S}{d\varepsilon_1};$$

$$\begin{aligned}\psi(p, \varepsilon) &= P - P_0 - f_s(\varepsilon_1); \\ f_s(\varepsilon_1) &= A_S^{-1} [(\varepsilon_1 + 1)^{-\gamma_s} - 1], \quad f_D(\varepsilon_1) = f_s(\varepsilon_1) + k\varepsilon_1, \quad \kappa < 0; \\ \varepsilon_1 &= \frac{1}{\alpha_1} \left(\varepsilon - \sum_{i=2}^3 \alpha_i \varepsilon_i \right) = \frac{1}{\alpha_1} \left\{ \varepsilon + 1 - \sum_{i=2}^3 \alpha_i [A_i(P - P_0) + 1]^{-k_i} \right\} - 1; \\ A_i &= \frac{\gamma_i}{\rho_{i0} c_{i0}^2}, \quad B_i = \frac{1}{\rho_{i0} c_{i0}^2}, \quad k_i = \frac{1}{\gamma_i}, \quad i = 2, 3, \quad A_S = \frac{\gamma_S}{\rho_0 c_S^2},\end{aligned}\tag{5}$$

где P – среднее гидростатическое давление; $\varepsilon, \varepsilon_i$ – объемная деформация среды и компонентов ($i = 1$ – поровое пространство, $i = 2$ – жидкий компонент, $i = 3$ – твердый компонент); α_i – содержание компонентов в единице объема грунта; ρ_{i0}, c_{i0} – плотность компонентов и скорость звука в них при атмосферном давлении P_0 ; γ_i – показатели степени в уравнениях сжимаемости для компонентов типа Тета; ρ_0 – начальная плотность грунта; c_S, γ_S – скорость звука и показатель степени при статическом нагружении; точка над величинами обозначает операцию дифференцирования.

Для разгрузки имеем:

$$\begin{aligned}\varphi(P, \varepsilon) &= \alpha_1 \left[\frac{df_D}{d\varepsilon_1} - \frac{df_S}{d\varepsilon_1} + \frac{df_{SR}}{d\varepsilon_1} \right]^{-1} - \sum_{i=2}^3 \alpha_i B_i [A_i(P - P_0) + 1]^{-k_i - 1}; \\ \lambda_1(P, \varepsilon) &= \left(\frac{df_D}{d\varepsilon_1} - \frac{df_S}{d\varepsilon_1} \right) \left(\frac{df_D}{d\varepsilon_1} - \frac{df_S}{d\varepsilon_1} + \frac{df_{SR}}{d\varepsilon_1} \right)^{-1}, \quad \psi(p, \varepsilon) = P - P_0 - f_{SR}(\varepsilon_1); \\ f_s(\varepsilon_1) &= A_S^{-1} [(\varepsilon_1 + 1)^{-\gamma_s} - 1], \quad f_D(\varepsilon_1) = f_s(\varepsilon_1) + k\varepsilon_1, \quad k < 0; \\ f_{SR}(\varepsilon_1) &= A_{SR}^{-1} \left\{ \varepsilon_1 + 1 + [A_{SR}(P_m - P_0) + 1]^{-1/\gamma_{SR}} - [A_S(P_m - P_0) + 1]^{-1/\gamma_S} \right\}^{-\gamma_{SR}} - 1; \\ P_m - P_0 &= A_S^{-1} [(\varepsilon_{1m} + 1)^{-\gamma_s} - 1], \quad k_i = \frac{1}{\gamma_i}, \quad i = 2, 3; \\ A_S &= \frac{\gamma_S}{\rho_0 c_S^2}, \quad A_{SR} = \frac{\gamma_{SR}}{\rho_0 c_{SR}^2}.\end{aligned}\tag{6}$$

где c_{SR} – скорость звука при разгрузке среды; γ_{SR} – показатель степени в уравнении объемного сжатия при разгрузке среды; P_m – давление при достижении объемной деформацией порового пространства максимального значения ε_{1m} .

Коэффициент объемной вязкости согласно [9] имеет вид

$$\eta(P, \varepsilon) = \eta_D \left\{ \frac{P - P_0 - \frac{\rho_0 c_S^2}{\gamma_S} \left[\gamma_S \varepsilon_1 - 1 + (\varepsilon_1 + 1)^{-\gamma_S} \right]}{\varepsilon_1 (k - \rho_0 c_S^2)} \right\}^{-m}. \quad (7)$$

Условием пластичности грунта является условие Мизеса–Боткина [10]:

$$S_{rr} = - \left(y_0 + \frac{k_t P}{1 + \frac{k_t P}{\tau - y_0}} \right), \quad S_{\theta\theta} = -\frac{1}{2} S_{rr}, \quad S_{zz} = \frac{2(1 + k_t)}{1 + 2k_t} P, \quad (8)$$

где $S_{rr}, S_{zz}, S_{\theta\theta}$ – нормальные компоненты девиатора тензора напряжений; y_0 – сцепление грунта; k_t – коэффициент внутреннего трения; τ – сдвиговая прочность грунта.

Начальные условия нулевые, то есть среда в начальный момент времени находится в состоянии покоя.

Граничные условия задачи задаются на контактной границе поршня $r = R$ (R – радиус поршня) с грунтом в следующем виде:

1) радиальная составляющая скорости частиц равна скорости расширения поршня

$$w(R, t) = w_p; \quad (9)$$

2) касательное напряжение частиц грунта равно контактному напряжению на границе поршня

$$\tau_{rz} = \tau_p. \quad (10)$$

Интегрирование исходных дифференциальных уравнений проводилось численно методом конечных разностей с использованием схемы типа «крест» [10].

В расчетах рассматривался лессовидный суглинок с различным содержанием компонентов. Физико-механические характеристики грунта следующие [11]: $\rho_{20} = 1000$ кг/м³; $\rho_{30} = 2650$ кг/м³; $c_{20} = 1500$ м/с; $c_{30} = 4500$ м/с; $\gamma_2 = 7$; $\gamma_3 = 4$; $\rho_0 c_S^2 = 3 \cdot 10^7$ Па; $\rho_0 c_D^2 = 3,67 \cdot 10^7$ Па; $\rho_0 c_{SR}^2 = 3 \cdot 10^7$ Па; $m=3$; $k = -1,2 \cdot 10^7$ Па; $\gamma_S = 4$; $\gamma_D = 6$; $\gamma_{SR} = 8$; $\eta_D = 2000$ Па·с; $\alpha_1 = 0,1..0,4$; $\alpha_2 = 1 - (\alpha_1 + \alpha_2)$; $\alpha_3 = 0,6$; $y_0 = 0,9 \cdot 10^6$ Па; $\tau = 5 \cdot 10^6$ Па; $\tau_p = 12 \cdot 10^6$ Па.

Скорость осевого движения поршня полагалась равной 500 м/с, $2\beta = 60^\circ$.

При проникании поршня в грунт по последнему начинает распространяться ударная волна. На рис. 2 показаны зависимости радиальных напряжений грунта от относительного расстояния при различных текущих радиусах поршня R/R_0 : 1, 1' – $R/R_0 = 2,5$; 2, 2' – $R/R_0 = 4,5$; 3, 3' – $R/R_0 = 9,5$; 4, 4' – $R/R_0 = 14,5$. Сплошные линии соответствуют грунту с $\alpha_1 = 0,1$, штриховые – $\alpha_1 = 0,3$, черные точки – поверхности поршня. Из рис. 2 следует, что для одних и тех же текущих радиусов поршня большие значения радиальных

напряжений достигаются в грунте с меньшим содержанием порового пространства, то есть с большей плотностью. Это объясняется тем, что в такой среде диссипативные потери, связанные с динамической вязкостью, меньше, чем в более пористой среде. На поверхности поршня максимальные нормальные напряжения возникают в начальный момент времени при ударе его о грунт и генерации ударной волны. Далее величина σ_{rr} резко падает и начиная с $2,5 R_0$ остается практически неизменной, не зависящей от радиуса расширения поршня. Этот результат особо интересен для практики, так как из него следует, что наибольшие напряжения в массиве грунта возникают в небольшой окрестности головной части ударника и значительно превышают напряжения на других участках его поверхности. Качественно этот результат согласуется с исследованиями, приведенными в [12]. Однако количественные характеристики и характер распределения нормальных напряжений в грунтовом массиве различны. Это объясняется использованием различных моделей для описания динамического поведения грунтов. В нашем случае достигаются меньшие значения σ_{rr} , что является следствием проявления вязкопластических свойств грунта и влечет за собой увеличение диссипативных потерь при распространении волны.

Представляет интерес вопрос влияния компонентного состава грунта на его деформирование при проникновении ударника. На рис. 3 представлена зависимость максимальных объемных деформаций от относительного расстояния для лессовидного суглинка с различным содержанием порового пространства α_1 . Кривая 1 соответствует $\alpha_1 = 0,1$, кривая 2 – $\alpha_1 = 0,3$.

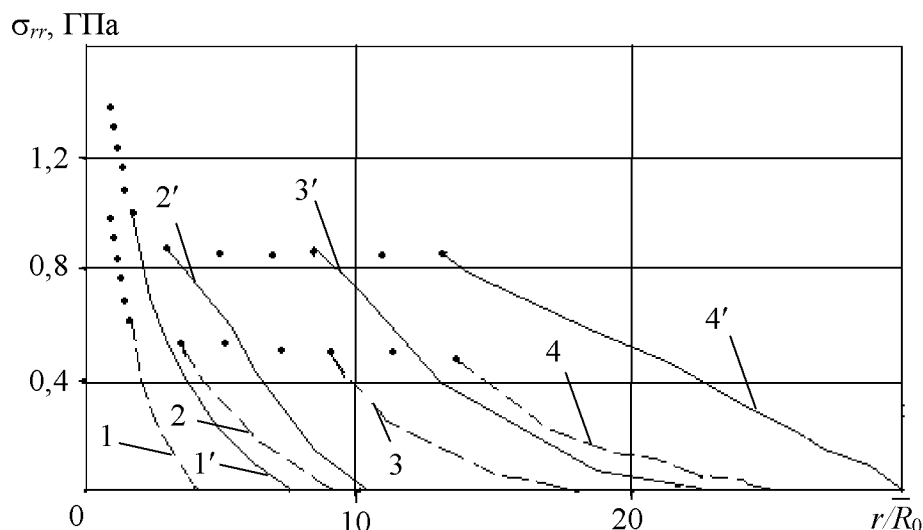


Рис. 2. Зависимость радиальных напряжений грунта от относительного расстояния при различных радиусах поршня: 1, 1' – $R/R_0 = 2,5$; 2, 2' – $R/R_0 = 4,5$; 3, 3' – $R/R_0 = 9,5$; 4, 4' – $R/R_0 = 14,5$. Сплошные линии соответствуют грунту с $\alpha_1 = 0,1$; штриховые – $\alpha_1 = 0,3$; черные точки обозначают поверхность поршня

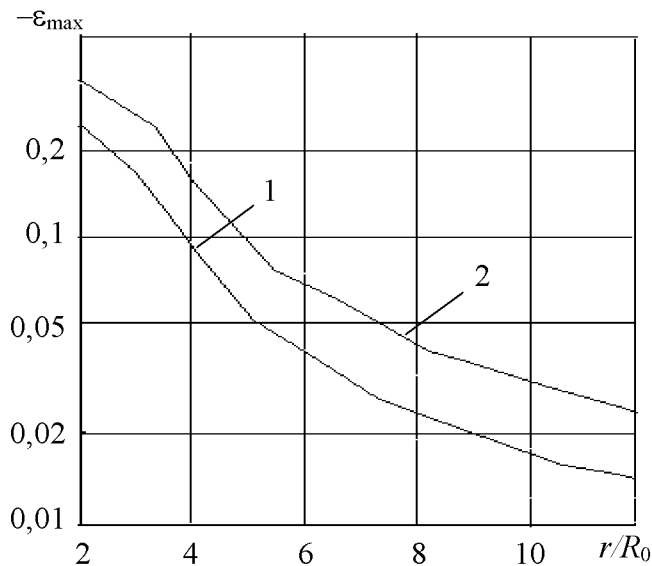


Рис. 3. Зависимость максимальных объемных деформаций от относительного расстояния для лессовидного суглинка с различным содержанием α_1 : 1 – $\alpha_1 = 0,1$; 2 – $\alpha_1 = 0,3$

Из рисунка следует, что на всех относительных расстояниях большие значения объемной деформации достигаются в грунте с большей свободной пористостью, то есть с меньшей плотностью, хотя максимальные напряжения в такой среде ниже. Это объясняется тем, что более пористая среда обладает большей сжимаемостью даже при меньшем уровне нагрузки. Следует отметить, что для рассмотренных грунтов характерно резкое падение величины объемной деформации с удалением от поршня. Такое распределение деформаций соответствует характеру распределения напряжений. Однако радиус наибольших деформаций увеличивается по отношению к радиусу наибольших напряжений, что объясняется наличием вязких свойств грунта, которые приводят к увеличению времени достижения максимума деформаций по отношению к максимуму напряжений.

Из анализа проведенных исследований вытекает, что предложенная модель проникновения ударника в грунтовый массив позволяет приблизительно описывать напряженно-деформированное состояние грунта вокруг ударника при различных физико-механических свойствах пород и геометрических параметрах объектов. Результаты данной работы могут быть использованы для расчетов параметров волн напряжения вблизи ведения специальных работ с использованием ударных инструментов.

1. Штаерман И. Я. Контактная задача теории упругости. – М.: Наука, 1949. – 270 с.

2. Остроушко И. А. Разрушение горных пород при бурении. – М.: Наука, 1952. – 213 с.

3. Александров Е. В., Соколинский В. Б. Прикладная теория соударения стержней с торцами произвольной формы. – М.: Изд-во ИГД им. А. А. Скочинского, 1964. – 32 с.

4. Александров Е. В., Соколинский В. Б. Исследование процесса ударного взаимодействия горной породы и инструмента. – М.: Изд-во ИГД им. А. А. Скочинского, 1965. – 87 с.
5. Александров Е. В., Соколинский В. Б. Прикладная теория и расчеты ударных систем. – М.: Наука, 1969. – 200 с.
6. Allen W. A., Mayfield E. B., Morrison H. L. Dynamics of projectile penetrating sand // J. Appl. Phys., 1957. – V. 28. – № 3. – P. 370–376.
7. Сагомоян А. Я. Проникание. – М.: МГУ, 1974.
8. Ляхов Г. М. Волны в пористых многокомпонентных средах. – М.: Наука, 1982. – 234 с.
9. Ремез Н. С. Особливості деформування твердого багатоконпонентного в'язкопластичного середовища зі змінним коефіцієнтом в'язкості при динамічних навантаженнях // Вісник НТУУ України „Київський політехнічний інститут”. Серія „Гірництво”: Зб. наук. праць. – К., 2000. – Вип. 3. – С. 34–39.
10. Уилкинс М. Л. Расчет упругопластических течений // Вычислительные методы в гидромеханике. – М.: Мир, 1967. – С. 212–263.
11. Лучко И. А., Плаксий В. А., Ремез Н. С. и др. Механический эффект взрыва в грунтах. – К.: Наук. думка, 1989. – 232 с.
12. Велданов В. А., Федоров С. В. Особенности поведения грунта на границе контакта с недеформируемым ударником при проникании // Прикл. механика и техн. физика. – 2005. – Т. 46. – № 6. – С. 116–127.