ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՀ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ
ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР
Մեխանիկա XXXIX, № 1, 1986 Механика

УДК 539.374

ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ПРОНИКАНИЯ В ГРУНТ

КИРИЛЕНКО Г. А., САГОМОНЯН А. Я.

Проникание заостренных тел вращения по нормали к поверхности сухого слабосвязного грунта рассмотрено в работах [1], [2].

В работе [3] численные расчеты в задаче проникания использовались для проверки точности приближенной теории расширения цилиндрической полости в туфе. Одно- и двумерные расчеты проведены как для гидродинамической модели грунта, так и с учетом его прочности.

Известно, что многие грунты при нагружении деформируются необратимым образом [2]. При этом в слабосвязных грунтах при достаточно больших нагрузках можно пренебречь влиянием касательных составляющих напряжений на процесс деформирования по сравнению с влиянием среднего давления.

Предположим, что в условиях высокоскоростного проникания вблизи поверхности тела применима модель идеальной пластически сжимаемой среды.

Динамическая система уравнений для описания поступательного движения жесткого тела и вызванного им движения грунта в указанных предположениях имеет вид

$$\rho \frac{d\vec{V}}{dt} = -\operatorname{grad} P, \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \rho \vec{V} = 0$$

$$m_т \frac{dV_т}{dt} = -\int\limits_{s_k(t)} P n_x \, ds$$

$$P = \begin{cases} f_н(\rho), & \dfrac{d\rho}{dt} > 0, \quad \rho^* = \rho \\ f_р(\rho, \rho^*), & \dfrac{d\rho}{dt} < 0, \quad \dfrac{d\rho^*}{dt} = 0 \\ f_р(\rho, \rho^*), & \dfrac{d\rho}{dt} > 0, \quad \rho < \rho^* \\ & \dfrac{d\rho^*}{dt} = 0 \end{cases}$$

где $\rho=\rho(t, x)$, $V=V(t, x)$, $P=P(t, x)$, $\rho^*=\rho^*(t, x)$; ρ^*—максимальная плотность частицы среды, полученная ею в процессе предшествующего нагружения и сохраняющаяся в дальнейшем при разгрузке и повторной нагрузке до ρ^*; $f_н$—функция нагружения; $f_р$—функция разгрузки; $m_т$—масса тела; $V_т$—скорость движения тела; $S_к(t)$—поверхность контакта среды и тела; n_z—осевая компонента внешней к поверхности $S_к$ нормали.

На свободной поверхности, совпадающей в начальный момент с границей нижнего полупространства, занятого грунтом, имеем

$$P_{св}(t, z, r)=0$$

На оси симметрии выполнено

$$V_r(t, z, 0)=0$$

На поверхности тела

$$V_т n_z = v_r n_r + v_z n_z$$

где (v_r, v_z)—компоненты скорости среды.

Рассмотрим для определенности нормальное проникание конуса конечного раствора: $r = z\,\mathrm{tg}\,\frac{\gamma}{2}$, $z \leqslant h_{кон}$, $z \geqslant 0$, $t=0$, где γ — угол раствора конуса, $h_{кон}$—высота конуса.

В начальный момент времени известна скорость $V_т(0)$ подхода тела к поверхности грунта. Грунт однороден: ρ_0=const. Нет остаточных деформаций: $\rho^*|_{t=0}=\rho_0$. Всюду $P=0$ и $\vec{V}=0$. Для решения задачи от системы уравнений, приведенной выше, перейдем к интегральным соотношениям, записанным с помощью обобщенной эйлеровой формулировки законов сохранения. Это дает возможность пользоваться комбинированными лагранжево-эйлеровыми подвижными сетками.

Для расчета значений параметров на промежуточном слое явной разностной схемы используется алгоритм решения задачи о распаде произвольного разрыва в идеальной пластически сжимаемой среде на границе между двумя соседними ячейками в предположении локальной автомодельности.

Решение получено для конуса с параметрами [2]:

$$\gamma=\pi/3,\ m_т=10\ кг,\ h_{кон}=0{,}13\ м,\ V_т(0)=-600\ м/с$$

Параметры грунта (суглинок воздушной влажности):

$$f_н(\varepsilon)=\frac{\alpha\varepsilon}{\beta-\varepsilon},\quad \varepsilon=1-\rho_0/\rho$$

$$f_р(\varepsilon,\varepsilon^*)=P^*[(\varepsilon-\varepsilon_0)/(\varepsilon^*-\varepsilon_0)]^m$$

$$\alpha=10^8\ н/м^2,\quad \beta=0{,}5;\quad \rho_0=1529\ кг/м^3$$

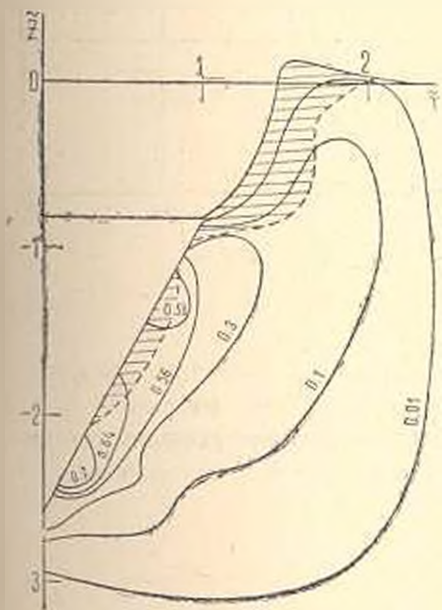
где $\varepsilon_0=q\varepsilon^*$—остаточная деформация; $q=0{,}6$; $\varepsilon^*=1-\rho_0/\rho^*$—максимальная деформация; $m=5$

$$P^*=\frac{\alpha\varepsilon^*}{\beta-\varepsilon^*}$$

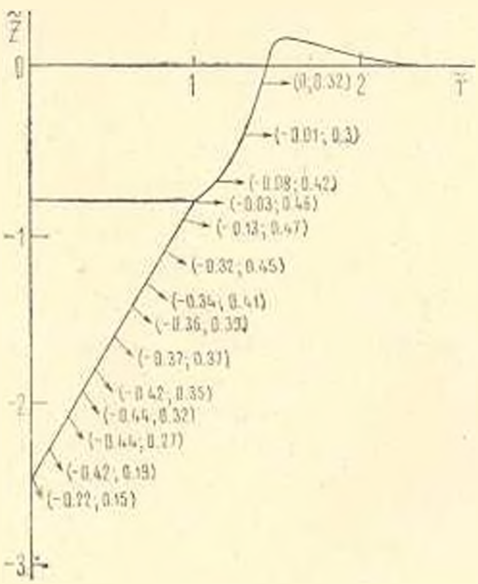
На фиг. 1 приведено поле давлений и вид свободной поверхности для момента времени $\bar{t}=1{,}53$, когда конус полностью погрузился в грунт. Здесь: $\bar{t}=tC_0/r_{кон}$, $r_{кон}=h_{кон}\operatorname{tg}\gamma/2$, C_0—скорость звука в невозмущенной среде, $\bar{z}=z/r_{кон}$, $\bar{r}=r/r_{кон}$, $\bar{P}=P/(\rho_0 C_0^2)$.

Изобары имеют характерную чечевицеподобную форму. Заштрихована область пластичности. Для нее выполнено: $\rho<\rho^*$. Характерной особенностью решения является наличие на поверхности конуса двух максимумов давления. На наш взгляд, это является результатом специфической формы ударной волны и двумерности течения грунта. Второй максимум давлений вблизи свободной поверхности постепенно исчезает по мере развития волны пластической разгрузки и увеличения глубины проникания.

Вид поля скоростей (фиг. 2) $\bar{V}=v/C_0$ вблизи поверхности тела (цифры в скобках—значения компонент) примерно соответствует гипотезе нормального движения среды [1].



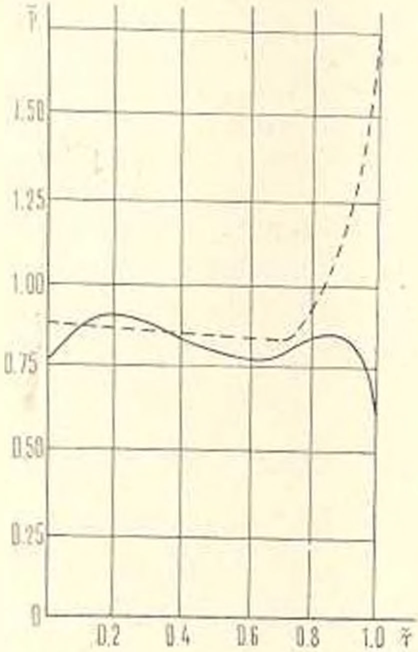
Фиг. 1



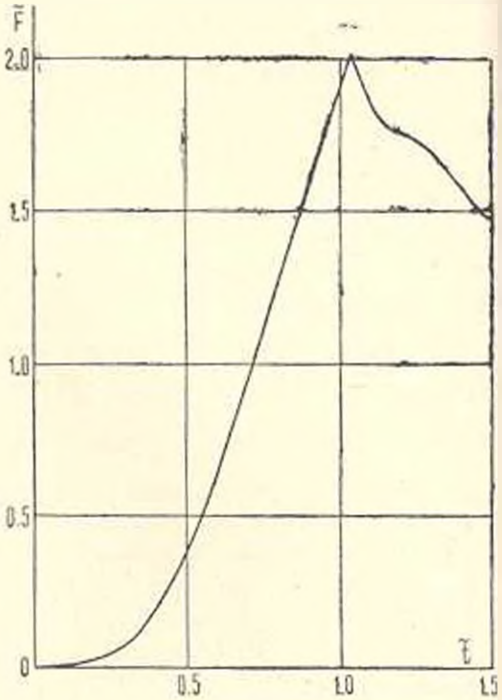
Фиг. 2

На фиг. 3 сплошной линией изображен профиль давления вдоль поверхности конуса в момент времени $\bar{t}=1{,}01$, когда он погружен на глубину $z=-h_{кон}$. Здесь штриховая линия—решение по одномерной теории [1]. Существенное различие решений имеется вблизи свободной поверхности. Однако, его влияние локализовано довольно узкой зоной, что позволяет сделать вывод об обоснованности гипотезы [1].

Зависимость силы сопротивления $\bar{F}=F/(\pi\rho_0 C_0^2 r_{кон}^2)$ от глубины проникания — $\bar{z}$ изображена на фиг. 4. Максимум достигается в момент, когда $\bar{z} = -1{,}73$.



Фиг. 3



Фиг. 4

Следует отметить высокие сглаживающие свойства разностной схемы вследствие использования задачи о распаде разрывов. Это, в сочетании с подвижными перестраиваемыми по ходу решения сетками, позволяет ограничиться предельно малым числом счетных ячеек, что делает метод весьма экономичным.

ԳԵՏՆԱՀՈՂՈՒՄ ՆԵՐԹԱՓԱՆՑՄԱՆ ԹՎԱՅԻՆ ՄՈԴԵԼ

Դ. Ա. ԿԻՐԻԼԵՆԿՈ, Ա. ՅԱ ՍԱԳՈՄՈՆՅԱՆ

Ա մ փ ո փ ու մ

Թվային մեթոդներով լուծված է գերբարձր արագությամբ մարմինների ներթափանցման խնդիրը, բերված են դիմադրության ուժի անցած ժամանակից կախման գրաֆիկները։

THE NUMERICAL MODEL OF PENETRATION INTO THE SOIL

G. A. KIRILENKO, A. Y. SAGOMONIAN

S u m m a r y

The problem of high velocity penetration in an ideal plastic medium is solved by means of numerical methods. The graphs of drag force from dimensionless time are given.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Сагомонян А. Я.* Проникание. М.: изд. МГУ, 1974
2. *Рахматулин Х. А., Сагомонян А. Я., Алексеев Н. А.* Вопросы динамики грунтов. М изд. МГУ, 1964.
3. *Hicks D. H., Norwood F. R., Trucano T. G.* Toody—Wandy calculations of penetration events. „Shock Waves condens. Matter. Con. Meulo Park. Calif., 23—25 June, 1981", New Jork: 1982, p. 544—547.

Механико-математический факультет МГУ
им. М. В. Ломоносова

Поступила в редакцию
28.VI. 1984