

17. Кутателадзе С. С., Накоряков В. Е., Соболев В. В., Шрейбер И. Р. Динамика ударных волн в жидкости, содержащей пузырьки газа. — ПМТФ, 1974, № 5.
18. Николаевский В. Н., Басниев К. С., Горбунов А. Г., Зотов Г. А. Механика насыщенных пористых сред. М., «Недра», 1970.
19. Копытов Г. Ф. Затухание ударных волн в газожидкостной среде. — «Вестн. Ленингр. ун-та», 1968, № 1.
20. Ляхов Г. М. Основы динамики взрывных волн в грунтах и горных породах. М., «Недра», 1974.
21. Кошелев Э. А. О развитии камуфлетной полости при взрыве в мягком грунте. — ПМТФ, 1975, № 2.
22. Хоскин Н. Э. Метод характеристик для решения уравнений одномерного неустановившегося течения. — В кн.: Вычислительные методы в гидродинамике. М., «Мир», 1967.

УДК 624.131 + 539.215

О МЕТОДЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕДЕЛЬНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ДИАГРАММ СЖАТИЯ ДЛЯ ГРУНТОВ И ПОРИСТЫХ СРЕД, ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ К СКОРОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ

А. И. Котов, Г. В. Рыков

(Москва)

Для сред типа грунтов, чувствительных к скорости деформирования, существенным является вопрос об определении предельных динамических диаграмм сжатия, соответствующих мгновенному нагружению ($\epsilon = \infty$) [1, 2]. Такие диаграммы до настоящего времени определялись на фронте ударной волны, распространяющейся в массиве грунта при взрывах зарядов ВВ [3—5] или при ударе по образцу грунта массы, имеющей достаточно большую начальную скорость [6]. При распространении в грунтах непрерывных волн сжатия указанный метод не может быть использован.

Для упругих и упругопластических сред с нелинейными характеристиками для определения динамических диаграмм растяжения использовалась связь диаграмм одноосного сжатия (растяжения) со скоростью распространения слабых возмущений [7, 8].

1. Рассматриваемый метод основан на связи скоростей распространения слабых возмущений в сжатой среде с предельной динамической диаграммой $\varphi(\epsilon)$ ($\epsilon = \infty$) в вязкопластической среде. Предполагается, что основные свойства грунтов и рассматриваемых пористых сред при кратковременных динамических нагрузках с достаточной точностью описываются при одноосном сжатии законом деформирования типа [9, 10]

$$(1.1) \quad \frac{\partial \epsilon}{\partial t} = G(\sigma_1 - f(\epsilon)) + \begin{cases} \frac{1}{E(\epsilon)} \frac{\partial \sigma_1}{\partial t}, & \frac{\partial \sigma_1}{\partial t} \geq 0, \\ \frac{1}{E_*(\epsilon)} \frac{\partial \sigma_1}{\partial t}, & \frac{\partial \sigma_1}{\partial t} < 0, \end{cases}$$

где σ_1 — наибольшее главное напряжение; $E(\epsilon)$ — переменный модуль деформаций при нагружении ($\partial \sigma_1 / \partial t \geq 0$); $E_*(\epsilon)$ — переменный модуль деформаций при разгрузке ($\partial \sigma_1 / \partial t < 0$); $G > 0$ при $\sigma_1 > f(\epsilon)$ и $G \equiv 0$ при $\sigma_1 \leq f(\epsilon)$; $f(\epsilon)$ — статистическая диаграмма сжатия при $\epsilon = 0$.

При $E_*(\epsilon) = E(\epsilon)$ (1.1) совпадает с законом деформирования, рассмотренным в [11, 12]. Применительно к распространению взрывных волн в грунтах аналогичная модель рассматривалась в [13]. Из [9, 13], в частности, следует, что связь скоростей распространения малых возмущений $a(\epsilon)$ и предельной динамической диаграммы $\varphi(\epsilon) (\dot{\epsilon} = \infty)$ определяется соотношением

$$(1.2) \quad E(\epsilon) = d\varphi(\epsilon)/d\epsilon = \rho_0 a^2(\epsilon).$$

Из (1.2), интегрируя, получим предельную динамическую диаграмму

$$(1.3) \quad \varphi(\epsilon) = \int_0^\epsilon E(\xi) d\xi, \quad \dot{\epsilon} = \infty.$$

Для закона деформирования (1.1) соотношение (1.3) будет соответствовать условию нагружения ($\partial\sigma_1/\partial t \geq 0$). Для разгрузки ($\partial\sigma_1/\partial t < 0$) и при $\sigma_1 < f(\epsilon)$ получим аналогично

$$\varphi_*(\epsilon, \epsilon_*) = \sigma_{1*} + \int_{\epsilon_*}^\epsilon E_*(\xi) d\xi,$$

где σ_{1*} , ϵ_* — напряжение и деформация, достигнутые к моменту, когда выполняется условие $\sigma_1 = f(\epsilon)$.

Таким образом, зная из эксперимента зависимость $a(\epsilon)$, можно построить предельную динамическую диаграмму $\varphi(\epsilon) (\dot{\epsilon} = \infty)$ при нагружении, а также диаграмму $\varphi_*(\epsilon, \epsilon_*)$ при $\sigma_1 < f(\epsilon)$.

Необходимо, однако, отметить одно обстоятельство. В [14] было показано, что для закона деформирования типа (1.1) возможна ситуация, когда слабые разрывы не распространяются со скоростью характеристик (случай движения, близкого к автомодельному). В то же время из [14] следует, что всегда можно найти такое конечное расстояние x_* , когда при $x < x_*$ слабые возмущения будут распространяться со скоростью $a(\epsilon)$.

Таким образом, при достаточно малой высоте образца h_0 скорость распространения слабых возмущений всегда будет равна характеристической. Отсюда также следует, что для длинных стержней из материалов, обладающих вязкими свойствами, такой метод может оказаться непригодным [8].

2. Для определения зависимости $a(\epsilon)$ в лабораторных условиях образец материала подвергается статическому нагружению нагрузкой σ_{1i} , изменяемой ступенями ($i = 1, 2, \dots, n$).

При этом определяется статическая деформация ϵ_i и соответствующее ей время $t_i = t(\epsilon_i)$ пробега волной слабого разрыва расстояния, равного высоте образца после предыдущего нагружения $h_i = h(\epsilon_{i-1})$. При достаточно малой высоте образца скорость распространения волны слабого разрыва определяется как средняя

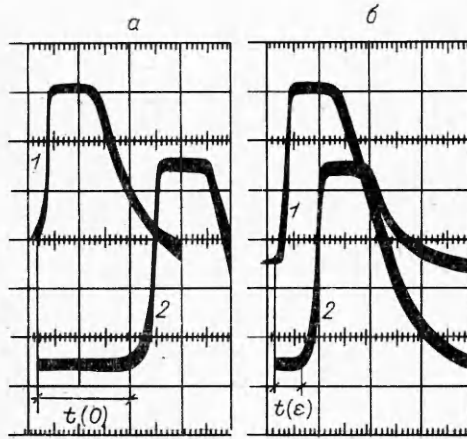
$$a(\epsilon_i) = h_i/t_i, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

Приводятся результаты исследований предельных динамических диаграмм сжатия песчаного грунта с объемным весом скелета $\gamma_0 = 1,50$ г/см³, влажностью $w = 0,003$ и пенопласта типа ПХВ с объемным весом $\gamma_0 = 0,07$ г/см³, проводившихся в установке, описанной ранее в [2].

Для измерения времени пробега $t(\epsilon_i)$ в установку внесены некоторые изменения. В частности, вместо поршневого и донного (центрального) тензодатчиков установлены пьезодатчики на базе керамики ЦТС-19, сигналы которых регистрировались на электронном осциллографе С1-33. При этом поршневой датчик выполнен в виде подвижного блока, который имел возможность смещаться при ударе по нему, генерируя волну слабого

разрыва в образце. Это слабое возмущение создавалось для каждого из значений ε за счет удара по блоку с датчиком падающего шарика весом 100 г. Вес подвижного блока с датчиком также составлял 100 г. Высота сброса шарика 1—2 см.

На фиг. 1, а, б представлены осциллограммы сигналов, характеризующих возмущение в образце песчаного грунта, регистрируемое поршневым



Ф и г. 1

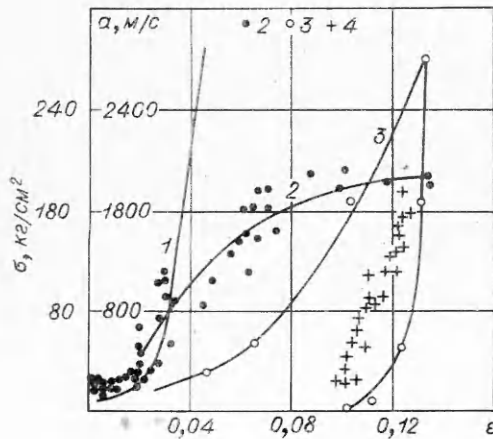
и донным 2 датчиками. Здесь цена деления на осциллограммах $75 \cdot 10^{-6}$ с (фиг. 1, а) и $30 \cdot 10^{-6}$ с (фиг. 1, б). Соответствующие величины времени пробега и скорости $a(\varepsilon)$ при $\sigma_{10} = 0$ (фиг. 1, а) равны $t(0) = 139 \cdot 10^{-6}$ с, $a(0) = 215$ м/с, при $\sigma_{1n} = 283$ кг/см² (фиг. 1, б) $t(\varepsilon_n) = 16,5 \cdot 10^{-6}$ с, $a(\varepsilon_n) = 1810$ м/с. Характер возмущений, регистрируемых в образцах пенопласта, аналогичен.

На фиг. 2, 3 представлены соответствующие экспериментальные результаты для песчаного грунта (фиг. 2) и пенопласта (фиг. 3). По оси абсцисс отложены деформации ε , по оси ординат — напряжения σ_1 и скорости $a(\varepsilon)$. При этом точки и кривые 2 соответствуют $a(\varepsilon)$, 3 — статическим диаграммам сжатия $f(\varepsilon)$, полученным при скорости деформирования $\dot{\varepsilon} = 2,5 \cdot 10^{-4}$ с⁻¹ для песка и $\dot{\varepsilon} = 2,5 \cdot 10^{-3}$ с⁻¹ для пенопласта. Точки 4 фиг. 2 соответствуют скоростям $a_*(\varepsilon)$ при $\sigma_1 < f(\varepsilon)$. Зависимости $a(\varepsilon)$ и $f(\varepsilon)$ аппроксимированы следующими формулами:

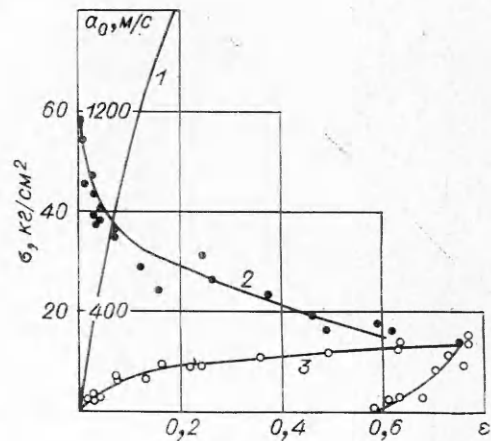
$$(2.1) \quad a(\varepsilon)/a(0) = 1 + m_0 \varepsilon, \quad 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_1;$$

$$a(\varepsilon)/a(\varepsilon_1) = [1 + m_1(\varepsilon - \varepsilon_1)^{v_1}]^{1/2}, \quad \varepsilon_1 < \varepsilon \leq 0.12;$$

$$(2.2) \quad f(\varepsilon) = K(\varepsilon + m_2 \varepsilon^{v_2}), \quad 0 \leq \varepsilon \leq 0.13;$$



Ф и г. 2



Ф и г. 3

для пенопласта

$$(2.3) \quad a(\varepsilon)/a(0) = 1 - m_1 \varepsilon^{v_1}, \quad 0 \leq \varepsilon \leq 0,50;$$

$$(2.4) \quad f(\varepsilon) = \begin{cases} K\varepsilon, & 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_s; \\ \sigma_s [1 + m_2 (\varepsilon - \varepsilon_s)^{v_2}], & \varepsilon_s < \varepsilon \leq 0,70. \end{cases}$$

В (2.1), (2.2) $a(0) = 200$ м/с; $m_0 = 37$; $a(\varepsilon_1) = 350$ м/с; $\varepsilon_1 = 0,02$; $m_1 = 364$; $v_1 = 1,0$; $K = 550$ кг/см²; $m_2 = 155$; $v_2 = 3,0$. В (2.3), (2.4) $a(0) = 1125$ м/с; $m_1 = 0,89$; $v_1 = 0,36$; $\varepsilon_s = 0,0346$; $\sigma_s = 4,5$ кг/см²; $K = 130$ кг/см²; $m_2 = 2,30$; $v_2 = 0,46$.

Предельные динамические диаграммы (кривые 1, фиг. 2, 3) получены из (2.1), (2.3) с учетом (1.3) в следующем виде:
для песка

$$\varphi(\varepsilon) = \begin{cases} \frac{E_0}{3m_0} [(1 + m_0 \varepsilon)^3 - 1], & 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_1, \\ \sigma_0 + E_1 [\varepsilon - \varepsilon_1 + m (\varepsilon - \varepsilon_1)^v], & \varepsilon_1 < \varepsilon \leq 0,12, \end{cases}$$

где $E_0 = 608$ кг/см²; $m = 182$; $v = 2,0$; $E_1 = 1880$ кг/см²; $\sigma_0 = 23,2$ кг/см²; для пенопласта

$$\varphi(\varepsilon) = E_0 \left(\varepsilon - \frac{2m_1}{1+v_1} \varepsilon^{1+v_1} + \frac{m_1^2}{1+2v_1} \varepsilon^{1+2v_1} \right),$$

где $E_0 = 1000$ кг/см².

Интересно отметить качественное отличие в характере диаграмм $\varphi(\varepsilon)$ ($\varepsilon \rightarrow \infty$) для песчаного грунта и для пенопласта. В первом случае скорости $a(\varepsilon)$ возрастают с увеличением ε , а для $\varphi(\varepsilon)$ имеет место условие $d^2\varphi/d\varepsilon^2 > 0$. Для пенопластов $a(\varepsilon)$ убывает с увеличением ε и соответственно $d^2\varphi/d\varepsilon^2 < 0$ (в пределах измеренных величин напряжений).

Отличие величин скоростей распространения слабых возмущений $a_*(\varepsilon)$ при разгрузке от $a(\varepsilon)$ при нагружении при одних и тех же значениях деформаций ε (точки 4, фиг. 2) свидетельствует о том, что в законе деформирования типа (1.1) $E_*(\varepsilon) \neq E(\varepsilon)$.

Полученные результаты подтверждают изложенные ранее в [2] данные о существенном влиянии скорости деформирования на сжимаемость песчаных грунтов при кратковременных нагрузках.

Еще более значительным оказывается влияние скорости деформирования на сжимаемость пенопласта, для которого различие в деформациях при $\dot{\varepsilon} = \infty$ и $\dot{\varepsilon} = 2,5 \cdot 10^{-3}$ с⁻¹ достигает 10—15 раз (при $\sigma_1 = 10—12$ кг/см²).

Поступила 26 III 1976

ЛИТЕРАТУРА

1. Мельников В. В., Рыков Г. В. О влиянии скорости деформирования на сжимаемость лессовых грунтов. — ПМТФ, 1965, № 2, с. 158—160.
2. Рыков Г. В. Влияние скорости деформирования на сжимаемость и сдвиг песчаных и глинистых грунтов при кратковременных динамических нагрузках. — ПМТФ, 1969, № 3, с. 155—160.
3. Алексеенко В. Д., Григорян С. С., Кошелев Л. И., Новгородов А. Ф., Рыков Г. В. Измерение волн напряжений в мягких грунтах. — ПМТФ, 1963, № 2, с. 135—141.
4. Рыков Г. В. Экспериментальное исследование поля напряжений при взрыве в песчаном грунте. — ПМТФ, 1964, № 1, с. 85—89.
5. Ляхов Г. М. Основы динамики взрыва в грунтах и жидких средах. М., «Недра», 1964, с. 61—66.
6. Лагунов В. А., Степанов В. А. Измерение динамической сжимаемости песка при высоких давлениях. — ПМТФ, 1963, № 1, с. 88—96.

7. Баренблатт Г. И. О распространении возмущений в среде с нелинейной зависимостью напряжений от деформаций.— ПММ, 1953, т. XVII, вып. 4.
8. Ильюшин А. А., Ленский В. С. Сопротивление материалов. М., Физматгиз, 1959, с. 277.
9. Lubliner J. A general theory of strain-rate dependent plastic wave propagation in bars.— *J. Mech. Phys. Solids*, 1964, vol. 12, p. 59—65.
10. Кристеску Н. О распространении продольных волн в тонких упруго-вязкопластических стержнях.— Сб. пер. Механика, 1966, № 3, с. 119—133.
11. Соколовский В. В. Распространение упруговязкопластических волн в стержнях.— ПММ, 1948, вып. 3, с. 261—280.
12. Малверн Л. Распространение продольных волн с учетом влияния скорости деформирования.— Сб. пер. Механика, 1952, вып. 1, с. 153—161.
13. Зубкова А. Н., Рыков Г. В. Распространение одномерных волн напряжений в вязкопластической среде.— В кн.: Материалы V Всесоюзного симпозиума 4—7 окт. 1971 г. Алма-Ата, «Наука», 1973, с. 165—173.
14. Скобеев А. М. Волна нагружения в вязкопластической среде.— *Изв. АН СССР. МТТ*, 1967, № 2, с. 139—142.

УДК 628.193.624

ЗАЩИТНЫЕ СВОЙСТВА ТОНКОГО ЭКРАНА ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ УДАРЕ

Л. А. Мержиевский, В. М. Титов

(Новосибирск)

Пробивая тонкую пластину (экран), высокоскоростная частица (метеорит) разрушается в результате развивающихся в ней волновых процессов. При деформировании в частице вырабатывается поле скоростей с ненулевой составляющей, перпендикулярной направлению удара, поэтому траектории осколков направлены под различными углами к траектории частицы и удар осколков по преграде, расположенной за экраном, распределяется по площади, во много раз превосходящей площадь сечения частицы. Это вместе с потерей импульса частицы на пробивание и определяет защитное действие экрана.

Процесс деформации и разрушения частицы при соударении с экраном рассмотрен в [1]. В данной работе на основе проведенных экспериментов обосновывается методика количественных оценок разрушений преграды (мишени), защищенной экраном. Методика ускорения стальных шаров описана в [2]. В зазоре между экраном и мишенью во всех опытах давление доводилось до 1 мм рт. ст.

Общая постановка задачи о пробивании экранированной мишени осложняется тем, что при изменении расстояния между мишенью и экраном S меняется механизм воздействия на мишень. Если при малых S удар по мишени наносится неразошедшимся (компактным) облаком осколков либо только еще деформирующейся частицей, то с ростом S разрушение мишени все в большей степени определяется ударом наиболее крупных осколков рассредоточенного осколочного поля. Поэтому необходима оценка диапазона расстояний $S_1 = S/d_0$ (d_0 — диаметр ударяющей частицы), на которых воздействие на мишень определяется каждым из названных механизмов. При выборе в качестве мишени массивной (полубесконечной) преграды количественной характеристикой степени разрушения мишени и,