

## ЕНЕРГЕТИКА УЩІЛЬНЕННЯ І ФОРМОЗМІНИ ПРИ ДИНАМІЧНОМУ ДЕФОРМУВАННІ ГРУНТІВ

*А. В. Михалюк, докт. техн. наук, М. О. Лисюк, канд. техн. наук,  
В. В. Захаров, інж. (ННДІОП)*

*На основі общих закономірностей поведіння ґрунтів при динамічних навантаженнях дан аналіз енергоємності деформаційних процесів з виділенням енергії об'ємного деформування (уплотнення) і енергії формозмінення.*

Незважаючи на те, що деформаційним властивостям ґрунтів при довільних режимах навантаження присвячено велику кількість досліджень і публікацій, енергетика деформаційних процесів в ґрунтах залишається малодослідженою. Нижче викладено результати її вивчення при динамічних методах впливу на ґрунт як найбільш поширених в практиці будівельних робіт.

Дослідження проводились з суглинками і глинами – ґрунтами, які найчастіше вимагають штучної зміни свого фізичного стану. Природні властивості цих ґрунтів з такими позначеннями:  $\rho$  – щільність,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\rho_c$  – щільність скелета,  $\text{кг/м}^3$ ;  $n$  – загальна пористість, %;  $n_0$  – вільна пористість, %;  $w$  – вологість, %;  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона в області пружної поведінки;  $\xi$  – коефіцієнт бокового тиску;  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  і  $\alpha_3$  – вміст мінеральної складової, рідини і газу (по об'єму).

Випробування проводились за схемою стабілометра, яка не тільки значно спрощує аналіз їх результатів, а й відображає затрати енергії динамічного навантаження як на об'ємне деформування ґрунту, так і на його формозміну. Методика робіт детально викладена в [1].

На рис. 1 показані характерні діаграми динамічного деформування зелених глин вологістю 23,5% в координатах  $\sigma_1(\varepsilon_1)$ , де  $\sigma_1$  – найбільше головне (осьове) напруження,  $\varepsilon_1$  – осьова деформація. Їх загальний вигляд дозволяє зробити висновок, що ґрунт є нелінійно і необоротно деформівним пружно-в'язкопластичним середовищем, схильним до релаксації і післядії, причому залежність  $\sigma_1(\varepsilon_1)$  характеризується змінною кривизною в областях переважно пружного і переважно пластичного деформування. Такі діаграми відповідають умовам, коли  $\varepsilon_1 > \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0$  і  $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = \xi\sigma_1$ , де  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  – головні нормальні напруження;  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_3$  – деформації ґрунту в напрямку дії головних нормальних напружень.

Виходячи із залежності  $\sigma_1(\varepsilon_1)$ , легко визначити затрати енергії на перебіг деформаційного процесу. В розрахунку на одиницю деформівного об'єму вони становитимуть:

$$W = \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_k} \sigma_1(\varepsilon_1) d\varepsilon_1, \quad (1)$$

де  $\varepsilon_0$  і  $\varepsilon_k$  – початкова і кінцева деформації.

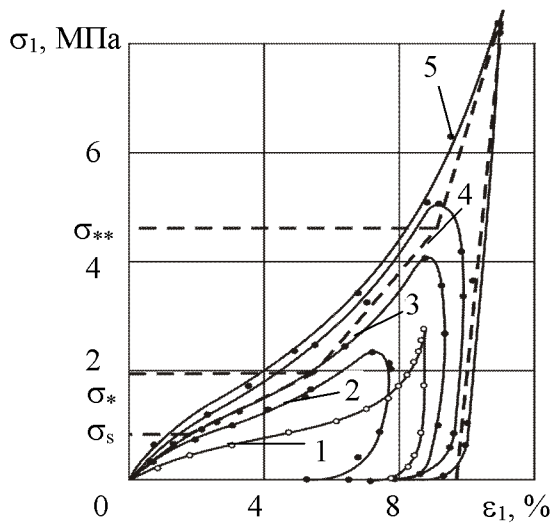


Рис. 1. Діаграми динамічного деформування глини вологістю 23,5% при швидкостях навантаження  $\sim 0(1)$ , 0,2(2), 0,82(3), 1,39(4) і 3,54(5) ГПа/с

В загальному вигляді рівняння стану ґрунту як баротропного середовища побудувати досить складно, оскільки його визначальні характеристики залежать не тільки від амплітуди напружень і деформацій, а й від часових показників їх розвитку, таких як швидкість і тривалість навантаження (деформування). Тому нижче, використовуючи рекомендації, викладені в роботі [2], кожену діаграму деформування будемо подавати у вигляді кусочно-лінійної функції, яка максимально відображає реальну ситуацію (див. штрихові лінії на рис. 1) і дозволяє розділити деформаційний процес за рівнем навантаження на декілька характерних областей, а саме:

область  $0 \leq \sigma_1 \leq \sigma_s$ , де  $\sigma_s$  – умовна межа пружності ґрунту

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_s}; \quad (2)$$

область  $\sigma_s \leq \sigma_1 \leq \sigma_*$

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_s(E_1 - E_s)}{E_s E_1} + \frac{\sigma_1}{E_1}; \quad (3)$$

область  $\sigma_* \leq \sigma_1 \leq \sigma_{**}$

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_s(E_1 - E_s)}{E_s E_1} + \frac{\sigma_*(E_2 - E_1)}{E_1 E_2} + \frac{\sigma_1}{E_2}; \quad (4)$$

область  $\sigma_1 \geq \sigma_{**}$

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_s(E_1 - E_s)}{E_s E_1} + \frac{\sigma_*(E_2 - E_1)}{E_1 E_2} + \frac{\sigma_{**}(E_3 - E_2)}{E_2 E_3} + \frac{\sigma_1}{E_3}; \quad (5)$$

область пружного розвантаження

$$\varepsilon_1^H = \varepsilon_1 - \frac{\sigma_1}{E_p}. \quad (6)$$

У цих співвідношеннях, крім уже відомих, прийнято такі позначення:  $\varepsilon_1^H$  – необоротна складова осьової деформації;  $\sigma_*$  і  $\sigma_{**}$  – критичні напруження, що розмежовують області пружно-пластичного деформування ґрунту з різною

крутістю залежності  $\sigma_1(\varepsilon_1)$ ;  $E_s, E_1, E_2, E_3$  і  $E_p$  – модулі загальних деформацій на відповідних ділянках навантаження і розвантаження. Звернемо увагу на те, що їх величина не збігається з модулем Юнга. Так, в області переважно пружного деформування

$$E_s = \frac{1 + \xi}{1 + \xi - 2\xi^2} E, \quad (7)$$

де  $E$  – модуль Юнга. Подібні співвідношення можуть бути одержані і для інших гілок модельної залежності  $\sigma_1(\varepsilon_1)$ .

Користуючись формулами (1)–(6), легко визначити загальні затрати енергії  $W$  на розвиток деформаційного процесу в ґрунті при навантаженні інтенсивністю  $\sigma_1$ :

в області  $\sigma_1 \leq \sigma_s$

$$W = \frac{\sigma_1^2}{2E_s}; \quad (8)$$

в області  $\sigma_s \leq \sigma_1 \leq \sigma_*$

$$W = \frac{\sigma_s^2}{2} \frac{E_1 - E_s}{E_s E_1} + \frac{\sigma_1^2}{2E_1}; \quad (9)$$

в області  $\sigma_* \leq \sigma_1 \leq \sigma_{**}$

$$W = \frac{\sigma_s^2}{2} \frac{E_1 - E_s}{E_1 E_s} + \frac{\sigma_*^2}{2} \frac{E_2 - E_1}{E_1 E_2} + \frac{\sigma_1^2}{2E_2}; \quad (10)$$

в області  $\sigma_1 \geq \sigma_{**}$

$$W = \frac{\sigma_s^2}{2} \frac{E_1 - E_s}{E_1 E_s} + \frac{\sigma_*^2}{2} \frac{E_2 - E_1}{E_1 E_2} + \frac{\sigma_{**}^2}{2} \frac{E_3 - E_2}{E_2 E_3} + \frac{\sigma_1^2}{2E_3}. \quad (11)$$

Оскільки енергія пружного розвантаження дорівнює  $\sigma_1^2/2E_p$ , необоротні затрати енергії на розвиток деформаційного процесу легко підрахувати, використовуючи формули (8)–(11).

Як відомо [3], затрати енергії на об'ємне деформування визначаються роботою середнього нормального напруження, яке в нашому випадку дорівнює

$$\sigma_{\text{сеп}} = \frac{1 + 2\xi}{3} \sigma_1. \quad (12)$$

Приймаючи до уваги, що в умовах одноосового деформування об'ємна деформація кількісно дорівнює осьовій, знайдемо, що робота ущільнення на етапі навантаження становить

$$W_0 = \frac{1 + 2\xi}{3} \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_k} \sigma_1(\varepsilon_1) d\varepsilon_1 = \frac{1 + 2\xi}{3} W. \quad (13)$$

Це дає змогу розділити загальну енергію деформаційного процесу на роботу ущільнення  $W_0$  і роботу формозміни  $W_\phi = W - W_0$  [3]. Для зазначених вище областей навантаження відповідні співвідношення мають вигляд:

при  $0 < \sigma_1 \leq \sigma_3$ :

$$W_0 = \int_0^{\varepsilon_1} \frac{1+2\xi}{3} E_s \varepsilon_1 d\varepsilon_1 = \frac{1+2\xi}{3} E_s \frac{\varepsilon_1^2}{2} = \frac{1+2\xi}{6} \frac{\sigma_1^2}{E_s}; \quad (14)$$

$$W_\Phi = \frac{1-\xi}{3} \frac{\sigma_1^2}{E_s}; \quad (15)$$

при  $\sigma_s \leq \sigma_1 \leq \sigma_*$ :

$$W_0 = \frac{1+2\xi}{6} \left( \frac{\sigma_s^2}{E_s} - \frac{\sigma_s^2}{E_1} + \frac{\sigma_1^2}{E_1} \right); \quad (16)$$

$$W_\Phi = \frac{1-\xi}{3} \left( \frac{\sigma_s^2}{E_s} - \frac{\sigma_s^2}{E_1} + \frac{\sigma_1^2}{E_1} \right); \quad (17)$$

при  $\sigma_* \leq \sigma_1 \leq \sigma_{**}$ :

$$W_0 = \frac{1+2\xi}{6} \left( \frac{\sigma_s^2}{E_s} - \frac{\sigma_s^2}{E_1} + \frac{\sigma_*^2}{E_1} - \frac{\sigma_*^2}{E_2} + \frac{\sigma_1^2}{E_2} \right); \quad (18)$$

$$W_\Phi = \frac{1-\xi}{3} \left( \frac{\sigma_s^2}{E_s} - \frac{\sigma_s^2}{E_1} + \frac{\sigma_*^2}{E_1} - \frac{\sigma_*^2}{E_2} + \frac{\sigma_1^2}{E_2} \right); \quad (19)$$

при  $\sigma_1 \geq \sigma_{**}$ :

$$W_0 = \frac{1+2\xi}{6} \left( \frac{\sigma_s^2}{E_s} - \frac{\sigma_s^2}{E_1} + \frac{\sigma_*^2}{E_1} - \frac{\sigma_*^2}{E_2} + \frac{\sigma_{**}^2}{E_2} - \frac{\sigma_{**}^2}{E_3} + \frac{\sigma_1^2}{E_3} \right); \quad (20)$$

$$W_\Phi = \frac{1-\xi}{3} \left( \frac{\sigma_s^2}{E_s} - \frac{\sigma_s^2}{E_1} + \frac{\sigma_*^2}{E_1} - \frac{\sigma_*^2}{E_2} + \frac{\sigma_{**}^2}{E_2} - \frac{\sigma_{**}^2}{E_3} + \frac{\sigma_1^2}{E_3} \right). \quad (21)$$

Зрозуміло, що формули (14)–(21) дають уяву про максимальну величину складових енергії деформаційного процесу. Якщо виникає необхідність врахувати ту частину енергії, яка розсіюється в навколишньому середовищі за рахунок пружності ґрунту, величини  $W$ ,  $W_0$  і  $W_\Phi$  мають бути зменшені на  $\Delta W$ ,  $\Delta W_0$  і  $\Delta W_\Phi$  відповідно, причому

$$\Delta W = \frac{\sigma_1^2}{2E_p}; \quad \Delta W_0 = \frac{1+2\xi}{3} \frac{\sigma_1^2}{2E_p}; \quad \Delta W_\Phi = \frac{1-\xi}{3} \frac{\sigma_1^2}{2E_p}. \quad (22)$$

Аналізуючи рівняння (14)–(21), легко дійти висновку, що при динамічному деформуванні ґрунту співвідношення між затратами енергії на формозміну і ущільнення  $\eta$  визначається лише нерівномірністю генерованого напруженого стану, яка характеризується коефіцієнтом  $\xi = \sigma_3/\sigma_1$ . Дійсно, для будь-якої області напружень

$$\eta = \frac{W_\Phi}{W_0} = \frac{2(1-\xi)}{1+2\xi}.$$

Графічна інтерпретація цієї залежності для найбільш поширених умов зовнішнього силового навантаження ( $0 \leq \xi \leq 1$ ) подана на рис. 2, де точки 1 відображають результати спостережень у суглинках вологістю 14,2%, точки 2 – в суглинках вологістю 9,6%, точки 3 – в жовто-зелених глинах; точки 4 і 5 – в зелених глинах вологістю 23,5 і 15% відповідно.

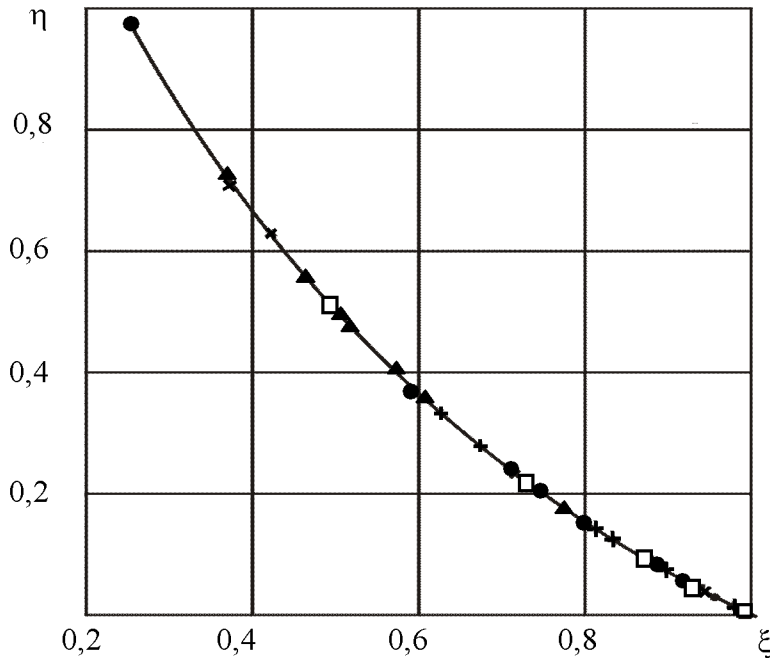


Рис. 2. Вплив нерівномірності напруженого стану ґрунту на співвідношення енергій ущільнення і формозміни: ● – 1; + – 2; × – 3; ▲ – 4; □ – 5

З рис. 2 випливає, що затрати енергії на ущільнення ґрунту перевищують енергію формозміни лише тоді, коли найменше головне напруження не менше як чверть амплітуди найбільшого головного напруження; в іншому разі пластична формозміна стає основним механізмом дисипації енергії динамічного навантаження. При  $\xi = 1$ , тобто при всебічному рівномірному навантаженні, вся енергія деформаційного процесу витрачається на ущільнення ґрунту; при  $\xi = 0$  (одноосовий напружений стан) на ущільнення використовується третина енергії деформаційного процесу, а формозміна поглинає дві третини його енергії.

В ґрунтах з помітним опором розриву може виникнути ситуація, коли  $\xi = -0,5$ ; в цьому випадку  $W_0$  і вся енергія деформування йде лише на пластичну формозміну. З огляду на те, що при  $\xi = -0,5$  середній нормальний тиск дорівнює нулю, напружений стан ґрунту набуває характеру “чистого” зсуву.

Не зайве зауважити, що в ряді робіт [1, 4 та ін.] звертається увага на те, що коефіцієнт бокового тиску істотно залежить від інтенсивності динамічного навантаження, що пов'язується зі зміною фазового складу ґрунту в процесі деформування [5]. У зв'язку з тим, що при динамічних навантаженнях деформаційний процес розгортається за закритою схемою без дренажу ґрунтової вологи, ущільнення ґрунту відбувається за рахунок зменшення його газової фази (вільної пористості). Природно, що при деякому рівні тиску ґрунт може перетворитись з трифазного середовища в двофазне типу “ґрунтової маси” Н. М. Герсєванова, поведінка якого подібна поведінці в'язкої рідини, де  $\xi = 1$ .

Характерний вигляд залежностей  $\xi(\sigma_1)$  при деформуванні ґрунту за схемою  $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = \xi\sigma_1$  і  $\varepsilon_1 > \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0$  показаний на рис. 3. Крива 1 відповідає результатам досліджень у суглинках вологістю 14,2%, крива 2 – в суглинках вологістю 9,6%; криві 3 і 4 – в зелених глинах вологістю 23,5 і 15% відповідно.

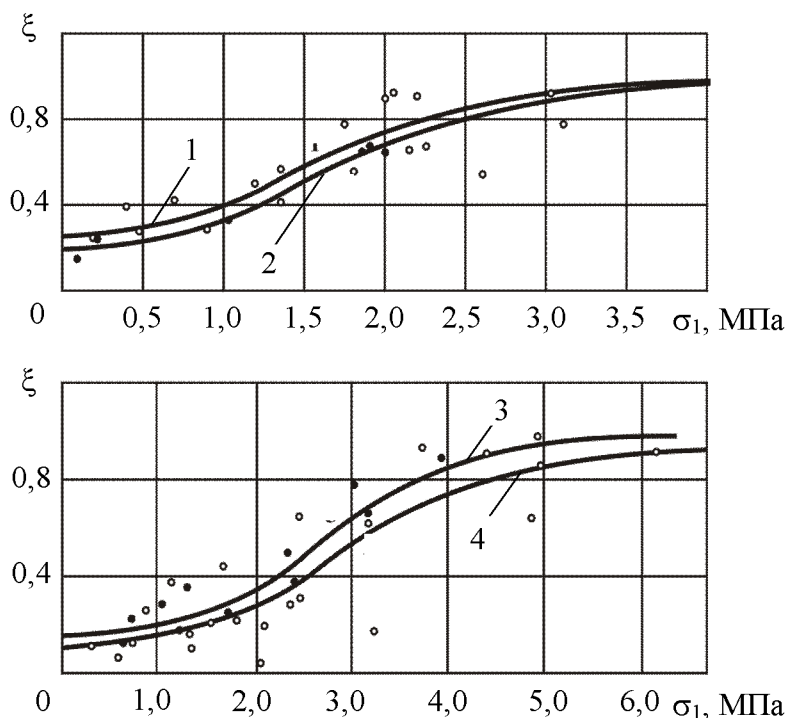


Рис. 3. Вплив амплітуди навантаження на величину коефіцієнта бокового тиску

Наближено вони можуть бути апроксимовані формулою

$$\xi(\sigma_1) = \xi_+ + \operatorname{arctg} \frac{\sigma_1 - \sigma_+}{k},$$

де  $\xi_+ = \frac{1 + \xi_0}{2}$ ;  $\xi_0$  – коефіцієнт бокового тиску в ненавантаженому ґрунті;  $\sigma_+$  – рівень навантаження, що відповідає  $\xi_+$ ;  $k$  – емпіричний коефіцієнт. Зауважимо, що, як показали численні незалежні дослідження, коефіцієнт  $\xi$  майже не залежить від часових параметрів навантаження (деформування).

Існування залежності  $\xi = (\sigma_1)$  свідчить про те, що протягом періоду дії імпульсу тиску змінюється співвідношення між енергіями формозміни і ущільнення. Цей висновок наочно ілюструється кривими на рис. 4, побудованими на підставі дослідів з суглинками вологістю 14,2% (крива 1) і 9,6% (крива 2), жовто-зеленими глинами (крива 3) та зеленими глинами вологістю 23,5% (крива 4) і 15,0% (крива 5). Їх аналіз свідчить про те, що в умовах одноосового стискання з малою амплітудою навантаження затрати енергії на ущільнення ґрунту майже збігаються з затратами енергії на його формозміну. Із збільшенням інтенсивності навантаження величина  $\eta$  швидко зменшується. Зрозуміло, що характер цієї залежності визначається властивостями ґрунту (в першу чергу вологістю), особливостями його переходу до стану “ґрунтової маси”.

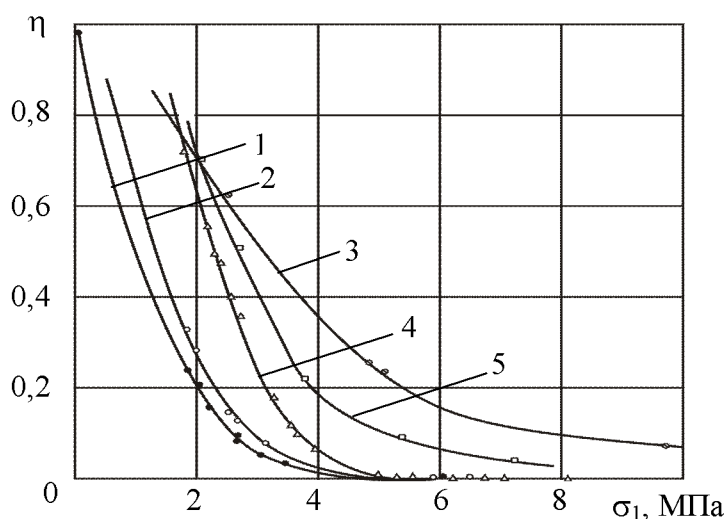


Рис. 4. Залежність співвідношення між енергіями формозміни і ущільнення від поточного напруження в імпульсі тиску

Так, в суглинках і зелених глинах вологістю 23,5% затрати енергії на формозміну стають неістотно малими порівняно з енергією об'ємного деформування вже при  $\sigma_1 \geq 4 \dots 5$  МПа; в глинах вологістю 15% – при  $\sigma_1 \geq 8 \dots 9$  МПа. Це можна вважати цілком природним явищем, бо вологі ґрунти швидше переходять в стан “ґрунтової маси”, аніж сухі. З викладеного зробимо корисний практичний висновок: чим більша інтенсивність динамічного навантаження ґрунту, тим більше енергії витрачається на роботу ущільнення і менше – на формозміну. Очевидно, що раціональна амплітуда навантаження визначається оптимальним співвідношенням між  $W_\phi$  і  $W_0$ .

В протилежність коефіцієнту бокового тиску опір ґрунту динамічному деформуванню, який характеризується величинами  $E_s$ ,  $E_1$ ,  $E_2$  і  $E_3$ , зростає зі збільшенням швидкості навантаження  $\dot{\sigma}_1 = d\sigma_1/dt$ , що має позначатись на дисипації енергії динамічного навантаження. Як показано в [6] і підтверджується кривими на рис. 1, для ґрунтів існує два режими навантаження, пов'язані із впливом часових факторів на їх механічну поведінку і розмежовані деякою критичною швидкістю навантаження  $\dot{\sigma}_1^{кр}$ : при  $\sigma_1 > \dot{\sigma}_1^{кр}$  вплив швидкості навантаження на деформаційні характеристики ґрунту в 10...40 разів слабший, ніж при  $\sigma_1 < \dot{\sigma}_1^{кр}$ . Величина  $\dot{\sigma}_1^{кр}$  відносно невелика і варіюється в межах 0,5...1,0 ГПа/с. Це, схоже, дало підстави деяким дослідникам [1, 7 та ін.] знехтувати зміною опору ґрунту деформуванню при досить великих швидкостях навантаження (деформування) і зробити висновок про існування граничної динамічної діаграми деформування ґрунту.

Модуль розвантаження ґрунтів є відносно стабільною величиною, яка більше залежить від властивостей середовища, ніж від режиму навантаження (розвантаження). Тому в інженерних розрахунках модуль розвантаження звичайно вважають постійним, на що зверталась увага в [1].

На рис. 5 показано залежність повної енергії деформаційного процесу від амплітуди динамічного навантаження. Крива 1 відображає залежність  $W(\sigma_1^m)$  в суглинках вологістю 14,2%, крива 2 – в таких самих ґрунтах вологістю 9,6%, крива 3 – в жовто-зелених глинах, криві 4 і 5 – в глинах вологістю 23,5% і 15%. Як і належало очікувати, затрати енергії на деформування ґрунту зростають зі

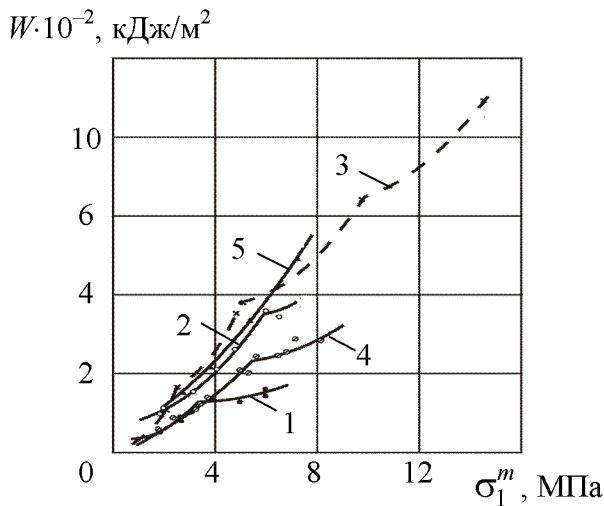


Рис. 5. Залежність енергії деформаційного процесу від рівня навантаження

збільшенням амплітуди навантаження. Досить виразно видно розподіл залежності  $W(\sigma_1^m)$  на окремі ділянки, причому в кожній з них вона має параболічний характер згідно з прийнятою кусочно-лінійною моделлю ґрунту. Затрати енергії при динамічному деформуванні ґрунтів в абсолютному вигляді залежать від численних факторів, пов'язаних із різноманітністю їх властивостей і амплітудно-часових режимів навантаження (деформування). Більш стійкою характеристикою енергоємності деформаційного процесу є питомі затрати енергії на одиницю тиску, тобто  $W/\sigma_1$ . Безумовною перевагою цієї величини є безрозмірність і практична постійність для конкретного ґрунту при різних режимах навантаження. Так, для суглинків вологістю 14,2% вона дорівнює  $30,0_{-5,95}^{+6,43}$ ; для суглинків вологістю 9,6% –  $54,0_{-5,42}^{+5,65}$ ; для жовто-зелених глин –  $65,56_{-13,0}^{+8,5}$ ; для зелених глин вологістю 23,5% –  $37,3_{-9,18}^{+6,88}$ ; для цих же глин вологістю 15% –  $61,37_{-4,11}^{+6,74}$ . Ці дані свідчать про те, що максимальне відхилення окремих величин  $W/\sigma_1$  від середнього значення, як правило, не перевищує 13...14% і лише в окремих випадках сягає 20%. Константний характер величини  $W/\sigma_1$  дозволяє припустити, що вона може бути використана для прогнозування енергозатрат на деформаційний процес за даними про властивості ґрунтів і амплітуду навантаження. На жаль, кількість ґрунтів, використаних при проведенні досліджень, недостатня для узагальнюючих висновків, однак і одержані результати підтверджують це припущення. На рис. 6 показано вплив фазового складу ґрунту, який контролюється його вологістю і пористістю, на питомі затрати енергії динамічного деформування. Суцільна крива зображає залежність  $W/\sigma_1 = f_1(n_0)$ , штрихова – залежність  $W/\sigma_1 = f_2(w/n_0)$ . Їх аналіз дозволяє зробити два корисних висновки.

При певному співвідношенні пористості і вологості в ґрунтах спостерігається мінімум затрат енергії на розвиток деформаційного процесу. Це збігається з висновками робіт [8–10 та ін.] про існування оптимальної вологості ґрунтів, за якої деформаційна податливість ґрунту найбільша. Мінімуми кривих відповідають ситуації, коли вологість ґрунту визначається вмістом зв'язаної води при повному насиченні адсорбційних плівок на його мінеральних зернах.



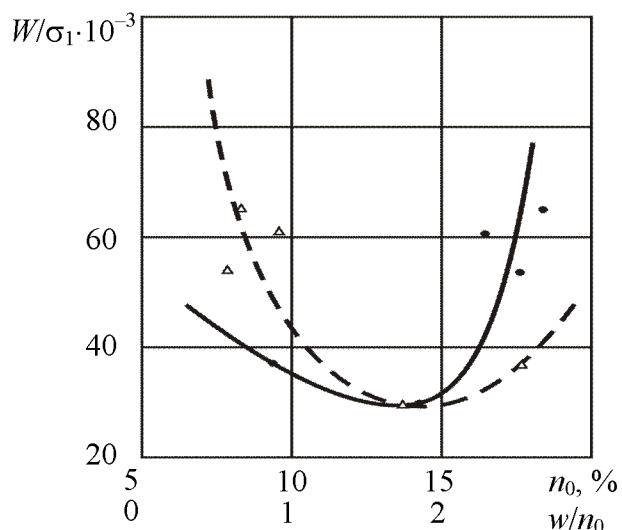


Рис. 6. Вплив властивостей ґрунтів на питомі затрати енергії динамічного деформування

Проаналізуємо, в якій з зазначених вище областей навантаження поглинається найбільша кількість енергії деформаційного процесу. Ясно, що в області  $\sigma_1 \leq \sigma_s$  вона визначається формулою (8), в області  $\sigma_s \leq \sigma_1 \leq \sigma_*$  – величиною  $W_* = W(\sigma_1) - W(\sigma_s)$ ; в області  $\sigma_* \leq \sigma_1 \leq \sigma_{**}$  – різницею  $W_{**} = W(\sigma_1) - W(\sigma_*)$ , а при більш високих рівнях навантаження – за формулою  $W_{***} = W(\sigma_1) - W(\sigma_{**})$ . Якщо деформування охоплює всі області навантаження, то щоб визначити максимальні затрати енергії в кожній з них, замість поточної величини  $\sigma_1$  слід користуватись граничними напруженнями  $\sigma_s$ ,  $\sigma_*$  та  $\sigma_{**}$  відповідно.

## Висновки

1. Найбільше поглинання енергії деформаційного процесу спостерігається там, де деформування ґрунту має переважно необоротний характер. Це має місце в діапазоні напружень  $\sigma_s \leq \sigma_1 \leq \sigma_{**}$ . Якщо динамічне навантаження на ґрунт не перевищує  $\sigma_{**}$ , то в цих областях поглинається 97...99% енергії навантаження, причому в області  $\sigma_s \leq \sigma_1 \leq \sigma_*$  в середньому від 24,3 до 44,0%, а в області  $\sigma_* \leq \sigma_1 \leq \sigma_{**}$  – від 53,0 до 75,0%, тобто в 1,7...2,2 рази більше. В області  $\sigma_1 \leq \sigma_s$  поглинання енергії навантаження нехтовно мале і не перевищує 0,5...3,0% в залежності від властивостей ґрунту. В суглинках у квазіпружній області витрачається близько 0,5...0,6% енергії деформаційного процесу; в області  $\sigma_s \leq \sigma_1 \leq \sigma_*$  – 24,3...33,6%; в області  $\sigma_* \leq \sigma_1 \leq \sigma_{**}$  – 65,7...72,2%. В глинах, як менш податливих у деформаційному відношенні середовищах, затрати енергії в квазіпружній області трохи більші і можуть сягати 2...3%. Деякий перерозподіл енергій має місце в другій і третій областях навантаження. Так, в області  $\sigma_s \leq \sigma_1 \leq \sigma_*$  витрачається 35...44% енергії, в той час як в області  $\sigma_* \leq \sigma_1 \leq \sigma_{**}$  – лише 53...62%. В середньому по всій сукупності проведених випробувань при навантаженнях  $\sigma_1 = \sigma_{**}$  затрати енергії в квазіпружній області становлять 1,87% повної енергії деформаційного процесу, в області  $\sigma_s \leq \sigma_1 \leq \sigma_*$  – 36,1%, і в області  $\sigma_* \leq \sigma_1 \leq \sigma_{**}$  – 62,03%.

2. В області  $\sigma_1 \geq \sigma_{**}$  дисипація енергії динамічного навантаження хоч і залежить від його інтенсивності, однак у відносних показниках вона значно менша, ніж у другій і третій областях зміни тиску. Це пояснюється тим, що з переходом ґрунту в стан “ґрунтової маси” його фазові компоненти деформуються пружно, а необоротність деформаційного процесу значно зменшується у зв’язку зі зниженням вмісту газової фази. В такому стані на затрати енергії навантаження помітно впливають ефекти, пов’язані з в’язкістю середовища. Так, наприклад, при зростанні амплітуди тиску від  $\sigma_{**}$  до  $2\sigma_{**}$  поглинання енергії збільшується в суглинках всього на 55,9...65,5%, в жовто-зелених глинах – на 49,0%. Одночасно зменшується залежність кількості поглинутої енергії від швидкості навантаження (деформування).

3. Поглинання енергії в окремих областях динамічного навантаження істотно залежить від його амплітуди. Найяскравіше це спостерігається в другій і третій областях зміни  $\sigma_1$ . Якісну і кількісну сторони цієї залежності ілюструють криві на рис. 7, де суцільні лінії побудовані за даними досліджень в області  $\sigma_s \leq \sigma_1 \leq \sigma_*$ ; штрихові – для області  $\sigma_* \leq \sigma_1 \leq \sigma_{**}$ . Криві 1 і 2 відображають експериментальні дані в суглинках вологістю 14,2 і 9,6% відповідно, крива 3 – в жовто-зелених глинах, криві 4 і 5 – в зелених глинах вологістю 23,5 і 15,0%. Слід зауважити, що в глинах аналізована залежність значно сильніша, ніж в суглинках. Можливо, це пояснюється особливостями газової фільтрації в тонкодисперсних середовищах. Кількісні спостереження підтверджують такий висновок. Так, якщо в суглинках вологістю 23,5% зростання амплітуди тиску в 3...4 рази приводить до збільшення кількості поглинутої енергії в області  $\sigma_s \leq \sigma_1 \leq \sigma_*$  всього на 15...30%, то в глинах з такою ж вологістю в цій області витрачається в 1,6...4 рази більше енергії. Якісно аналогічна ситуація спостерігається і в області  $\sigma_* \leq \sigma_1 \leq \sigma_{**}$ . Зауважимо, що фізичне пояснення цього факту задовільно узгоджується з особливостями розвитку деформацій післядії в ґрунтах різних типів [10].

$W_*, W_{**}$ , кДж/м<sup>2</sup>

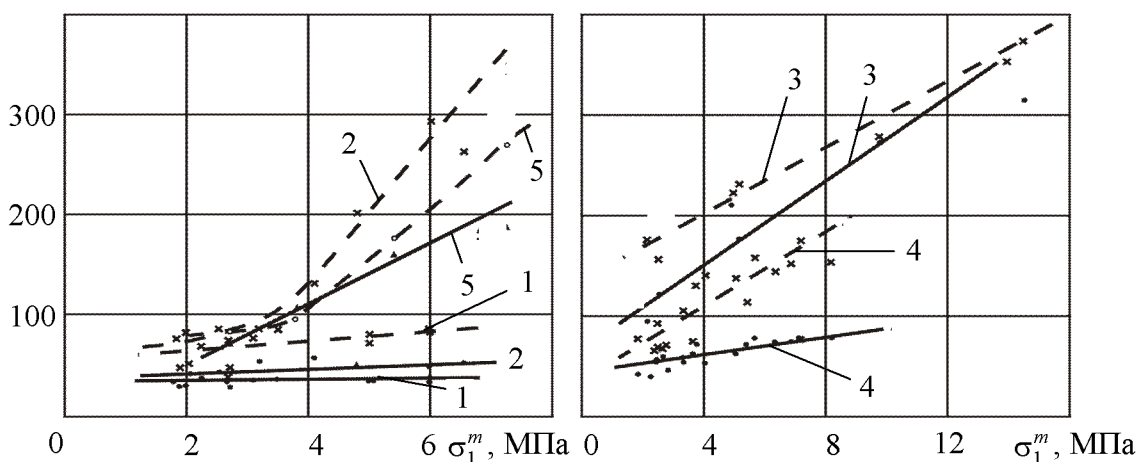


Рис. 7. Залежність енергії деформаційного процесу в окремих областях навантаження від його інтенсивності

4. З огляду на те, що окремі області відрізняються інтенсивністю динамічного навантаження, слід очікувати, що в кожній з них співвідношення між енергіями ущільнення і формозміни не залишатиметься незмінним (рис. 4), а залежатиме як від амплітуди навантаження, так і від властивостей ґрунту. Так, в суглинках вологістю 14,2% в області  $\sigma_s \leq \sigma_1 \leq \sigma_*$  на волюметричне деформування ґрунту затрачується в середньому біля 60% енергії процесу, в той час як в області  $\sigma_* \leq \sigma_1 \leq \sigma_{**}$  її частка зростає до 90...95%; в суглинках вологістю 9,6% аналогічні показники становлять 50 і 86...88% відповідно. Подібна зміна співвідношення між  $W_0$  і  $W_\phi$  має місце і в інших ґрунтах.

Викладене дозволяє не тільки дати кількісну оцінку коефіцієнта корисної дії тієї чи іншої технології впливу на ґрунт, а й визначити шляхи підвищення її ефективності, що має неабияке значення з точки зору як енергозбереження, так і техногенного навантаження на навколишнє середовище.

1. *Поведение ґрунтов под действием импульсных нагрузок* / А. А. Вовк, Б. В. Замышляев, Л. С. Евтерев и др. – К.: Наук. думка, 1984. – 288 с.
2. *Ляхов Г. М., Полякова Н. И.* Волны в плотных средах и нагрузки на сооружения. – М.: Недра, 1967. – 232 с.
3. *Безухов Н. И.* Основы теории упругости, пластичности и ползучести. – М.: Высш. школа, 1968. – 512 с.
4. *Сооружение подземных резервуаров кассетного типа энергией взрыва* / А. В. Михалюк, Е. А. Мухин, С. А. Михалюк, В. В. Захаров. – К.: ВИПОЛ, 2005. – 95 с.
5. *Черный Г. И., Михалюк А. В.* Экспериментальное исследование условия пластичности сжимаемых ґрунтов при динамическом нагружении // Журн. прикл. механики и техн. физики. – 1970. – № 2. – С. 131–133.
6. *Михалюк А. В.* Определение размеров полостей и зон уплотнения при взрывах в ґрунтах с учетом их вязких свойств // Взрыв в пористых и дисперсных средах. – К.: Наук. думка. – 1969. – С. 124–130.
7. *Григорян С. С.* Исследования по механике ґрунтов: Автореф. дис... д-ра физ.- мат. наук. – М.: МГУ, 1965. – 24 с.
8. *Михалюк А. В.* Горные породы при неравномерных динамических нагрузках. – К.: Наук. думка, 1980. – 154 с.
9. *Вовк А. А., Черный Г. И., Михалюк А. В.* Влияние влажности на динамическую деформируемость суглинков // Основания, фундаменты и механика ґрунтов. – 1972. – № 3. – С. 6–8.
10. *Михалюк А. В., Захаров В. В.* Последствие при динамическом деформировании ґрунтов // Основания, фундаменты и механика ґрунтов. – 2000. – № 6. – С. 6–11.