

без змін, а потім починає дорівнювати 6 см, з добавкою СДБ це буде відповідати 6 годинам, з добавкою патоки — 12 годинам.

Таким чином, добавки ПАР на ранній стадії гідратції цементу сповільнюють цей процес на деякий час, який необхідно для транспортування і виконання робіт. Крім того, у 7-добовому віці зразки з добавками мали відставання в міцності, з добавкою СДБ — на 18 %, з добавкою патоки — на 26 %. Очевидно, що якби зразки тужавіли при температурі 25, 30, 40 °С, тоді б відставання у міцності було б менше.

Використання будівельних розчинів і бетонів з підвищеною життєздатністю дасть можливість, у залежності від дозування сповільнювачів тужавіння, транспортувати їх на будівельні майданчики на дальші відстані і використовувати їх на протязі зміни, що зменшить простої будівельних бригад і втрати цементних матеріалів при виконанні робіт в умовах жаркого клімату.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Патуроев В. В., Соловьев Г. К. Применение полимербетонов в строительстве. — М.: ВНИИТПИ, 1988. — 49 с.
2. Разработка предложений и концепций комплексного прогноза научного технического прогресса строительного комплекса на 1996—2015 годы в части применения сборного и монолитного железобетона. — М.: НИИЖБ, 1990. — С. 5—10.
3. Ли Ф. М. Химия цемента и бетона. — М.: Стройиздат, 1961. — 642 с.
4. Несен Л. М., Сердюк В. Р., Христич О. В. Моделювання та оптимізація рецептурно-технологічних факторів отримання нагрівачів із цементно-шламових композицій // Вісник ВПІ. — № 3. — 1995. — С. 9—11.

Кафедра економіки і управління будівництвом

УДК 624.131.376.5 (088.8)

## УСТАНОВКА ДЛЯ ТРИОСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ДОРОЖНЬО-БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

**Волошин О. Б., канд. техн. наук. Ратушняк Г. С., канд. техн. наук. Коц І. В.**

При проектуванні дорожнього одягу, підвалин фундаментів різних споруд, нафтових морських опор, залізничних насипів, метрополітенів, шахт, гідротехнічних споруд тощо, необхідно знати механічні властивості ґрунтів. У підвалинах споруд ґрунт знаходиться в складному (триосному) напруженому стані, спричиненому дією навколишніх статичних і динамічних навантажень та силами власної ваги. Для визначення комплексу характеристик механічних властивостей ґрунтів в умовах складного напруженого стану (модуля деформування, коефіцієнту бокового тиску, коефіцієнту Пуассона, кутів внутрішнього тертя та зчеплення ґрунтів тощо) при дії на них статичних та динамічних навантажень використовуються прилади триосного навантаження (стабілометри).

У Вінницькому державному технічному університеті розроблена установка для триосних досліджень дорожньо-будівельних матеріалів, яка дозволяє проводити випробування зразків ґрунтів не тільки статичним, але й динамічним навантаженням за допомогою простого та надійного гідроімпульсного приводу з регульованими параметрами, конструктивна схема якої зображена на рис. 1 [1].

Установка містить стабілометр 16, в робочій камері 15 якого розмішений зразок ґрунту 10, ресивер 14, генератор гідравлічних імпульсів 30, гідравлічний розподільник 27, насосну станцію 1 з гідромагістралями 2, 3 і 28, та систему давачів 7, 39—42.

Установка працює таким чином. При вмиканні насосної станції 1 робоча рідина знаходить під заданим тиском по загальній гідромагістралі 2 і гідролінії 3 в робочу порожнину 4 гідродомкрату 5. Шток 6 передає силу тиску рідини через з'єднаний з ним давач сили 7, штамп 8 та верхню пористу вставку 9 на зразок ґрунту 10, розмішений в гумовій оболонці 11, яка герметично зафіксована кільцями 12. Відбувається статичне осьове стиснення зразка 10. Для створення всебічного тиску на зразок використовується стиснене повітря, яке надходить із поршневої порожнини 13 ресивера 14 по пневмомагістралі в робочу камеру 15 стабілометра 16. Стиснення повітря виконує поршень 17, шток якого жорстко з'єднаний з притиснутою пружинами 18 рамою 19, кінематично сполученою із штоком 20, який сприймає тиск робочої рідини в робочій порожнині 21 гідроциліндра 22. Робоча порожнина 21 гідролінією з'єднана з загальною гідромагі-

траллю 2. Регулювання величини всебічного тиску на зразок 10 виконується за допомогою обмежника 23, якій регулює хід поршня 17. Цим передбачена можливість оперативно змінювати об'єм поршневої порожнини 13, що приводить до зміни тиску в робочій камері 15. При поверненні поршня 17 у вихідне верхнє положення повітря, яке знаходиться в поршневій порожнині 13, виходить в атмосферу по каналу 25. Вихід повітря продовжується до тих пір, доки не перекриється розточка 26. При подальшому переміщенні поршня 17 вгору відбувається стиснення повітря в гальмовій надпоршневій порожнині 24, що запобігає його жорстким зіткненням з корпусом.

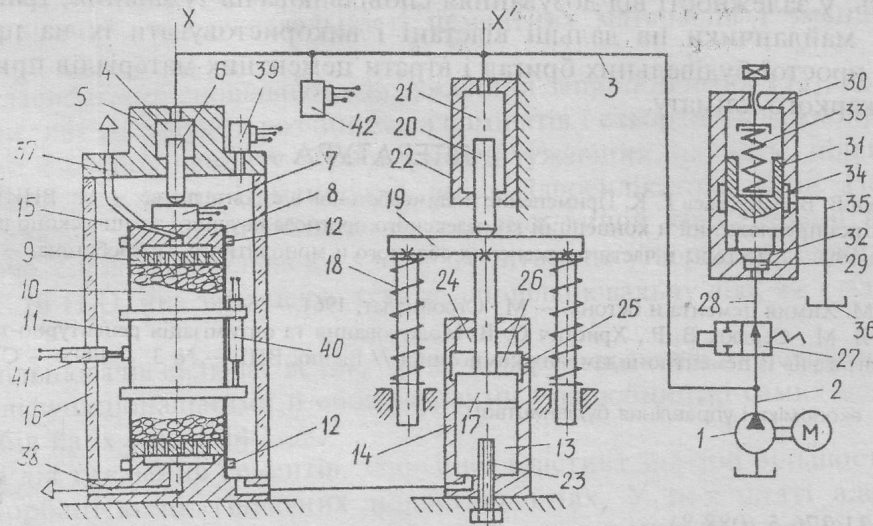


Рис. 1. Конструктивна схема установки для тріосних досліджень дорожно-будівельних матеріалів

Для створення динамічного навантаження зразка ґрунту 10 в робочій камері 15 необхідно перекинути гідравлічний розподільник 27 в положення, при якому загальна гідромагістраль 2 з'єднується з гідромагістраллю 28, зв'язаною з підклапанною порожниною 29 генератора гідравлічних імпульсів 30. Переборюючи силу пружини 33, що притискає клапан 31 до установного сидла 32, робоча рідина зміщує клапан 31 вгору, з'єднуючи підклапанну порожнину 29 з розточкою 34 і далі з гідромагістраллю 35 і баком 36. Тиск в порожнинах 4 та 21 падає. Внаслідок цього поршень 17 і шток 20 під дією стисненого повітря в робочій камері 15 і поршневій порожнині 13 та пружини 18 піднімається вгору. Стиснене повітря виходить в атмосферу по каналу 25. Крім того, одночасно під дією пружинних сил деформованого зразка 10 шток 6 повертається в початкове верхнє положення. Припинення витрат робочої рідини із порожнин 21 і 4 викликає зниження тиску в підклапанній порожнині 29 до зливного. Внаслідок цього під дією пружини 33 клапан 31 перекриває дросельну щілину і пересувається вниз до посадки на сидло. Тиск в порожнинах 4 та 21 піднімається. Далі робочий цикл повторюється в автоматичному режимі. Пористі вставки 9 призначені для зволоження зразка 10 або видалення з нього води через канали 37, 38, а також заміру тиску і об'єму порової води за допомогою зовнішніх допоміжних пристроїв. Напружено-деформований стан зразка ґрунту 10 в різних умовах навантажень вимірюється за допомогою давача вертикальної сили 7, давача тиску 39, які вимірюють всебічний тиск повітря в робочій камері 15, а також давачів переміщень 40, 41, які дозволяють вимірювати вертикальні та радіальні деформації зразка 10 в середній його частині. Давач тиску 42 призначений для контролю тиску робочої рідини в порожнинах 4 і 21.

Для надійного та достовірного дослідження напружено-деформованого стану зразків ґрунтів в умовах динамічних навантажень, розробки методики проектного розрахунку основних робочих параметрів приводу стабілометра необхідні знання динаміки робочого процесу коливальної системи установки, які б дозволили розкрити закономірності впливу конструктивних параметрів гідроімпульсного приводу на характеристики тріосного навантаження та їх взаємозв'язок з процесом навантаження зразка.

Для аналітичного опису динаміки робочого процесу установки були прийняті такі припущення: температура і в'язкість робочої рідини в гідросистемі та температура стисненого повітря в порожнинах 13, 15 вважається постійною; хвилювими процесами нехтуємо; продуктивність гідронасоса постійна; можливі витрати з гідросистеми та пневмосистеми



не враховуються; коефіцієнт стискування при тискові 0—3 МПа приймаємо рівним певному середньоінтегральному значенню, а при тискові більше ніж 3 МПа — надаємо постійне значення; коефіцієнт витрати крізь дроселюючу щілину клапана 31 постійний; час спрацьовування клапана 31 не враховуємо (перемикання відбувається рележно); тиск в порожнинах 6 і 21 рівний тиску в магістралі 2; зразок ґрунту в магістралі 2; зразок ґрунту 10 приймається ідеально-пружним лінійно-деформованим тілом (тіло Гука).

Робочий цикл розглянутого гідроприводу стабілометра можна умовно поділити на п'ять фаз: I — фаза підвищення тиску робочої рідини в напірній магістралі 2, а також зв'язаних з нею порожнинах 6, 21, 29 від величини  $p_r = p_{3л}$  до  $p_r = p_{го}$ , при якій починається переміщення штоку 20 із рамою 19 та поршнем 17 і деформація пружин 18 ресівера; II — фаза переміщення штоку 20 вниз із рухомими елементами рівера — рамою 19 та поршнем 17, деформація пружин 18, а також стиснення повітря в поршневій порожнині 13 і робочій камері 15 від величини  $p_{п} = p_{по}$  до заданої величини  $p_{п} = p_{п1}$ , при якій починається деформація зразка ґрунту 10, при подальшому зростанні тиску в гідросистемі до заданої величини  $p_r = p_{r1}$ ; III — робочій хід штока 6 вниз із рухомими елементами 7, 8 та 9, а також рухомих елементів ресівера 17, 19 із штоком 20, що приводить до навантаження зразка 10 та його деформації при подальшому зростанні тиску в гідросистемі до величини  $p_r = p_{r2}$ , та повітря в робочій камері 15 до величини  $p_{п} = p_{п2}$ ; IV — фаза холостого ходу робочих органів 6, 17 вверх та розвантаження зразка 10 внаслідок відриву від установного сідла і зміщення вверх клапана 31, що призводить до падіння тиску в гідросистемі до величини  $p_r = p_{r3}$ , та в порожнині 13 і камері 15 до величини  $p_{п} = p_{по}$ ; V — падіння тиску в гідросистемі до мінімальної величини  $p_r = p_{3л}$ , посадка клапана 31 на сідло.

Математична модель робочого циклу приводу стабілометра при динамічному навантаженні зразка для основних фаз — фаз робочого та холостого ходів — має вигляд:

фаза робочого ходу

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = p_r F_6 + p_{п} (F_8 - F_6) - K_1 \frac{dx}{dt} - c_{3п}^{вп} x - R_{тp1} \cdot \text{sign} \left( \frac{dx}{dt} \right); \quad (1)$$

$$M \frac{d^2 x'}{dt^2} = p_r F_{20} + p_{п} F_{17} - K_2 \frac{dx'}{dt} - c(x' + x'_{01}) - R_{тp2} \cdot \text{sign} \left( \frac{dx'}{dt} \right); \quad (2)$$

$$Q_H = \frac{dp_r}{dt} (W_r + F_6 \cdot x + F_{20} \cdot x') \beta + F_6 \frac{dx}{dt} + F_{20} \frac{dx'}{dt}; \quad (3)$$

$$m_{3п} \frac{d^2 u}{dt^2} = p_{п} - c_{3п}^{рп} u; \quad (4)$$

$$p_{п} = p_{п1} \cdot V_{п1}^n / [V_{п1} + \pi r_0^2 (x_0 + x) + 2 \pi \cdot x_0 (r_0 + u) - F_{17} \cdot x']^n; \quad (5)$$

фаза холостого ходу

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = - p_r F_6 - p_{п} (F_8 - F_6) - K_1 \frac{dx}{dt} - c_{3п}^{вп} x - R_{тp1} \cdot \text{sign} \left( \frac{dx}{dt} \right); \quad (6)$$

$$M \frac{d^2 x'}{dt^2} = - p_r F_{20} + p_{п} F_{17} - K_2 \frac{dx'}{dt} - c(x' + x'_0) - R_{тp2} \cdot \text{sign} \left( \frac{dx'}{dt} \right); \quad (7)$$

$$\mu f_{ш} \sqrt{2g(p_r - p_{3л})/\gamma} = Q_H + \frac{dp_r}{dt} (W_r + F_6 \cdot x + F_{20} \cdot x') \beta + F_6 \frac{dx}{dt} + F_{20} \frac{dx'}{dt}; \quad (8)$$

$$m_{3п} \frac{d^2 u}{dt^2} = - p_{п} + c_{3п}^{рп} u;$$

$$P_{\Pi} = P_{\Pi 2} \cdot V_{\Pi 2}^n / [V_{\Pi 2} + \pi r_0^2 (x_0 + x) + 2 \pi x_0 (r_0 + u) - F_{17} \cdot x']^n. \quad (9)$$

В рівняннях (1)–(9) прийняті наступні позначення:  $m$  — приведена маса штока 6, давача сили 7, штамп 8 і пористої вставки 9;  $M$  — приведена маса штока 20, поршня 17 та інших рухомих мас ресівера 14;  $K_1, K_2$  — коефіцієнти в'язкого тертя в рухомих з'єднаннях відповідно гідродомкрата 5 та ресівера 14;  $p_r$  — поточний тиск в порожнинах 4 та 21;  $R_{\text{тр}1}$  і  $R_{\text{тр}2}$  — сили сухого тертя в рухомих з'єднаннях відповідно гідродомкрата 5 та ресівера 14;  $W_r$  — об'єм гідросистеми;  $x, x'$  — переміщення приведених рухомих мас відповідно  $m$  та  $M$ ;  $C$  — сумарна жорсткість пружин 18;  $x'_0$  — попередня деформація пружин 18;  $m_{\text{зр}}$  — приведена маса зразка 10 і гумовій оболонки 11;  $F_6, F_8, F_{17}$  та  $F_{20}$  — відповідно площа поперечного перетину штока 6, штамп 8, поршня 17 та штока 20;  $p_{\Pi}$  — поточний тиск стисненого повітря в робочій камері 15 та поршневій порожнині 13, які визначаються із рівняння стану газу [2]:  $p_{\Pi} V_{\Pi}^n = \text{const}$ ;  $V_{\Pi}$  — початковий об'єм пневмосистеми установки на початок відповідної фази;  $n$  — показник політропи;  $\beta$  — коефіцієнт стисливості робочої рідини;  $u$  — поточна зміна радіуса зразка 10;  $c_{\text{зр}}^{\text{ГР}}$  і  $c_{\text{зр}}^{\text{ВР}}$  — відповідно жорсткість зразка ґрунту по горизонталі та вертикалі;  $r_0$  і  $x_0$  — відповідно початковий радіус та висота зразка ґрунту 10,  $Q_H$  — продуктивність гідронасоса;  $\mu$  — коефіцієнт витрат;  $f_{\text{щ}}$  — площа дроселюючої щілини;  $\gamma$  — питома вага робочої рідини;  $p_{\text{зл}}$  — тиск в зливній гідролінії 36.

Для знаходження поточної зміни радіуса  $u$  та поточного переміщення штамп 8  $x$  (деформації зразка 10) представимо зразок ґрунту у вигляді суцільного циліндра з радіусом  $r_0$  і висотою  $x_0$ , тоді зміна радіуса циліндра під дією зовнішніх навантажень

$$u = u_1 + u_2 + u_3, \quad (10)$$

де  $u_1$  — зміна радіуса від дії тиску повітря в робочій камері 15 на бокову поверхню циліндра;  $u_2$  — зміна радіуса циліндра від дії тиску повітря в робочій камері 15 на штамп 8;  $u_3$  — зміна радіуса циліндра від дії осової вертикальної сили навантаження  $N$ .

Для суцільного циліндра після перетворення формул Ламе [3]

$$u_1 = -\frac{P_{\Pi} \cdot r_0}{E_{\text{зр}}} (1 - 2\nu_{\text{зр}}), \quad (11)$$

де  $E_{\text{зр}}$  — модуль пружності матеріалу зразка;  $p_{\Pi}$  — поточний тиск повітря в робочій камері 15;  $\nu_{\text{зр}}$  — коефіцієнт Пуасона матеріалу зразка.

$u_2$  знайдемо із рівняння:

$$u_2 = -\nu_{\text{зр}} \frac{\sigma_x}{E_{\text{зр}}} r_0, \quad (12)$$

де  $\sigma_x = p_{\Pi}$  — осова напрута.

Осова сила  $N$  спричиняє зміну радіуса

$$u_3 = -\nu_{\text{зр}} \frac{N}{E_{\text{зр}} \pi r_0}. \quad (13)$$

Сумарна зміна радіуса із урахуванням рівнянь (11)–(13) буде мати вигляд:

$$u = -\frac{r_0}{E_{\text{зр}}} \left[ p_{\Pi} (1 - 2\nu_{\text{зр}}) + \nu_{\text{зр}} p_{\Pi} + \frac{\nu_{\text{зр}} N}{\pi r_0^2} \right] = -\frac{r_0}{E_{\text{зр}}} \left[ p_{\Pi} (1 - 2\nu_{\text{зр}}) + \nu_{\text{зр}} p_{\Pi} + \frac{\nu_{\text{зр}} P_{\Gamma} F_6}{\pi r_0^2} \right]. \quad (14)$$

Деформація циліндра уздовж вертикальної осі

$$x = x_1 + x_2, \quad (15)$$

де  $x_1$  — осова деформація, яка виникає від дії осової сили  $N$  та тиску повітря на штамп 8;  $x_2$  — осова деформація, що виникає від дії тиску повітря на бокову поверхню зразка.

Як відомо

$$x_1 = x_0 \cdot \xi'_x, \quad (16)$$



де  $\xi'_x$  — відносна вертикальна деформація циліндра від дії осьової вертикальної сили  $N$  та тиску повітря на штамп 8

$$\xi'_x = -\frac{\sigma_x}{E_{зр}} = -\frac{1}{E_{зр}} \left( \frac{N}{\pi r_0^2} + p_{\Pi} \right). \quad (17)$$

Після підстановки (17) в (16):

$$x_1 = -\frac{x_0}{E_{зр}} \left( \frac{N}{\pi r_0^2} + p_{\Pi} \right). \quad (18)$$

$$x_2 = -x_0 \cdot \xi_x'', \quad (19)$$

де  $\xi_x''$  — відносна вертикальна деформація від дії тиску повітря на бокову поверхню циліндра [3]:

$$\xi_x'' = -\frac{\nu_{зр}}{E_{зр}} (\sigma_r + \sigma_{\Theta}), \quad (20)$$

де  $\sigma_r$  — нормальна радіальна напрута циліндра, яка після перетворювання формул Ламе має вигляд:

$$\sigma_r = -p_{\Pi}; \quad (21)$$

$\sigma_{\Theta}$  — нормальна окружна напрута циліндра, що відповідно має вигляд:

$$\sigma_{\Theta} = -p_{\Pi}. \quad (22)$$

З урахуванням рівнянь (20)—(22) залежність (19) перетворюється в рівняння

$$x_2 = 2 x_0 \frac{\nu_{зр}}{E_{зр}} p_{\Pi}. \quad (23)$$

Тоді вертикальна деформація зразка

$$x = -\frac{x_0}{E_{зр}} \left[ \frac{p_r \cdot F_6}{\pi r_0^2} + p_{\Pi} (1 - 2\nu_{зр}) \right]. \quad (24)$$

Одержані залежності (14) і (24) підставляємо в систему рівнянь (1)—(9).

Системи рівнянь (1)—(9) являються нелінійними, а тому їх аналітичне розв'язання ускладнене. Розв'язання систем рівнянь для кожної фази робочого циклу приводу виконувалось числовими методами на ЕОМ за допомогою спеціально розробленої програми. За результатами розрахунків було проаналізовано вплив всіх складових елементів рівнянь на можливе збудження та існування незатухаючих періодичних коливань клапана 31, визначена амплітудо-частотна характеристика приводу, виявлені закономірності впливу конструктивних параметрів приводу на характеристики триосного навантаження та їх взаємозв'язок з останнім, а також розроблена інженерна методика проектного розрахунку основних робочих параметрів приводу установки.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. А. С. 164305 СССР. Установка для трехосных испытаний грунтов статическими и динамическими нагрузками / Г. В. Малеванский, А. Е. Мерзликин, И. В. Коц, А. А. Мальячук, В. В. Машык // Бюл. изобр. 1991. — № 14.
2. Банта 1. М. Гидропривод и гидропневматика. М.: Машиностроение, 1972. — 320 с.
3. Писаренко Г. С. Сопrotивление материалов. К.: Выща школа, 1977. — 665 с.

Кафедра газопостачання та інженерного забезпечення будівництва