

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Київський національний університет будівництва і архітектури

В. І. Терновий

ФІЗИЧНІ ОСНОВИ СПОСОБІВ УЩІЛЬНЕННЯ ҐРУНТУ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ
для студентів спеціалізації
«Промислове та цивільне будівництво»

Київ 2016

УДК 69.057

ББК

Т17

Рецензент Є. Г. Романушко, канд.. техн.. наук, професор

Затверджено на засіданні кафедри Технології будівельного виробництва, протокол № 6 від 7 грудня 2015 року.

Терновий В. І.

Т17 Фізичні основи способів ущільнення ґрунтів: Конспект лекцій. – 3-те вид., доповнене. - К.: КНУБА, 2016. – 56 с.

Розкрито фізичні основи ущільнення різних за видом та станом ґрунтів. Показано вплив вологості на здатність ущільнення ґрунтів різного виду в разі дії різного навантаження: статичного, статичного повторного, вібраційного, ударного, динамічного. Наведено загальні рекомендації до практичної реалізації способів та контролю якості ущільнення.

Призначено для студентів спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія», спеціалізації ПЦБ.

Видано у авторській редакції

УДК 69.057

ББК

Т17

© В.І. Терновий,

ЗМІСТ

Передмова.....	4
1. Різновиди ґрунтів, які необхідно ущільнювати.....	5
2. Фізичні характеристики щільності ґрунтів.....	6
3. Щільність ґрунтів за коефіцієнтом пористості.....	8
4. Щільність ґрунтів за коефіцієнтом ущільнення.....	10
5. Ущільнення сухого ґрунту.....	12
6. Ущільнення водонасиченого ґрунту.....	17
7. Небезпека ущільнення водонасиченого глинистого ґрунту.....	23
8. Небезпека ущільнення водонасиченого піщаного ґрунту.....	25
9. Залежність ущільнення від вологості ґрунту.....	29
10. Вібруущільнення пісків.....	31
11. Ущільнення ґрунту трамбуванням.....	34
12. Різновиди виробничих способів ущільнення.....	35
13. Рекомендації до практики ущільнення ґрунтів.....	39
14. Контроль якості ущільнення ґрунту.....	44
15. Польові методи визначення щільності ґрунту.....	45
16. Лабораторні методи визначення щільності ґрунту.....	48
Список рекомендованої літератури.....	55

Передмова

Ущільнення ґрунтів – один із важливих процесів земляних робіт. Ущільнення виконують під час підготовки ґрунтових основ для будівництва споруд; влаштування зворотних ґрунтових засипок; планування земляних площадок; влаштування ґрунтових основ для підлог в промислових будівлях. Якісне ущільнення ґрунту, в кінцевому результаті, визначає якість будівельної продукції в цілому.

Нерівномірне осідання покриття під'їзних доріг та мощень біля будівель, руйнування підземних інженерних мереж, вихід із ладу технологічного обладнання від осідання підлог в промислових будівлях та на промислових площадках свідчить про недосконалість ущільнення як насипних ґрунтів, такі ґрунтів природного залягання під час будівництва. Часто недоущільнення ґрунту є результатом не вірно вибраного способу ущільнення. Особливо часто це проявляється у перезволожених ґрунтах або за використання води у випадку ущільнення глинистих ґрунтів. Слід відмітити, що брак в ущільненні ґрунту – це, здебільшого, результат неналежного контролю за дотриманням технології ущільнення та за якістю виконання і приймання робіт.

Метою цього спецкурсу є розкриття фізичних основ ущільнення різних за видом і станом ґрунтів статичним, ступінчастозростаючим, багаторазовим, динамічним та ударним силовим навантженням. Це дасть можливість усвідомленого вибору та застосування способів ущільнення сухих, вологих, водонасичених, незв'язних (піщаних) та зв'язних (глинистих) ґрунтів.

Автор прагнув продемонструвати студентам на завершальному етапі навчання в Університеті, як при вирішенні практичних будівельних інженерних задач слід використовувати знання фундаментальних наук: фізики, теоретичної механіки, опору матеріалів, будівельної механіки, механіки ґрунтів, теорії пружності та ін.

Це видання призначене для студентів спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія» спеціалізації Промислове та цивільне будівництво, які вивчають спецкурс за вибором кафедри Технологія будівельного виробництва і може бути корисне фахівцям будівельного виробництва.

1. Різновиди ґрунтів, які необхідно ущільнювати

Влаштування земляних споруд, переміщення ґрунтів для укладання їх на новому місці, влаштування зворотних засипок супроводжується процесом ущільнення ґрунту. Влаштуванню основ будівель на слабких та лесових ґрунтах також передують їх ущільнення.

Ґрунти, які потребують ущільнення, розрізняють за видом та за станом. Поділ ґрунтів за видом на пісок, супісок, суглинок, глину обумовлений глибокими відмінностями в будівельних властивостях цих ґрунтів:

- пісок це – продукт механічного руйнування основної породи;
- глина це – продукт хімічного руйнування основної породи.

Найістотніші відмінності між піском і глиною наступні:

1. Часточки піску у формі гранул мають розмір від 2,0-1,0 мм до 0,002мм, а часточки глини мають форму пластинок, найбільший розмір яких не перевищують 0,002 мм, а їх товщина менше 0,0001мм.

2. Вологість: піску - 0 – 40 %, глини - 3 – 610 %.

3. Пісок має два стани в залежності від його вологості:

- крупнозернистий водонасичений пісок знаходиться у текучому стані, а сухий у сипкому стані;
- мілкий (колоїдальний) водонасичений пісок у разі висихання переходить з текучого стану в стан твердого тіла.

Глина має три стани: текучий, пластичний і твердий. Твердість глини іноді може досягати такого рівня, що для її розробки необхідно використовувати вибухові роботи. Пластичність це – зміна форми, при стисненні, без зміни об'єму.

4. Пісок при висиханні не має усадки. Глина при висиханні має велику усадку, аж до появи тріщин.

5. Пісок при навантаженні ущільнюється мало. Глина може ущільнюватись у широких межах.

6. Пісок ущільнюється під навантаженням швидко, глина повільно.

7. Пісок водопроникний у всіх станах, пластична глина практично водонепроникна.

В більшості випадків ґрунти містять в своєму складі і пісок і глину, а їх властивості мають проміжне положення між властивостями пісків і глин, а тому варто ознайомитись з особливостями ущільнення останніх.

Ґрунти, крім розподілу за видом (пісок, глина), розрізняють за станом. В залежності від ступеня заповнення пор водою (рис. 1) стан ґрунту може бути сухий, вологий, водонасичений.

Нижче розглянуті особливості ущільнення ґрунтів у крайніх станах: сухих та водонасичених. Особливості ущільнення ґрунтів, які знаходяться у вологому стані, мають ознаки як сухих, так і водонасичених, а в окремих випадках тільки їм притаманні властивості.

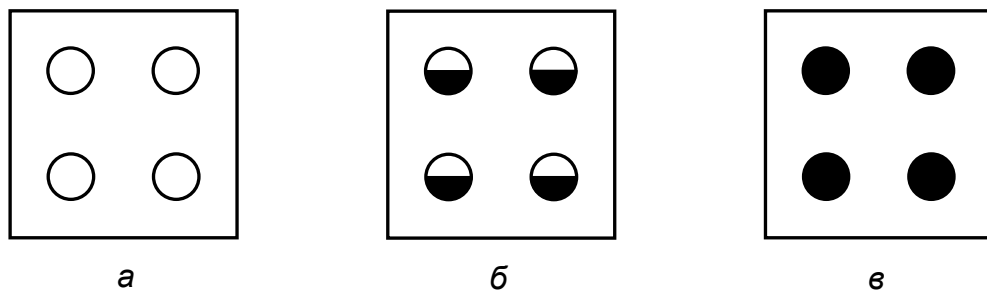


Рис. 1. Можливий стан ґрунту за кількістю води (чорний колір) в порах: а – сухий; б – вологий; в – водонасичений.

2. Фізичні характеристики щільності ґрунтів

Щільність ґрунту в сухому стані (ρ_d) в одинці об'єму визначається відношенням маси твердих часточок ґрунту в одинці об'єму (m) до одиниці об'єму ґрунту ($A + B$), де буквою (A) позначено об'єм мінеральної частини ґрунту в одинці об'єму, а буквою (B) – об'єм пор, і вираховується за формулою:

$$\rho_d = \frac{m}{A + B}; \quad (1)$$

Так як в одиниці об'єму сума об'ємів ($A + B$) рівна одиниці, то формула (1) прийме наступний вигляд:

$$\rho_d = m; \quad (2)$$

Пористість - відношення об'єму пор (В) до загального об'єму зразка (А + В), яку виражають у відсотках множенням на 100 %, вираховується за формулою, і також характеризує щільність ґрунту:

$$\Pi = \frac{B}{A + B} \times 100\% = B \%; \quad (3)$$

Для характеристики щільності ґрунту, крім того, користуються коефіцієнтом пористості.

Коефіцієнт пористості (ε) -це відношення об'єму пор до об'єму твердих часточок:

$$\varepsilon = \frac{B}{A}; \quad (4)$$

Коефіцієнт пористості може бути визначений за формулою:

$$\varepsilon = (1 + W) \frac{\rho_d}{\rho} - 1, \quad (5)$$

де W – вологість ґрунту; ρ – щільність ґрунту з вологістю; ρ_d – щільність ґрунту в сухому стані. Ці фізичні величини, які входять у формулу, визначаються лабораторними дослідженнями ґрунту.

Вологість (W)це – відношення маси води, яка знаходиться в порах одиниці об'єму ґрунту, до щільності ґрунту в сухому стані в одиниці об'єму:

$$W = \frac{m_w}{\rho_d}, \quad (6)$$

Щільність вологого ґрунтуяк відношення сумарної маси твердих часточок ґрунту та води в порах одиниці об'єму ґрунту до об'єму одиниці ґрунту (А + В), яке дорівнює одиниці, визначається за формулою:

$$\rho = \rho_d + m_w \quad (7)$$

3. Щільність ґрунтів за коефіцієнтом пористості

Досвід свідчить, що значення коефіцієнта пористості ґрунтів знаходиться в межах $0 < \varepsilon < 1$ для пісків та $0 < \varepsilon < 16$ для глин.

Ці положення проілюстровані механічними моделями на рисунку 2, де:

ε_{∞} - коефіцієнт пористості при найбільшій щільності ґрунту, що досягається максимальним навантаженням на ґрунт;

ε_0 - коефіцієнт пористості при найменшій щільності ґрунту, яку може мати ґрунт за відсутності навантаження на нього.

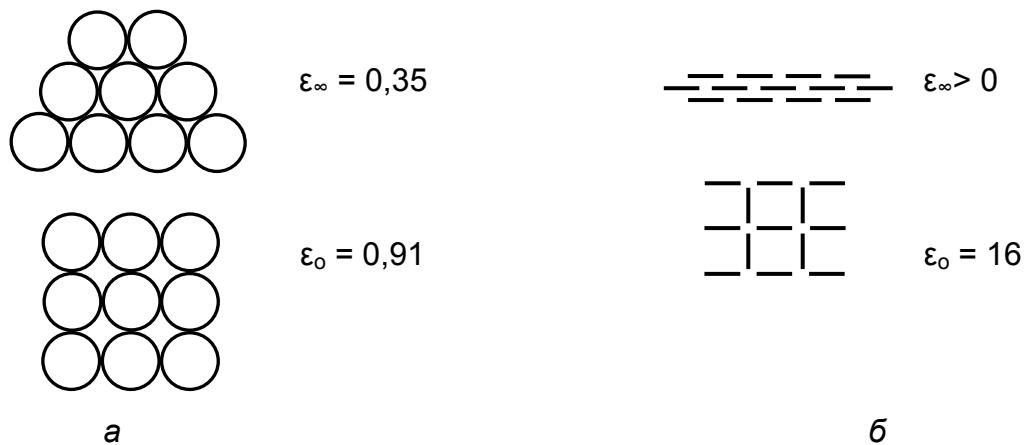


Рис. 2. Механічні моделі ґрунтів з максимальним та мінімальним ущільненням: а – пісок, б – глина

Значення ε_0 більше для дисперсних (з меншим розміром частинок) ґрунтів (рис. 3) тому, що поверхові сили частинок, які діють в місцях їх контакту і, напевне, носять молекулярний характер (це сили між плівками води і газів адсорбованих частинками ґрунтів) утримують рівні частинки ґрунту в початковому положенні.

Вплив цих, молекулярних, сил суттєвий в дисперсних ґрунтах так як величина цих сил пропорційна другій степені, а вага пропорційна третій степені лінійних розмірів частинок. Отже, зі зменшенням розмірів частинок ґрунту відносне значення поверхневих сил зростає.

Одне числове значення коефіцієнта пористості ще не дає повної інформації про щільність ґрунту. Наприклад, цемент з діаметром частинок від 0,01 до 0,02 мм при $\varepsilon_{\infty} = 1,22$ знаходиться в найщільнішому стані, а пісок з діаметром частинок від 0,05 до 0,5 мм при $\varepsilon_0 = 1,25$ рихлий. Отже, для ґрунтів з різною крупністю значення коефіцієнта пористості може означати в одному випадку, що ґрунт найщільніший, а у іншому – рихлий. Як видно, дуже важливо знати в якому відношенні знаходиться дійсний коефіцієнт пористості до його граничних значень.

Відповідь на це запитання дає метод оцінки щільності ґрунтів з допомогою коефіцієнта ущільнення.

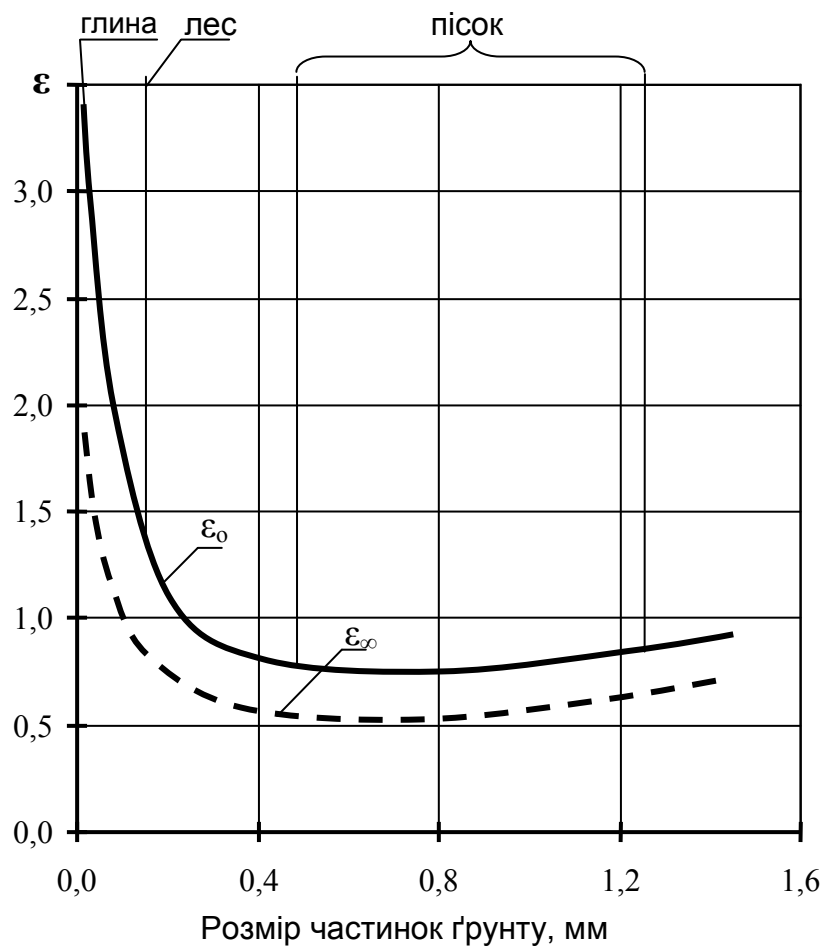


Рис. 3. Залежність коефіцієнта пористості від дисперсності ґрунту

4. Щільність ґрунтів за коефіцієнтом ущільнення

Ущільнення – це зміна коефіцієнта пористості від найбільш рихлого стану до визначеного:

$$\delta = \varepsilon_o - \varepsilon; \quad (8)$$

Максимально можливий інтервал змін коефіцієнта пористості при ущільненні ґрунту $\delta_{max.}$ визначається різницею граничних значень коефіцієнта пористості:

$$\delta_{max.} = \varepsilon_o - \varepsilon_{\infty}; \quad (9)$$

Для пісків значення ε_o і ε_{∞} (рис. 3) мало залежать від крупності зерен, то і значення максимально можливого ущільнення приблизно однакове, для всіх пісків.

Коефіцієнт ущільнення ($K_{ущ}$) показує відношення фактичної зміни коефіцієнта пористості до його максимально можливої зміни для даного ґрунту і характеризує ступінь ущільнення ґрунту:

$$K_{ущ} = \frac{\delta}{\delta_{max.}} = \frac{\varepsilon_o - \varepsilon}{\varepsilon_o - \varepsilon_{\infty}}; \quad (10)$$

Коефіцієнт ущільнення змінюється від 0 до 1. Якщо він рівний одиниці, то ґрунт знаходиться у найщільнішому стані ($\varepsilon = \varepsilon_{\infty}$), а якщо він рівний нулю, то ґрунт має найбільш рихлу структуру ($\varepsilon = \varepsilon_o$).

В залежності від значення коефіцієнта ущільнення піски ідентифікують як:

$$\text{рихлі } 0 < D < 0,33; \quad (11)$$

$$\text{середньої щільності } 0,33 < D < 0,67; \quad (12)$$

$$\text{щільні } 0,67 < D < 1; \quad (13)$$

Коефіцієнт рихлості (K_p) – величина обернена коефіцієнту ущільнення також, інколи, використовується у будівельній практиці. Його визначають за формулою (14):

$$K_p = \frac{\varepsilon - \varepsilon_\infty}{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty} \quad (14)$$

$$\text{або } K_p = 1 - K_{уц} \quad (15)$$

У будівельній практиці щільність ґрунту зручно задавати натуральним значенням показника щільності ґрунту у сухому стані, тобто масою сухої мінеральної частини ґрунту у одиниці об'єму (г/см^3).

Коефіцієнт ущільнення як відношення досягнутої щільності ґрунту в сухому стані до максимально можливої щільності ґрунту в сухому стані,

Максимально можливу щільність конкретного ґрунту визначають за результатами випробувань в спеціальному приладі стандартного ущільнення за методикою ГОСТ 22733-77.

Прилад стандартного ущільнення - це сталевий циліндричний місткість, внутрішній діаметр і висота якої відповідно рівні 100 мм і 127 мм, а її об'єм рівний одному кубічному дециметру (1000 см^3). До цієї місткості виготовлена спеціальна трамбівка, що має круглий штамп (плиту) діаметром 100 мм, в центрі якого перпендикулярно до поверхні штампа укріплений з однієї сторони стрижень. На стрижень одягають, з можливістю рухатись, гирю вагою 2,5 кг з отвором в центрі.

В місткості приладу стандартного ущільнення пошарово, в три шари, описаною вище, спеціальною трамбівкою ущільнюють ґрунт.

У циліндр закладають шар ґрунту трохи вище третини висоти, поверхню ґрунту розрівнюють і на неї поміщають штамп трамбівки. Стрижень трамбівки підтримують у вертикальному положенні однією рукою, а іншою – підіймають гирю і скидають її на штамп з висоти 30 см. Таку операцію повторюють тричі. По

кожному шару з незв'язних ґрунтів наносять 25 ударів та 40, якщо ґрунт зв'язний.

Після ущільнення ґрунту у приладі лабораторним методом визначають його щільність у сухому стані.

Щільність ґрунту в приладі стандартного ущільнення визначають декілька разів при зміні вологості ґрунту через 1-2 %. Максимальне значення щільності ґрунту в сухому стані і є максимально можливою щільністю цього ґрунту.

Проектне значення щільності співвідноситься до максимально можливої щільності певного ґрунту через унормований коефіцієнт ущільнення.

Будівельними нормами встановлено значення коефіцієнта ущільнення для різних ґрунтів і споруд. Для відповідальних земляних споруд цей коефіцієнт нормується в межах 0,95 – 1,0.

Ту щільність, яку необхідно забезпечити в інженерних земляних спорудах, тобто необхідну щільність, визначають як добуток максимальної можливої щільності даного ґрунту і коефіцієнта ущільнення наведеного у нормах проектування земляних споруд.

Вологість, при якій досягнута максимальна щільність ґрунту названа оптимальною і буде розглянута далі.

5. Ущільнення сухого ґрунту

Прості експерименти, виконані дослідниками в XIX ст. показали, що після ходьби людини по рихлому ґрунту на ньому залишаються сліди від ніг, або залишкові (пластичні) деформації.

Вчений Й. Фенель з допомогою оптичних приладів слідкував за поведінкою забитого в щільний ґрунт кілка, біля якого ходили люди. З наближенням людини до кілка останній опускався вниз, а при віддаленні людини від кілка він піднімався до попереднього рівня. Цим учений визначив, що ґрунт мав пружні деформації. Він також встановив, що чим більше злежався (ущільнився природним шляхом) ґрунт тим менше в ньому пластичних деформацій. На деякій глибині від поверхні землі, де ґрунт значно ущільнений, залишкові деформації зовсім зникають, а пружні залишаються, про що свідчить звукопровідність ґрунту та його здатність передавати сейсмічні коливання.

Отже ґрунт, як всяке тверде тіло, при дії на нього зовнішніх сил стискається. Деформація стиснення, як і у всіх твердих тіл, складається із пружних та пластичних деформацій. Величина пружних деформацій свідчить про ступінь пружності ґрунту, а величина пластичних деформацій, головним чином, – про ступінь ущільненості і, в деякій мірі, про ступінь випирання ґрунтів в боки. Вивчення закономірностей утворення та величини пластичних деформацій надзвичайно важливо тому, що це, по суті, осідання споруд.

Вертикальна залишкова деформація залежить, головним чином, від ступеня ущільнення ґрунту. Ущільнення ґрунту в будівництві ведуть масивом, в якому ущільнений ґрунт оточений з боків ґрунтовою відсипкою, а тому є можливість моделювати ущільнення ґрунту компресійною кривою, яку визначають в приладах одноосного стиснення (в одометрах).

Одометричне (без можливості розширення) стиснення ґрунту призводить до зміни пористості (до ущільнення) ґрунту. На рисунку 4 приведено графіки зміни коефіцієнта пористості (компресійні криві) глинистих ґрунтів порушеної структури (глин, суглинків та супісків) при їх одометричному стисненні напруженням від 0,0 до 0,4 МПа, а на рисунку 5 типовий графік зміни коефіцієнта пористості піску (компресійна крива) при його одометричному стисненні напруженнями від 0,0 до 1,6 МПа. З порівнювання кривих (рис. 4) витікає, що в глині коефіцієнт пористості змінюється у великому інтервалі значень, отже найбільше ущільнюється глина, менше – супісок, а найменше пісок (рис. 5).

Рисунок 5 свідчить, що пісок інтенсивно ущільнюється в початковому інтервалі напружень, а в подальшому практично не ущільнюється. Із механіки ґрунтів відомо, що α – коефіцієнт ущільнення при зміні одометричних напружень від 0,1 до 0,5 МПа можна вирахувати за формулою (16) і в середньому він рівний 0,01.

$$\alpha = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{P_1 - P_2} \quad (16)$$

Зміна (зменшення) коефіцієнта пористості ґрунту при його стисненні відбувається за двох причин:

1. Ґрунт при навантаженні зазнає пружних деформацій, які не значні в пісках тому, що мілкі і пилюваті обломки основної породи мало стискувані і найбільші в глинах тому, що лускоподібні пластинки глини можуть значно пружно згинатися.

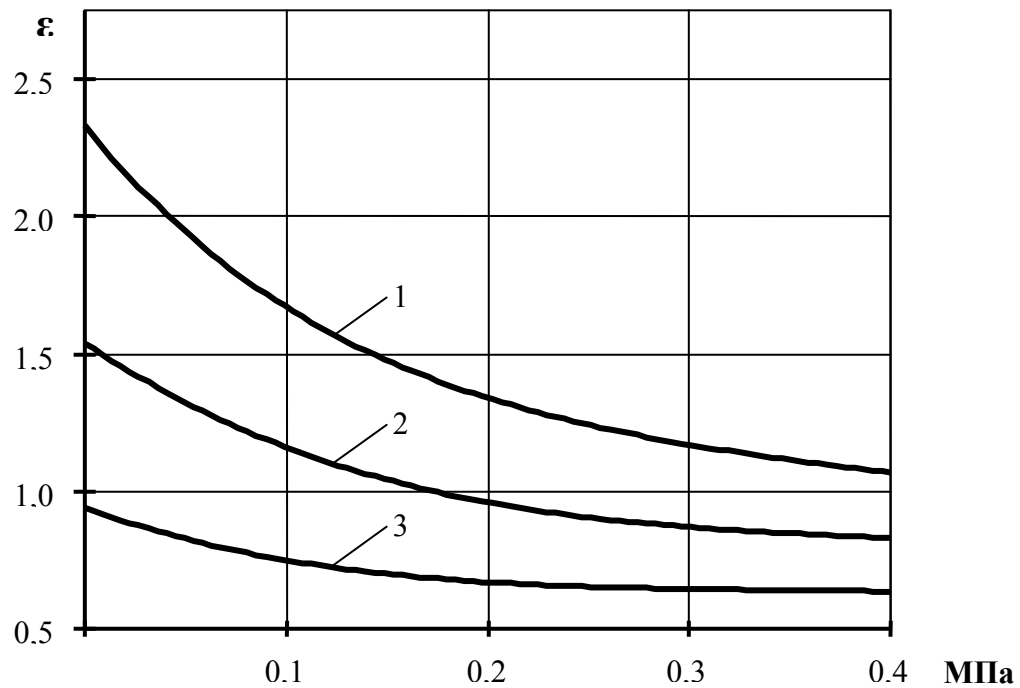


Рис. 4. Компресійні криві глинистих ґрунтів:
1 – глина; 2 – суглинок; 3 – супісок

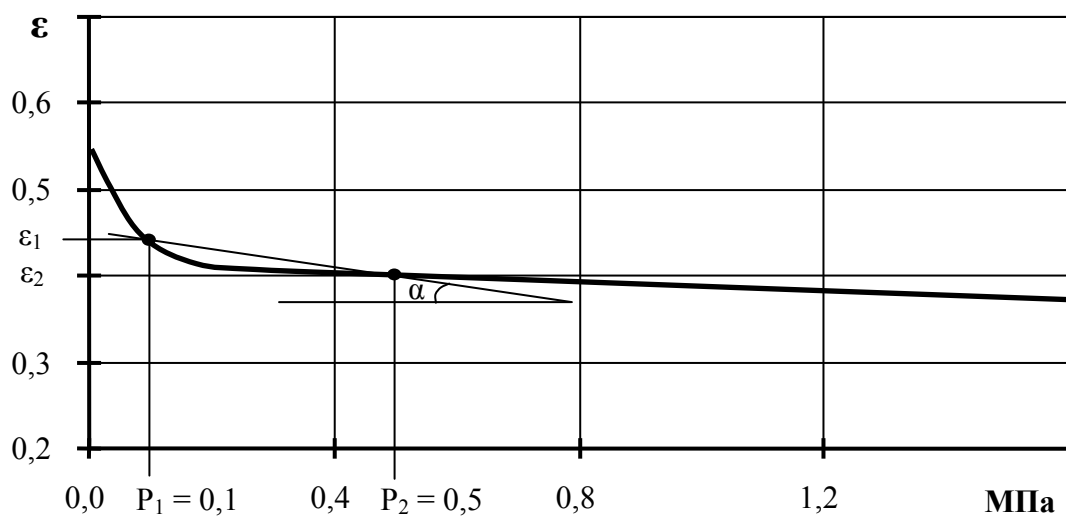


Рис. 5. Компресійна крива піщаного ґрунту

2. Ґрунти під навантаженням зазнають пластичних деформацій. Піски під навантаженням переупаковуються, займаючи менший об'єм при не значних деформаціях. Глини переупаковуються зі зломом деяких лусочок при значних деформаціях. Ці деформації і зміни структури ґрунту, які відбуваються таким чином - незворотні.

На рисунку 6 наведено графік залежності деформацій ґрунту від його багаторазового навантаження та розвантаження.

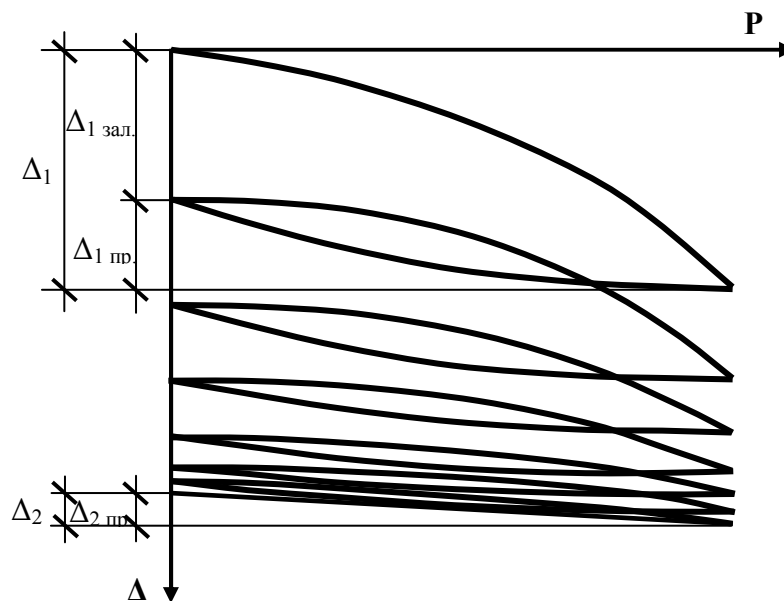


Рис. 6. Графік деформацій ґрунту від багаторазового навантаження:
 P — навантаження; Δ — деформація; $\Delta_{\text{зал.}}$ — залишкова деформація;
 $\Delta_{\text{пр.}}$ — пружна деформація

З графіка видно, що при першому навантаженні деформації зростають в нелінійній залежності від навантаження, а при розвантаженні ґрунту деформація не тільки зупиняється, а й зменшується, тобто поверхня ґрунту піднімається за рахунок пружних деформацій, але до свого початкового положення не доходить, і залишається залишкова деформація

Повторне навантаження ґрунту знову викликає деформацію, а при розвантаженні знову проявляються як пружні, так і залишкові деформації.

Видно, що з наростанням циклів навантаження, як залишкові, так і пружні деформації зменшуються в абсолютній величині, причому залишкові деформації, в кінці кінців, зовсім зникають, отже, ґрунт досяг своєї максимальної, при цьому навантажені, щільності.

Пружні деформації при ущільненні ґрунту декількома циклами навантаження зменшуються, а це значить, що те ж саме навантаження створює меншу пружну деформацію – отже, модуль пружної деформації ґрунту зростає разом зі збільшенням щільності ґрунту.

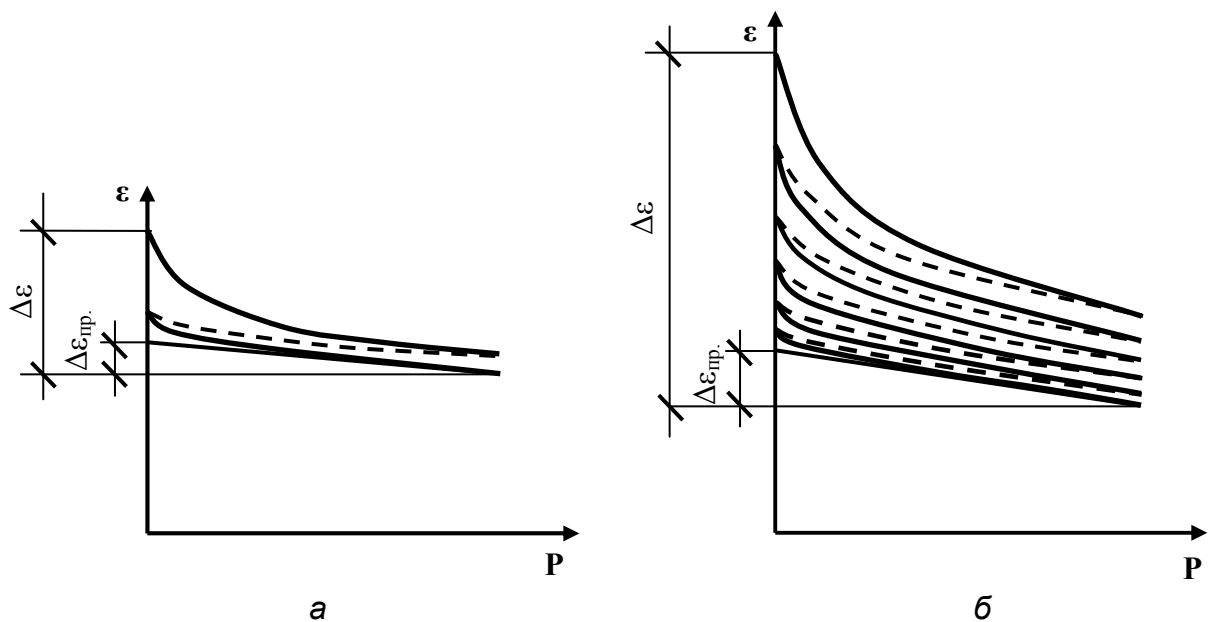


Рис. 7. Графік зміни коефіцієнтів пористості піску (а) та глини (б) при багаторазовому навантаженні: $\Delta \varepsilon$ – зміна коефіцієнта пористості; $\Delta \varepsilon_{\text{пр.}}$ – зміна коефіцієнта пористості за рахунок пружних деформацій.

З графіка також видно, що ґрунт при початкових навантаженнях стискується (ущільнюється), але з часом, коли ущільнення не відбувається, то ґрунт працює під навантаженням як пружне тіло: пористість зменшується і це зменшення буває зникаюче (пружне) і залишкове (пластичне), що слід зв'язувати з пружними і пластичними деформаціями.

При порівнянні компресійних кривих багаторазового навантаження пісків і глин (рис.7) видно, що:

1. Для досягнення максимального ущільнення однаковим навантаженням в глинах необхідно створити більше (іноді значно більше) повторних навантажень ніж у пісках.

2. Зменшення значень коефіцієнта пористості від початкових навантажень більші, ніж від наступних навантажень.

Зменшення значень коефіцієнта пористості за рахунок як пластичних, так і пружних деформацій при досягненні ґрунтами максимального ущільнення більше в глинах ніж у пісках:

$$\Delta \varepsilon_n < \Delta \varepsilon_z; \quad (16)$$

6. Ущільнення водонасиченого ґрунту

Водонасичений ґрунт – це *ґрунтова маса*, яка складається із ґрунтового скелета та ґрунтової води. Якщо металевий стакан (рис. 8) заповнити ґрунтовою масою, щільно закрити його притертим поршнем з отвором, який щільно закритий і на поршень зверху покласти гирю вагою, наприклад, 20 кг, то він не осяде.

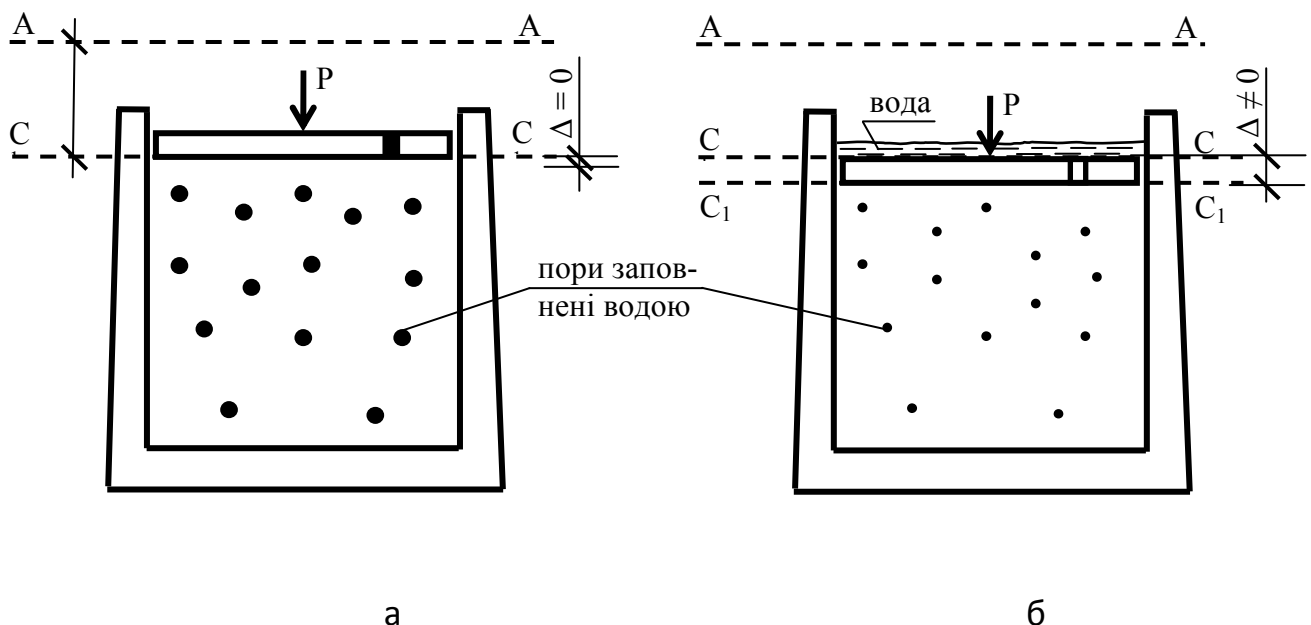


Рис. 8. Стиснення ґрунтової маси у замкнутому об'ємі: а – отвір у поршні закрито, б – отвір у поршні відкрито

Це можна пояснити тим, що наявність деформацій призводить до зменшення об'єму пор, тобто вода в порах повинна стискатися, а, як відомо, вода практично не стискається (коефіцієнт об'ємного стиснення води рівний $0,000047 \text{ см}^3/\text{кг}$, а мінеральних часточок ґрунту – $0,000006 \text{ см}^3/\text{кг}$) і ґрунт під всебічним стисненням водою також практично не стискається. Отже, ґрунтова маса не стискається і поршень не осіде.

Якщо у поршні відкрити отвір, то під дією тиску, який створює гиря поршень почне осідати, вода буде крізь отвір в поршні фільтруватись на поверхню, а ґрунт буде ущільнюватись. Через деякий час цей процес зупиниться. Цей процес зручно проаналізувати на механічній моделі (рис. 9), в

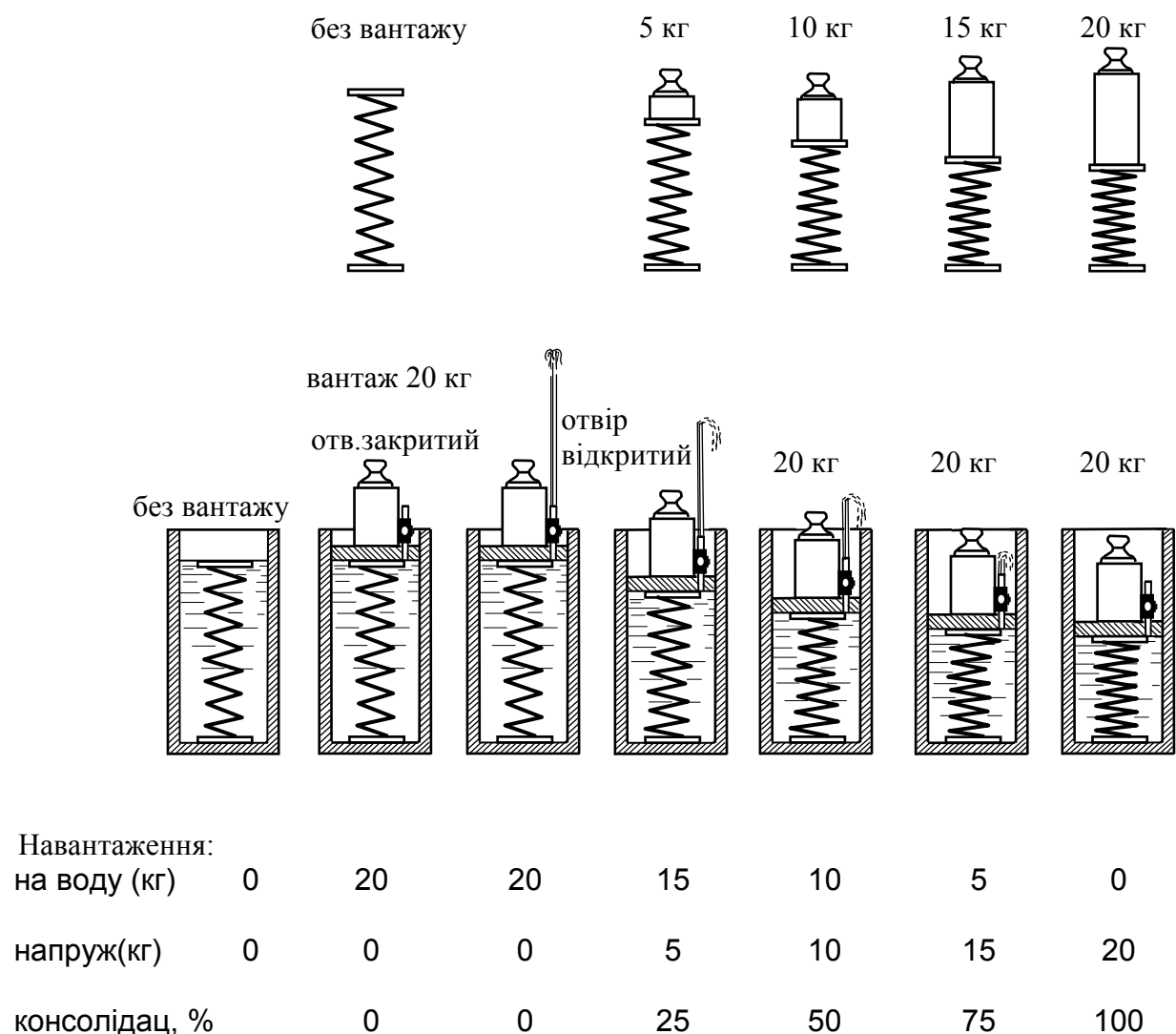


Рис. 9. Механічна модель стиснення ґрунтової маси в замкненому об'ємі

якій металевий стакан замінено металевим циліндром, ґрунтову масу імітує металева пружина (ґрунтовий скелет) у водному середовищі (вода в порах ґрунтового скелета).

Якщо кран відкрити, то вода під впливом напору у вигляді фонтану буде виходити із-під поршня, внаслідок чого її рівень буде поступово знижуватись, а пружина буде стискуватись і сприймати на себе діюче навантаження.

Процес передачі водою навантаження пружині відбувається до тих пір поки вода буде витікати з-під поршня. Тривалість же витікання залежить від пропускної здатності отвору, що імітує фільтраційну здатність ґрунту. На рис. 9 внизу цифрами показано процес поступової передачі навантаження від води пружині. Так як із верхньої частини рис. 9 відомо, яке навантаження може сприймати пружина при певному її осіданні, то, звідси виходить, що знаючи яке осідання має пружина, можна визначити, яке навантаження сприймає пружина в певний момент.

Отже, при стисненні водонасиченого ґрунту:

1. Розпочинається динамічний процес передачі початкового тиску з води на скелет ґрунту.
2. Об'єм твердого скелета як до стиснення, так і після стиснення залишається незмінним і деформації відбуваються за рахунок зближення твердих часточок скелета, тобто за рахунок зменшення пор.
3. Швидкість ущільнення водонасиченого ґрунту залежить від швидкості фільтрації води із пор об'єму ґрунту, який ущільнюють. Чим більший коефіцієнт фільтрації ґрунту, тим швидше йде процес ущільнення.

Фільтрація води в ґрунті відбувається за законом Дарсі, який стверджує, що швидкість руху води в ґрунті пропорційна градієнту напору:

$$q = k \cdot I; \quad (17)$$

де I - градієнт напору (гідрравлічний ухил); k – коефіцієнт фільтрації, який виражає ступінь водопроникності ґрунту і залежить від виду ґрунту. При градієнті напору $I = 1$ коефіцієнт фільтрації рівний швидкості фільтрації.

Коефіцієнт фільтрації залежить від розміру пор в ґрунті. Зі зменшенням пор опір руху води в ґрунті значно збільшується. Це можна продемонструвати наступним прикладом.

Розглянемо два водопроводи: перший із однієї труби великого діаметра(D) і площею отвору (F), другий із n трубок малого діаметра d і з такою ж сумарною площею отворів (F). Опір руху води в трубах пропорційний поверхні змоченого периметра. У першому водопроводі змочений периметр P_D буде рівний $P_D = \pi \cdot D$, а у другому – $P_d = n \cdot \pi \cdot d$. Так як площі отворів рівні, то:

$$\frac{\pi D^2}{4} = \frac{n \cdot \pi \cdot d^2}{4} \text{ або } D = d \cdot \sqrt{n}; \quad (18)$$

А тому, відношення змочених периметрів рівне:

$$\frac{n \cdot \pi \cdot d}{n \cdot D} = \frac{n \cdot d}{\sqrt{n} \cdot d} = \sqrt{n}; \quad (19)$$

$$\text{або } \frac{P_d}{P_D} = \sqrt{n} \quad (20)$$

У другому водопроводі змочений периметр $\sqrt{n}$ раз більше ніж у першому, а тому опір руху води буде також більший.

Особливості руху води в порах ґрунту подібні руху її в трубах, а тому, висновки зроблені нами для труб можна застосувати для ґрунтів, тобто, опір руху води в ґрунті зростає зі зменшенням розміру пор. Так як пори в глині значно менші ніж в піску, то проникнення води в глині в мільйон раз менше ніж в піску.

Коефіцієнт фільтрації ґрунтів, які ми розглядаємо рівний:

- в пісках $0,25 \div 0,01$ см/с;
- в глинах $0,06 \cdot 10^{-8} \div 0,03 \cdot 10^{-8}$ см /с, або 1- 0,1см за рік.

Градiєнт напору визначається поділом різниці гiдравлiчних напорiв в пунктах, мiж якими вiдбувається фiльтрацiя, на вiдстань мiж цими пунктами за, формулою:

$$I = \frac{H_1 - H_2}{L} \quad (22)$$

Градiєнт напору води звичайно вище в глинах, ніж в пісках (рис.10):

$$I_r > I_n \quad (23)$$

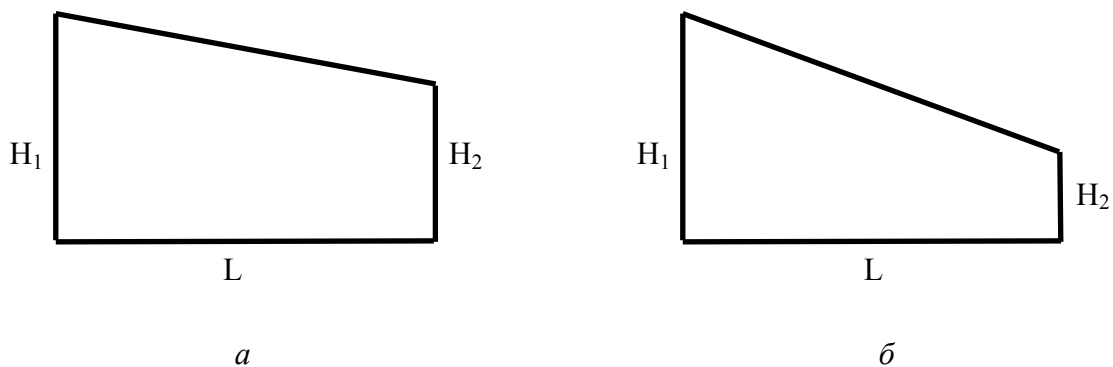


Рис. 10. Градiєнт напору ґрунтової води: *а* – в пісках; *б* – в глинах

Гiдродинамiчний тиск водина ґрунт виникає при її фiльтрацiї у ґрунті. Розглянемо на рис. 11 рух води, яка фiльтрується через ґрунт від точки A_1 до точки A_2 , на відстані L , через поперечний переріз ω .

В точці A_1 гiдравлiчний напір рiвний H_1 , а в точці A_2 – H_2 , тоді п'єзометричні висоти в т.1 і 2 будуть рiвні: $h_1 = H_1 - Z_1$; $h_2 = H_2 - Z_2$.

У фiзичних задачах з динамiки всі сили, що діють на виділений об'єм, повинні врівноважуватися силами iнерцiї. Визначимо ці сили користуючись розрахунковою схемою приведеною на рисунку 11 і спроектуємо їх на вісь циліндра A_1A_2

Сили позначені на розрахунковій схемі наступні:

– тиск стовпа води на основу в точці A1:

$$P_1 = \rho_w \cdot h_1 \cdot \omega; \quad (24)$$

– тиск стовпа води на основу в точці A2:(26)

$$P_2 = \rho_w \cdot h_2 \cdot \omega; \quad (25)$$

- проекція ваги води довжиною l , перерізом ω :

$$P_3 = \rho_w \cdot l \cdot \omega \cdot \cos \alpha \quad (26)$$

- сила тертя об ґрунт при питомому терті на одиницю об'єму T :

$$P_4 = T \cdot l \cdot \omega \quad (27)$$

- сила інерції рівна масі води (m) помноженій на прискорення (a):

$$P_5 = m \cdot a \quad (28)$$

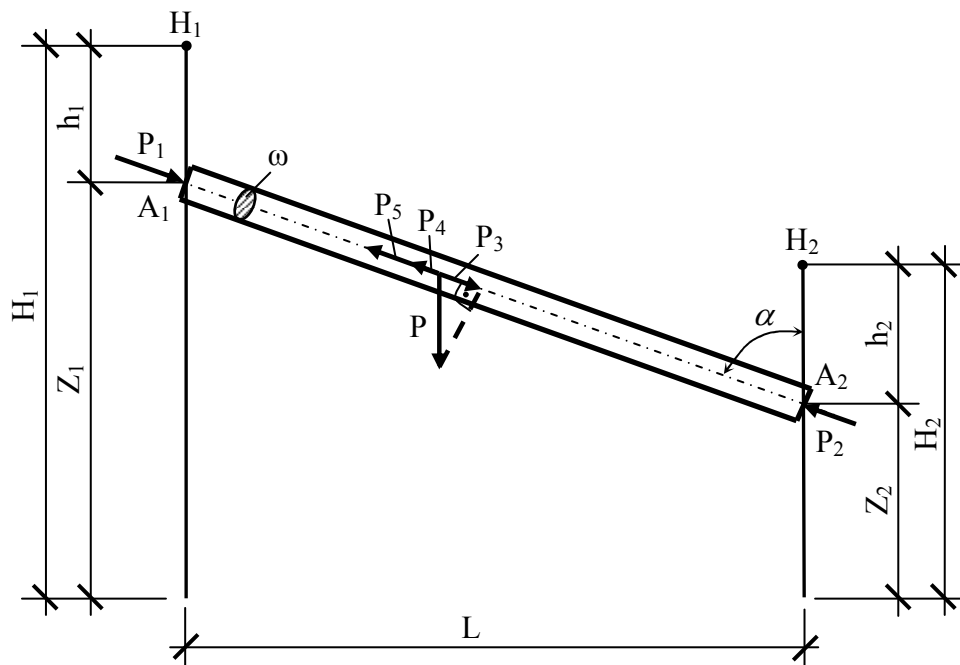


Рис. 11. Розрахункова схема гідродинамічного тиску

Спроектувавши всі сили на вісь об'єму, склавши рівняння рівноваги сил і підставивши у рівняння значення $m, \alpha, \cos \alpha$ отримаємо значення питомого тертя потоку води об ґрунт в одиниці об'єму:

$$T = \frac{\rho_w}{q} \cdot \frac{dq}{dt} - \rho_w \cdot I \quad (29)$$

Воду гальмує ґрунт, але можна дивитися і навпаки, що вода давить на ґрунт – це сила $D = -T$ і називається гідродинамічний тиск.

$$D = \rho_w \cdot I - \frac{\rho_w}{q} \cdot \frac{dq}{dt}; \quad (30)$$

Так як, швидкість q і прискорення $\frac{dq}{dt}$ при фільтрації води крізь ґрунт надзвичайно малі порівняно з градієнтом напору, то гідродинамічний тиск рівний градієнту напору:

$$D = \rho_w \cdot I \text{ або } D = I \quad (31)$$

Гідродинамічний тиск майже не залежить від швидкості фільтрації, а залежить від градієнта напору, який, як було показано, у глинах вищий, ніж у пісках.

7. Небезпека ущільнення водонасиченого глинистого ґрунту

Допустимо, що до поверхні ОО водонасиченого глинистого ґрунту (рис.12) прикладене швидке навантаження P .

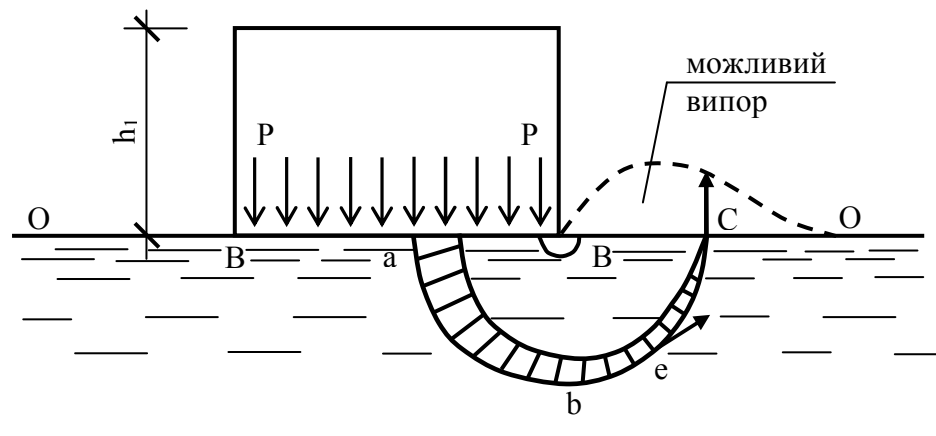


Рис. 12. Випор водонасиченого глинистого ґрунту при швидкому навантаженні

В початковий момент часу навантаження передається на воду і створює в ній напруження в площині ВВ рівне напору $h_1 = \frac{P}{\rho}$.

Від площини ВВ до не завантаженої поверхні ОО починається інтенсивна фільтрація води під напором h_1 . Напрямок потоків фільтрації методами теорії фільтрації можуть бути визначені математично досить точно: їх вид має зігнуту криву із середньою точкою в наприклад (abeC). Вздовж лінії (abeC) виникає гідродинамічний тиск на ґрунтовий скелет, цей тиск намагається вирвати ґрунт

із основи. Особливо несприятливо він діє на ділянці (eC). Величина гідродинамічного тиску умовно прийнята рівномірно падаючою вздовж лінії (abeC) довжиною L, а тому градієнт напору і гідродинамічний тиск можна визначити за формулою:

$$D = P \cdot L \cdot L_1 \quad (32)$$

де: L – довжина кривої abeC; L_1 - довжина кривої eC.

При великих P і малих L гідродинамічний тиск (D) може зрівнятися з допустимим напруженням зсуву $[\tau]$ для даного ґрунту і основа може бути зруйнованою – відбудеться випор ґрунту на поверхню.

Якщо навантаження P прикладати сходами з витримкою кожної сходинок в часі поки з пор, завдяки створеному напору, відфільтрує вода, зміниться структура ґрунту і впаде гідродинамічний тиск до нуля, то можна уникнути випору ґрунту на поверхню.

Наприклад, якщо прикласти навантаження на основу рівне 0,9 МПа, то при довжині фільтраційного потоку (abeC) до поверхні рівному 3м, а від небезпечної точки е до поверхні 1м гідродинамічний тиск в точці e буде рівний: $D = 0,9/3 = 0,3$ МПа.

Якщо навантаження прикладати в три сходинки (перша – 0,3 МПа, друга – 0,6 МПа, третя – 0,9 МПа то гідродинамічний тиск в точці *e* від першої сходинки навантаження буде $D = 0,3/3 = 0,1$ МПа, тобто зменшиться в три рази, а таке напруження ґрунт, мабуть, може сприйняти без руйнування і з часом ущільниться для сприйняття наступної сходинки навантаження рівній 0,6 МПа з гідродинамічним тиском в точці *e* $D = 0,6/3 = 0,2$ МПа, і при третій сходинці навантаження рівній 0,9 МПа з гідродинамічним тиском в точці *e* = 0,3 МПа.

Навантаження на водонасичений глинистий слабкий ґрунт для його ущільнення зручно створювати відсипанням будь-якого ґрунту підстеленого шаром крупного піску або щебеню товщиною не менше 0,8 м або тимчасового складування піску, щебенястих матеріалів, будівельних конструкцій. У цьому випадку напрямок фільтрації води із ґрунту буде направлений найкоротшим шляхом в пісок чи щебінь (рис. 13).

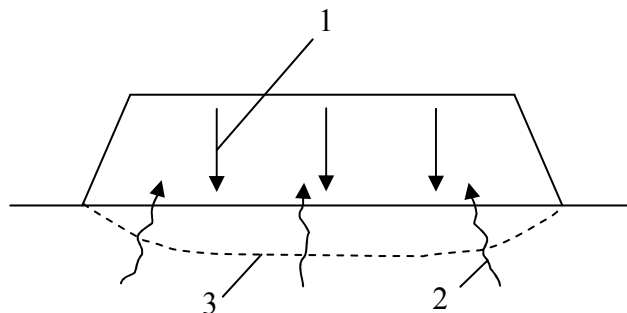


Рис. 13. Ущільнення водонасиченого глинистого ґрунту привантаженням: 1 – тиск відсипки фільтруючим ґрунтом (пісок, щебінь); 2 – напрямок фільтрації ґрунтової води; 3 – лінія осідання поверхні ґрунту.

Крупний пісок, як і щебінь, не чинить опору фільтрації, в ньому напір води відсутній, тиск води в крупному піску завжди гідростатичний. Гідродинамічний тиск, у цьому випадку, не виштовхує ґрунт з основи в бокову сторону, а притискує до дренажного шару привантаження, що сприяє стійкості основи.

8. Небезпека ущільнення водонасиченого піщаного ґрунту.

Стійкість піщаної ґрунтової маси із жорстким скелетом (частинки ґрунту дотикаються одна з одною) обумовлена тертям між частинками, яке створене або зовнішнім навантаженням або поверхневим натягуванням капілярних і плівкових вод.

Якщо в гумовий мішок насипати пісок і мішок зав'язати так, щоб було місце для повітря, то мішок буде схожий на подушку з сипким наповненням. Якщо із мішка відкачати повітря вакуумним насосом, то мішок з піском буде схожий на камінь. Цей дослід показує, як зовнішнє обтиснення піску атмосферним тиском забезпечує йому стійкість.

Стійкість вертикальних вологих піщаних відкосів, які осипаються і зсуваються, як тільки пісок висихає, обумовлена поверхневим натягуванням капілярних і плівкових вод еквівалентним зовнішньому обтисненню. Отже, причину втрати стійкості в піщаній ґрунтовій масі потрібно шукати в послабленні цього взаємного тиску в системі ґрунтового скелета, яке забезпечує сили тертя в ньому.

Розглянемо механічну модель піщаної ґрунтової маси представлену сферами (рис. 14) у стані максимальної і мінімальної її пористості. Ущільнення навантаженням рихлого (рис. 14, а) водонасиченого піску, як всякої ґрунтової маси, супроводжується відтоком води із пор та зміною структури піщаного скелета від рихлого стану до ущільненого стану (рис. 14, б).

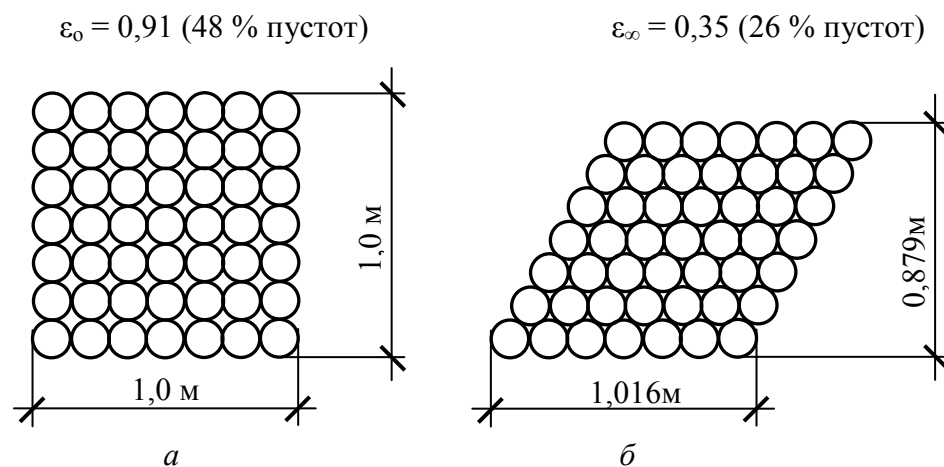


Рис. 14. Механічна модель водонасиченого піщаного ґрунту:
а – рихлий; б – максимально щільний.

Перехід піску від рихлого до ущільненого положення триває короткий, але певний час, протягом якого відбудеться фільтрація води із ґрунтової маси з одночасною зміною структури ґрунту.

На рисунку 15 показано фрагмент структури водонасиченого піску у різні моменти часу, протягом якого ґрунт ущільнюється. Як видно, в проміжному

положенні переходу від рихлого до щільного стану між шарами, що імітують піщинки контакту не має. Усі шари «висять» у воді, отже, піщана ґрунтова маса на якусь мить знаходиться в стані суспензії. Це «важка вода», в якій тонуть більш важкі тіла і спливають легші, ніж важить витіснений ними об'єм суспензії. У такій ситуації можуть статись не прогнозовані техногенні випадки.

Для підтвердження вищесказаного розглянемо загальновідомий дослід з водонасиченим рихлим мілким піском, який був виконаний біля 150 років тому європейськими вченими.

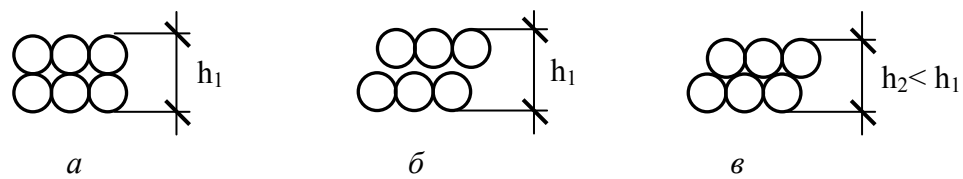


Рис. 15. Етапи переходу піщаного обводненого ґрунту від нестійкого до стійкого положення: *а* – нестійке положення; *б* – проміжне положення (суспензія); *в* – стійке положення

В акваріум наповнений водою, дуже обережно (як солять страву) і (рис. 16) повільно насипали мілкий пісок. Вода по мірі наповнення акваріуму піском переливалась через край. Коли рівень піску та води зрівнялись з верхнім краєм

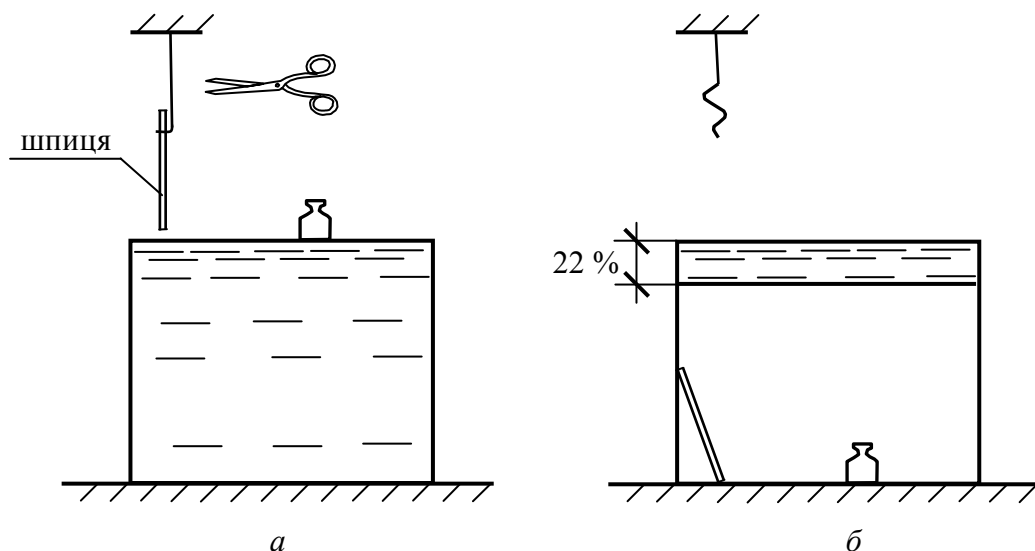


Рис. 16. Демонстрація гідродинамічного розрідження водонасиченого рихлого піску дослідом.

акваріуму, то на пісок, в центрі, дуже обережно поклали невеличку гирку. Над акваріумом, подальше від гирки, на висоті 10 см від піску повісили на нитці в'язальну шпичку.

Після того, як шпичка перестала гойдатися нитку перерізали ножицями. Як тільки шпичка вдарила своїм нижнім кінцем по ґрунтовій масі, гирка і шпичка миттєво зникли, а ґрунтова маса розшарувалась на піщаний масив товщиною біля 78 % висоти акваріума під шаром води з поверхнею на рівні верху акваріуму.

Вичерпавши воду та пісок дослідники знайшли на дні акваріуму гирку і шпичку. Це підтверджує те, що ґрунтова маса в якийсь момент часу мала стан суспензії.

А відбувається це так: в початковий момент ущільнююче навантаження передається на скелет, а після щонайменшого порушення структури це навантаження передається повністю на воду. Напір у воді раптово підніметься і вода отримує інтенсивний рух у всіх напрямках. Це сильні струмені води, що руйнують структуру ґрунту. Така руйнація миттєво розповсюджується, процес протікає як вибух і має назву гідродинамічне розрідження піщаного водонасиченого ґрунту.

Таке явище може розпочатися від незначного силового, навіть акустичного імпульсу.

Щоб дізнатися чи може обводнений пісок отримати гідродинамічне розрідження потрібно визначити його пористість і критичну пористість.

Критична пористість піску – це пористість, яка не змінюється в момент зсуву піску.

Об'єм рихлого піску під час зсуву зменшується, бо пісок ущільнюється, а вода виходить із зразка назовні. Об'єм щільного піску під час зсуву зростає, бо пісок розрихлюється (рис. 17) і всмоктує вільну воду.

В ґрунтах з критичною пористістю чи меншою від неї гідродинамічне розрідження не відбувається.

Крупнозернисті і середньозернисті піски навіть з пористістю вище критичної, ніколи не мають статичного гідродинамічного розрідження із-за швидкого розсіювання гідродинамічного тиску.

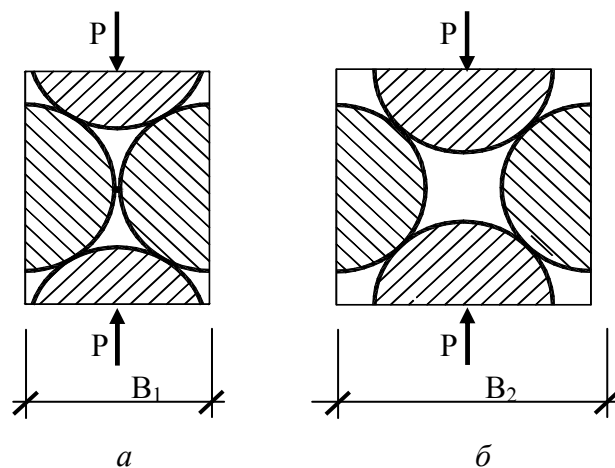


Рис. 17. Модель Лемба розрихлення щільного піску при стисненні:
 a – щільний стан; b – розрихлений стан

9. Залежність між щільністю і вологістю ґрунту

В системі координат «вологість ґрунту – щільність ґрунту в сухому стані» (рис. 18) умовно покажемо кордон між зонами вологого та водонасиченого ґрунту $G = 1$. Покажемо ґрунт з вологістю w_1 відмітимо, що один і той же ґрунт при одній і тій же вологості може мати різний показник щільності ґрунту в сухому стані.

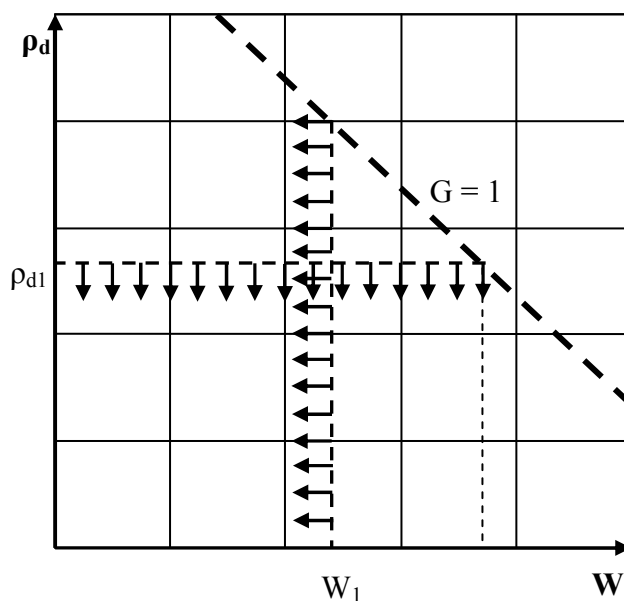


Рис. 18 Поле можливих значень щільності ґрунту в сухому стані в залежності від вологості ґрунту

У цій же системі координат виділимо ґрунт з показником щільності ґрунту в сухому стані ρ_d і відмітимо, що цю щільність може мати ґрунт при різних вологості.

Якщо один і той же ґрунт різної вологості ущільнювати рівною кількістю ущільнюючої роботи (A_1), наприклад, трамбувати рівною кількістю ударів трамбівкою однієї ваги, скидаючи її в рівні інтервали часу з однакової висоти і кожен раз визначати щільність сухого ґрунту, то за цими значеннями в системі координат «вологість – щільність сухого ґрунту» можна побудувати графік.

Графік (рис.19) показує, що між щільністю і вологістю ґрунту, при постійній кількості ущільнюючої роботи, існує залежність виражена випуклою кривою з максимумом при певній вологості. Аналогічні залежності проявляються для

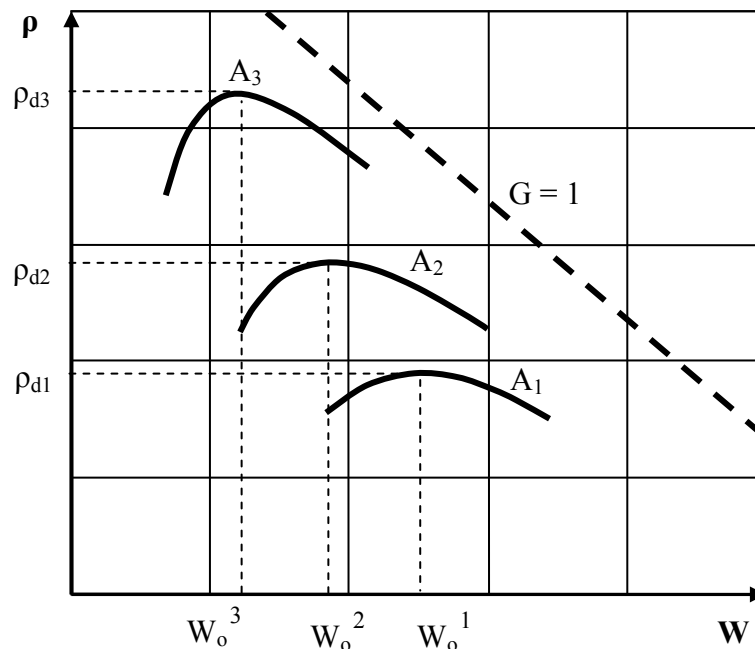


Рис. 19. Залежності щільності сухого ґрунту від його вологості при різних кількостях роботи ущільнення A_1 , A_2 , A_3

інших кількостей роботи - A_2 , A_3 тощо. Максимум на кривій показує можливу найбільшу щільність ґрунту при конкретній кількості роботи і при якій вологості ґрунту це можливо.

*Вологість, що відповідає максимуму на кривій при даній кількості роботи ущільнення називається **оптимальною** (W_o).*

Оптимальну вологість для конкретного ґрунту при певній, вибраній, кількості ущільнюючої роботи визначають експериментально пробним ущільненням ґрунту різної вологості і визначенням його щільності в сухому стані. Можна оптимальну вологість визначити при різній кількості ущільнюючої роботи, наприклад, для різних за потужністю машин, а потім рішати оптимізаційну задачу (за вибраним критерієм: собівартість, трудомісткість, енергоємність або тривалість робіт) вибору ущільнюючої машини при проектуванні процесу ущільнення ґрунту.

Існують також рекомендації для орієнтовного визначення за індексом пластичності оптимальної вологості ґрунту при його ущільненні.

Для ґрунту, який необхідно ущільнювати визначають індекс пластичності (вологість, при якій ґрунт окочується в джгутики діаметром 3 мм). Чисельне значення індексу пластичності збільшують на 2 – 3 пункти, це й буде орієнтовне значення оптимальної вологості.

10. Віброущільнення пісків

Для ущільнення ґрунту вібруванням масу вібратора за рахунок підведеної до збудника коливань енергії вводять в стан коливальних рухів. Слідом за вібратором вже за рахунок кінетичної енергії останнього вводяться в стан коливальних рухів також і розташовані в зоні дії часточки ґрунту. За відсутності ударних імпульсів з боку вібратора часточки ґрунту знаходяться під впливом тільки інерційних сил. Останні пропорційні масам цих часточок. З огляду на те, що маси частинок неоднакові, відрізняються також і виникаючі сили інерції. У результаті не однакових сил інерції в місцях контактів частинок виникають напруги зсуву. До відомих меж ці напруги врівноважуються силами зчеплення або міцністю сполучних водно-колоїдних плівок. Після перевищення цих меж виникає переміщення частинок. Напруження зсуву пропорційне інерційним силам; тому вони визначаються не тільки різницею мас сусідніх частинок, а й прискореннями, які розвиваються при коливальних рухах.

Відносні переміщення часток наступають тим швидше, чим більше розходження в масах окремих частинок, складових ґрунту, і чим слабкіші будуть сили зв'язків між ними. Тому успішно ущільнюються вібруванням незв'язні і малозв'язні ґрунти.

Вібрація піщаних ґрунтів порушує контакти між окремими часточками ґрунту і під впливом сил інерції і сил тертя вони переміщуються і відбувається більш щільна переупаковка об'єму.

Існує залежність між коефіцієнтом пористості піску ε і прискоренням вимушених коливань ω_y , яка виражається віброкомпресійною кривою (рис. 20).

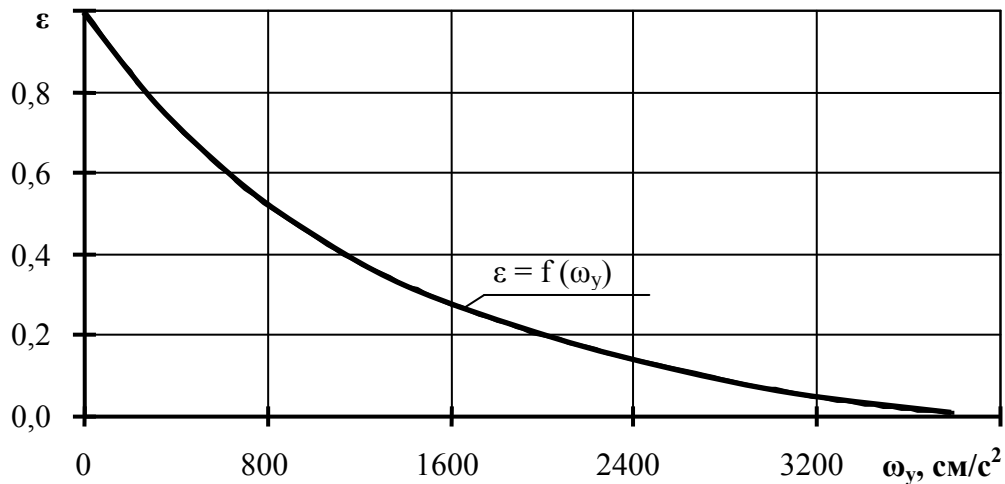


Рис. 20. Віброкомпресійна крива

Для кожного виду піску в лабораторії необхідно встановити віброкомпресійну криву і по ній в залежності від потрібного коефіцієнта пористості ε встановити необхідне прискорення коливань ущільнюючого агрегату. У більшості вібраційних агрегатів джерелом вібрації є обертання неурівноважених мас, а прискорення коливань у цьому випадку, як відомо, залежить від частоти обертання.

Крім вібрації при обертанні виникає і змінюється за величиною (рис. 21) вертикальна сила коливань, яка також сприяє ущільненню піску.

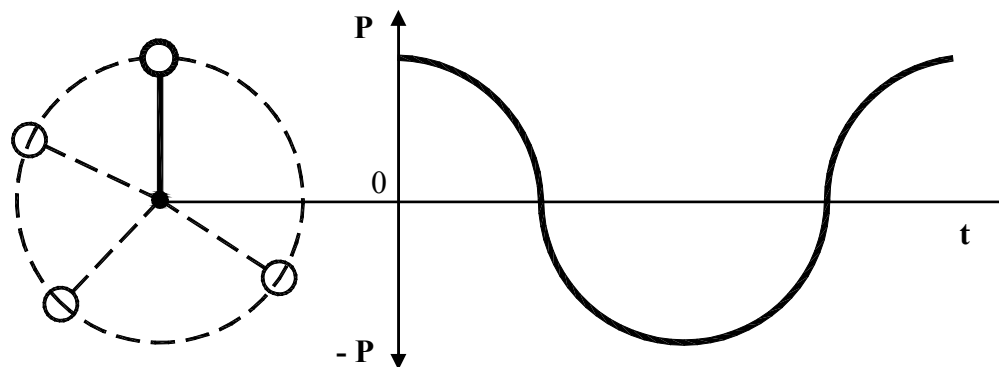


Рис.21.Графік зміни вертикальної сили коливань у часі.

Вологість має певний вплив на віброущільнення. Залежність коефіцієнта віброущільнення від вологості виражається графіком, приведеним на рис.22.

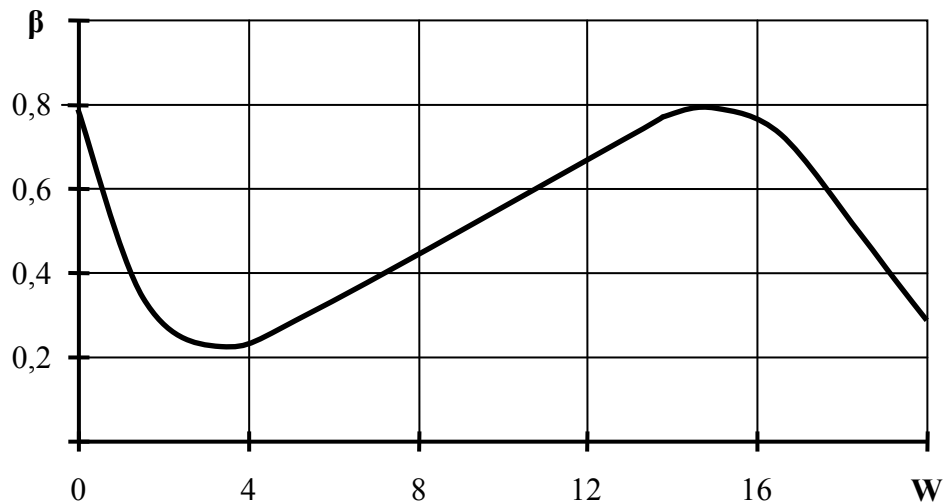


Рис. 22. Залежність коефіцієнта віброущільнення піску від вологості

За вологості піску 0 – 2 % він ущільнюється добре. Це обумовлено тим, що при цій вологості виникають сили зчеплення між частинками, які створює поверхневий натяг плівкової води на окремих піщинках при їх об'єднанні, що протистоять ущільнюючій силі коливальних.

За вологості 3 - 5 % ефект вібрації мінімальний.

З подальшим збільшенням вологості коефіцієнт віброущільнення зростає і при вологості 16 -17 % (водонасичення - біля 80 % пор) досягає максимуму.

Збільшення вологості до повного водонасичення пор знову приводить до зменшення коефіцієнта віброущільнення. Існування оптимальної вологості, при якій досягається найбільше віброущільнення характерно для супісків і суглинків і знаходиться в межах 11 -17 %.

Викладене пояснює необхідність штучного зволоження ґрунту, який ущільнюють вібруванням тому, що в природних умовах пісок здебільшого знаходиться з вологістю нижчою величини оптимальної вологості, близької до максимального насичення водою. Цим же і пояснюється успішне практичне застосування ущільнення ґрунтів вібрацією з одночасним нагнітанням води в ґрунт методом гідровібрації та віброфлотації.

Ущільнення ґрунту вібрацією відбувається протягом певного часу (орієнтовно 6 хвилин). Кожен ґрунт має поріг віброущільнення – це

прискорення вібрації, яке необхідно перевищити, щоб ущільнення розпочалось.

Радіус ущільнення для досить потужних вібраторів не перевищує 1,5 м, а для легких, подібних тим, які застосовують для ущільнення бетонних сумішей – біля 0,5 м.

В результаті вібрації щільні піски розпушуються, а пухкі ущільнюються.

Показник щільності ґрунту в сухому стані віброущільнених пісків може досягати $1,6 \div 1,75 \text{ г/см}^3$ (коефіцієнт ущільнення 0,7 ...0,9).

Застосування вібрації дозволяє зменшити пористість піску на 9 -12 %, тобто, рихлий пісок можна ущільнити до щільного стану.

При ущільненні піску вібрацією є «небезпечний інтервал» частот 500 - 2500 коливань в хвилину. Ґрунт при цій частоті коливань веде себе як вода – важкі предмети, що лежать на поверхні піску «тонуть», а легкі «спливають» з глибини на поверхню.

11. Ущільнення ґрунту трамбуванням

Трамбування – це нанесення ударів по поверхні ґрунту фізичними тілами (трамбівками).

Трамбівки за вагою розрізняють як *легкі* (від декількох кілограмів до 3 т), *важкі* (від 5 до 12 т) і *надважкі* (від 15 до 200т).

В момент удару **легкою трамбівкою** по ґрунтовій поверхні розпочинається удар, при якому за короткий проміжок часу швидкість трамбівки міняється до нуля, в результаті чого розвиваються великі напруження на поверхні контакту. Більша частина кінетичної енергії робочого органу витрачається на підвищення тиску трамбівки на ґрунт з наступним швидким його спадом. Ефект ущільнення визначається величиною незворотних деформацій і розподілом її по товщі. Деформація в першу чергу залежить від напружень, що розвиваються у ґрунті, а також від тривалості дії навантаження.

Напруження в глибину і осесиметрично від центру удару зменшується. Розмір деформаційної зони (ущільнення ґрунту) від удару трамбівкою з круглою основою досягає в ширину і у глибину 2 – 2,5 діаметри основи. Отже при діаметрі ударної частини 0,2 м глибина ущільнення складе 0,5 м, а при діаметрі трамбівки 0,8 м – 2,0 м.

Контактні напруження на поверхні ґрунту не повинні перевищувати міцності ґрунту. В разі збільшення ваги трамбівки або висоти її скидання на

ґрунт енергія трамбівки, а значить, і сила удару зростає, то у цьому випадку величину контактних напружень регулюють розміром опорної площі трамбівки.

Трамбування **важкими і надважкими трамбівками** в останні декілька десятиліть інтенсивно розвиваються. Суть цього методу полягає у покращенні механічних властивостей ґрунту шляхом передачі йому високих енергетичних імпульсів трамбуванням.

Енергетичні імпульси, які створює падаюча трамбівка супроводжуються коливаннями, що розповсюджуються хвилями в ґрунтах. Від витіснення і коливань ґрунту його часточки переміщуються і створюють більш щільні конфігурації. У водонасиченому стані ґрунт від сильного удару і наступних коливань розріджується і його часточки переміщуються в більш компактний стан. У обох випадках зменшення пустот і збільшення контакту між зернами приводить до покращення механічних властивостей ґрунту.

Від традиційного поверхневого трамбування цей метод відрізняється використанням значно більшої (у 5 - 15 разів) енергії удару (не менше 450 кН·м), в точках взаємно віддалених на 2,5 - 4,0 діаметри трамбівки, що в масиві ґрунту під місцем удару виникає ущільнене ядро (рис.23) шириною 2,7 діаметри трамбівки і глибиною 3,2 діаметри трамбівки.

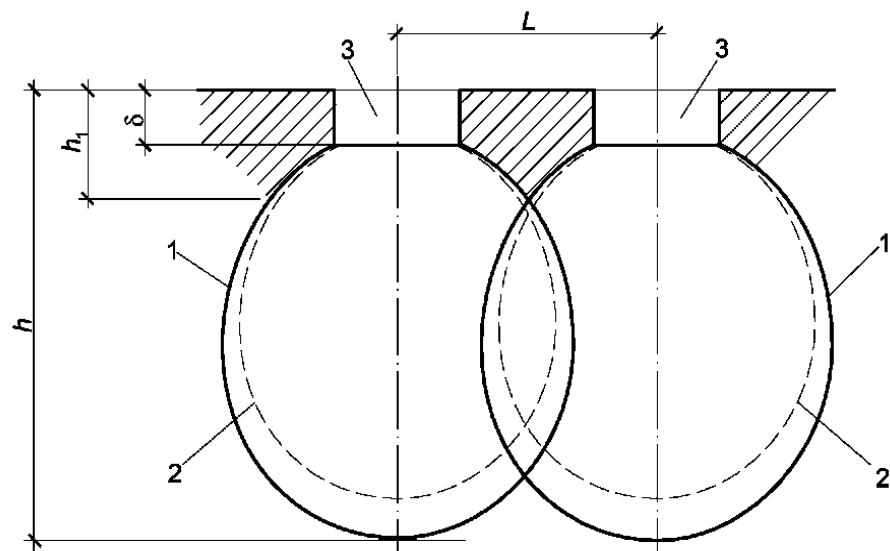


Рис. 23. Утворення зон ущільненого ґрунту важкою трамбівкою: h – глибина зони ущільнення; h_1 – глибина розрихленого шару ґрунту; L – відстань між точками удару трамбівки; δ – глибина відбитку трамбівки; 1 – зона ущільнення ґрунту; 2 – зона ущільненого ґрунту; 3 – відбиток трамбівки

12. Різновиди виробничих способів ущільнення

Ущільнення ґрунту відбувається за рахунок певних силових навантажень на ґрунт. Ці навантаження можуть бути: *статичними, статичними короткочасними повторними, вібраційними, ударними, динамічними імпульсними і комбінованими.*

Ущільнювальні навантаження супроводжуються рядом супутніх виробничих процесів: осушенням, зволоженням, обводненням ґрунтів, прискоренням фільтрації, пошаровим відсипанням ґрунту, подачею під тиском в ґрунт води або повітря, влаштуванням дренажних фільтраційних шляхів тощо. Комбінація силових навантажень, з супроводжуючими їх процесами, створює велику кількість способів ущільнення. Вибір способу ущільнення залежить від виду силового навантаження, конструкції споруди, виду і стану ґрунту, форми і розміру масиву, який ущільнюють, методу укладання ґрунту, мети ущільнення й інших умов. Всі можливі способи ущільнення варто об'єднати у групи в залежності від виду силового навантаження.

Статичні силові навантаження виникають в разі привантаження поверхні ґрунту додатковим насипним шаром ґрунту або штучними вантажами протягом тривалого часу.

Статичне привантаження об'єднує ряд способів ущільнення:

- привантаження ґрунтом, щебенем, камінням, блоками і різними видами вантажів;
- привантаження сухої, заболоченої або підводної поверхні ґрунту;
- привантаження з поверхневим або глибинним відведенням ґрунтової води;
- привантаження зі створенням фільтраційних шляхів для ґрунтової води із піщаних паль (рис. 24) або вертикальних дренажів, або одноразових паперових дрен;
- привантаження з традиційним або електроосмотичним водопониженням.

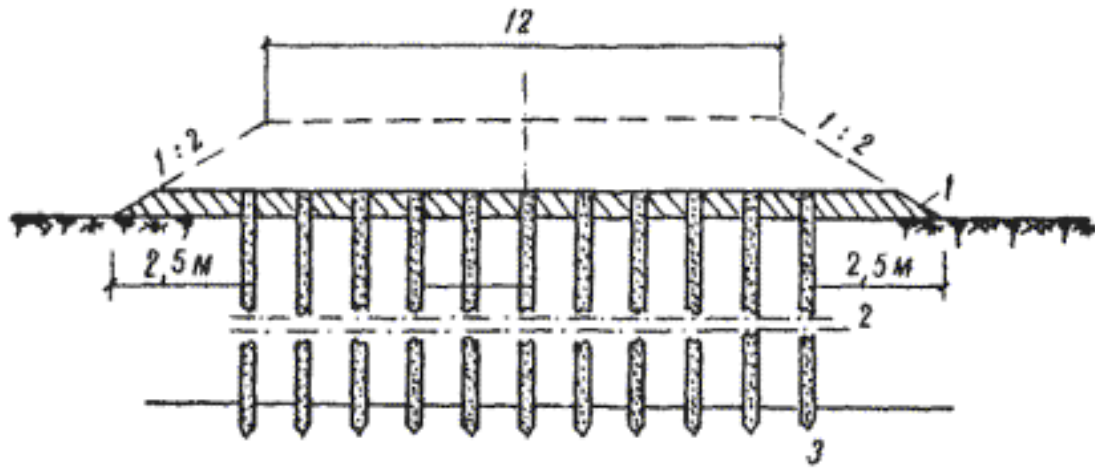


Рис. 24. Ущільнення водонасиченого глинистого ґрунту привантаженням: 1 – робоча площадка з привантаженням і піщані палі-дрени; 2 - слабкий ґрунт; 3 – міцний ґрунт.

Статичні короточасніповторні навантаження на ґрунт відбуваються при багаторазовому повільному русі по пухкому ґрунті важкої техніки або спеціалізованих машин для ущільнення - котків. Укочуванням можна ущільнювати будь-які ґрунти, відносно невеликими за товщиною (15 - 45 см) шарами, котками малої, середньої та великої ваги. Котки можуть бути причіпні та самохідні. За формою ущільнювального вальця, що також визначає спосіб ущільнення, котки розрізняють:

- з гладенькими вальцями;
- з рифленною або сітчастою поверхнею;
- кулачкові (циліндричний валець оснащений великою кількістю шипів-кулачків з різною формою тіла, які установлені перпендикулярно поверхні вальця);
- пневмоколісні.

Вібраційні місцеві, поверхневі та глибинні, навантаження на ґрунт створюють механічні вібратори, у яких гармонійні коливання виникають внаслідок обертання неурівноваженої маси. Вібратори являються основним робочим органом великої кількості ущільнювальних засобів: ручний вібраційний інструмент; віброплити малого розміру; навісне вібраційне обладнання на універсальні будівельні машини; спеціалізовані вібромашини.

Вібруванням доцільно ущільнювати незв'язні (піщані) ґрунти.

Вібраційні способи ущільнення ґрунту розрізняють як:

- поверхневе вібрування для ущільнення шарів (товщиною до 110 см) піщаного ґрунту;
- глибинне вібрування використовують для ущільнення водонасичених шарів піску товщиною до 10 м;
- віброфлотацію (вібрування природних або штучних водонасичених пісків) застосовують в разі товщини ущільнення пісків від 1,5 м і до 40 м.

Ударні (трамбувальні) навантаження в ґрунті виникають при скиданні на поверхню ґрунту: легких, середньої ваги та важких тіл (трамбівок). Трамбуванням можна ущільнювати зв'язні і незв'язні ґрунти, як насипні, так і ґрунти природного залягання, від малих товщин ґрунту (0,15 м) до великих товщин (10,0 м).

Найбільше ущільнення ґрунтів досягається при ударному навантаженні. За ефективністю впливу на ґрунт і досягненні заданого значення показника щільності ґрунту у сухому стані ударне навантаження відповідає статичному навантаженню 0,85 – 1,0 МПа.

У ґрунтах природного складу за рахунок більшої щільності і структурної зв'язності ефективність ущільнення трамбуванням нижча, ніж в насипних ґрунтах. Про це свідчить те, що глибина ущільнення в насипних ґрунтах на 30 – 40% більша, ніж у ґрунтах природного складу.

Під час трамбування максимальні контактні тиски, створювані робочим органом, приблизно рівні з тими, що виникають при укочуванні і знаходяться в межах 0,5 – 1,2 МПа. Швидкість змін цих напружень біля поверхні ґрунту різна: для укочування вона складає 0,5 – 6,0 МПа/с, а для трамбування – 10 – 800 МПа/с. Тривалість дії укочування 0,04 – 0,4 с, а трамбування у 10 разів менше – 0,005 – 0,03 с. Це і обумовлює особливості ущільнення ґрунту трамбуванням.

Ущільнення трамбуванням можна виконувати:

- ручними трамбувальними інструментами (вантаж з рукоятками);
- ручними механізованими (пневматичними, електричними, дизельними) трамбівками;
- важкими гідромолотами (з ударною частиною вагою до 16 т) у складі спеціалізованої машини.
- навісним механізованим трамбувальним обладнанням на універсальних машинах;

- важкими (до 15 т) трамбівками, які скидають з висоти універсальними машинами;

Динамічні імпульси створюють ударами по поверхні ґрунту надважкими трамбівками (вагою від 20 т до 170 т) унікальними машинами, які можуть скидати у вільному падінні надважкі трамбівки з висоти 22 м. Динамічні імпульси можна також створювати глибинними вибухами у рихлих водонасичених ґрунтах. У обох випадках у ґрунті виникають інтенсивні коливання і зміщення його великих об'ємів, що сприяє переупаковці часточок ґрунту до більш щільного стану.

Відмінною особливістю динамічного імпульсного ущільнення надважкими трамбівками є те, що удари трамбівкою методом вільного скидання наносять без перекриття слідів, а по рівномірно розосереджених точках з підсипанням ґрунту у витрамбовані виїмки з його повторним трамбуванням у декілька етапів.

Комбіновані навантаження виникають при використанні засобів, що одночасно створюють вищеперераховані навантаження, (часто в одній машині), наприклад, віброукочування, вібротрамбування, укочування ударними вальцями (укочування з ударом) або послідовне виконання перерахованих способів.

Вібrazioвикористовують у переважній кількості машин ущільнюючих укочуванням оскільки вібрація суттєво підвищує ефективність ущільнення.

13. Рекомендації до практики ущільнення ґрунтів

За останні десятиріччя найбільш широко використовують для пришвидшення консолідації слабких ґрунтів тимчасове привантаження, але також популярні способи глибинної вібрації та динамічна консолідація надважкими трамбівками при великих обсягах робіт.

Привантаження поверхні ґрунту доцільно використовувати, переважно в ґрунтах природного складу, в разі необхідності створення довготривалого ущільнювального навантаження. Такі навантаження необхідно створювати для ущільнення водонасиченого заболоченого, мулистого, пилуватого або глинистого ґрунту, який має низький коефіцієнт фільтрації, а тому для відтоку

води із пор цього ґрунту необхідно створювати тривалий час додатковий напір в ґрунтових водах.

Практичний досвід показав, що коли термін консолідації (ущільнення) привантаженого слабкого ґрунту не перевищує терміну будівництва, то цей спосіб (тимчасового привантаження) найбільш раціональний.

Тимчасове привантаження слабких обводнених ґрунтів застосовують одночасно з вертикальними дренажами, оскільки вони прискорюють фільтраційні процеси, і як результат - ущільнення обводненого ґрунту. Особливо актуальний цей спосіб на органічних намулах (сопропелях), коли необхідно прискорити відведення води із водонасиченого ґрунту, а тимчасове привантаження не дає ефекту внаслідок повільного відтиснення води із таких ґрунтів. Для торф'янистих ґрунтів, навпаки, влаштування дрена здебільшого не має сенсу, тому що їх водопроникність і стискуваність достатньо високі і тривалість фільтраційного осідання не суттєве.

При невеликій товщині проникних обводнених ґрунтів найбільш економічним є спосіб їх ущільнення тимчасовим привантаженням. Затрати на привантаження з влаштуванням піщаних дрена у розмиті заглиблення мають майже однакову вартість з найдешевшим динамічним ущільненням трамбівками.

Піщані дрена, які влаштовують у вибурені свердловини дорожчі у 2 – 4 рази у порівнянні з динамічною консолідацією.

Ущільнення ґрунтів трамбуванням отримав новий розвиток в зв'язку зі збільшенням потужності ударів і застосування спеціальної технології, яка дозволяє ущільнювати ґрунти на глибину більше 20 м. Цей метод успішно застосовують на недостатньо ущільнених мінеральних ґрунтах (пісок, глина, крупноблочний ґрунт) і при ущільненні слабких ґрунтів, складених органо-мінеральними шарами.

Ущільнення ґрунту підводним вибухом практикували в середніх роках минулого століття для ліквідації просідання лесового ґрунту товщею біля 20 м, проте, останнім часом, цей спосіб не використовують тому, що з'явилися більш прогресивні технічні можливості, а крім того із-за його великої складності і відсутності гарантії вибуху всіх закладених зарядів.

Для всіх способів ущільнення тиск робочого органу на ґрунт не повинен перевищувати його міцність наведену у таблиці 1.

Міцність ґрунтів Таблиця 1

Вид ґрунту	Міцність ґрунтів, МПа		
	при уковуванні котками з		при трамбуванні
	гладкими вальцями	пневмоколісними вальцями	
пісок	0,3 - 0,6	0,3 – 0,4	0,3 - 0,7
супісок	0,3 – 0,6	0,3 – 0,4	0,3 – 0,7
суглинки	0,6 – 1,0	0,4 – 0,6	0,7 – 1,2
глини	1,5 – 1,8	0,8 – 1,0	2,0 – 2,3

У Великій Британії виконали порівняльний економічний аналіз різних способів пришвидшення консолідації ґрунтів природного складу. Порівнювали методи дренажу, тимчасового привантаження та динамічної консолідації. Результати цих досліджень свідчать, що кожен із методів має переваги у певній області застосування. Ця область залежить від глибини слабкого ґрунту, площі території та виду ґрунту.

Привантаження з влаштуванням піщаних дренажів, виїмки для яких створюють методом розмиву ґрунту, та динамічна консолідація ґрунтів важкими трамбівками – найбільш економічні.

Вплив вологості ґрунту на його ущільнення дослідив Віхрев В. П. Він встановив взаємозв'язок (рис. 24) між вологістю та щільністю мінеральної

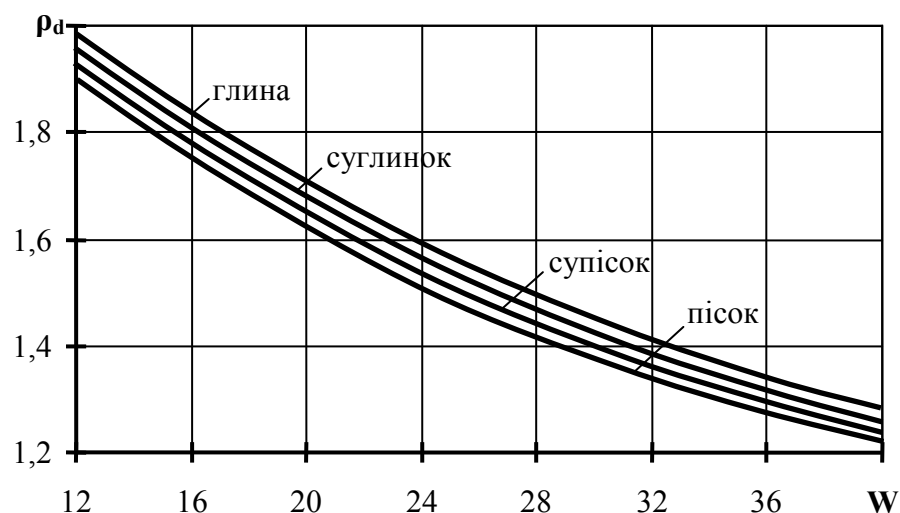


Рис. 24 Залежність між можливим ущільненням і вологістю ґрунту

частини ґрунтів і рекомендує графіки, з допомогою яких можна визначити, яка можлива максимальна щільність ґрунту в сухому стані при певній вологості ґрунту і навпаки, яка рекомендується вологість для досягнення заданої щільності ґрунту в сухому стані при найменшій кількості роботи ущільнення.

Графіки наведені на рисунку 24 свідчать, що чим більше необхідно ущільнити ґрунт, тим меншою повинна бути вологість.

Властивості ущільнених глинистих ґрунтів вивчав вчений Лемб з різною вологістю ущільнювального ґрунту і встановив:

1. При малих експлуатаційних навантаженнях ґрунт ущільнений при $W > W_o$ більше осідає, ніж ущільнений при $W < W_o$. При великих експлуатаційних навантаженнях, які вимушують ґрунтові часточки переорієнтуватись, ґрунт ущільнений при $W < W_o$ більше осідає, ніж ущільнений при $W > W_o$.

2. Ґрунти, ущільнені при $W < W_o$ більше бубнявють, тому що мають більший дефіцит води і більш випадкове, хаотичне, розміщення ґрунтових часточок (рис. 25).

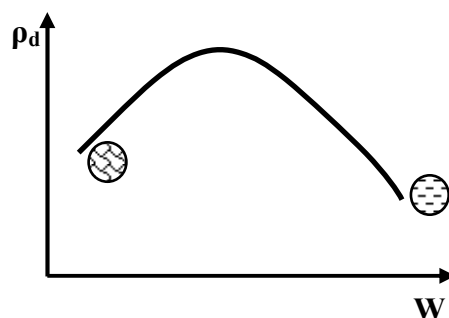


Рис. 25 Залежність щільності ґрунту від його вологості в разі постійної кількості роботи ущільнення. В кружках орієнтація базальних поверхонь часточок ґрунту: зліва - хаотичне, справа – паралельне горизонтальне

3. Ґрунт, ущільнений при $W > W_o$ має більшу усадку при висиханні, так як при більш паралельній упаковці ґрунтових часточок він при висиханні отримає менший об'єм.

4. При однаковій ущільнюючій роботі і однаковій щільності міцність вище у ґрунті з $W < W_o$ тому, що при хаотичному розміщенні часточок ґрунту в об'ємі та малій вологості в більшій мірі проявляється поверхневий натяг капілярної та плівкової води в порах.

5. Більш орієнтоване розміщення часточок ґрунту в об'ємі при $W > W_o$ сприяє зменшенню міцності зчеплення між часточками ґрунту. Зближення часточок ґрунту при $W < W_o$ збільшує міцність зчеплення між часточками ґрунту.

6. Якщо у досліді ущільнювати однаковою кількістю роботи один і той же ґрунт при вологості $W < W_o$ і при вологості $W > W_o$, а після цього збільшити кількість ущільнюючої роботи і повторити дослід для цього ж ґрунту при цих же вологостях, то збільшення щільності ґрунту буде більшим у стані малої вологості (при $W < W_o$). Це наочно продемонстровано рисунком 26.

Отже, для збільшення щільності глинистого ґрунту, при його ущільненні, більш раціонально збільшити кількість ущільнювальної роботи, ніж додатково зволожити ґрунт.

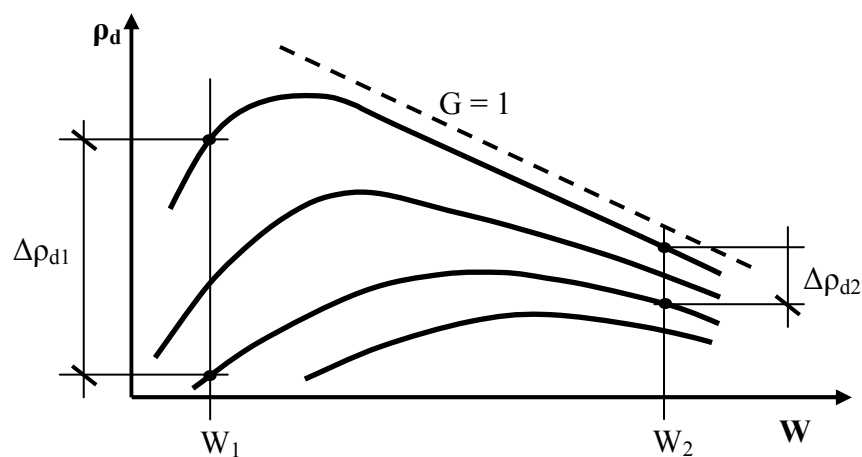


Рис. 26. Приріст щільності сухого та вологого ґрунту при однаковому збільшенні рівної роботи ущільнення.

7. Якщо ущільнені ґрунти можуть бути водонасичені, то різниця в щільності у ґрунтів з початковою вологістю $W < W_o$ і з $W > W_o$ зменшується, а при можливості необмеженого бубнявіння стає практично однаковою.

8. При малих навантаженнях осідання ґрунту, ущільненого при $W > W_o$ більше, ніж ущільненого при $W < W_o$.

9. Опір ґрунту великим деформаціям практично не залежить ні від початкової вологості, ні від способу ущільнення (статичний, вібраційний, ударний, переминання).

10. Опір ґрунту малим деформаціям при $W < W_o$ також не залежить від способу ущільнення, але при $W > W_o$, він максимальний при статичному ущільненні, менший при вібраційному і ще менший при ударному і при переминанні.

14. Контроль якості ущільнення ґрунту

Якість ущільнення ґрунту повинна відповідати вимогам проекту і діючим нормативним документам. Якість ущільнення ґрунту контролюють в три етапи: вхідний контроль, поопераційний і заключний при здачі виконаної роботи.

Вхідний контроль якості передбачає перевірку якості ґрунту за показниками виду (гранулометричний склад та ін.) та стану (вологість, коефіцієнт фільтрації) та відповідність засобів для ущільнення ґрунту проектним.

Поопераційний контроль виконують у відповідності з проектом виконання робіт, який передбачає перевірку:

- правильності геометричних параметрів відсипання шарів ґрунту;
- щільності ґрунту в основі насипу;
- вологості насипного ґрунту;
- однорідності ґрунту в шарах насипу;
- щільності ґрунту в шарах насипу;
- відповідність отриманої щільності ґрунту заданій та ін.

Для контролю щільності ґрунту пробивідбирають з кожних шарів у різних встановлених проектом частинах споруди. Проби відбирають із шурфів. Відхилення від нормативного значення коефіцієнта ущільнення в бік

зменшення допускаються не більше ніж в 10 % випробувань від їх загальної кількості.

Контроль вологості ґрунту для земляних споруд треба проводити як у місці його розробки (резерв, кар'єр, виїмка), так і в місці укладання та ущільнення не рідше одного разу за зміну та обов'язково після атмосферних опадів.

Щільність та вологість ґрунту лабораторними методами потрібно визначати згідно з ДСТУ Б.В.2.1-17:2009. Але ці методи неоперативні, оскільки тільки на сушіння зразків ґрунту для визначення вологості витрачається 5-7 год. Крім того, лабораторним методом не вдається оперативно контролювати властивості великоуламкових і водонасичених ґрунтів. Тому останнім часом застосовують прискорені польові експрес-методи засновані на використанні проникаючих випромінювань, радіоактивних ізотопів, але не менше ніж 10 % дослідів слід виконати стандартним методом.

Заключний контроль при прийманні об'єктів в експлуатацію передбачає перевірку технічної документації за установленим переліком; робочі креслення споруд; журнал робіт; акти огляду прихованих робіт; результати контролю ущільнених ґрунтів та результати вибіркової перевірки якості ущільнення.

При приймальному та інспекційному контролі використання експрес-методів не дозволяється. Для відповідальних об'єктів кінцевий контроль ущільнення ґрунту може бути призначений проектом у вигляді штампових випробувань ґрунту.

15.Польові методи визначення щільності ґрунту

Насипні чи природні ґрунти ущільнюють для збільшення їх міцності та зменшення їх деформації, а тому визначення міцнісних та деформаційних показників ґрунту у польових умовах штамповими випробуваннями буде ближче відображати реальну роботу ущільненого ґрунту, але такі дослідження трудомісткі, дорогі та довготривалі, про те найбільш достовірні.

У будівельній практиці існують також оперативні польові методи та експрес-методи.

Прилад Н.П.Ковальова використовують для визначення щільності і вологості ґрунту в польових умовах. Він протягом 30 хвилин забезпечує необхідну точність в ґрунтах зернистістю до 2 мм. Для цього необхідно

відібрати зразок ґрунту об'ємом 200 см^3 вдавлюванням в нього спеціального металевого трубчастого тонкостінного кільця.

Прилад має вигляд відра-кожуха наповненого водою, в якому плаває поплавко-диск з вертикальною трубкою зверху в центрі. На трубці нанесено стовбці позначок зі значеннями вологості та щільності ґрунту. До нижньої поверхні поплавка спеціальними зачіпками з прозором 1 - 2 мм кріпиться циліндричний контейнер відкритий зверху.

В знятий контейнер поміщають кільце з ґрунтом, для визначення вологості ґрунту, або ґрунт із кільця і перетирають його з водою для ліквідації пор заповнених повітрям, для визначення щільності ґрунту. Контейнер прикріплюють до поплавка і опускають у відро-кожух, який заповнюють водою до встановленої позначки. На вибраній шкалі (для чорноземних, глинистих, піщаних ґрунтів) фіксують вологість ґрунту або його щільність у сухому стані.

Прилад відтаровано для певних ґрунтів під час його виготовлення, що обмежує його область застосування.

Методи пенетрації розроблені на принципі проникнення в ґрунт загостреного конуса, чи циліндричного стрижня від статичного чи ударного дозованого навантаження. Кількість роботи або глибина проникнення в ґрунт зонда опосередковано, за спеціальними таблицями, дає можливість визначити щільність ґрунту.

Методи пенетрації прості, зручні, не трудомісткі але тут слід зазначити, що точність визначення щільності може не відповідати реальності, а тому цей метод використовують для якісної («більше-менше») оцінки.

Цей принцип закладено у відомий ударник-циліндр ДорНДІ для оцінки щільності ґрунту у поверхневому шарі. Він має стрижень круглого поперечного перерізу 1 см з довжиною робочої частини 10 см, та двома упорами на стрижні. Між упорами на стрижень насаджений молот-диск вагою 2,5 кг. Стрижень ставлять вертикально на поверхню ґрунту робочою частиною. Молот піднімають рукою до верхнього упору і відпускають. Молот у вільному падінні ударяє в нижній упор від чого робоча частина стрижня заглиблюється в ґрунт. Оператор рахує кількість ударів, що характеризує кількість роботи, до повного заглиблення робочої частини ударника.

Також широко відомий пенетрометр ДІІТ для зондування рихлих ґрунтів, торфів та водо насичених мілких пісків до глибини 2 – 6 м. Основну частину пенетрометра складає сталеві труба, у нижній частині якої є конусне

загострення 30° з діаметром основи більшим від діаметра труби. На трубі через кожні 10 см нанесено мітки. У верхній торець труби вставляють молот аналогічний молоту ударника описаного вище, але з вагою 3,2 кг.

Методизаміщення – це методи піщаної лунки і водобалонний метод, за виконання яких викопують у ґрунті невелику лунку, а вийнятий ґрунт зважують. Після цього об'єм лунки заповнюють сухим каліброваним піском відомої щільності або водою, попередньо опустивши у лунку м'який гумовий балон. Пісок і воду вносять із місткостей попередньо визначеного об'єму і ваги, а після заповнення лунки залишки піску і води зважують і обраховують об'єми. Цих даних достатньо для обрахування щільності досліджуваного ґрунту

Випробовування падаючим вантажем дозволяє ефективно і швидко за допомогою мікропроцесорного пристрою визначити величину деформації поверхні ґрунту та розрахувати динамічний модуль пружності та щільності ґрунту і вивести результат на міні дисплей. Прилад зарубіжного виготовлення має опорну круглу плиту з вертикальним стрижнем в центрі з насадженим на нього диск-вантажем. На висоті 1,2 м стрижень завершується поперечною рукояткою, яка слугує також обмежувачем підйому вантажа і в центрі, над стрижнем розміщено електронний пристрій. Прилад встановлюють на горизонтальну зачищену поверхню ґрунту, однією рукою утримують прилад у вертикальному положенні, а іншою рукою піднімають вантаж до верхнього упору і відпускають. Після удару по досці-основі диск-вантаж виштовхує вгору на $2/3$ висоти стрижня спеціальна пружина де його підхоплює рука оператора і підносить до верхнього упору на стрижні. Спочатку виконують три тестових удари, а потім дослідні з миттєвим результатом щільності.

Пробне укочування ґрунту на два жким катком з пневматичними шинами дозволяє визначити якість ущільнення за глибиною отриманого сліду, яка не повинна перевищувати певну стандартну величину.

Сьогодні польові методи розвиваються разом з удосконаленням ущільнювальної техніки та мікропроцесорних та комп'ютерних засобів. В кабіні оператора ущільнювальної машини на дисплеї у автоматичному режимі або за вимогою оператора з'являється інформація про якість ущільнення ґрунту.

Радіометричний метод визначення щільності ґрунту заснований на здатності ґрунту поглинати або розсіювати радіоактивне випромінювання у прямій залежності від його щільності. В Україні вже давно використовують два типи таких приладів. Це - «Поверхностный гамма плотномер» (ПГП) та «Глубинный гамма плотномер» (ГГП).

Приладом ПГП заміряють щільність ґрунтів у поверхневому шарі товщиною до 15 см. Приладом ГГП заміряють щільність ґрунту зі свердловини глибиною до 6 м в радіусі 15 – 20 см від вісі свердловини з обсадною трубою із дюралюмінію.

Джерелом гама випромінювання слугує цезій – 137, який розміщують у свердловині у свинцевій капсулі з заглушкою, що може бути відкрита оператором дистанційно. Реєстрацію інтенсивності імпульсів випромінювання фіксує спеціальний прилад на поверхні ґрунту з демонстрацією результатів на дисплеї.

16. Лабораторні методи визначення щільності ґрунту

Лабораторні методи визначення щільності ґрунту дають, більш точні результати ніж польові експрес-методи, проте тривалість лабораторних робіт розтягується іноді на декілька днів. Тривалість визначення щільності можна значно скоротити при наявності польової лабораторії, а тому можна оперативно і точно виконувати щоденний контроль якості.

В лабораторних умовах для визначення фізичних властивостей ущільненого ґрунту виконують випробування над пробами ґрунту непорушеної структури відібраними на місці його ущільнення. Відбір, упакування, транспортування та зберігання проб ґрунту непорушеної структури (монолітів) виконують згідно з ДСТУ Б В.2.1-8.

Нижче приведені способи лабораторного визначення:

- вологості ґрунту у природному стані;
- вологості ґрунту на границі розкочування;
- щільності ґрунту у природному стані (двома способами);
- розрахункової щільності ґрунту у сухому стані.

Для виконання лабораторних випробувань необхідно мати наступне **лабораторне обладнання та матеріали:**

1. Шафа сушильна або вакуумна сушильна;
2. Термометр зі шкалою до 200 °С, з ціною поділки 2 °С;
3. Ексикатор (ГОСТ 23932) з хлористим кальцієм прожареним у муфельній печі;
4. Стаканчики скляні (ГОСТ 23932) або алюмінієві;
5. Шпатель металевий;
6. Ніж з прямим лезом;
7. Щипці тигельні;
8. Ваги лаборат.(ГОСТ 24104) з гирями (ДСТУ, ГОСТ 7328);
9. Кільця-пробовідбірники (ДСТУ Б В.2.1-17-2009);
10. Лопатка пласка;
11. Штангенциркуль (ДСТУ, ГОСТ 166);
12. Насадка для вдавлювання кілець;
13. Прес гвинтовий для вдавлювання кілець;
14. Пластинки гладкі із скла або металу для накривання кілець;
15. Вазелін технічний або консистентне мастило;
16. Склянки лабораторні 0,5 -1,0 л;
17. Парафін;
18. Голка, нитка, висок;
19. Папір фільтрувальний;
20. Вода дистильована.

Фізичні властивості потрібно визначати не менше ніж для двох паралельних зразків, які відбирають з досліджуваної проби ґрунту. Визначення властивостей вираховують як середнє арифметичне за результатами паралельних визначень.

Різниця між паралельними визначеннями не повинна перевищувати:

- для вологості ґрунту - 0,2 % при кількості визначень від 1 до 5;
 - 0,6 % при кількості визначень від 5 до 10;
 - 2,0 % при кількості визначень від 10 до 50;
 - 4,0 % при кількості визначень від 50 до 100.
- для щільності ґрунту - 0,04 г/см³ у піщаних ґрунтах;
 - 0,03 г/см³ у пилувато-глинистих ґрунтах.

Точність обрахування повинна бути:

- для щільності..... 0,01 г/см³
- для вологості до 30%0,1 %

- для вологості більше 30%.....1,0 %

Точність зважування повинна бути:

- для маси від 10 до 1000 г..... 0,02 г
- для маси від 1000 до 5000 г..... 1,0 г

Точність вимірювання внутрішнього діаметра та висоти кільця-пробовідбірника повинна бути 0,1мм

Вологість ґрунту визначають як відношення маси води, вилученої із ґрунту висушуванням до постійної маси, до маси висушеного ґрунту. Зразок ґрунту для визначення вологості відбирають масою від 15 до 50 г із природних умов або із «монолітів» доставлених в лабораторію, поміщають у заздалегідь висушений, зважений і пронумерований стаканчик і щільно закривають кришкою.

Зразок ґрунту в закритому стаканчику зважують.

Стаканчик відкривають і разом з кришкою поміщають у нагріту сушильну шафу. Ґрунт висушують до постійної маси при температурі 105 ± 2 °С, чергуючи висушування і зважування. Перше сушіння піщаних ґрунтів триває протягом 3 год, а інших ґрунтів - протягом 5 год. Наступні висушування піщаних ґрунтів тривають 1 год, інших - 2 год.

Після кожного висушування ґрунт у стаканчику охолоджують в ексікаторі з хлористим кальцієм до температури приміщення і зважують. Висушування ґрунту продовжують до одержання різниці мас ґрунту зі стаканчиком при двох наступних зважуваннях не більше ніж 0,02 г.

Вологість ґрунту у відсотках вираховують за формулою:

$$w = \frac{100}{m_0 - m} (m_1 - m_0) \quad (33)$$

де, m - маса порожнього стаканчика з кришкою, г;

m_1 - маса вологого ґрунту зі стаканчиком і кришкою, г;

m_0 - маса висушеного ґрунту зі стаканчиком і кришкою, г;

Визначення вологості на границі розкочування ґрунту дає можливість визначити оптимальну вологість ущільнення.

Границя розкочування (пластичності) це - вологість ґрунту, при якій він розкочується в джгутики діаметром 3 мм, що починають розпадатись на шматочки довжиною від 3 до 10 мм.

Грунт у кількості від 40 до 50 г розминають ножем або шпателем у фарфоровій чашці, очищають від рослинних залишок розміром більше 1 мм, просівають крізь сито із сіткою №1, зволожують дистильованою водою до стану густої пасти і витримують протягом 2 год. у закритій посуді.

Невеликий шматочок ґрунтової пасти розкочують долонею на скляній або пластмасовій пластинці до утворення джгута діаметром 3 мм. Якщо джгут при цій товщині не тріскається - його збирають у грудочку і знову розкочують. Тепло від рук випаровує воду із розкочуваного ґрунту

І на якійсь спробі джгутики ґрунту при їх діаметрі 3 мм будуть розпадатися за поперечними тріщинами на шматочки довжиною від 3 мм до 10 мм.

Шматочки джгута збирають у стаканчики, накривають кришками і коли маса ґрунту в стаканчиках досягне 10 - 15 г, визначають вологість цього ґрунту.

Визначення щільності ґрунту

Щільність ґрунту визначають відношенням маси зразка ґрунту до його об'єму. Для визначення щільності ґрунту рекомендується два способи:

- для ґрунтів, що легко піддаються вирізанню або не зберігають своєї форми без кільця, використовують *метод ріжучого кільця*;
- для ґрунтів пилувато-глинистих, схильних кришитися або тих, що важко піддаються вирізанню – *метод зважування у воді парафінованих зразків*.

Визначення щільності ґрунту методом ріжучого кільця.

Для випробувань необхідно взяти ріжуче кільце - пробовідбірник з нержавіючого металу, яке має діаметр 50 - 70 мм, товщину стінки - 2 мм, висоту біля 30 мм і кут заточки зовнішнього краю, що ріже не більше ніж 30°. Кільця нумерують, вимірюють внутрішній діаметр і висоту та зважують. Зарезультатами вимірювань вираховують об'єм кільця з точністю до 0,1см³. Пластинки із гладкою поверхнею (зі скла, металу тощо) нумерують та зважують.

Поверхню ґрунту, з якого мають відібрати зразок для визначення його щільності, підготовляють - розчищають від рихлої поверхні і вирівнюють.

Металеве кільце-пробовідбірник змащують із внутрішньої сторони тонким шаром вазеліну або консистентного мастила і вдавлюють в підготовлену поверхню ґрунту. Потім ґрунт обрізають зовні кільця на глибину до 10 мм нижче ріжучого краю кільця і відокремлюють його від ґрунтового масиву. Ґрунт, що виступає за краї кільця, підрізають ножем, зачищають поверхню ґрунту на рівні

з краями кільця і закривають торці пластинками.

Кільце із ґрунтом і пластинками зважують.

Щільність ґрунту в грамах на кубічний сантиметр обчислюють за формулою:

$$\rho = \frac{(m_1 - m_0 - m_2)}{V} \quad (34)$$

де, m_1 - маса ґрунту з кільцем і пластинками, г;

m_0 - маса кільця, г;

m_2 - маса пластинок, г;

V - внутрішній об'єм кільця, см³.

Визначення щільності ґрунту методом зважування у воді

Вирізають зразок ґрунту об'ємом біля 50 см³ і надають йому округлої форми обрізаючи гострі виступи ножем. Зразок обв'язують тонкою міцною ниткою з вільним кінцем і петлею для підвішування зразка до ваги.

Парафін нагрівають у чистій посуді до температури 57 - 60 °С

Зразок разом з ниткою зважують і занурюють у розплавлений парафін на 2 - 3 с. Після виймання зразка і затвердіння парафіну нагрітою голкою проколюють повітряні бульбашки у парафінові і загладжують місця проколів до утворення щільної парафінової оболонки.

Охолоджений парафінований зразок зважують.

Вдруге парафінований зразок зважують у посудині з водою. Для цього один із підвісів ваг знімають, коромисло ваг урівноважують (при потребі додатковим вантажем). На місце знятого підвісу ваг підвішують на нитці парафінований зразок. Підтримуючи зразок за нитку під нього на ваги устанавлюють посуду з водою. Об'єм посуду, рівень води, довжина нитки повинні забезпечити повне занурення зразка у воду. При цьому зразок не повинен торкатися дна і стінок посуду.

Зважений зразок виймають із води, промокають фільтрувальним папером і зважують третій раз. Якщо показники третього зважування відрізняються від показників першого зважування більше ніж на 0,02 г зразок слід забракувати у зв'язку з негерметичністю парафінової оболонки.

Щільність ґрунту вираховують за формулою:

$$\rho = \frac{m \cdot \rho_p \cdot \rho_w}{\rho_p(m_1 - m_2) - \rho_w(m_1 - m)} \quad (35)$$

де, m – маса зразка ґрунту до парафінування, г;

m_1 - маса парафінованого зразка ґрунту, г;

m_2 - маса парафінованого зразка ґрунту у воді, г;

ρ_p – щільність парафіну, можна прийняти 0,9 г/см³

Визначення щільності сухого ґрунту

Для визначення щільності сухого ґрунту попередніми лабораторними дослідженнями визначають вологість і щільність ґрунту при цій вологості.

Щільність сухого ґрунту (щільність скелету сухого ґрунту) в грамах на кубічний сантиметр вираховують за формулою:

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + 0,01w} \quad (36)$$

де, ρ - щільність ґрунту, г/см³;

w – вологість ґрунту, %.

Питання для самоконтролю

1. Чим відрізняється піщаний ґрунт від глинистого?
2. Дайте формулювання фізичних характеристик ґрунтів: щільність в сухому стані, пористість, коефіцієнт пористості, вологість, щільність вологого ґрунту.
3. Як залежить коефіцієнт пористості від дисперсності ґрунту?
4. Яка суть коефіцієнта ущільнення?
5. Як визначають максимально можливу щільність ґрунту?
6. Нарисуйте приблизно компресійні криві глини, суглинку, супіску, піску.
7. Нарисуйте орієнтовно в системі координат «навантаження – деформація» графік деформації ґрунту при багаторазовому навантаженні.
8. Розкрийте фізичну суть стиснення водонасиченого ґрунту.
9. Як відрізняється фільтрація води в піску і глині?

10. Коли виникає гідродинамічний тиск ґрунтової води?
11. У якому ґрунті гідродинамічний тиск більший, чому?
12. В чому полягає небезпека швидкого навантаження глинистого водонасиченого ґрунту?
13. В чому полягає небезпека швидкого навантаження піщаного водонасиченого ґрунту?
14. Чому і як відбувається гідродинамічне розрідження водонасиченого рихлого піску?
15. У яких піщаних ґрунтах не відбувається гідродинамічне розрідження?
16. Що таке критична пористість ґрунту?
17. Що таке оптимальна вологість ґрунту при його ущільненні?
18. Як визначити оптимальну вологість ґрунту при його ущільненні?
19. Що дає більший приріст щільності - збільшення вологості ґрунту чи збільшення роботи ущільнення?
20. Як впливає вібрація на ущільнення піску?
21. Як впливає вологість на віброущільнення піску?
22. Наведіть криву залежності коефіцієнта віброущільнення піску від вологості і поясніть що спричиняє такий її характер.
23. Які фізичні процеси відбуваються при ущільненні ґрунту надважкими трамбівками?
24. Які види силового ущільнювального навантаження Вам відомі?
25. Якими видами контролю супроводжується ущільнення ґрунтів?
26. Що слід контролювати у входному контролі ущільнення ґрунтів?
27. Що підлягає операційному контролю ущільнення ґрунтів?
28. Що контролюють у заключному контролі ущільнення ґрунтів?
29. Які методи визначення фізичних показників ґрунту є сьогодні?
30. Розкрийте суть визначення вологості ґрунту.
31. Як визначають щільності ґрунту у польових умовах?
32. Як визначають щільності ґрунту у лабораторних умовах?

Список рекомендованої літератури

1. Герсеванов Н. М. Собрание сочинений / Н. М. Герсеванов. – М.: Стройвоенмориздат, 1948. –т. 2. – 374 с.
2. Баркан Д. Д. Виброметод в строительстве / Д. Д.Баркан. – М.: Гиссройиздат, 1959. – 315 с
3. *Технология* строительного производства: Справочник / Под ред. С. Я. Луцкого, С. С. Атаева. – М.: Высш. шк., 1991. – 384 с.
4. *Ущільнення ґрунтів у будівництві: навчальний посібник/* Уклад.: В.І. Терновий; І. М. Уманець, Л.С. Саушева; О. С. Молодід. – К.: КНУБА, 2015. – 136 с.
5. Методи лабораторного визначення фізичних властивостей. ДСТУ Б В.2.17-2009. – [Чинний від 2010-10-01]. – К.: Мінрегіонбуд України 2010. – 32 с. – (Національний стандарт України)
6. Визначення щільності ґрунтів методом заміщення об'єму. ДСТУ Б В.2.1.-21:2009 – [Чинний від 2010-10-01] – К.: Мінрегіонбуд України 2010. – 8 с. – (Національний стандарт України)
7. Ґрунти. Методи польового визначення характеристик міцності і деформативності. ДСТУ Б В.2.1-7-2000 (ГОСТ 20276-99) - [Чинний від 2001-03-01] – К.: Держбуд України 2000. – 81с. – (Міждержавний стандарт)

Навчальне видання

ТЕРНОВИЙ Віталій Іванович

**ФІЗИЧНІ ОСНОВИ
СПОСОБІВ УЩІЛЬНЕННЯ ҐРУНТУ**

Конспект лекцій