

Міністерство освіти і науки України
Національний університет водного господарства та
природокористування

Навчально-науковий інститут будівництва та архітектури
Кафедра автомобільних доріг, основ та фундаментів

03-03-209М

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до практичних занять та самостійної роботи
з навчальної дисципліни

«Фізико-хімічна механіка дорожніх матеріалів» для здобувачів
вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за освітньо-
професійною програмою «Будівництво та цивільна інженерія»
спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія»
всіх форм навчання

Рекомендовано
науково-методичною радою
з якості ННІБА
Протокол № 5 від 11.02.2025 р.

Рівне – 2025

Методичні вказівки до практичних занять та самостійної роботи з навчальної дисципліни «Фізико-хімічна механіка дорожніх матеріалів» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за освітньо-професійною програмою «Будівництво та цивільна інженерія» спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія» всіх форм навчання. [Електронне видання] / Зятюк Ю. Ю. – Рівне : НУВГП, 2025. – 39 с.

Укладач:

Зятюк Ю. Ю., канд. техн. наук, доцент кафедри автомобільних доріг, основ та фундаментів.

Відповідальний за випуск: Кузлю М. Т., д-р. техн. наук, професор, завідувач кафедри автомобільних доріг, основ та фундаментів.

Керівник групи забезпечення
спеціальності 192

«Будівництво та цивільна інженерія»

Караван В. В.

Попередня версія методичних вказівок 03-03-029

© Ю. Ю.Зятюк, 2025

© НУВГП, 2025

ЗМІСТ

	стор.
1. Основні поняття і термінологія	4
2. Класифікація методів технічної меліорації	4
3. Поліпшення властивостей природних матеріалів гранулометричними добавками (метод оптимальних сумішей)	6
4. Поліпшення дисперсних ґрунтових матеріалів ущільненням за рахунок механічного впливу	9
4.1 Методи ущільнення статичними механічними навантаженнями	9
4.2 Ущільнення ґрунтів котками	12
4.3 Ущільнення структурно нестійких ґрунтів	15
4.4 Покращення властивостей слабких водонасичених ґрунтів	19
5. Фізико-хімічні методи покращення ґрунтів	25
Рекомендована література	30
Додатки. Умови задач	31

1. Основні поняття і термінологія

Фізико-хімічна механіка дорожньо-будівельних матеріалів - розділ колоїдної хімії, що вивчає закономірності структуроутворення в дисперсних системах, механічні властивості структурованих систем та різноманітні будівельні матеріали на їх основі, а також властивості цих матеріалів.

Колоїдна хімія – галузь хімії, яка вивчає дисперсні системи і фізико-хімічні явища на межі розділу фаз.

Технічна меліорація ґрунтів – це заходи, спрямовані на покращення механічних властивостей природних порід – надання їм таких характеристик, які вони не мають в природному стані.

Ґрунти, що потребують покращення властивостей:

- слабкі ґрунти (якщо $E < 5$ МПа, $\varphi < 12^\circ$);
- просідаючі ґрунти ($\epsilon_{sl} \geq 0,01$);
- пухкі піски ($e > 0,8$);
- насипні ґрунти;
- мулясті ґрунти.

2. Класифікація методів технічної меліорації

Класифікація методів технологічної меліорації ґрунтів розглядає їхнє поліпшення незалежно від виду будівництва, але з урахуванням структурних особливостей ґрунтів або суті процесів, що відбуваються на межі розділу фаз при закріпленні ґрунтів.

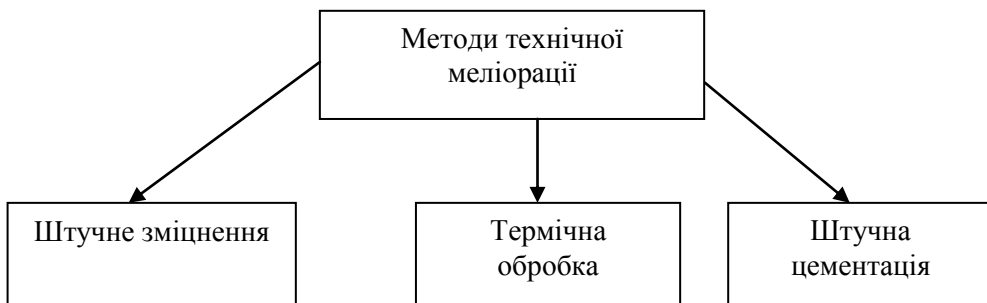
Академік Є.М.Сергєєв існуючі методи поліпшення інженерно-геологічних властивостей ґрунтів поділяє на три групи :

- 1) штучної зміни властивостей ґрунтів без істотної зміни їх дисперсної природи;
- 2) термічної обробки;
- 3) штучної цементації.

При виділенні груп методів технічної меліорації ґрунтів за основу прийнято різні фактори. Як видно з назви першої групи методів, таким фактором є те, що зміна властивостей ґрунтів відбувається без істотної зміни їхньої дисперсної природи.

Обґрунтування не зовсім точне, тому що методи оптимальних сумішей, електрохімічного зміцнення і штучного засолення, що входять у цю групу, значно змінюють дисперсність ґрунтів, особливо метод оптимальних сумішей.

Перша група (штучне змінення) включає наступні види методів технічної меліорації ґрунтів: метод оптимальних сумішей; ущільнення; штучне засолення, вапнування.



- 1) метод оптимальних сумішей
- 2) ущільнення
- 3) засолення
- 4) вапнування

- 1) прогрівання
- 2) опік
- 3) замороження

- 1) цементация
- 2) силікатизация
- 3) бітумізація
- 4) смолізація
- 5) глинізація

В ґрунтах існують такі типи структурних контактів між окремими частинками дисперсного середовища:

Фазові контакти є найбільш міцними, вони встановлюються на рівні атомних зв'язків, і мають міцність кристалічної решітки 50 МПа і більше. Характерні для магматичних порід (в результаті опіку також отримуються фазові контакти).

Перехідні контакти – характеризуються значно меншою міцністю, порівняно із фазовими. Називаються перехідними тому, що вони можуть переходити в інший стан під дією води. Притаманні лесовим і лесовидним ґрунтам, і мають міцність в сухому стані до 1 МПа. При взаємодії з водою відбувається

руйнування цих контактів, вони переходять у коагуляційні контакти.

Коагуляційні контакти – частинки взаємодіють між собою не безпосередньо, а через водні плівки, які оточують ці частинки. Вони притаманні практично всім глинистим ґрунтам.

Контакти зачеплення – існують між сипучими частинками, і виникають в результаті механічного зачеплення.

Методи технічної меліорації направлені, в першу чергу, на зміцнення існуючих контактів між окремими частинками, по-друге, створення нових контактів.

3. Поліпшення властивостей природних матеріалів гранулометричними добавками (метод оптимальних сумішей)

Класифікація частинок за розмірами:

- Глинисті частинки ($d < 0,005$ мм)
- Пилуваті частинки ($0,005 \leq d \leq 0,05$ мм)
- Піщані частинки ($0,05 \leq d \leq 2$ мм)
- Гравійні частинки ($2 \leq d \leq 10$ мм)
- Галькові частинки ($10 \leq d \leq 200$ мм)
- Валуні ($d > 200$ мм)

$$n_m + n_n + n_{ic} = 1 \quad (100\%) \quad (3.1)$$

де $n_m + n_n + n_{ic}$ вміст складових в суміші за масою.

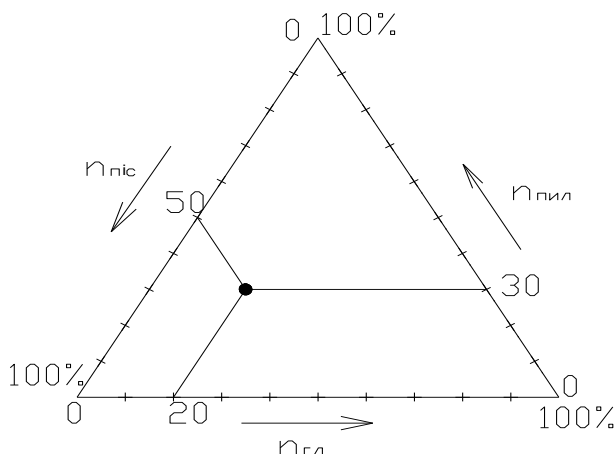


Рис. 3.1 Графічна інтерпретація зернового складу
 $n_{gl} = 20\%$, $n_{nil} = 30\%$, $n_{nic} = 50\%$

Оптимальною, з точки зору механічних впливів, є така суміш частинок, яка має найменший ступінь зміни властивостей за даними, водно-тепловими умовами. Точніше, це суміш, яка має найбільший внутрішній опір зовнішнім впливам за рахунок максимальної питомої поверхні частинок, причому пористість в цьому випадку є фізичною характеристикою, яка пов'язана з оптимальністю.

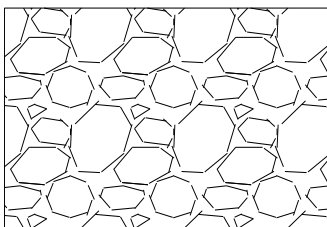


Рис. 3.2 Схема структури дисперсного ґрунту (суміш різних фракцій частинок)

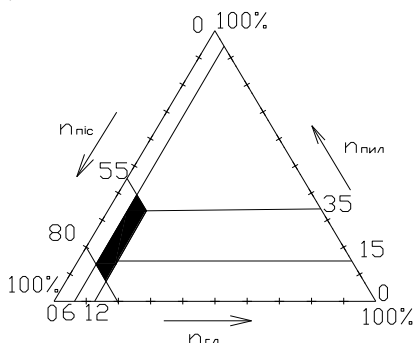
Фактично, на основі експериментів було встановлено наступні вмісти фракцій в оптимальній суміші:

Вміст частинок в оптимальній суміші

Таблиця 3.1

Розмір частинок фракцій, мм	Вміст фракцій, %			
	нормальне зволоження		надмірне зволоження	
	<i>A1</i>	<i>A2</i>	< <i>B1</i>	< <i>B2</i>
2...0,25	45-60	25-45	45-75	25-45
0,25...0,05	10-20	20-40	15-30	25-55
0,05...0,005	15-35	15-35	15-25	15-25
<0,005	6-12	8-14	3-8	3-10

Нанесемо зерновий склад для суміші *A1* в трикутних координатах (рис3.3):

Рис. 3.3 Графічна інтерпретація зернового складу суміші *A1*

Аналітичний метод розрахунків оптимальних сумішей

Оптимальні суміші підбираються, в першу чергу, за вмістом глинистих фракцій. Розглянемо визначення оптимального складу із двох складових ґрунтів.

Наприклад, в першому ґрунті маємо a % (процентний вміст глинистих фракцій у суміші), в 2-ому ґрунті – b %, d % - вміст глинистих фракцій у суміші. Знайти співвідношення між першим і другим ґрунтом?

Вміст ґрунту у суміші визначаємо за формулою

$$\left(1 - \frac{N}{100}\right)a + \frac{N}{100}b = d, \quad (3.2)$$

де N – вміст першого ґрунту у суміші, визначається за формулою

$$N = \frac{100(d - a)}{b - a}. \quad (3.3)$$

4. Поліпшення дисперсних ґрунтових матеріалів ущільненням за рахунок механічного впливу

Розрізняють такі методики і випадки:

Види ущільнення:

- 1) ущільнення ґрунтових матеріалів у насипах;
- 2) ущільнення ґрунтів в основі;

Методи ущільнення бувають:

- 1) механічний метод – за рахунок механічних впливів різноманітних механізмів (котків):
 - а) статичними навантаженнями;
 - б) динамічними навантаженнями;
- 2) метод замочування (стосується просідаючих ґрунтів);
- 3) метод прискореної консолідації ґрунтів довантаженням;
- 4) метод ущільнення вибухами;

4.1 Методи ущільнення статичними механічними навантаженнями

Розглянемо ущільнення глинистих ґрунтів циклічними статичними навантаженнями. Для цього проведемо дослід.

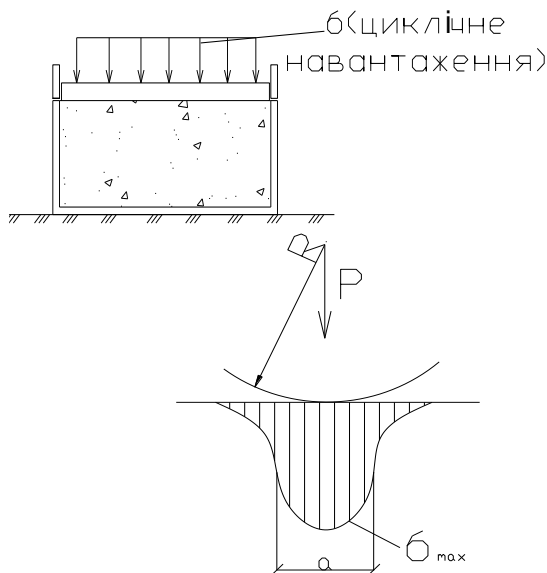


Рис. 4.1 Схема приладу циклічного ущільнення ґрунтів та епіюра розподілу напружень під колесом ущільнюючого тиску

Глинисті частинки складаються із активних глинистих мінералів:

- каолінит $SiO_2 \cdot 2Al_2O_3 \cdot 2H_2O$;
- монтморилоніт;
- гідрослюда;

Основна властивість цих мінералів полягає в тому, що вони мають на своїй поверхні не скомпенсовані електричні заряди (від'ємні). Не скомпенсовані електричні заряди, що знаходяться на поверхні, викликають появу дуже тонких гідратних плівок зв'язаної води, товщина яких складає приблизно 10^{-6} см. Існування цих плівок спричиняє взаємодію між частинками глинистого ґрунту через коагуляційні зв'язки.

Змінюючи вологість, визначимо граничну щільність сухого ґрунту.

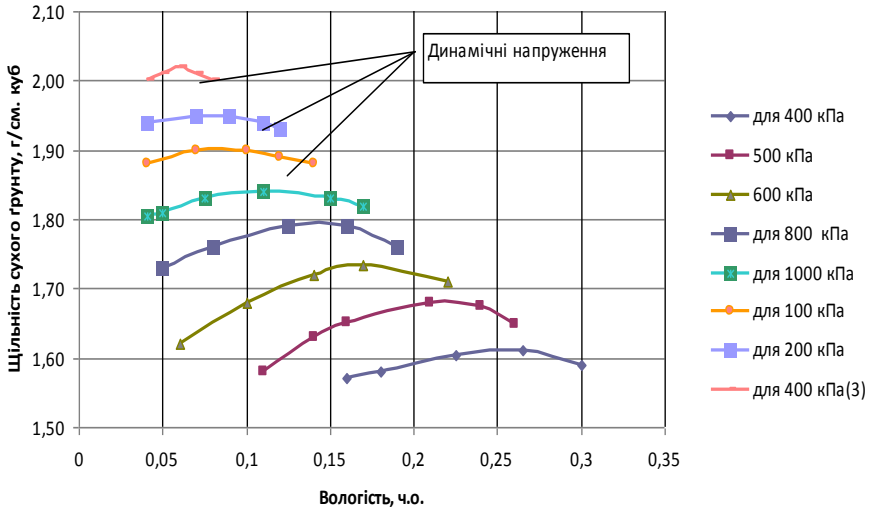


Рис. 4.2 Залежність щільності ґрунту від вологості та ущільнюючого тиску при ущільненні у приладі циклічного ущільнення $\sigma_3 > \sigma_2 > \sigma_1$

W_{opt} – оптимальна вологість – це вологість, при якій відбувається максимальне ущільнення ґрунту до $\rho_{d \max}$ при даних умовах ущільнення.

- Для глини $W_{opt} = (16-26)\%$;
- суглинку $W_{opt} = (12-22)\%$;
- супіску $W_{opt} = (9-15)\%$;
- піску $W_{opt} = (8-13)\%$;

Оптимальна вологість пилюватих і піщаних часток пов'язана не стільки із гідратними плівками, як із капілярними силами. Збільшення вологості глинистих ґрунтів пояснюється тим, що вони мають набагато більшу питому поверхню у порівнянні з пісками. Оптимальна вологість спричиняється рівноважним станом між зовнішнім навантаженням σ і внутрішнім тиском води (енергією взаємодії) у гідратних плівках або капілярних менісках.

4.2 Ущільнення ґрунтів котками

Ущільнення ґрунтів є найбільш відповідальною операцією, від якої залежить міцність, стійкість, деформації насипу автомобільної дороги. При цьому, контролюючим показником, даного процесу, є щільність сухого ґрунту у насипу ρ_{dn} :

$$\rho_{dn} = K \cdot \rho_d^{\max(opt)} \quad (4.1)$$

$\rho_d^{\max}$ - щільність сухого ґрунту, визначається лабораторним шляхом.

K – коефіцієнт ущільнення, який задається ДБН залежно від категорії дороги, частини насипу і дорожньо-кліматичної зони.

Ущільнення котками на пневмоходу

Максимальні напруження під колесом ущільнюючого механізму

$$\sigma_{\max} = \frac{1,44 \cdot P}{B^2} \quad (4.2)$$

P – вага, яка передається на колесо;

R – радіус колеса;

B – ширина контакту між колесом і ґрунтом;

Ущільнення котками з гладкими вальцями

Максимальні напруження під гладким вальцем ущільнюючого механізму

$$\sigma_{\max} = \sqrt{\frac{g \cdot E}{R}} \quad (4.3)$$

g – прискорення сили тяжіння;

E – модуль деформації ґрунту після ущільнення;

R – радіус вальця;

Як правило, максимальне значення тисків, що передаються на ґрунт у процесі ущільнення, змінюються в межах:

$$\sigma_{\max} = 0,3 \dots 1,2 \text{ МПа} \quad (\sigma_{\max} = 3 \dots 12 \text{ кГс/см}^2).$$

Мета, яка ставиться при ущільненні ґрунтів у насипах :

- 1) руйнування існуючих мікроагрегатів і крупних грудок ґрунту;
- 2) створення нової структури ґрунту, більш щільної у порівнянні із структурою ґрунту у природному стані.

Щільність ґрунту в насипу, як правило, перевищує щільність ґрунту перед розробкою.

Відносний коефіцієнт ущільнення ґрунту:

$$K_1 = \frac{\rho_{dH}}{\rho_{dnn}} \quad (4.4)$$

ρ_{dnn} - природна щільність ґрунту

Товщина шару ґрунту що відсипається, яка необхідна для нормального його ущільнення, як правило, підбирається експериментально (зазвичай не перевищує 30 см для нормального ущільнення).

Вологість ґрунту при його ущільненні має бути близькою до оптимальної, у кращому випадку в межах: $W_{\min, \max} = W_{opt} \pm 2\%$

В разі, якщо $W < W_{opt}$ (суттєво) – потрібно збільшувати інтенсивність ущільнення, або ущільнюючий тиск, чи до зволожувати ґрунт. Якщо $W > W_{opt}$ (суттєво, на 6-7 %) – тоді необхідно зменшити інтенсивність тиску, а в разі неотримання потрібного значення щільності – підсушувати ґрунт, або додавати до нього певні домішки.

Ущільнення ґрунтів динамічними навантаженнями (віброкотками)

Динамічні ущільнюючі напруження під вібровальцем:

$$\sigma_g = i_{\max} \cdot A \quad (4.5)$$

$i_{\max}$ - максимальний окремих питомий віброімпульс; A – емпірична постійна, $A = 105 \text{ с}^{-1}$;

$$i_{\max} = \frac{0,225 \cdot P_o}{f \cdot F} \quad (4.6)$$

P_o – величина вимушуючої сили вібратора; f – частота коливань вібратора, Гц; F – площа контакту вібровальця і ґрунту:

$$F = a \cdot B \quad (4.7)$$

$$a = 4 \sqrt{\frac{A \cdot I \cdot R}{B \cdot E}} \quad (4.8)$$

I – імпульс окремого віброудару, ($H \cdot c$); R – радіус вібровальця;

E – модуль деформації ґрунту в ущільненому стані.

$$I = \frac{\sqrt{2P_o}}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (4.9)$$

Згідно з діючими нормативними документами, в процесі зведення ґрунтової споруди проводиться геотехнічний контроль.

Функції геотехнічного контролю: визначити показники фізичних властивостей ґрунту після ущільнення (вологість, щільність), порівняти їх з проектними значеннями щільності для того, щоб було забезпечене виконання умов.

Геотехнічний контроль – це не є просте порівняння щільності з еталонним значенням, він передбачає аналіз результатів, на основі якого вносяться корективи проект.

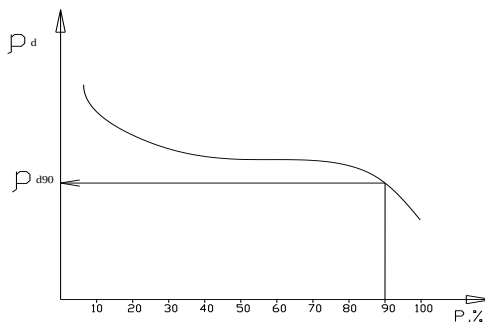


Рис. 4.3 Графік забезпеченості значень щільності ґрунту в насипу

$$P_{\Sigma} = \sum P_i, \quad \rho_{dn} \geq \rho_{d90} \quad (4.10)$$

де $P_i = \frac{n}{N} \cdot 100\%$ - ймовірність появи того чи іншого ґрунту

4.3 Ущільнення структурно нестійких ґрунтів

Під структурно нестійкими ґрунтами розуміють такі ґрунти:

- 1) просідаючі
- 2) слабкі
- 3) пухкі піски

Просідаючі – лесові і лесовидні ґрунти, що можуть давати додаткові деформації просідання при зволоження водою під власною вагою і в результаті дії додаткового навантаження.

Характерні властивості:

- пористість $n \geq 60\%$;
- число пластичності $I_p = 3 \dots 14$
- вміст пилюватих частинок $0,005 < d \leq 0,05$ мм, $n \geq 60\%$.

Кількісний показник, що характеризує явище просідання:

- відносне просідання ε_{sl} ;
- початковий тиск просідання p_{sl} .

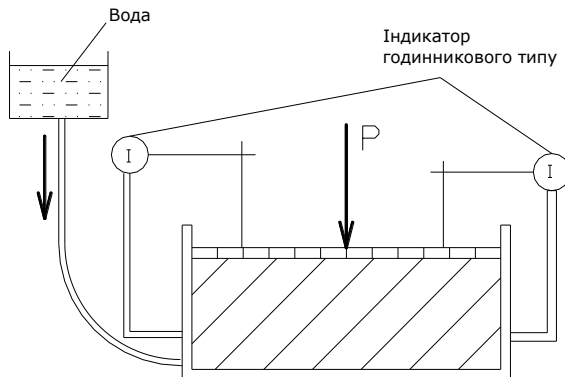


Рис. 4.4 Схема приладу для визначення просідання

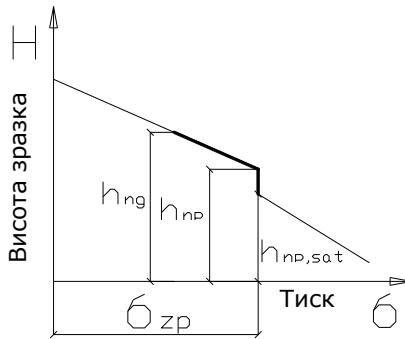


Рис. 4.5 Графік залежності висоти зразка в приладі від навантаження

Відносне просідання:

$$\varepsilon_{sl} = \frac{h_{hp} - h_{hp,sat}}{h_{hg}}$$

Згідно з ДБН є два типи ґрунтів за просіданням:

- 1) якщо просідання ґрунту в результаті замочування під дією власної ваги не перевищує 5 см – 1-ий тип за просіданням;
- 2) якщо просідання товщі ґрунту S_{sl} перевищує 5 см – 2-ий тип за просіданням.

Ущільнення просідаючих ґрунтів

Метод ущільнення важкими трамбівками

Застосовується для 1-го типу просідаючих ґрунтів при товщині шару просідаючого ґрунту, яка не перевищує 4 м.

При висоті падіння трамбівки з висоти 3-4 м, товщина шару, що ущільнення, визначають за формулою:

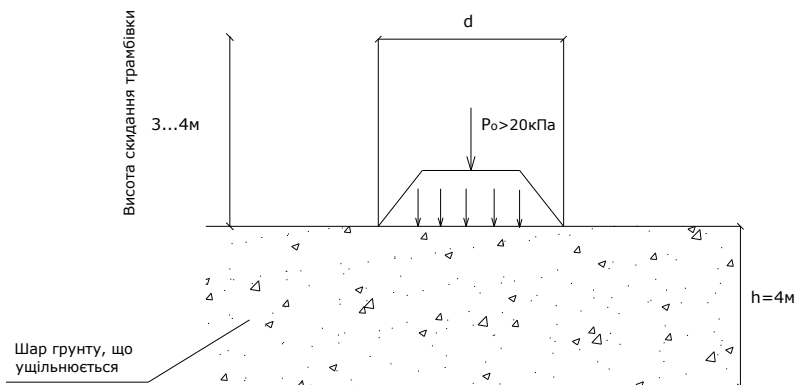


Рис. 4.6 Схема ущільнення важкою трамбівкою

$$h_y = K \cdot d \quad (4.11)$$

d – діаметр робочої поверхні трамбівки;

K – коефіцієнт, який залежить від типу ґрунту:

- для пісків і супісків $K = 1,6$;
- для глин $K = 1,4$.

Ущільнення виконують екскаватором драглайн. Вантажопідйомність екскаватора має мінімум в 1,5 рази перевищувати вагу трамбівки.

Маса трамбівки:

$$m_{тр} = \frac{P_0 \cdot A}{g} \quad (4.12)$$

P_0 – тиск, який передається від трамбівки на ґрунт в статичному стані, $P_0 \geq 20$ кПа; A – площа поверхні трамбівки; g – прискорення сили тяжіння.

Метод ущільнення ґрунтовими палями

Застосовується для 1-го і 2-го (частіше 2-го) типу ґрунту.

Ущільнення ґрунтовими палями полягає в тому, що в ґрунтовій товщі буряться свердловини на всю довжину просідаючих товщ з певним кроком

(розташованих в шаховому порядку):

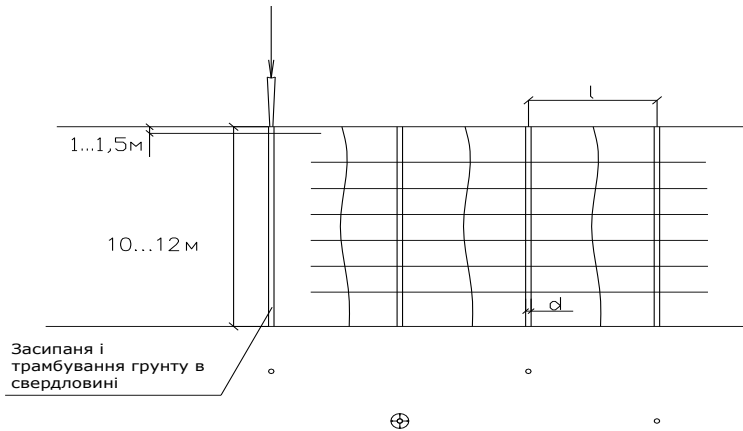


Рис. 4.7 Схема уцілювання просідаючого ґрунту ґрунтовими палями

l – відстань між свердловинами:

$$l = 0.95 \cdot d \sqrt{\frac{\gamma_{дуц}}{\gamma_{дуц} + \gamma_{дп}}} \quad (4.13)$$

d – діаметр свердловин; ρ_s – щільність уцілюєного ґрунту;

ρ_d – щільність уцілюєного ґрунту в природному стані.

Поверхню ґрунту уцілюєного важкою трамбівкою (1-1,5 м), а нижню – ґрунтовими палями.

Метод уцілюєнення замочуєванням

Метод замочуєвання полягає у тому, що ще до того, як почалося будівництво, територію, де воно буде проводитися, замочують водою, тим самим ініціюють просідання.

Роблять дамбочки, у просторі між якими бурять свердловини; потім цей простір заливають водою. Під дією власної ваги ґрунту

відбувається його самоущільнення в нижньому шарі замоченої товщі. Коли вода зійде, верхній шар доущільнюють важкою трамбівкою.

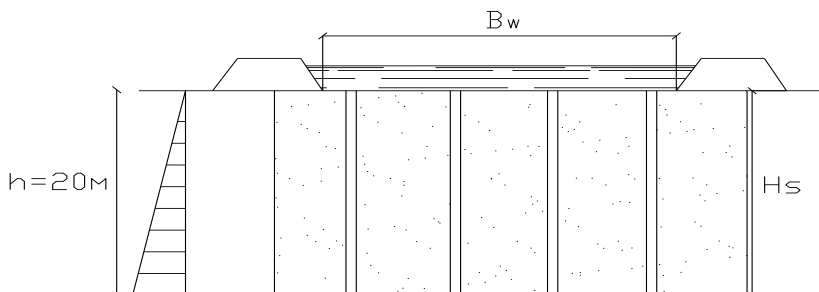


Рис. 4.8 Схема ущільнення просідаючого ґрунту замочуванням

Ширина ставу, в який подають воду:

$$B_w = B + 0,6 \cdot H_s \quad (4.14)$$

B – ширина споруди; H_s – товщина просідаючого ґрунту.

Метод ущільнення зволоженням з вибухами

Метод ущільнення зволоженням з вибухами схожий до методу ущільнення зволоженням. Але в свердловини можуть ще закладати вибухівку (це можливо тоді, коли в даній місцевості немає забудови).

4.4 Покращення властивостей слабких водонасичених ґрунтів

До слабких водонасичених ґрунтів відносять ґрунти, що мають великий коефіцієнт пористості ($n > 0,7$), причому пори водонасичені ($S_r \geq 0,8$). Це, як правило, суглинки і супіски з числом пластичності в межах $5 \leq I_p \leq 15$, низькі показники стисливості ($E < 5$ МПа), кут внутрішнього тертя $\varphi < 10^0$.

За походженням – це алювіальні (озерні) відкладення, заторфовані ґрунти, сапропелі тощо.

Засоби будівництва на слабких ґрунтах:

- улаштування ґрунтових дренажних паль;
- заміна ґрунту і влаштування ґрунтових подушок;
- застосування геотекстильних матеріалів.

Розглянемо модель слабого водонасиченого ґрунту:

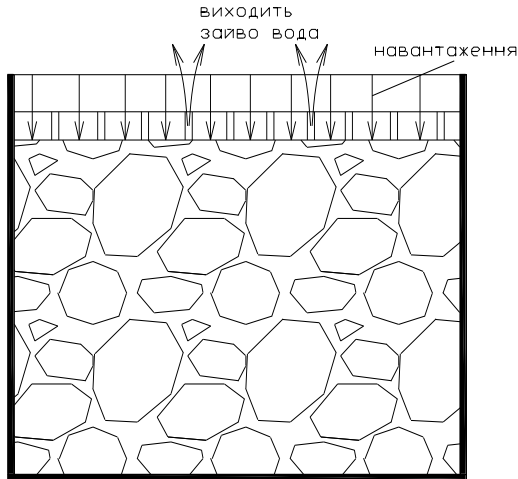


Рис. 4.9 Схема структури водонасиченого ґрунту

Модель ґрунту К. Терцаґи - Герсєванова:



Рис. 4.10 Схема моделі Терцаґи-Герсєванова

q – навантаження від споруди, яка будується

У водонасиченому ґрунті зовнішні навантаження викликають дві системи тисків:

- 1) поровий чи надлишковий тиск (u), який виникає у воді;
- 2) ефективний тиск (σ) чи напруження, яке виникає у скелеті ґрунту.

$$q = u + \sigma. \quad (4.15)$$

Послідовність ущільнення водонасиченого ґрунту наступна:

- 1) в перший момент часу все навантаження передається на воду, ґрунт не має опорних властивостей (ґрунт веде себе як рідина). Задача полягає в тому, щоб зменшити надлишковий тиск і перекласти навантаження на скелет ґрунту.

$$t = 0 \Rightarrow H = u / \gamma_w, \quad \sigma = 0;$$

$$2) t \neq 0, \quad \sigma \neq 0, \quad u \neq 0.$$

- 3) коли $t = \infty$ (умовно), $q = \sigma$ – все навантаження передається на скелет ґрунту, поршень піде вниз, вода витиснеться, $u = 0$.

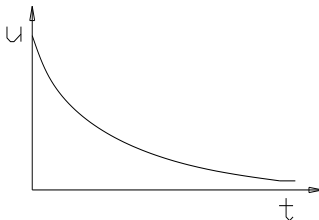


Рис. 4.11 Графік зменшення порового тиску в часі

Процес поступового ущільнення ґрунту з одночасним відтисканням порової води, називається *консолідацією*.

Швидкість консолидації залежить, в першу чергу від водопроникності ґрунту, що характеризується коефіцієнтом фільтрації, і в другу чергу, від стисливості ґрунту, що характеризується величиною коефіцієнта стисливості.

Коефіцієнт консолидації визначається за формулою

$$C_v = \frac{K_f}{m_0 \cdot \gamma_w} \quad (4.16)$$

K_f – коефіцієнт фільтрації ґрунту;

m_0 – коефіцієнт стисливості, який визначається з компресійної кривої, $m_0=1,2/E$.

γ_w – питома вага води; C_V [м²/с].

Закон Дарсі: $V = K_f \cdot I$

I – градієнт напору, який дорівнює різниці напорів, поділений на шлях фільтрації:

$$I = \frac{h_1 - h_2}{l} \quad (4.17)$$

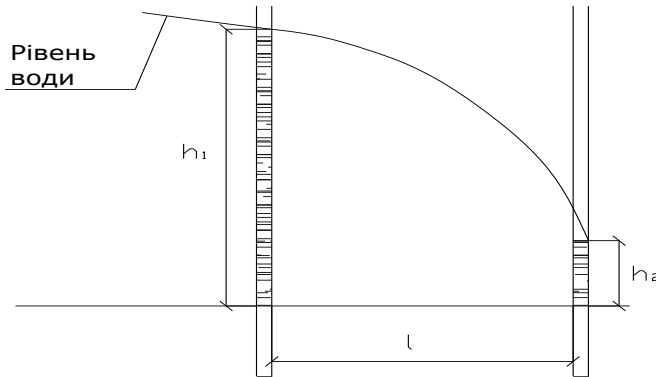


Рис. 4.12 Схема до визначення градієнта напору

Фізична суть коефіцієнта фільтрації: коефіцієнт фільтрації дорівнює швидкості фільтрації при одиничному градієнті, [м/с].

Конкретний приклад: (вода відтискається в одному напрямку знизу – в верх).

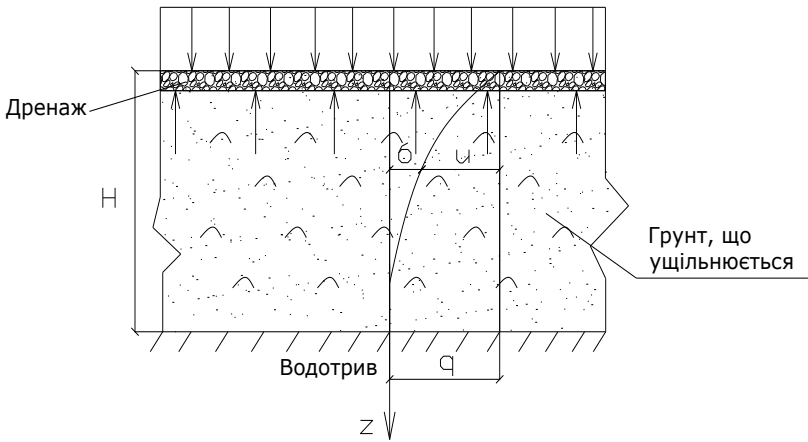


Рис. 4.13 Схема консолідації шару ґрунту

H – товщина шару ґрунту;

$$H_w = \frac{u}{\gamma_w}. \quad (4.18)$$

Потрібно знайти розподіл в часі надлишкових напорів.

Диференціальне рівняння консолідації:

$$\frac{dH_w}{dt} = C_v \frac{d^2 H}{dz^2} \quad (4.18)$$

Для одновимірної задачі рівняння має такий розв'язок:

$$H_w = \frac{4q}{\pi \cdot \gamma_w} \sum_{i=1}^n \frac{1}{i} e^{\frac{-C_v \cdot i^2 \pi^2 \cdot t}{4H^2}} \cdot \sin\left(\frac{i \cdot \pi \cdot z}{2 \cdot H}\right) \quad (4.19)$$

H_w – надлишковий напір; t – час; i – ціле число (1,3,5 – непарне); z – вертикальна координата;

Рішення рівняння консолідації для дрен:

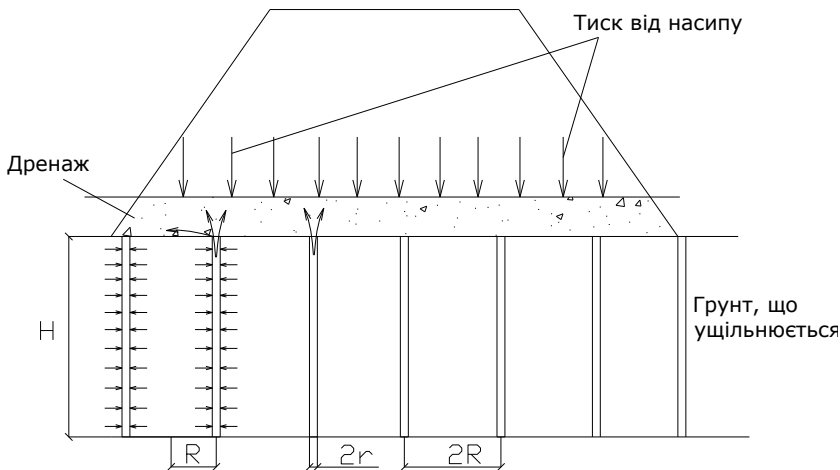


Рис. 4.14 Розрахункова схема консолідації шару основи насипу

R – радіус впливу дрени; $2r$ – діаметр дрени

Загальний ступінь консолідації:

$$u_{\Sigma} = 1 - (1 - u_r)(1 - u_z) \quad (4.20)$$

Загальний ступінь консолідації має дві складові: u_r - радіальна кнсолідація (горизонтальна); u_z - вертикальна консолідація (осьова)

$$u_r = 1 - e^{-M' \cdot t} \quad (4.21)$$

$$M' = \frac{K_f}{a \cdot \gamma_w \left(\frac{R^2}{2} \cdot \ln \frac{R}{r} - \frac{3}{8} R^2 \right)} \quad (4.22)$$

a – коефіцієнт стисливості; t – час

Осьова консолідація:

$$u_{\Sigma} = 1 - \frac{8}{\pi^2} e^{-N \cdot t} \quad (4.23)$$

$$\text{де } N = \frac{\pi \cdot C_v}{4 \cdot h^2}; \quad (4.24)$$

Знаючи u_z будуємо графік залежності загального ступеня консолідації від часу консолідації (задаючись послідовно значеннями часу з моменту докладання навантаження).

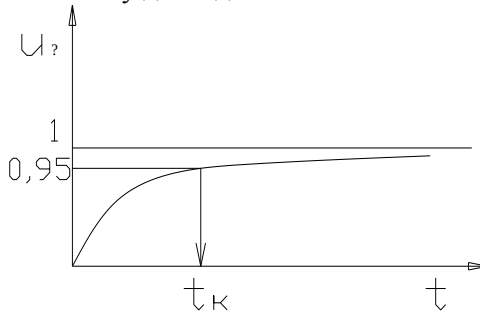


Рис. 4.15 Графік консолідації основи насипу

5. Фізико-хімічні методи покращення ґрунтів

Класифікація методів покращення ґрунтів:

1. За видом в'язучого:

- цементация;
- вапнування;
- силікатизация;
- бітумізація;
- смолізація;
- глинізація;

2. За способом внесення:

- перемішування на поверхні (для невеличких поверхневих шарів);
- нагнітання в'язучих речовин;
- термічна обробка;
- електрохімічна обробка.

Вибір в'язучого матеріалу і технології покращення ґрунтової основи здійснюється на базі техніко-економічного порівняння варіантів:

1) **вапнування** ґрунту дорожнього покриття полягає у внесенні в ґрунт дорожнього полотна вапна. **Вапном** (оксид кальцію або магнію CaO , MgO) називається в'язуча речовина яку одержують

шляхом випалювання нижче температури спікання карбонатних порід (крейда, вапняк доломіт).

$CaO + H_2O = Ca(OH)_2$. (2) – операція гасіння ($Ca(OH)_2$ пушонка)

В промисловості негашене вапно отримують в результаті термічного розкладання вапна (1):



Основними процесами, які зумовлюють збільшення міцності в початковий період твердіння ґрунтового вапна, вважається кристалізація гідрату окису кальцію ($Ca(OH)_2$), а при тривалих термінах взаємодії – кристалізацію і карбонізацію гідрату окису кальція, яка відбувається під впливом вуглекислого газу, який знаходиться в повітрі і у воді.

Реакція виникнення гідросилікатів результаті взаємодії гідрату окису кальцію (3) з дрібодисперсними частинками ґрунту SiO_2 :



2) цементация ґрунтів виконується в двох варіантах:

- у піщаних і гравіюватих ґрунтах;
- у скельних ґрунтах.

Цемент – мінеральна порошкоподібна речовина – узагальнена назва штучних неорганічних в'язучих речовин, переважно гідравлічних. Застосовується для зменшення водопроникності піщаних і гравіюватих ґрунтів, а також, цементації тріщин у скельних ґрунтах. Для здійснення цементації буряться свердловини, у них опускаються спеціальні ін'єктори з гумовими манжетами. Потім туди подається цементний розчин, який утворює область закріпленого ґрунту. Потім ін'єктори переміщують в іншу точку і повторюють ті ж самі операції.

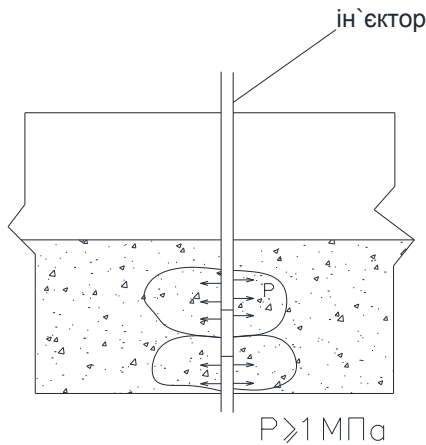


Рис. 5.1 Схема ін'єктування

Цементацию використовують для створення цементогрунту. В цьому випадку, портландцемент перемішують з мінеральними частинками ґрунту (краще застосовувати піщано-гравійну суміш).

3) **метод силікатизації** – метод, який заснований на застосуванні для закріплення водонасиченого розчину силікату натрію, який називають «рідке скло» ($\text{Na}_2\text{O} \times n\text{SiO}_2$). Силікат натрію отримують при виробництві скла.

Силікатизація може бути в залежності від ґрунтів:

- одно розчинна;
- двох розчинна.

Однорозчинну силікатизацію застосовують для відносно, малорозчинних ґрунтів.

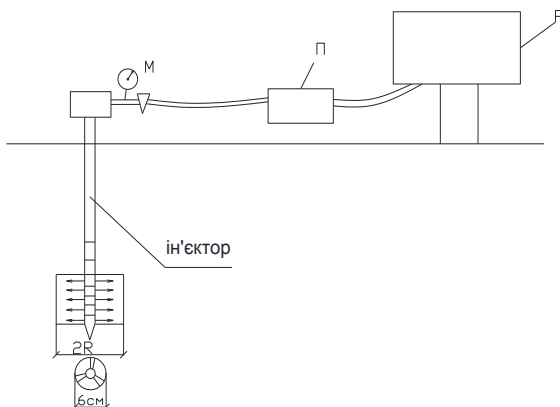
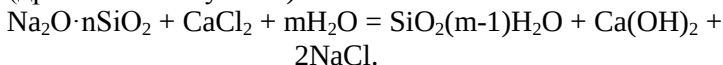


Рис. 5.1 Схема силікатизації П – помпа; Р – резервуар; М – манометр;

R – радіус закріплення, залежно від проникності ґрунту, і змінюється в межах 0,2...0,8 м.

Дворозчинна силікатизація застосовується у водопроникних ґрунтах (дрібні піски і супіски).



Міцність ґрунту забезпечується плівками навколо частинок, контакти твердіють з часом. Набирання міцності ґрунту в результаті силікатизації відбувається в результаті твердіння гелю, хлористий кальцій прискорює твердіння.

У водонасичених зв'язних ґрунтах (важкі суглинки і глини) застосовують електросилікатизацію, яка полягає у тому, що до ін'єкторів приєднується постійне електричне поле ($\pm$), і відбувається рух обмінних катіонів (Na^+). Це явище прискорює розповсюдження у ґрунтовій товщі рідкого скла. Відстань між ін'єкторами збільшується (вона визначається дослідним шляхом).

4) **смолізація** – це нагнітання в ґрунт синтетичних смол органічного походження, таких як карбонатна чи фармальдегідна, іноді епоксидна смола.

Недолік – ці смоли токсичні і шкідливі для навколишнього середовища, застосовуються лише для локальних об'єктів, де немає підземних вод.

5) **бітумізація** – нагнітання у скельні ґрунти гарячого бітуму, використовують, як правило, для створення водооупірних елементів у гідротехнічному будівництві.

б) термічна обробка – застосовується для укріплення просідаючих ґрунтів, для цього ґрунти нагрівають до температури 300-500⁰ С.

Рекомендована література

1. Белятинський А. О., Краюшкіна К. В. Фізико-хімічна механіка дорожно-будівельних матеріалів. Київ : НАУ, 2016. 244 с.
2. Дворкін Л. Й. Властивості мінеральних будівельних матеріалів : навч. посіб. Рівне : НУВГП, 2019. 418 с.
3. Кузло М. Т. Інженерно-геологічні вишукування, ґрунтознавство та механіка ґрунтів : навч. посіб. [Електронне видання]. Рівне : НУВГП, 2024. 267 с.
4. ДСТУ 9116:2021. Бітум та бітумні в'язучі. Бітуми дорожні, модифіковані полімери. Технічні умови. [Чинний від 2022-01-01]. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2021. 24 с.
5. ДСТУ 9179:2022. Щебінь та гравій зі щільних гірських порід і металургійних шлаків для дорожнього будівництва. Методи фізико-механічних випробувань: Національний стандарт України. [Чинний від 2023-01-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022. 35 с.
6. ДСТУ 4044:2019. Бітуми нафтові дорожні в'язкі. Технічні умови: Національний стандарт України. [Чинний від 2021-01-01]. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. 22 с.
7. ДСТУ Б В.2.7-84-99 Будівельні матеріали. Мастики покрівельні та гідроізоляційні. Методи випробувань (ГОСТ 26589-94). [Чинний від 2006]. К. : Держстандарт України, 2002. 46 с.
8. ДСТУ Б В.2.7-116-2002. Будівельні матеріали. Матеріали герметизуючі для швів аеродромних покриттів. Загальні технічні умови (ГОСТ 30740-2000): Національний стандарт України. [Чинний від 2003-01-01]. Київ : Держбуд України, 2002. 21 с.
9. ДСТУ Б В.2.7-129:2013. Емульсії бітумні дорожні. Технічні умови: Національний стандарт України. [Чинний від 2014-01-01]. Київ : Мінрегіон України, 2013. 16 с.
10. ДСТУ Б В.2.7-119:2011. Суміші асфальтобетонний і асфальтобетон дорожній та аеродромний. Технічні умови: Національний стандарт України. [Чинний від 2012-01-01]. Київ : Мінрегіон України, 2011. 47 с.
11. ДСТУ-Н Б В.1.1-39:2016. Настанова щодо інженерної підготовки обґрунтованої основи будівель і споруд: Національний стандарт України. [Чинний від 2017-01-01]. Київ : Мінрегіон України, 2016. 48 с.

Додатки. Умови задач
Задача №1 Проектування суміші оптимального
гранулометричного (зернового) складу

Для заданого зернового складу місцевого ґрунту (*ПГЕ-1* див. табл.) запроєктувати оптимальну ґрунтову суміш з привізним ґрунтом (*ПГЕ-2*) аналітичним і графічним методом.

Таблиця Д.1 Умови задачі №1

№ вар	№ <i>ПГЕ</i>	Гранулометричний склад ґрунтів (процентний вміст частинок, %, діаметр частинок d , мм)			Тип суміші
		Пісок 2 ...0,05мм	Пил 0,05...0,075 мм	Глина $d < 0,075$ мм	
1	<i>ПГЕ-1</i>	100,0	0	0	<i>A1</i>
	<i>ПГЕ-2</i>	46,0	46,0	8,0	
2	<i>ПГЕ-1</i>	43,1	41,2	15,7	<i>B1</i>
	<i>ПГЕ-2</i>	93,6	6,4		
3	<i>ПГЕ-1</i>	44,4	36,7	18,9	<i>A2</i>
	<i>ПГЕ-2</i>	100,0	0	0	
4	<i>ПГЕ-1</i>	96,8	3,2		<i>B2</i>
	<i>ПГЕ-2</i>	14,2	54,8	31,0	
5	<i>ПГЕ-1</i>	75,6	24,4		<i>A1</i>
	<i>ПГЕ-2</i>	35,3	49,0	15,7	
6	<i>ПГЕ-1</i>	97,5	2,5		<i>B1</i>
	<i>ПГЕ-2</i>	39,0	57,1	3,9	
7	<i>ПГЕ-1</i>	83,4	16,6		<i>A2</i>
	<i>ПГЕ-2</i>	49,0	42,0	9,0	
8	<i>ПГЕ-1</i>	100,0			<i>B2</i>
	<i>ПГЕ-2</i>	24,5	57,0	18,5	
9	<i>ПГЕ-1</i>	86,6	12,9	0,5	<i>A1</i>
	<i>ПГЕ-2</i>	53,9	30,4	15,7	
10	<i>ПГЕ-1</i>	82,1	17,7	0,2	<i>B1</i>
	<i>ПГЕ-2</i>	38,6	45,7	15,7	
11	<i>ПГЕ-1</i>	43,5	48,4	8,1	<i>A2</i>
	<i>ПГЕ-2</i>	98,3	1,7		

12	<i>IFE-1</i>	3,2	55,8	41,0	<i>B2</i>
	<i>IFE-2</i>	91,5	8,5		
13	<i>IFE-1</i>	34,5	49,6	15,9	<i>A1</i>
	<i>IFE-2</i>	93,5	6,5		
14	<i>IFE-1</i>	94,8	5,2		<i>B1</i>
	<i>IFE-2</i>	50,0	45,0	5,0	
15	<i>IFE-1</i>	90,0	10,0		<i>A2</i>
	<i>IFE-2</i>	31,7	41,3	27,0	
16	<i>IFE-1</i>	96,8	3,2		<i>B2</i>
	<i>IFE-2</i>	14,2	48,8	37,0	
17	<i>IFE-1</i>	100,0	0	0	<i>A1</i>
	<i>IFE-2</i>	46,0	46,0	8,0	
18	<i>IFE-1</i>	43,1	41,2	15,7	<i>B1</i>
	<i>IFE-2</i>	93,6	6,4		
19	<i>IFE-1</i>	44,4	36,7	18,9	<i>A2</i>
	<i>IFE-2</i>	100,0	0	0	
20	<i>IFE-1</i>	96,8	3,2		<i>B2</i>
	<i>IFE-2</i>	14,2	54,8	31,0	
21	<i>IFE-1</i>	75,6	24,4		<i>A1</i>
	<i>IFE-2</i>	35,3	49,0	15,7	
22	<i>IFE-1</i>	97,5	2,5		<i>B2</i>
	<i>IFE-2</i>	39,0	57,1	3,9	
23	<i>IFE-1</i>	83,4	16,6		<i>A2</i>
	<i>IFE-2</i>	49,0	42,0	9,0	
24	<i>IFE-1</i>	100,0			<i>B1</i>
	<i>IFE-2</i>	24,5	57,0	18,5	

Задача №2

Підібрати грунтоущільнюючий механізм (коток на пневмоходу або віброкоток) для ущільнення ґрунту у насипу автодороги до заданого значення щільності ρ_d^n . Природна вологість ґрунту змінюється в межах $W_{min} \dots W_{max}$ при середньому значенні W_{cp} . Залежність щільності скелета ґрунту від вологості та ущільнюючого тиску, встановлена на основі експериментів (див. рис.). Технічні характеристики котків наведені в таблиці.

Таблиця Д.2

Умови задачі №2

Варіант	Задане значення щільності ρ_d^n , г/см ³	Інтервал і зміни вологості $W_{min} \dots W_{max}$, %	Середня вологість W_{cp} , %	Варіант	Задане значення щільності ρ_d^n , г/см ³	Інтервал і зміни вологості $W_{min} \dots W_{max}$, %	Середня вологість W_{cp} , %
1	1,58	22...26	24	13	1,70	11...15	13
2	1,70	11...15	13	14	1,60	16...22	19
3	1,60	16...22	19	15	1,65	18...24	22
4	1,65	18...24	22	16	1,76	12...18	15
5	1,68	15...19	17	17	1,74	13...17	15
6	1,76	12...18	15	18	1,78	11...16	13
7	1,74	13...17	15	19	1,65	18...24	22
8	1,78	11...16	13	20	1,68	15...19	17
9	1,80	9...14	12	21	1,76	12...18	15
10	1,82	8...12	11	22	1,74	13...17	15
11	1,75	10...15	13	23	1,58	22...26	24
12	1,58	22...26	24	24	1,70	11...15	13

Задача № 3

Визначити час консолідації ґрунту основи насипу автодороги при покращенні ґрунтових умов шляхом дренажу основи при наступних вихідних даних:

Таблиця Д.3 Умови задачі №3

Варіант	Параметри профілю автодороги			Питома вага ґрунту, кН/м^3	Характеристики ґрунту		Товщина шару слабого ґрунту, h м	Радіус впливу дрена, R , м	Радіус дрена, r , м
	Ширина бічного насипу a , м	Ширина проїзної частини B , м	Висота насипу H , м		Модуль деформації, E , МПа	Коефіцієнт фільтрації, κ , см/с			
1	1,5	4,5	3,0	16	4,5	$1 \cdot 10^{-8}$	4,0	1,0	0,20
2	2,25	6,0	3,5	16,5	3,0	$5 \cdot 10^{-8}$	13,0	1,2	0,30
3	3,0	7,0	4,0	17	2,8	$7 \cdot 10^{-8}$	8,0	1,4	0,24
4	3,75	7,5	4,5	17,5	4,7	$9 \cdot 10^{-9}$	8,0	1,3	0,22
5	4,5	15	5,0	18	3,0	$3 \cdot 10^{-8}$	16,0	1,1	0,25
6	6,0	22,5	6,0	18,5	5,0	$2 \cdot 10^{-10}$	15,0	1,5	0,28
7	5,25	15,0	3,5	19	4,2	$4 \cdot 10^{-8}$	4,0	1,0	0,20
8	7,5	22,5	5,0	20	4,1	$6 \cdot 10^{-10}$	7,0	1,2	0,30
9	9,0	30,0	6,0	19,5	4,5	$8 \cdot 10^{-8}$	8,0	1,4	0,24
10	3,0	4,5	3,0	18	3,0	$3 \cdot 10^{-9}$	9,0	1,3	0,22
11	3,0	6,0	4,0	18,5	2,8	$4 \cdot 10^{-8}$	10,0	1,1	0,25
12	4,5	7,0	5,0	17	4,7	$6 \cdot 10^{-9}$	8,0	1,5	0,28
13	4,5	7,5	5,0	17,5	3,0	$7 \cdot 10^{-8}$	7,5	1,0	0,20
14	5,25	15,0	3,5	16	5,0	$1 \cdot 10^{-8}$	8,0	1,2	0,30
15	9,0	22,5	6,0	16,5	4,2	$7 \cdot 10^{-10}$	4,0	1,4	0,24
16	6,0	15,0	4,0	18	4,1	$4 \cdot 10^{-8}$	4,0	1,3	0,22
17	7,5	22,5	5,0	19	4,5	$9 \cdot 10^{-9}$	5,0	1,1	0,25
18	6,0	15,0	4,0	20	3,0	$5 \cdot 10^{-8}$	7,0	1,5	0,28
19	10,5	22,5	7,0	18,5	2,8	$1 \cdot 10^{-10}$	8,0	1,4	0,30
20	9,75	30,0	6,5	19,5	4,7	$3 \cdot 10^{-8}$	12,0	1,3	0,24

Задача № 4

Запроектувати ущільнення просідаючого ґрунту основи насипу автодороги важкою трамбівкою і ґрунтовими палями при наступних вихідних даних:

Таблиця Д.4 Умови задачі №4

Варіант	Параметри профілю автодороги			Питома вага ґрунту в природному стані, кН/м^3	Характеристики ґрунту		Товщина шару просідаючого ґрунту, h м	Радіус, r , м
	Ширина бічного насипу a , м	Ширина проїзної частини B , м	Висота насипу H , м		Питома вага ґрунту після ущільнення, кН/м^3	Вологість, W , $\delta.o.$		
1	1,5	4,5	3,0	14	19,0	$0,10$	14,0	0,20
2	2,25	6,0	3,5	14,5	18,50	0,12	13,0	0,30
3	3,0	7,0	4,0	15	18,8	$0,13$	8,0	0,24
4	3,75	7,5	4,5	15,5	19,7	0,14	8,0	0,22
5	4,5	15	5,0	15,4	19,0	$0,15$	16,0	0,25
6	6,0	22,5	6,0	14,5	20,0	0,16	15,0	0,28
7	5,25	15,0	3,5	14,7	19,0	$0,17$	4,0	0,20
8	7,5	22,5	5,0	14	18,50	$0,10$	7,0	0,30
9	9,0	30,0	6,0	14,5	18,8	0,12	8,0	0,24
10	3,0	4,5	3,0	15	19,7	$0,13$	9,0	0,22
11	3,0	6,0	4,0	15,5	19,0	0,14	10,0	0,25

12	4,5	7,0	5,0	15,4	20,0	0,15	8,0	0,28
13	4,5	7,5	5,0	14,5	19,0	0,16	7,5	0,20
14	5,25	15,0	3,5	14,7	18,50	0,17	8,0	0,30
15	9,0	22,5	6,0	14	18,8	0,10	4,0	0,24
16	6,0	15,0	4,0	14,5	19,7	0,12	4,0	0,22
17	7,5	22,5	5,0	15	19,0	0,13	5,0	0,25
18	6,0	15,0	4,0	15,5	20,0	0,14	7,0	0,28
19	10,5	22,5	7,0	15,4	19,0	0,15	8,0	0,30
20	9,75	30,0	6,5	14,5	18,50	0,16	12,0	0,24
21	1,5	4,5	3,0	14	19,0	0,10	14,0	0,20
22	2,25	6,0	3,5	14,5	18,50	0,12	13,0	0,30
23	3,0	7,0	4,0	15	18,8	0,13	8,0	0,24
24	3,75	7,5	4,5	15,5	19,7	0,14	8,0	0,22

Таблиця Д.5 Технічні характеристики котків на пневмоходу

Фірма- виготовлювач і модель	Тип котка	Вага котка (машини), кН		Завантаженість на вісь, кН		Кількіс ть шин	Розмір профілю шин, м	Ширина смуги, яка ущільнюється, м
		Без баласту	З баластом	передню	задню			
Д-219	Прицепні	18	100	-	-	8	0,533	2,20
ДУ-30 /Д-625/		-	125	-	-	5	0,305	2,20
ДУ-4 /Д-263/		56	250	-	-	6	0,356	2,50
ДУ-29 /Д-703/		63	250	-	-	5	0,350	2,50
ДСК-1		160	264	-	-	6	0,356	3,10
Д-326		132	454	-	-	5	0,673	3,30
Д-627	Самохідні	83	160	48	112	7	0,305	1,70
Д-365		107	175	52	123	7	0,305	-
Д-624		153	300	90	210	7	0,305	2,20
МАЗ-205	Автосамоскиди	66	128	36	93	6	0,305	-
МАЗ-503, МАЗ-510		68	140	46	94	6	0,305	-
КрАЗ-256		117	219	47	171	10	0,305	-
КрАЗ-222, КрАЗ-222 В		120	222	47	175	10	0,305	-
МАЗ-525		243	495	167	328	6	0,432	-
МАЗ-530		384	784	175	609	10	0,457	-
БелАЗ-540		210	480	156	324	6	0,457	-
БелАЗ-548		269	610	225	445	6	0,508	-

Д.6 Технічні характеристики котків вібраційної дії

Фірма-виготовлювач і модель	Тип котка	Статичний лінійний тиск кН/м	Загальна маса кг	Частота коливань гц	Примушуючи сила кН	Розмір вальця м		Потужність кВт
						діаметр	ширина	
Енергомаш ПВК-70А	П Р И Ч Е П Н И Й	108	26000	16-25	500	1,75	2,64	100
АБГ-186		77	15000	23	350	1,80	2,00	100
Бомаг-15		75	16000	25	300	1,74	2,10	74
Дінапак СН-61		70	15000	25	380	1,62	2,13	95
Хем-400		67	13500	25-30	450	1,80	2,00	70
А-12		60	11300	16-25	360	2,00	2,00	104
Вібромакс-1521		60	12500	30	150	1,83	2,08	61
Фергюссон-230		56	10610	18-25	209	1,67	1,90	56
Бомаг-10		55	10800	25	180	1,60	1,95	49
Дінапак-СК-51		45	10000	20	140	1,50	2,13	70
Кларк-Шед-120		46	12000	20-27	320	1,80	2,61	74
А-8		45	8900	25	160	2,00	2,00	51
ДУ-52	С А М О Х І Д Н И	30	16000	26-33	150	1,60	2,00	110
ДУ-57		50	25000	25	250	1,60	2,40	147
Інгерсол-Ренд-60		47	22200	25	266	1,52	2,54	170
Інгерсол-Ренд-60 ДР		45	19300	16-25	377	1,52	2,54	170
Рей-Гоу-60 А		42	15200	18-25	204	1,54	2,03	87
Бомаг-215		45	17700	28	245	1,50	2,10	110

Рей-Гоу-420	Й	33	11400	18-25	145	1,52	2,13	84
Бомаг-2120		30	10200	31	214	1,70	2,10	82
Дінапак СА-25		28	10900	28	160	1,50	2,10	92
Дінапак СА-51		39	15200	25	330	1,52	2,13	129