

ДОРОЖНЬО-БУДІВЕЛЬНІ МАТЕРІАЛИ

УДК 625.7

Литвиненко А.С.

ПРО ФІЗИЧНИЙ ЗМІСТ НЕОБХІДНОЇ І ДОСТАТНЬОЇ ВЕЛИЧИНИ ГУСТИНИ СУХОГО ҐРУНТУ ЗВ'ЯЗНИХ ҐРУНТІВ ПРИ СПОРУДЖЕННІ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ

Анотація. Розкривається, для зв'язних ґрунтів, фізичний зміст величини ρ_{dmax} , що визначається за стандартним ущільненням і доводиться її достатність як середини нормального статичного розподілу для забезпечення надійної експлуатації земляного полотна автомобільних доріг.

Ключові слова: ґрунт, земляне полотно, автомобільна дорога.

Аннотация. Раскрывается, для связных грунтов, физический смысл величины ρ_{dmax} , определяемой методом стандартного уплотнения и показывается её достаточность как среднего значения нормального статистического распределения для обеспечения надёжной эксплуатации земляного полотна автомобильных дорог.

Ключевые слова: почва, земляное полотно, автомобильная дорога.

Annotation. The article deals with the statement of physical content of the value ρ_{dmax} defined according to standard density, and the proof of the value's sufficiency as the mean of normal static distribution for ensuring reliable operation of motor roads' roadbed.

Keywords: soil, subgrade, highway.

Вступ

На цей час сам факт необхідності ретельного і достатньо сильного ущільнення ґрунтів при спорудженні земляного полотна автомобільних доріг вже ні в кого не викликає сумнівів але існує певна невизначеність, до яких саме великих значень густини сухого ґрунту найдоцільніше ущільнювати ґрунти,

зокрема зв'язні. Теоретично і в лабораторних умовах доведено, що в процесі ущільнення густина сухого ґрунту може досягати дуже великих значень рис.1.

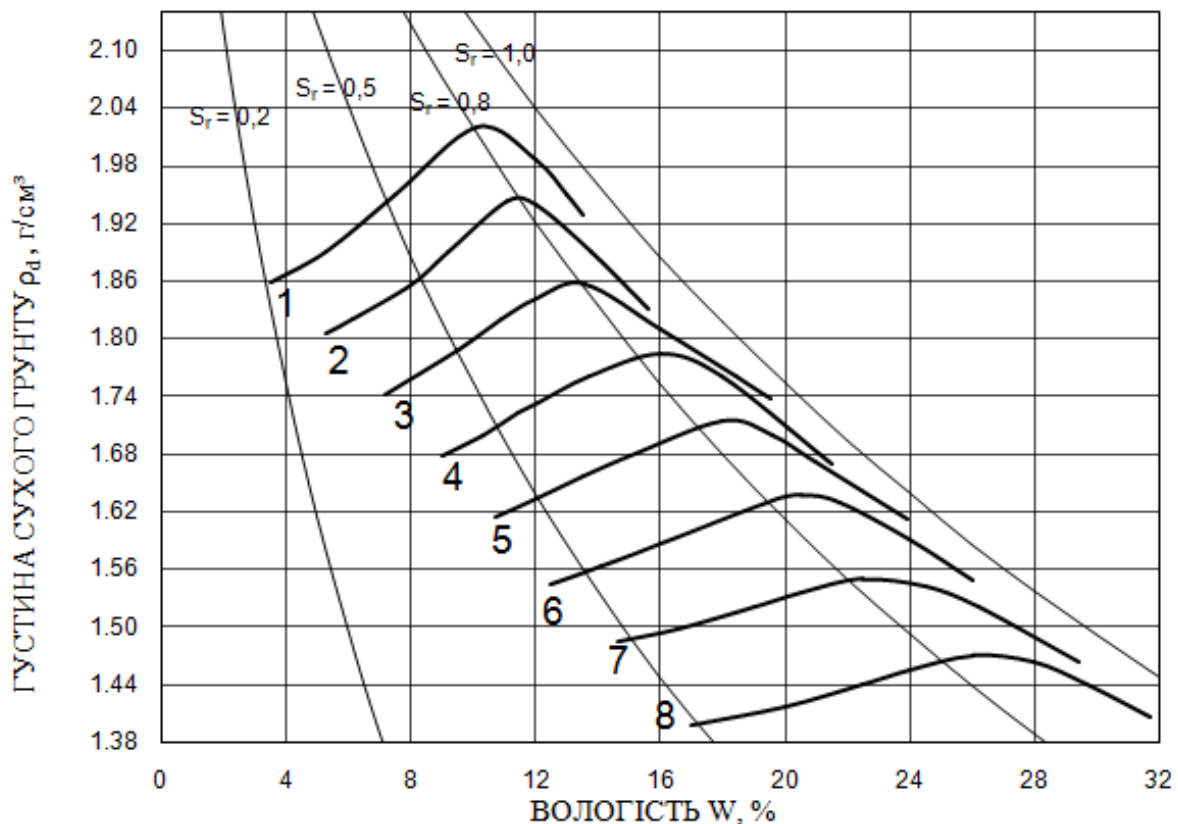


Рис. 1 ρ_{dmax} закономірно збільшується як при переході від більш важких ґрунтів (8) до більш легких (1), так і при збільшенні кількості роботи на одиницю об'єму будь-якого одного конкретного ґрунту

Наведені на рис.1 графіки показують, що як і для різних видів ґрунтів, від глин до гравіюватих пісків при однаковій кількості роботи, так само і для будь-якого окремо взятого ґрунту але із збільшенням роботи, яка витрачається на ущільнення одиниці об'єму ґрунту, можна досягти досить великих значень густини сухого ґрунту, при цьому оптимальна вологість увесь час зменшується. Таким чином доводиться, що ρ_{dmax} як і w_{opt} є лише змінними технологічними параметрами, які не мають певного фізичного змісту.

Основна частина

Як відомо головною точкою відліку в питанні необхідного ступеню ущільнення ґрунтів при спорудженні земляного полотна є значення так званої максимальної густини сухого ґрунту ρ_{dmax} , що досягається в процесі лабораторного, стандартного ущільнення [5,6]. Зазвичай ця величина повинна визначатись за допомогою графіка $\rho_d=f(w)$, приклади побудови якого завжди

надавались у відповідних нормативних документах у вигляді довідкових додатків. В гіршому випадку її інколи доволіно оцінювати «на око» за даними таблиці результатів стандартного ущільнення. Але в будь-якому випадку мабуть ніколи достатньо ретельно не досліджувався взаємозв'язок таких графіків із загальними класифікаційними характеристиками і відповідно фізико-механічними властивостями конкретних ґрунтів у графічному вигляді, що могло дати хоча б деяке якісне, коли вже не кількісне, пояснення і обґрунтування таких технологічних характеристик як ρ_{dmax} та W_{opt} . Щоб з'ясувати це питання і ще краще його усвідомити розглянемо конкретний приклад, одночасно маючи на увазі, що ця схема є типовою для будь-якого виду зв'язного ґрунту від піщаних супісків до масних глин.

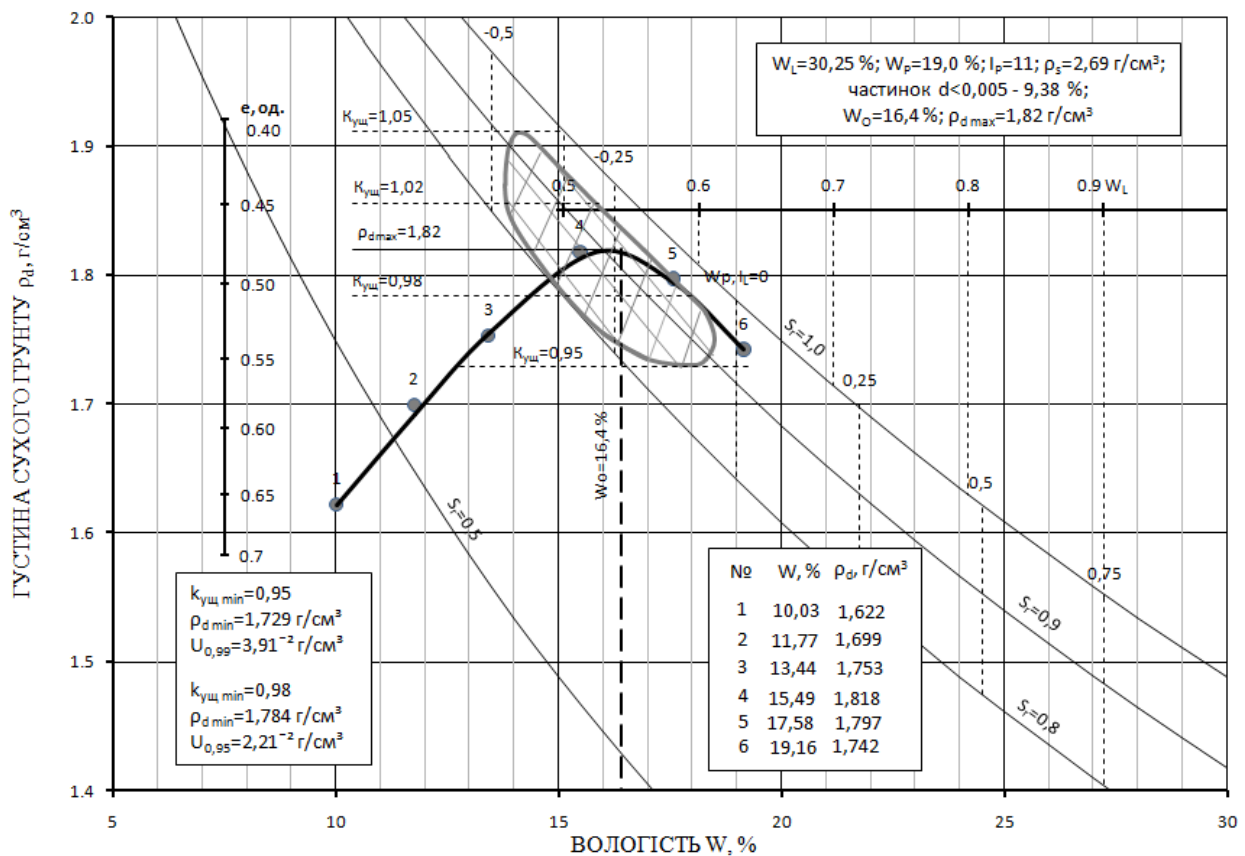


Рис. 2 Схема оцінки взаємозв'язку значень ρ_{dmax} , г/см³ і W_0 , % з основними класифікаційними показниками ґрунтів

На рис.2, у координатах вологість-густина сухого ґрунту, наведено графік стандартного ущільнення легкого пилуватого суглинку, як цього вимагали і вимагають всі попередні діючі нормативні документи. Але тут же, на рис.2, наведено значення фізичних класифікаційних показників цього ґрунту: W_L ; w_p ;

I_p ; ρ_s ; I_L ; S_r ; w/w_L , вміст глинистих частинок – $d < 0,005$ мм %. Торкаючись процедури побудови цього і таких графіків взагалі, варто нагадати, що необов'язково щоб якась із дослідних точок, отриманих при випробуванні обов'язково припадала саме на максимум дослідної кривої, а сама крива стандартного ущільнення проходила безпосередньо через всі експериментальні точки. В силу самої природи будь-яких експериментальних досліджень існує певний розкид отриманих даних і тому крива стандартного ущільнення повинна проводитись таким чином щоб найкраще, але достатньо плавно розташуватись між цими точками і водночас не відбулось суттєвого її спотворення. Загальний вигляд таких кривих для всіх видів ґрунтів в принципі дуже добре відомий у виробничих лабораторіях і лабораторіях проектних установ. Шкода тільки, що наведені у нормативних документах приклади побудови графіків стандартного ущільнення не дають повного уявлення щодо стану ґрунтів при ρ_{dmax} , w_{opt} стосовно всього поля значень показників вологості-густини як це показано на рис.2. Так, крім вже звичних шкал показників густини сухого ґрунту ρ_d , г/см³ і вологості w , % нанесені тут класифікаційні лінії ступеню водонасичення ґрунту S_r ч.од. показують, що при досягненні ρ_{dmax} всі зв'язні ґрунти, як в лабораторних, так і в польових умовах, переходять у водонасичений стан ($S_r \geq 0,8$), тобто формально вже майже сягають розрахункові вологості. Про фактичну можливу розрахункову вологість буде сказано далі. На ці ж ступені водонасичення ґрунтів ($S_r = 0,8-1,0$) поширюються і показники пластичності ґрунтів – I_L та значення вологостей на межах їх пластичного стану – w_p та w_L , які відкладаються вздовж лінії повного водонасичення $S_r = 1,0$. Вертикальними лініями опущеними із класифікаційних точок показника пластичності $I_L = 0; 0,25; 0,50$ і т.ін., сегменти між $S_r = 0,8-1,0$ діляться на окремі блоки, стосовно стану ґрунтів у яких зазвичай наводяться відповідні цим вологостям і коефіцієнтам пористості $e = (\rho_s - \rho_d) / \rho_d$ табличні значення показників механічної міцності і деформативності: кути внутрішнього тертя – ϕ , зчеплення – C та модуля деформації – E_d ґрунтів, які використовують у цивільному та промисловому будівництві при розрахунках фундаментів. Таким чином при досягненні значення ρ_{dmax} насипні зв'язні ґрунти у дорожньому будівництві повинні знаходитись також і у твердому стані ($I_L < 0$, де $I_L = 0$ відповідає w_p). В першу чергу це поширюється на ґрунт робочого шару з $k_{yщ \min} \geq 0,98$ і частково, коли частина значень ρ_{di} відповідає напівтвердому стану, для

$k_{yщ \min}=0,95$ ($I_L=0-0,25$), тобто повинні бути у всіх інших конструктивних елементах насипів, що штучно ущільнюються при їх спорудженні.

З'ясувавши у викладеному раніше, що стан ґрунтів, які штучно ущільнюються при спорудженні земляного полотна автомобільних доріг при ρ_{dmax} повинен відповідати твердому стану ($I_L < 0$) і одночасно бути водонасиченим ($S_i \geq 0,8$) можемо перейти до характеристики оцінки ущільненості ґрунтів власне за їх щільністю–густиною сухого ґрунту виражену через коефіцієнт пористості. Ще у 1947 році В.А.Приклонський [7,8], а з ним згодні і інші дослідники [9], для характеристики ущільненості глинистих порід у природному стані за аналогією із показником текучості I_L запропонував показник ущільненості:

$$k_d = \frac{e_f - e_i}{e_f - e_p} \quad (1)$$

де e_i – коефіцієнт пористості природного ґрунту;

e_f – його коефіцієнт пористості на верхній межі пластичності w_L та e_p – коефіцієнт пористості на нижній межі пластичності w_p .

Незважаючи на не дуже велике поширення у ґрунтознавчій науковій літературі, цей показник дає досить об'єктивну і вичерпну оцінку стану ґрунтів за значенням їх густини сухого ґрунту. Якщо за формулою (1) оцінювати стан ущільненості ґрунтів при ρ_{dmax} , то можна отримати таке значення k_d для розглянутого у прикладі ґрунту:

$$k_d = \frac{0,81 - 0,48}{0,81 - 0,51} = 1,1$$

І як свідчать подібні розрахунки для багатьох інших видів зв'язних ґрунтів, всі вони при ρ_{dmax} мають значення $k_d > 1,0$. Суть таких значень показника k_d полягає у тім, що коли в природних умовах ґрунти мають $k_d > 1,0$ їх називають переущільненими і такі ґрунти відносно рідко зустрічаються в геологічній практиці. Найбільш відомими серед них у четвертинних відкладеннях є моренні ґрунти, що утворилися під дією тиску потужного крижаного покриву. Такі ґрунти практично не змінюють набутих властивостей від дії погоднокліматичних факторів. Таким чином переущільненні в процесі спорудження насипів ґрунти дуже добре зберігають набути при цьому показники міцності і

деформативності. Про це ж пишуть і автори роботи [3]: «Следует иметь в виду, что если максимальная плотность грунта обеспечивает необходимую его прочность и водоустойчивость, то расчётная плотность, задаваемая с введением коэффициента уменьшения k , – ни прочности, ни водоустойчивости не обеспечивает!». А посилаючись на одну із наукових статей В.М.Безрука, нагадується, що «по мере приближения плотности и влажности грунта к оптимальной, затрудняется возможность последующего увлажнения грунта, при влажности его равной оптимальной, капиллярное передвижение воды в нём практически не происходит. Наиболее водоустойчивыми оказываются грунты, уплотнённые при оптимальной влажности до наибольшей плотности».

Якщо ж розглядати показники (міцності і деформативності стосовно їх використання для розрахунку дорожніх одягів різних типів за таблицями, що наводяться у відповідних нормативних документах [10,11], то там вони представлені щодо стану ґрунтів у долях так званої відносної вологості (відносно w_L) хоча цей показник слід визнати у всіх випадках недостатньо коректним. Шкала значень показника w/w_L також показана на рис. 2. Суттєвим недоліком представлення значень показників механічних властивостей ґрунтів через відносну вологість є невизначеність їх стану стосовно другого класифікаційного показника зв'язних ґрунтів – w_p (нижньої межі пластичності). І такий зв'язок з'ясовується тільки на схемах подібних тій, що показано на рис.2. Так з цього рисунка видно, що для робочого шару, де коефіцієнт ущільнення повинен бути не менше 0,98, розрахункова відносна вологість може бути не більше $0,60w_L$ навіть для більш легких ґрунтів.

Для важких же ґрунтів, таких як масні глини Рис.3, відносна розрахункова вологість навіть для коефіцієнту ущільнення 0,90 може сягати не більше $0,55 w_L$. Звідси можна зробити висновок, що коли ґрунт у робочому шарі при спорудженні земляного полотна справді є ущільненим, то таблиці розрахункових значень характеристик ґрунтів типу Д.7 [10] чи В.6 [11], у такому вигляді як вони є зараз, – не мають права для існування. Якщо ж навпаки, то про яке ущільнення взагалі може йти мова.

В такій самій мірі це стосується й таблиць так званих розрахункових вологостей ґрунтів для різних умов зволоження земляного полотна Додаток Д [10]. А.К. Бируля та інші [3], ще у 1952 році показали, що вологість ґрунтів у природному стані протягом року змінюється тільки через відносне наповнення пор ґрунту водою або повітрям. При цьому густина сухого ґрунту практично не змінюється (рис.4).

Якщо застосувати таку схему до переущільненого ґрунту, то діапазон зміни в ньому вологості і повітря з одного боку різко зменшується, а з іншого боку значення відносної розрахункової вологості ґрунтів характерне для природного стану ні в якому разі не можна переносити на переущільненні ґрунти. Підтвердженням цього може бути успішний досвід експлуатації доріг як у Європі так і Північній Америці. Таким чином можна зробити висновок, що ґрунти ущільненні відповідно до вимог стандартного ущільнення з $\bar{\rho}_d = \rho_{d \max}$ добре зберігають свої механічні властивості протягом дуже тривалого часу. Зрозуміло, що можуть траплятись природні умови, коли вологість ґрунтів практично увесь час перевищує вологість на їх нижній межі пластичності і їх практично неможливо переущільнити. Але у цьому разі проектом повинні бути передбачені додаткові заходи щодо підсилення дорожньої конструкції вцілому чи то тільки ґрунтів робочого шару. В окремих випадках такі заходи можуть поширюватись на весь об'єм насипу або тільки щодо укисних частин.

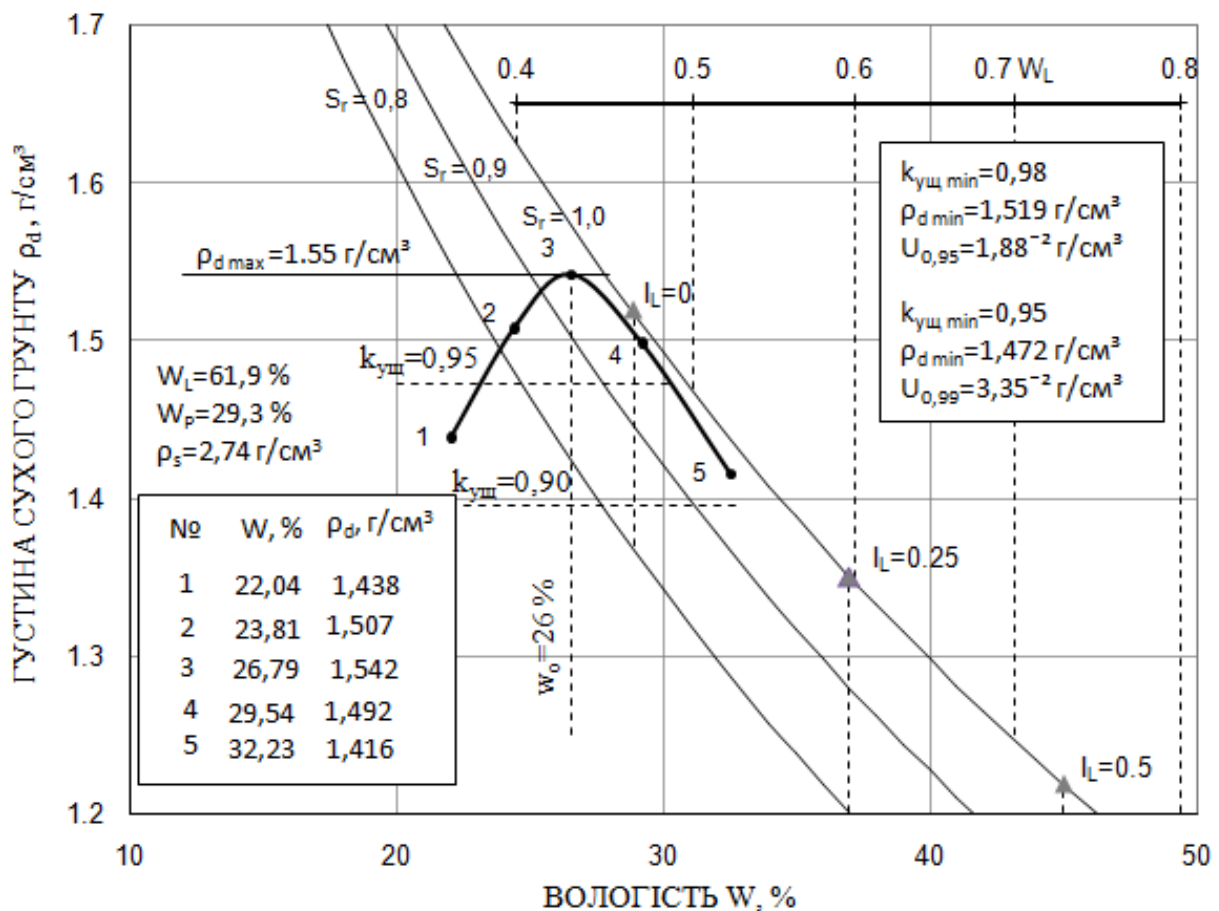


Рис.3 Співвідношення показників $\rho_{d \max}$ г/см³ і w_0 % з класифікаційними показниками масної глини

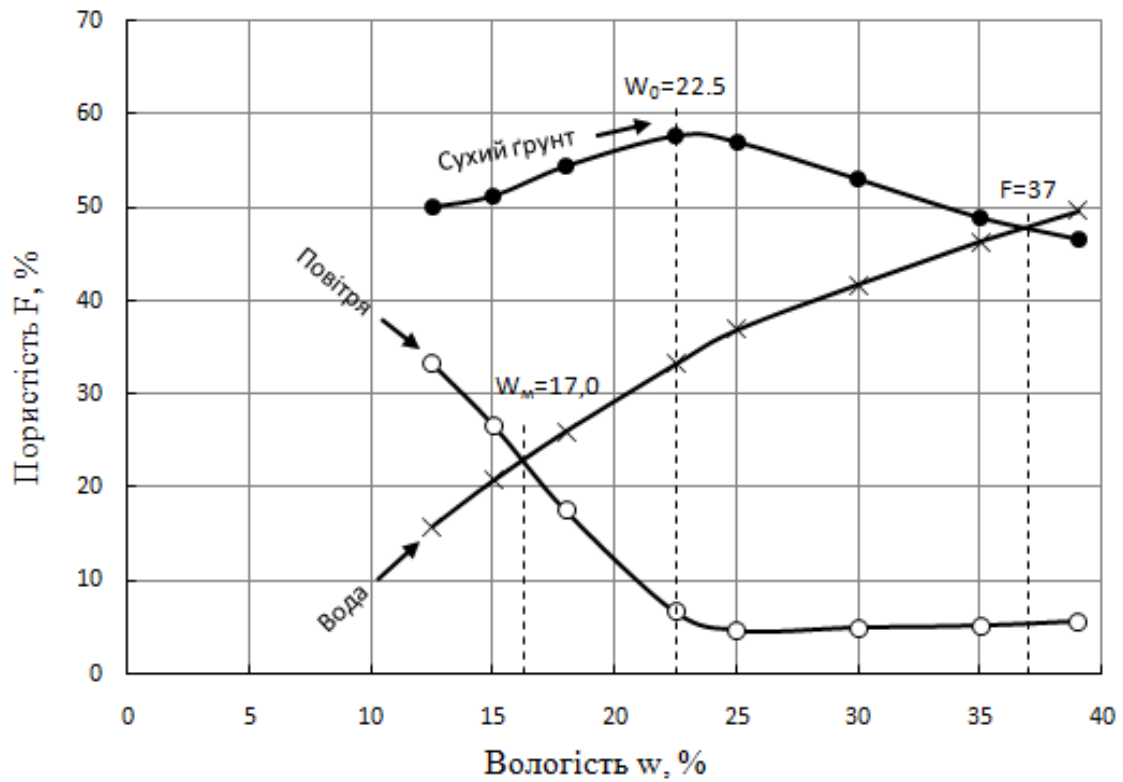


Рис. 4а Співвідношення об'ємів сухого ґрунту, води і повітря при стандартному ущільненні ґрунту [3]

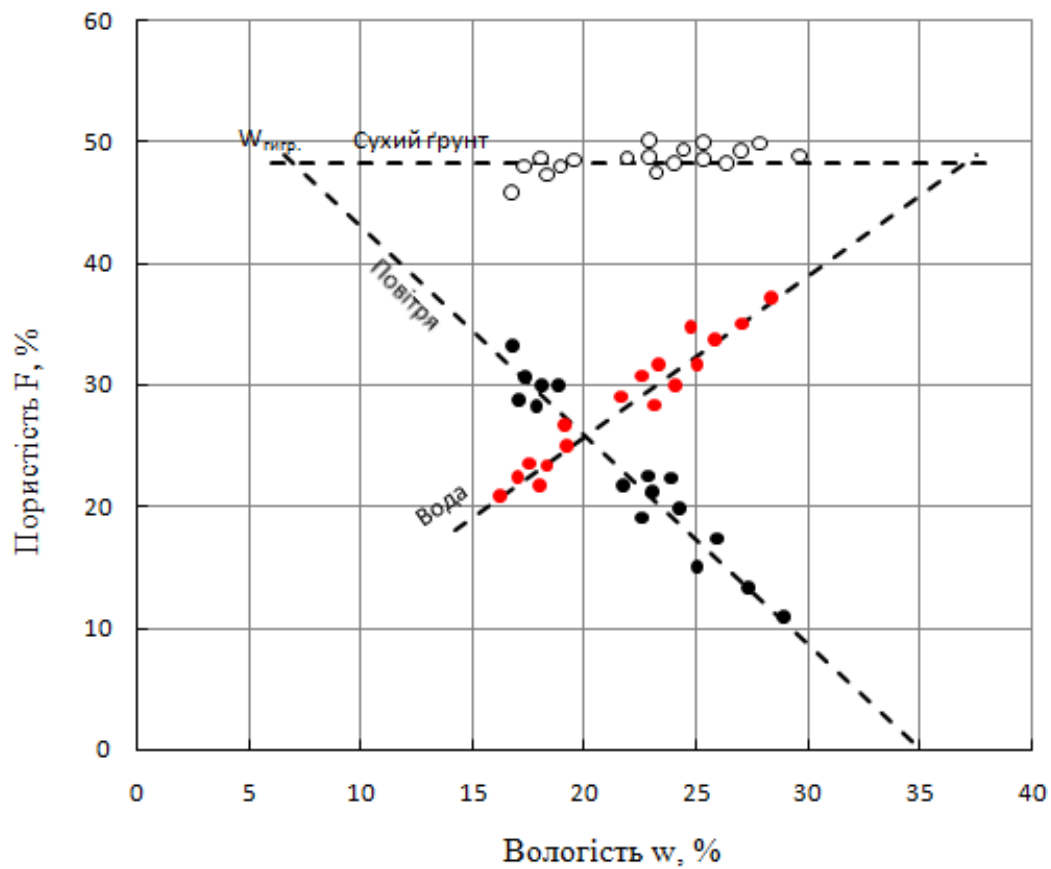


Рис. 4б Співвідношення об'ємів сухого ґрунту, води і повітря ґрунту в природному заляганні [3]

На рис. 5 показано статистичні розподіли густини сухого ґрунту легкого пілуватого суглинку побудовані згідно діючих вимог, таблиця 22.1 [12]. Тут крім показників густини сухого ґрунту і значень коефіцієнтів ущільнення показані і відповідні їм значення показників текучості I_L і відносної вологості w/w_L . Аналіз цього рисунка показує необхідність безумовної відмови від стереотипу розглядати значення густини сухого ґрунту, що відповідають мінімальним значенням коефіцієнтів ущільнення як середні значення показника щільності для певних конструктивних елементів земляного полотна. Так не тільки для $k_{yщ \min}=0,90$, де майже половина значень розподілу відповідає м'якопластичному стану ґрунту, який не рекомендується використовувати навіть при розрахунках фундаментів будівель, хоча природні ґрунти порівняно із насипними мають ще й структурне зчеплення, яке значно (у 2,0–2,5 рази) підвищує їх несучу здатність, але і при $k_{yщ \min}=0,95$, де майже для чверті значень густини сухого ґрунту може бути туго пластичний стан. Більш того, навіть для $k_{yщ \min}=0,98$ при такому підході більше половини значень розподілу може знаходитись не у твердому, а в напівтвердому стані ($I_L=0-0,25$). Таким чином це ще раз підтверджує, що для зв'язних ґрунтів середина розподілу густини сухого ґрунту повинна відповідати $k_{yщ}=1,0$, або й трохи більше. В зв'язку з цим мінімальні розрахункові значення модулів пружності повинні бути згідно діючих норм [10] не менше 65,0–75,0 МПа, хоча ці значення також ще вимагають певної експериментальної перевірки.

Повертаючись до питання визначення розрахункових значень вологості, густини сухого ґрунту та будь-яких інших показників слід скористатися рекомендаціями ДСТУ Б В.2.1-5-96 [13] або В.Д.Ломтадзе [10], який для спрощення розрахунків, посилаючись на такі ж нормативні документи, що діяли раніше, пропонує визначати розрахункове значення ρ_{dpoz} за формулою:

$$\rho_{dpoz} = \overline{\rho_d} - U. \quad (2)$$

Тобто розрахункове значення густини сухого ґрунту буде дорівнювати середньому значенню розподілу ($\overline{\rho_d} = \rho_{d \max}$) мінус середнє квадратичне відхилення. Проведені порівняльні розрахунки (із залученням директивних нормальних розподілів, які пропонується використовувати для контролю якості ущільнення ґрунтів) показали дуже невелику різницю в отриманих результатах ($\pm 0,002$ г/см³).

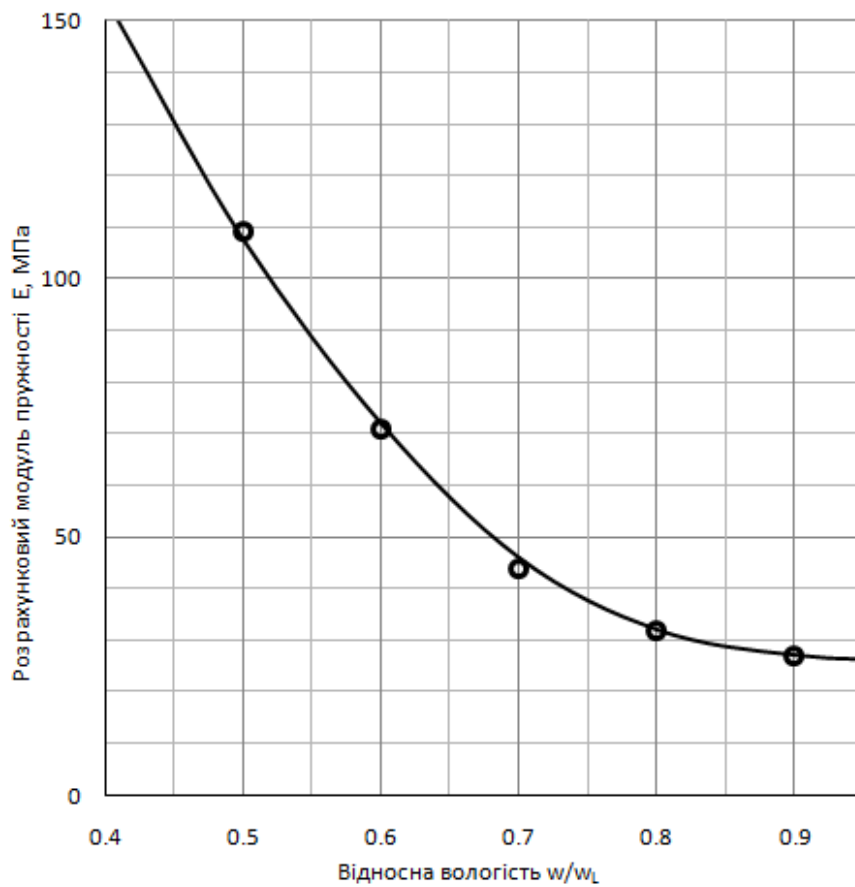
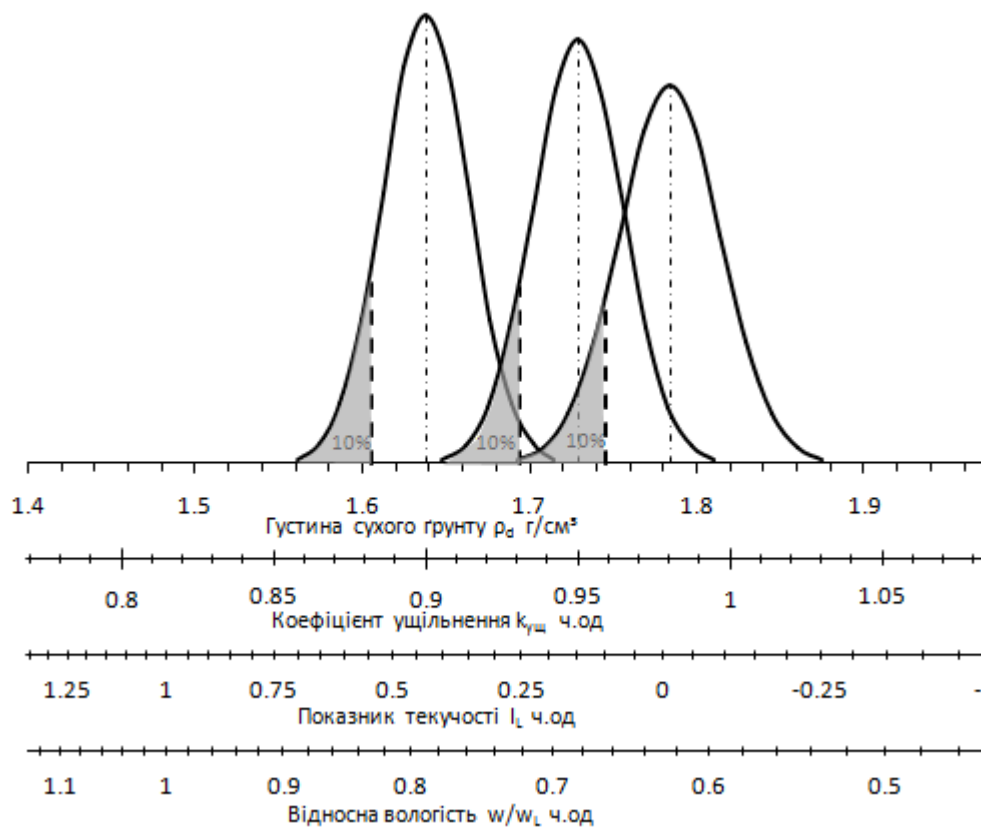


Рис. 5. Порівняльна оцінка можливих розрахункових вологостей легкого пилуватого суглинку при діючих нормативних вимогах до ступеня ущільнення ґрунтів згідно вимог ДБН В.2.3-4:2007

В той же час ці розрахунки показують, що при $\overline{\rho_d} = \rho_{d \max}$ і $\rho_{d \min}$ з $k_{yщ \min}=0,98$ розрахункова густина ґрунту буде відповідати $k_{yщ}=0,99$, а при $\rho_{d \min}$ з $k_{yщ \min}=0,95 - k_{yщ}=0,98$. І в першому, і в другому випадку розрахункова вологість при повному водонасиченні ґрунту $S_r=1,0$, що трапляється досить рідко, буде менше, ніж вологість ґрунту на нижній межі пластичності – w_p .

Якщо ж виразити ці розрахункові вологості відносно вологості верхньої межі пластичності зв'язних ґрунтів, то можна побачити, що ці відносні вологості будуть коливатись переважно у інтервалі $0,45 - 0,60 w_L$. Звідси можна зробити висновок, що розрахункові вологості штучно ущільнених в дорожніх насипах (і не тільки дорожніх) ґрунтів більше залежать від ступеню і однорідності ущільнення ніж від дії погодно-кліматичних умов. Тим більше це стосується України, яка має в основному відносно посушливий клімат і невелику глибину промерзання ґрунтів в зимовий період.

Висновки

1. Фізичний зміст необхідної і достатньої величини сухого ґрунту зв'язних ґрунтів при спорудженні земляного полотна автомобільної доріг, що відповідає $\rho_{d \max}$ ($k_{yщ}=1,0$) і w_{opt} згідно діючих нормативних документів, полягає в тім, що в цьому стані вони досягають найбільшої стабільності своїх фізико-механічних властивостей у часі. Цей стан відповідає твердому стану ($I_L \leq 0$) переущільненого ($k_d \geq 1,0$), водонасиченого ($S_r=0,8-1,0$) ґрунту з мінімальним вмістом повітря ($V=1,0-5,0\%$) при вологостях між нижньою межею пластичності (w_p) і межею зступу (w_{sh}). В такому стані припиняється капілярне переміщення води, зникають умови для виникнення тріщин зступу і морозного здимання через відносно невелику загальну вологість кожного з ґрунтів, що ущільнюється, а робота, яка витрачається на досягнення такого стану є найменшою. Значення показників механічної міцності і деформативності ґрунтів при цьому є достатньо великими для забезпечення як загальної міцності і стійкості насипного ґрунту, так і розташованої на ньому дорожньої конструкції.

2. Для забезпечення довготривалого ефекту від штучного ущільнення ґрунту не менше 50% значень всіх вимірів повинні мати густину сухого ґрунту $\rho_d \geq \rho_{d \max}$, що завжди досягалось рівнем розвитку ґрунтоущільнюючої техніки, тобто $\rho_{d \max}$ повинно бути серединою нормального статистичного розподілу $\overline{\rho_d} = \rho_{d \max}$. Кількість мінімальних табличних значень коефіцієнтів ущільнення повинна бути обмежена лише двома значеннями: для робочого шару і всіх інших частин земляного полотна, наприклад: 0,98 і 0,95. Причому ці значення $k_{yщ \min}$ повинні регламентувати значення $\rho_{d \min}$ не як середини нових розподілів,

а лише як крайні їх межі, більше значень яких повинно бути 90%; 95% чи 99% всіх вимірів показники ρ_d штучно ущільненого ґрунту.

При цих умовах мінімальні розрахункові значення $\rho_{d\text{ роз}}$ ніколи не будуть менше тих, що відповідають $k_{\text{ущ}}=0,99$ і $0,98$ для всіх конструктивних елементів насипів, а відповідні їм мінімальні розрахункові вологості ґрунту будуть $w_{\text{роз}} \leq w_p (I_L \leq 0)$, тобто $w_{\text{роз}} \leq 0,6 w_L$.

3. Таким чином на перший план в забезпеченні якості і надійності земляного полотна автомобільних доріг входить не стільки забезпечення достатнього рівня розвитку ґрунтоущільнюючих машин, який і так є досить високим, скільки необхідність забезпечення виробничих лабораторій високопродуктивним обладнанням для оперативної оцінки фізико-механічних властивостей добре ущільненого міцного ґрунту, в т.ч. і шляхом оперативного відбору монолітів кернавідбірникам з наступним застосуванням ріжучих кілець.

Література

1. Механика ґрунтов для инженеров-дорожников (ґрунты в дорожном строительстве) перевод с англ. – М.: Автогиздат, 1957.
2. Лебедев А.Д. Уплотнение ґрунтов при различной их влажности. – Л.: Стройвоенморизда, 1949.
3. Бируля А.К., Бируля В.И., Носич А.И. Устойчивость ґрунтов дорожного полотна в ственных районах. – М.: Дориздат, 1951.
4. Телегин М. Я. Методы уплотнения дорожных насыпей. – М.: Дориздат, 1952.
5. ДСТУ Б.В.2.1-12:2009. Основи та підвалини будинків і споруд. Ґрунти. Метод лабораторного визначення максимальної щільності. – К.: Мінрегіонбуд України, 2010.
6. ГОСТ 22733-77. Ґрунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности. – М.: Издательство стандартов, 1979.
7. Приклонский В.А. Об использовании пределов Аттерберга для характеристики состава и состояния тонкодисперсных отложений. Сб. Вопросы теоретической и прикладной геологии №2, Госгеолгиздат, 1947.
8. Приклонский В.А. Ґрунтоведение. Часть 1. – М.: Госгеолтехиздат, 1955.
9. Ломтадзе В.Д. Инженерная геология. Инженерная петрология. – Л.: Недра, 1970.
10. ВБН В.2.3-218-186-2004. Споруда транспорту. Дорожній одяг нежорсткого типу. – К.: Укравтодор, 2004.
11. ВБН В.2.3-218-186-008-97. Відомчі будівельні норми України. Проектування та будівництво жорстких та з жорсткими прошарками дорожній одягів. – К., 1997.
12. ДБН В.2.3-4:2007. Споруди транспорту. Автомобільні дороги. Частина I. Проектування. Частина II. Будівництво. – Київ, Мінрегіонбуд, 2007.
13. ДСТУ Б В.2.1-5-96. Основи та підвалини будинків та споруд. Ґрунти. Методи статистичної обробки результатів випробувань. – Київ, Укрархбудінформ, 1997.