



• © А.С. Литвиненко, зав. лабораторії ґрунтів та земляного полотна (ДП “ДерждорНДІ”)

НАСКІЛЬКИ ОБ’ЄКТИВНО ВИЗНАЧАЄТЬСЯ ЗНАЧЕННЯ ВЕРХНЬОЇ МЕЖІ ПЛАСТИЧНОСТІ ЗВ’ЯЗНИХ ҐРУНТІВ У СУЧАСНОМУ БУДІВЕЛЬНОМУ ҐРУНТОЗНАВСТВІ?

ЧАСТИНА ПЕРША

Анотація. На основі експериментальних лабораторних досліджень обґрунтовується справжня фізична сутність верхньої межі пластичності (W_L) зв’язних ґрунтів виходячи із їх власних природних властивостей.

Ключові слова: автомобільна дорога, зв’язні ґрунти, вологість, густина сухого ґрунту, двофазний стан, золь, гель, методика дослідження.

Анотация. На основании экспериментальных лабораторных исследований обосновывается настоящий физический смысл верхней границы пластичности (W_L) связных грунтов исходя из их собственных природных свойств.

Ключевые слова: автомобильная дорога, связные грунты, влажность, плотность сухого грунта, двухфазное состояние, золь, гель, методика исследования.

Annotation. In this article, based on experimental laboratory researches, substantiated true physical nature of the upper plasticity limit of cohesive soils on the basis of their own natural properties.

Keywords: road, cohesive soils, humidity, dry soil density, biphasic condition, sol, gel, technique to study.

Вступ

У 2011 році минуло сто років з часу опублікування роботи А. Аттерберга [1], в якій він першим із дослідників запропонував оцінювати залежність стану і фізико-механічних властивостей зв’язних ґрунтів від їх вологості за консистенцією і числом пластичності. Ось що про це пише К. Терцагі [2, с. 23–24]: “Пластичність характерна для всіх зв’язних ґрунтів. Поєтому залежність між складом ґрунтів, їх механічними властивостями і пластичністю має велике значення для класифікації ґрунтів. В інженерному використанні ґрунтів завойовував широке розповсюдження метод, запропонований Аттербергом в агрономічних цілях. Метод Аттерберга оснований на припущенні про існування двох перехідних точок в консистенції ґрунту, вологість якого, починаючи з абсолютно сухого стану плавно зростає. Перша точка – межа пластичності (межа розкатування), друга – межа текучості (межа текучості) – характеризується переходом з пластичного в рідкий стан”.

Через відносну простоту визначення цих показників метод Аттерберга отримав поширення у всіх галузях будівництва, пов’язаних із використанням ґрунтів, чи то в штучних спорудах: ґрунтові греблі, насипи залізниць чи автомобільних доріг тощо, де ґрунти знаходяться у штучно переробленому вигляді, чи то як природна основа будь-яких будівель. Але простота методики визначення цих показників і запропоновані назви – межа текучості та межа розкочування є лише штучним технічним прийомом, який аж ніяк не забезпечує достатньої обґрунтованості як саме таких значень цих показників, так і фізичного змісту реальних природних властивостей ґрунтів.

Необхідно також відмітити, що у багатьох інших галузях виробництва, які використовують зв’язні ґрунти в тому чи іншому стані, згаданий підхід або не знайшов широкого застосування, або використовується у певних модифікаціях [3, с. 159, 4, с. 259], або не використовується взагалі. Це стосується навіть таких досить споріднених виробництв як керамічне, зокрема виробництво цегли, в яких використовують досить близькі за своїм початковим фізичним станом ґрунти.



Водночас у багатьох із напрямів практичної діяльності із використанням глинистих ґрунтів, у тому чи іншому вигляді, досить інтенсивно проводились наукові дослідження щодо оцінки їх властивостей при різних вологостях за багатьма параметрами [5, с. 194–195], деякі з яких безпосередньо торкаються і предмета нашого дослідження.

Предмет дослідження

Із практики відомо, що у будівельній галузі як для проектувальників, так і для науковців найбільший інтерес становить більш-менш об'єктивне визначення фізико-механічних властивостей ґрунтів саме у пластичному стані. По-перше, тому, що саме у цьому інтервалі можливих їх вологостей і густини сухого ґрунту вони переважно знаходяться у природному заляганні й, по-друге, як у твердому, так і в текучому стані, якщо за прогнозом він не буде змінюватись у майбутньому, приймати певні конструктивні рішення значно простіше.

Як показали дослідження фізико-механічних властивостей ґрунтів методом пенетрації їх конусом, що найбільш інтенсивно і широко виконувались у другій половині двадцятого століття в СРСР, як у лабораторних, так і в польових умовах, і які у найбільш системному вигляді представлені в роботах В.Ф. Разорьонова, зокрема [7], залежності між більшістю досліджуваних показників і вологістю (чи показником текучості – I_L) мають лінійну залежність у напівлогарифмічних координатах, наприклад:

$$\lg R = f(W), \quad (1)$$

де R , МПа – опір ґрунту проникненню у нього конусу – **рис. 1** [7, с. 119, рис. 5.3].

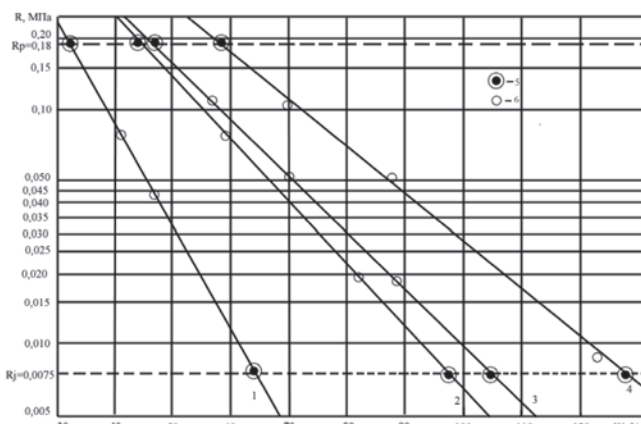


Рис. 1. Графіки лінійної залежності між вологістю і логарифмом питомого опору пенетрації, побудовані за результатами випробувань водонасичених мулів порушеної структури

Переважна більшість таких фахівців як працівники лабораторій проектних інститутів, і тим більше – виробничників чи геологів, що безпосередньо задіяні в інженерно-геологічних вишукуваннях, крім окремих науковців, ніколи не відчували потреби і, тим паче, важливості й необхідності оцінки фізико-механічних властивостей зв'язних ґрунтів від вологості саме у вигляді такої залежності. Зазвичай всі сприймають значення вологостей на межі розкочування і межі текучості тільки як якісь окремі числа, різниця між якими, так зване число пластичності – I_p , тільки у загальному вигляді дозволяє відносно порівнювати між собою різні зв'язні ґрунти. Цьому також сприяють і чинні стандартні методи визначення таких показників [11].

Так само не всі практики достатньо усвідомлюють, що ці показники відповідають тільки двофазному стану ґрунтів, тобто для яких $S_r \geq 0,98$, а невиконання цих умов призводить до значних помилок (**рис. 2**) [7, с. 126, рис. 5.6]. Зазвичай, при чинних стандартах, взагалі невідомо якому ступеню водонасичення відповідають отримані значення W_p і W_L . При цьому не завжди усвідомлюється, що для кожного виду ґрунту відповідно до значення питомої густини їх частинок ρ_s , г/см³, завжди є однозначний зв'язок із густиною сухого ґрунту – ρ_d : ($e = W \cdot \rho_s$ та $\rho_d = \rho_s / (1 + e)$).

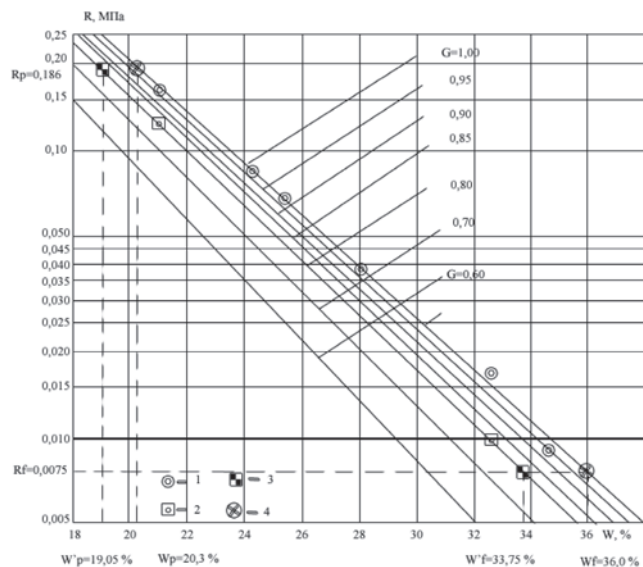


Рис. 2. Схема виникнення систематичних похибок у значеннях меж і числа пластичності зв'язних ґрунтів порушеної структури при пенетраційних випробуваннях із середнім ступенем водонасичення зразків менше одиниці

І навіть переважна більшість науковців не зможуть дати впевненої відповіді чи зберігається ця сама лінійна залежність за межами пластичного стану, чи там уже діють інші, аналогічні залежності. Водночас



залежності типу $\lg R = f(W, S_r = 1,0)$ можна розглядати як абсолютно індивідуальний математичний код кожного зв'язного ґрунту, подібний до відбитку пальця людини і, завдяки цьому, досить просто та чітко їх ідентифікувати.

Такий детальний опис цього питання було зроблено не для того, щоб дещо краще чи точніше оцінювати той чи інший ґрунт, а для того, щоб у майбутньому, користуючись запропонованою нами раніше удосконаленою методикою динамічного зондування ґрунтів [9], при інженерно-геологічних вишукуваннях, в дуже багатьох випадках, можна було відмовитись від відбирання монолітів ґрунтів і їх наступних лабораторних випробувань, наприклад, на одноплосинний зріз чи для стабілометричних випробувань.

У зв'язку із цим же, важливо розглянути питання стану ґрунтів, при якому відбуваються їх випробування з метою визначення вологостей на межі розкочування і межі текучості. Як відомо, зв'язним (і не тільки) ґрунтам притаманне явище тиксотропії. Тобто: "Тонкодисперсний ґрунт, що знаходиться у стані водонасичення має здатність під впливом механічних дій (вібрації, струсу, перемішування, розкочування) переходити у стан в'язкої рідини (рідинно-текучий), а після знаття механічної дії, через деякий час, повертається до попереднього стану без зниження вологості" [10, с. 43].

Таким чином процес визначення межі розкочування однозначно належить до стану тиксотропного розрідження ґрунту, в якому він перебуває у вигляді дуже густої пасти – гідрозолю. Теж саме можна сказати і про визначення межі текучості на приладі Казагранде, а також на приладі В.М. Безрука чи за методом Аттерберга, коли зразки ґрунту розріджуються в процесі ударяння форми об якусь основу. Одночасно слід зауважити, що такі визначення обох меж пластичності є методологічно однорідним за умовами їх виконання, чого не можна сказати про визначення верхньої межі пластичності балансірним конусом [11].

Оскільки процес тиксотропного зміцнення зв'язних ґрунтів відбувається дуже швидко (рис. 3) [6, с. 121, рис. 46] при якому вони переходять у стан гелю: "Переход золя в состояние геля называется гелобразованием (коагуляцией)" [5, с. 18], зрозуміло, що це впливає на результат вимірювання конусом вологості при W_L . Можливо саме через це (хоча не тільки) значення верхньої межі пластичності (межі текучості), які є типовими для вітчизняної практики дещо не збігаються зі значеннями цього показника, що визначаються за методом Казагранде [7, с. 148]. Щоб компенсувати цей недолік М.Н. Гольдштейн [12, с. 307] пропонував: "Перед заполнением чашечки пасту следует тщательно перемешать шпателем, а перед погружением конуса произвести постукивание чашечки с пастой о стол и сразу же после этого провести испытание".

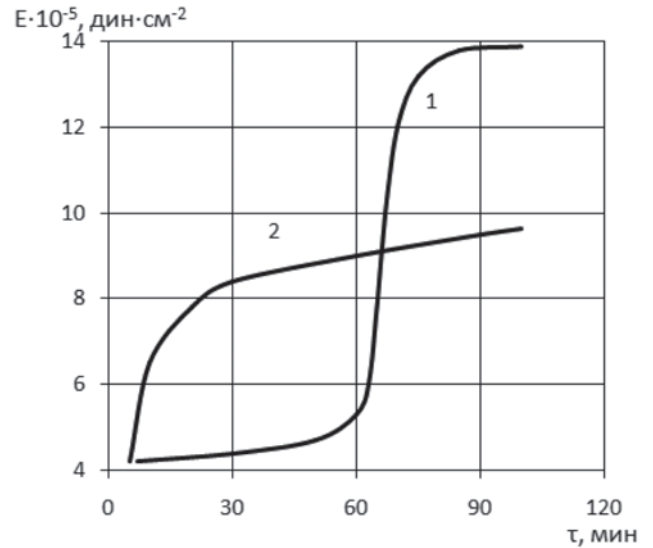


Рис. 3. Криві кінетики початкової стадії структуроутворення водних дисперсій: 1 – цементна; 2 – глиниста

Однак стан тиксотропного розрідження ґрунту не тільки в природі, але і на виробництві є досить нечастим явищем, якщо не створюється штучно і тому визначення меж пластичності зв'язних ґрунтів слід проводити не в стані тиксотропного розрідження (золю), а в стані його тиксотропного зміцнення (гелю), як найбільш характерному стані існування ґрунтів, тим більше, що в цей стан вони переходять дуже швидко (рис. 3). Крім іншого, лабораторні дослідження показують, що для легких різновидів зв'язних ґрунтів, таких як супіски, або навіть пилюваті піски чи легкі суглинки процес занурення конусу у тиксотропно розріджений ґрунт зазвичай триває значно більше п'яти секунд. Це особливо добре видно на оптичному пенетрометрі. Тому варто надати перевагу дослідженню меж пластичності глинистих ґрунтів саме у стані тиксотропного зміцнення – утворення гелю, тим більше, що такий підхід дозволяє більш чітко проявитись природним властивостям таких ґрунтів, які обумовлені їх мінералогічним і хімічним складом.

Однією з дуже важливих особливостей графіків типу $\lg R = f(W, S_r = 1,0)$ (рис. 1) у дослідженні залежності фізико-механічних властивостей зв'язних ґрунтів від їх вологості є те, що він дозволяє досить чітко виявляти певні особливості, обумовлені їх фізичними і хімічними властивостями [13, с. 300]: "Кривые, характеризующие физические и химические свойства, часто представляют собой взаимодействие двух или большего числа факторов; изменение угла наклона графика наблюдается в тех случаях, когда один эффект преобладает над другим. Таким образом, наибольший теоретический интерес представляет точка, где одна кривая переходит в другую".

Характерно, що питання наявності певних особливостей в залежностях типу $\lg R = f(W, S_r = 1,0)$



В.Ф. Разорьонов у своїх роботах зазвичай не розглядає. Однак про них пишуть деякі інші фахівці, зокрема Е.Н. Богданов (рис. 4) [14, с. 110, рис. 1], та інші. У той же час, це питання є одним із найважливіших для фахівців, які досліджують залежність фізико-механічних властивостей зв'язних ґрунтів з позиції фізико-хімічної механіки (рис. 5) [6, с. 84, рис. 22]. Та й традиційне представлення результатів залежності механічних властивостей ґрунтів від вологості, наприклад, у роботах П.О. Бойченка, про що згадує М.Н. Гольдштейн [10, с. 321], теж свідчить про наявність якогось недостатньо вивченого ефекту у їх поведінці. Більш того, навіть результати проведених нами випробувань із визначення верхньої межі пластичності на приладі Казагранде теж показали неоднорідність залежностей типу $n = f(W)$ у більш широкому діапазоні вологостей (рис. 6).

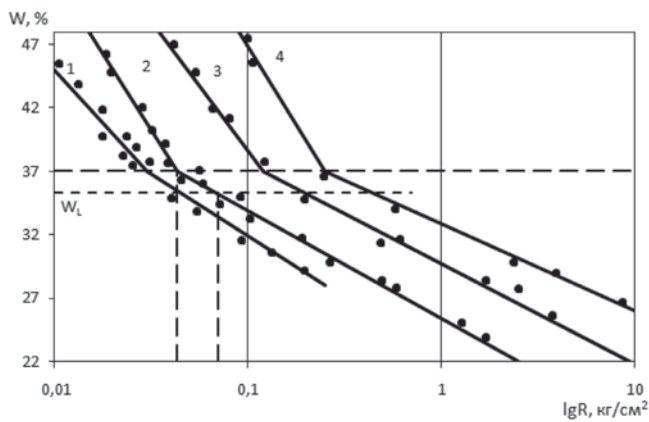


Рис. 4. Зміна зчеплення і питомого опору penetрації для конусів із різними кутами при вершині залежно від вологості: 1 – зчеплення; 2 – 4 – R при α відповідно 30° , 60° і 90°

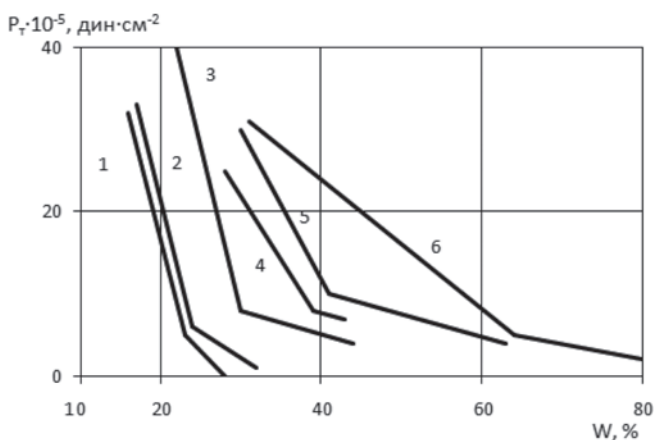


Рис. 5. Залежність пластичної міцності від вологості: 1 – 6 – різні види глин

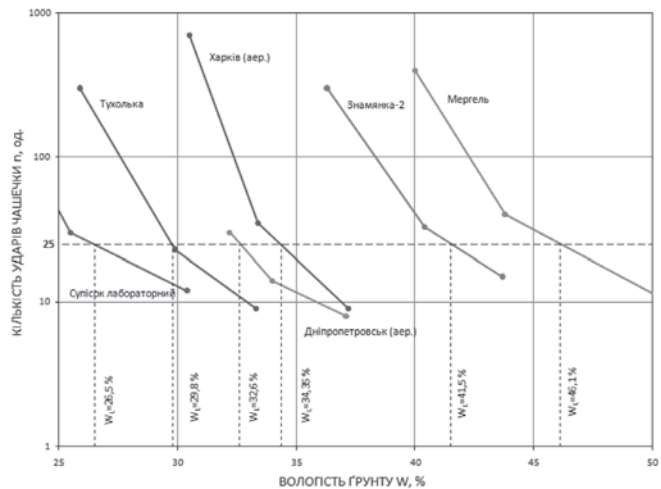


Рис. 6. Результати визначення верхньої межі пластичності досліджуваних ґрунтів на приладі Казагранде

Ми також на початку наших експериментальних досліджень залежності властивостей зв'язних ґрунтів від вологості, що виконувались методом пенетрації конусом за методикою В.Ф. Разорьонова, відчули наявність впливу певного явища при наближенні вологості до верхньої межі пластичності, що призвело до зламу у певній точці графіка типу $\lg R = f(W, S_r = 1,0)$. Це вимагало копіткої та тривалої роботи над методикою підготовки зразків до випробувань, хоча і самі випробування та обробка отриманих даних, як виявилось згодом, також вимагають більш ретельного аналізу.

З одного боку, необхідно було забезпечити гарну відтворюваність результатів випробувань з причин, що пояснюються рис. 2, з другого – існувала складність у досягненні повного водонасичення досліджуваних зразків ($S_r \geq 0,98$) без їх будь-якого пошкодження при цьому і також дійти усвідомлення про необхідність, для об'єктивного дослідження можливих значень верхньої межі пластичності, проводити випробування у початковій стадії гелеутворення (на початку коагуляції глинистої суспензії). Цьому сприяло те, що, як показав, М.М. Круглицький [6, с. 121]: “В глинистої суспензії структурообразование починається сразу после затворения водой и характеризуется быстрым подъемом кривой кинетики ... Исследования показали также интенсивное структурообразование с самого начала тиксотропного упрочнения ... так как в глинистых суспензиях есть достаточное количество природных коллоидных частичек, которые сразу вступают в процесс структурообразования”.

Характерно, що питання методики виконання подібних досліджень, в усіх без винятку роботах, які аналізувались, були висвітлені вкрай фрагментарно і неповно, що дуже гальмувало експериментальну роботу. При цьому методику, викладену у роботі С.П. Ничипоренка [15, с. 27], мабуть, можна вважати



однією з найбільш повних. Можливо саме через це, питання, що розглядаються у цій роботі, не були ще досі достатньо добре висвітлені у науковій літературі, а найбільша увага приділялась не стільки виявленню фізичної суті явища, що відбувається при переході до текучого стану ґрунту, скільки техніці вимірювань з використанням конусу. Хоча і в цьому питанні, на нашу думку, ще є досить багато спірних моментів.

Методика дослідження

Для виготовлення зразків використовувались два типи кільця, що не мають ріжучого канта (рис. 7). Одні з внутрішнім діаметром 5,69 см і висотою 4,02 см ($V = 102,2 \text{ см}^3$), а інші з внутрішнім діаметром 10,45 см і висотою 4,0 см ($V = 343,1 \text{ см}^3$).



а) кільця невеликого діаметру ($d = 5,69 \text{ см}$) і пристрій для ущільнення в них ґрунтів
б) кільця великого діаметру ($d = 10,45 \text{ см}$) і пристрій для ущільнення в них ґрунтів

Рис. 7. Пристосування для ущільнення ґрунтів

Ґрунт у повітряно-сухому стані розпушувався на спеціальному пристрої до агрегатів розміром $< 5 \text{ мм}$, а потім просіювався через сито з діаметром вічок — $1,0 \text{ мм}$. З одного боку, за визначенням, переважна більшість зв'язних ґрунтів має ґрунтових частинок, розміром більше 2 мм , зазвичай, не більше 2% (хоча є і винятки), а з другого — частинки, розміром до $1,0 \text{ мм}$, не мають великого впливу на занурення конуса у ґрунтову пасту.

Після просіювання ґрунту визначалась його гігроскопічна вологість. Задаючись певними потрібними значеннями вологості, і вважаючи, що вже при формуванні зразків на спеціальному пристрої (рис. 7) водонасичення ґрунту при ущільненні буде становити $S_r = 0,8 - 0,9$, розраховувалась необхідна для заповнення кільця кількість ґрунту і кількість води для його зволоження. Приготовлені зразки

ґрунтової пасту ставились на 12 годин у ексикатори для кращого перерозподілу води у ґрунтових агрегатах і їх подальшого більш легкого руйнування при ущільненні, що особливо важливо при невеликих вологостях, близьких за значенням до можливої межі розкочування ґрунту.

Кожний зразок укладався в окреме кільце і ущільнювався, подібно до методу стандартного ущільнення трамбівками різної маси до максимальної для цієї вологості щільності ($S_r = 0,80 - 0,95$). Половина ударів робилась з одного боку кільця, а половина з протилежного. Зазвичай, зразок дуже добре заповнював кільце. Коли ж він у ньому не вмщувався, то залишки ґрунту зрізувались, а висота виступу зразка, зазвичай, не перевищувала 1 мм . Більш розріджені ґрунтові пасту, при вологостях, близьких до можливої межі текучості й більше, укладались в кільця на листку цупкого поліетилену шпателем з притискуванням і штикуванням тонким стержнем, щоб у ньому не залишалось повітря. Після заповнення кільця вони вкривались з обох боків фільтрувальним папером у два шари і переставлялись чи по одному (великі кільця) чи по три одночасно (менші кільця) у спеціальний пристрій з двома денцями, що щільно притискалися до кільця через фільтрувальний папір (рис. 8). Денця мали густу сітку отворів діаметром $1,0 \text{ мм}$. Потім цей пристрій, разом із кільцями, ставився у не глибоку широку посудину, яка заповнювалась водою до середини чи двох третин висоти кільця і ставився у вакуумну камеру для водонасичення під вакуумом. Вакуум створювався протягом п'яти хвилин, а потім ще п'ятнадцять хвилин зразки утримувались у ньому. Вакуум становив -760 мм рт. ст. після цього його дія припинялась, посуд доливався водою врівень із поверхнею верхнього денця та вакуумування повторювалось як у першому разі.

Після цих двох циклів вакуумування пристрій із кільцями виймався з води, ставився на стіл і розкручувався. Така процедура і фільтрувальний папір забезпечували повне водонасичення зразків без їх будь-якого пошкодження. Кільця по одному виймалися із пристрою таким чином, щоб ґрунтові зразки не випадали із них, а з нижньої сторони, при цьому, їх підтримувала пластина цупкого поліетилену чи целулоїду. Кільця із зразками зважувались до і після вакуумування. Приріст ваги свідчив про їх водонасичення, що підтверджували



Рис. 8. Пристрій для водонасичення ґрунтів під вакуумом



Рис. 9. Лабораторний пенетрометр типу ЛП – 1 та диски навантаження

розрахунки. Із цим денцем зразок ставився на предметний столик лабораторного пенетрометра (рис. 9) і на ньому здійснювалось занурення у ґрунт конусу з кутом загострення 30° , чотирма-п'ятьма ступенями навантаження. Значення маси рухомої частини пенетрометра з відповідними навантажуючими дисками на кожному ступені й відповідно глибина занурення конусу записувались у лабораторний журнал. Маса дисків візуально і за досвідом випробувань відповідала стану ґрунту, що випробовувався.

Відповідно до стану ґрунту при його випробуванні використовувалось дві рухомі системи. Одна зі сталі, вагою 0,15212 кг, інша з алюмінію, вагою 0,02842 кг. Маса окремих дисків (ступенів навантаження) у різних випробуваннях становила від 10 г до 4 000 г.

(Продовження у наступному номері)

ЛІТЕРАТУРА

1. **Albert Atterberg.** Dis Plastizität der Tone. Internationale Mitteilungen für Bodeu Kunde bd1, 1911.
2. **Механіка ґрунтів для інженерів-дорожників.** Ґрунти в дорожньому будівництві / Перевод с англ. – М.: Автотрансиздат, 1957.

3. **Уоррел У.** Глины и керамическое сырье / Перевод с англ. – М.: Изд. “Мир”, 1978.

4. **Грим Р.** Минералогия и практическое использование глин / Перевод с англ. – М.: Изд. “Мир”, 1967.

5. **Круглицкий Н.Н.** Основы физико-химической механики. Часть 1. – К.: Изд. “Вища школа”, 1975.

6. **Круглицкий Н.Н.** Основы физико-химической механики. Часть 2. – К.: Изд. “Вища школа”, 1976.

7. **Разорёнов В.Ф.** Пенетрационные испытания ґрунтов (теория и практика применения). – М.: Стройиздат, 1980.

8. **Разорёнов В.Ф.** Определение строительных свойств ґрунтов. – К.: Изд. “Будівельник”, 1966.

9. **Литвиненко А.С.** Удосконалення методики обробки

даних, отриманих методами динамічного і статичного зондування ґрунті // Міжвідомчий науково-технічний збірник “Будівельні конструкції”. – Вип. 63. – К.: НДІБК, 2005. – С. 154–162.

10. **Основи, фундаменти, механіка ґрунтів** (короткий енциклопедичний словник). – К.: “ППНВ”, 2004.

11. **ДСТУ Б В.2.1-17:2009.** Основи та фундаменти будинків і споруд. Ґрунти. Методи лабораторного визначення фізичних властивостей. – Київ, 2010.

12. **Гольдштейн М.Н.** Механические свойства ґрунтов (основные компоненты ґрунта и их взаимодействие). – М.: Стройиздат, 1973.

13. **Шенк Х.** Теория инженерного эксперимента / Перевод с англ. – М.: Изд. “Мир”, 1972.

14. **Богданов Е.Н.** Связь результатов пенетрационных испытаний различными конусами с прочностными характеристиками ґрунтов. Ґрунтоведение и инженерная геология. – Вып. 1. – Л.: Изд. Ленинградского ун-та, 1976. – С. 94–105.

15. **Ничипоренко С.П.** Основные вопросы теории процессов обработки и формирования керамических масс. – К.: Изд. АН УССР, 1960.