



• © 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 ДРУГА

(Початок у № 3’2014)

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, дисперсія, концентрація, суспензія, паста, коагуляція, синерезис, пенетрація, енергія, зондування.

Аннотация. 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, дисперсия, концентрация, суспензия, паста, коагуляция, синерезис, пенетрация, энергия, зондирование.

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

Keywords: road, cohesive soils, dispersion, concentration, suspension, paste, coagulation, syneresis, penetration, energy, probing.

Аналіз експериментальних даних

Як було показано раніше [1], добре відпрацьована методика проведення експериментальних досліджень дозволяє не тільки забезпечити хороше відтворення результатів повторних, зокрема дублюючих, випробувань, але повністю проявитись власним природним властивостям ґрунтів.

Так, після вакуумування зразків було помічено, що при початкових вологостях, між вологістю на межі розкочування ($I_L = 0$) і до консистенції $I_L \approx 0,5$ (за існуючими уявленнями), коли вони мали вигляд більш-менш густої, щільної пасти (концентровані суспензії) всі зразки збільшували свою масу внаслідок витискання з них повітря і зайняття його місця водою. Ступінь їх водонасичення після вакуумування становив $S_r = 0,98 - 1,0$. Однак початково більш вологі зразки, з $I_L > 0,5$, які мали вигляд рідкішої глинистої суспензії, навпаки зменшували свою масу при вакуумуванні під водою, витискаючи не тільки повітря, але і досить велику кількість води. Водночас ступінь їх водонасичення також становив $S_r = 1,0$. При вакуумуванні помітно

зменшувався як діаметр таких зразків, так і їх висота (рис. 1). Та на вигляд такі зразки були більш однорідними, монолітними і міцними, ніж перед вакуумуванням.



Рис. 1. Зменшення висоти і діаметра зразка в процесі синерезису під час вакуумування в стані тиско-тропного спокою

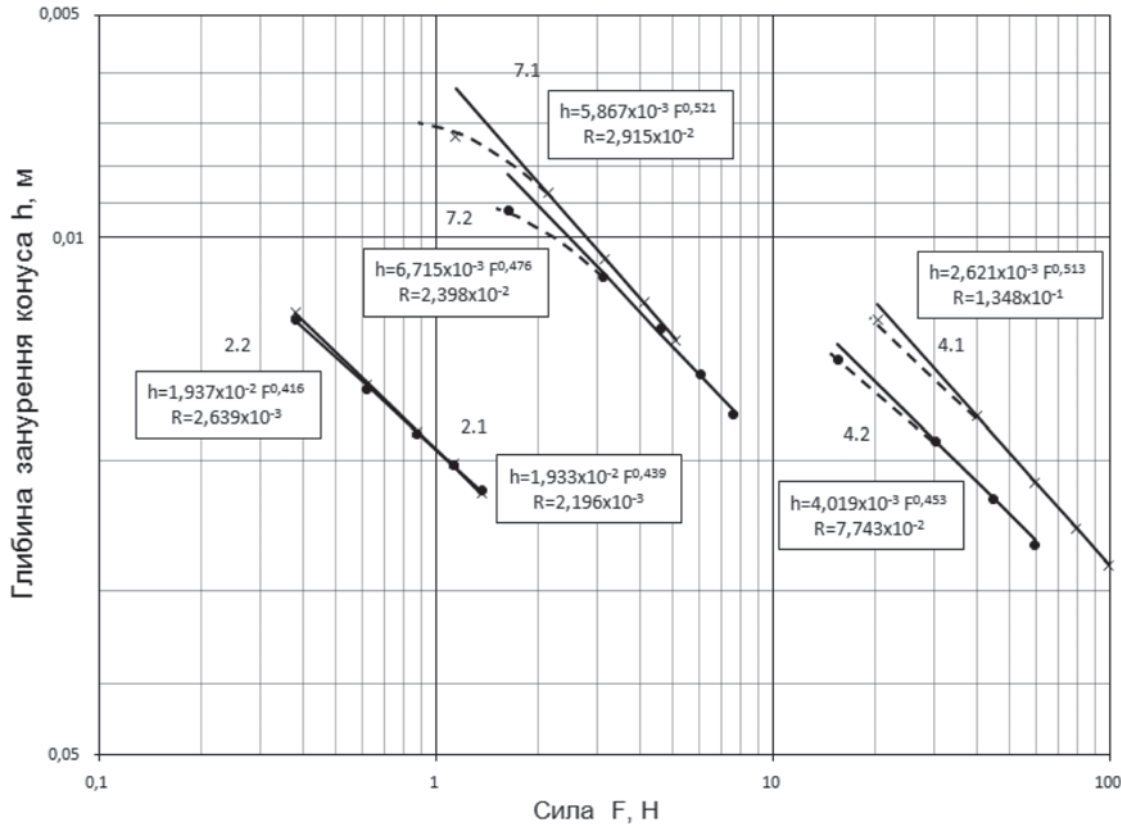


Рис. 2. Залежність глибини занурення конуса при його багатоступеневому навантаженні

Таке явище – синерезис – у науковій літературі відоме ще з початку двадцятого століття [2 – 5]. Як пише С.М. Ліпатов [3, с. 148], синерезис це: “Самопроизвольное застуднение системы, конечным этапом которого является разделение ее на фазы: дисперсную фазу и дисперсную среду. Скорость синерезиса есть функция расстояния между частицами, а следовательно и концентрации. Синерезис представляет, следовательно, процесс “выкристаллизовывания” дисперсной фазы и **возвращает систему к ее начальному устойчивому состоянию**”. Та загалом робить висновок М.Н. Гольдштейн [2, с. 329]: “Явление синерезиса до сих пор не получило удовлетворительного и непротиворечивого объяснения и его следует рассматривать как особый вид усадки, которая происходит под влиянием сил поверхностного натяжения, а усадку глинистого грунта под водой можно рассматривать как особый вид синерезиса (подводный синерезис)”.

Так чи так, але вже сама підготовка зразків до penetраційних випробувань конусом засвідчила наявність певної кардинальної зміни властивостей водонасичених глинистих ґрунтів при збільшенні вологості через певний період тиксотропного спокою в процесі вакуумування.

Зрозуміло, що традиційний підхід до визначення меж пластичності зв'язних ґрунтів за методом Аттерберга у будь-якій із відомих його інтерпретацій: чи то Безрука, чи то Казагранде, чи адаптованого до них методу балансірного конуса за Васильєвим, у принципі, не забезпечують будь-якого

прогресу як у класифікаційних оцінках таких ґрунтів, так, тим паче і у подальшій оцінці їх фізико-механічних властивостей як при лабораторних випробуваннях, так і при польових інженерно-геологічних вишукуваннях.

У зв'язку із цим пропозиція В.Ф. Разорьонова щодо необхідності переходу у визначенні обох меж пластичності зв'язних ґрунтів до їх penetрації конусом з багатоступеневим (4–5 ступенів) його навантаженням [6, с. 117] є абсолютно слушною. До того ж В.Ф. Разорьонов вже більш-менш обґрунтовано визначився із значеннями опору penetрації ґрунтів для “стандартного” наконечника: на межі розкошування – $R_w = 0,186$ МПа і на межі текучості – $R_{wL} = 0,0075$ МПа [6, с. 115]. А ці дві точки за В.Ф. Разорьоновим з'єднуються між собою лінійною залежністю типу $\lg R = f(W)$. Тому і наші експериментальні дослідження були проведені саме у цьому напрямі.

Однак як показали результати цих досліджень, така лінійна залежність між цими двома точками не є однорідною – на ній відбувається злам, характерний майже для всіх досліджених нами ґрунтів (всього близько 10 різновидів).

Після формування і вакуумування зразків їх випробовували на penetрацію конусом з кутом при вершині 30° на звичайному лабораторному пенетрометрі ЛП-1 додатково обладнаному для можливості проведення досліджень у більш широкому діапазоні сил, що діють на ґрунт через конус.

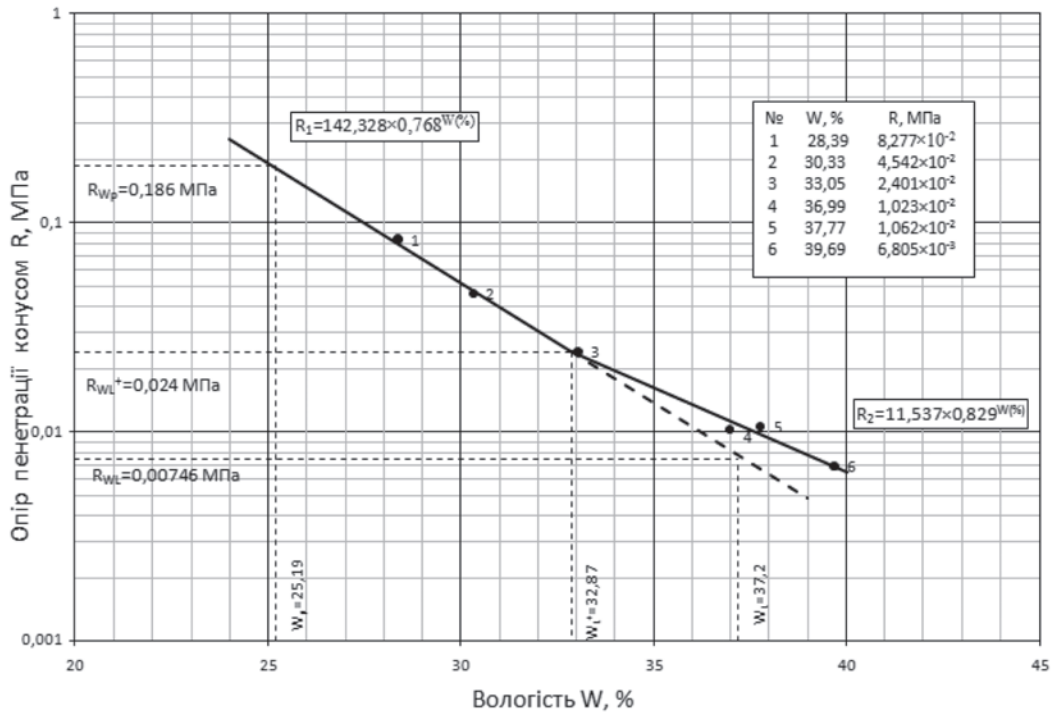


Рис. 3. Типовий графік залежності $R = f(W)$, МПа

Головним недоліком цього пенетрометра, як зазначає сам В.Ф. Разорьонов є: "...некоторое завышение глубины погружения наконечника за счет действия на первых двух ступенях нагрузки сил инерции падения штанг" [7, с. 36], що підтвердили і наші дослідження (рис. 2).

Проте як показав наступний аналіз, компенсувати цей недолік можливо двома способами: або не враховувати координати першої точки у розрахунку параметрів рівняння степеневої залежності $\lg h = f(\lg F)$ у подвійних логарифмічних координатах (рис. 2), або на першому ступені навантаження давати його величину на 25–50 % меншу за інші ступені. Це також підтверджує думку, що при русі кінцевого тіла у ньютонівському середовищі [8, с. 132] більш важливим є не те, наскільки загостреним (чи дещо притупленим) є конус, як величина кута цього конуса – α (30°, 45°, 60° чи 90°). Тут також можна зробити висновок про невелику об'єктивність визначення верхньої межі пластичності – W_L методом балансірного конуса [9], який придатний тільки для простих якісних порівняльних, а не кількісних оцінок. Зрозуміло, що конструктивно цього недоліку позбавлені безенерційні пенетрометри типу еластомера П.А. Ребіндера.

Як видно з графіків, наведених на рис. 2, у подвійних логарифмічних координатах дуже зручно одночасно будувати графіки penetрації при всіх станах ґрунтів від текучого до твердого. Водночас В.Ф. Разорьонов [6, с. 26] не рекомендує зазвичай так робити через те, що при цьому начебто: "...искажения в результатах испытаний, например, за счет слоистости текстуры уже не выявляются".

Треба думати, що проблема полягає не в цьому. Всі дослідники, починаючи від П.А. Ребіндера і включно з В.Ф. Разорьоновим, визначали опір ґрунтів penetрації у вигляді рівняння $R = kF/h^2$, МПа, в якому значення R формально сприймаються як тиск на одиницю площі, щоправда незрозуміло якої: чи то лобового перерізу, чи то зануреної у ґрунт частини поверхні конуса. А підтвердженням необхідності саме такого вигляду цього рівняння їм слугували лінійні графіки залежності $h^2 = f(F)$, наприклад, як у [6, с. 122], які у звичайних декартових координатах проходять близько їх початку, тобто при нульовому навантаженні на конус переміщення дорівнює нулю.

Однак відомо, що ступені функції не тільки із натуральними, але і з десятковими додатними показниками ступеню у звичайних координатах проходять через нуль, що і рекомендує використовувати Х. Шенк [10, с. 217] при перевірці точності вимірювань, результати яких підпорядковані степеневим залежностям типу $x = ay^b$ шляхом екстраполяції їх до початку координат.

Виконана перевірка показала, що точність проведених нами вимірювань забезпечується і при десяткових додатних значеннях показників ступеню, якими вони насправді і є при заглибленні конуса у ґрунт від діючої на нього сили (рис. 2). Таким чином, відношення значення діючої сили до квадрату глибини занурення конуса можна розглядати тільки як штучний, технічний прийом, який не має безпосереднього стосунку до оцінки власних природних властивостей ґрунтів.

Після аналітичного (методом найменших квадратів) визначення значень показника R для різних

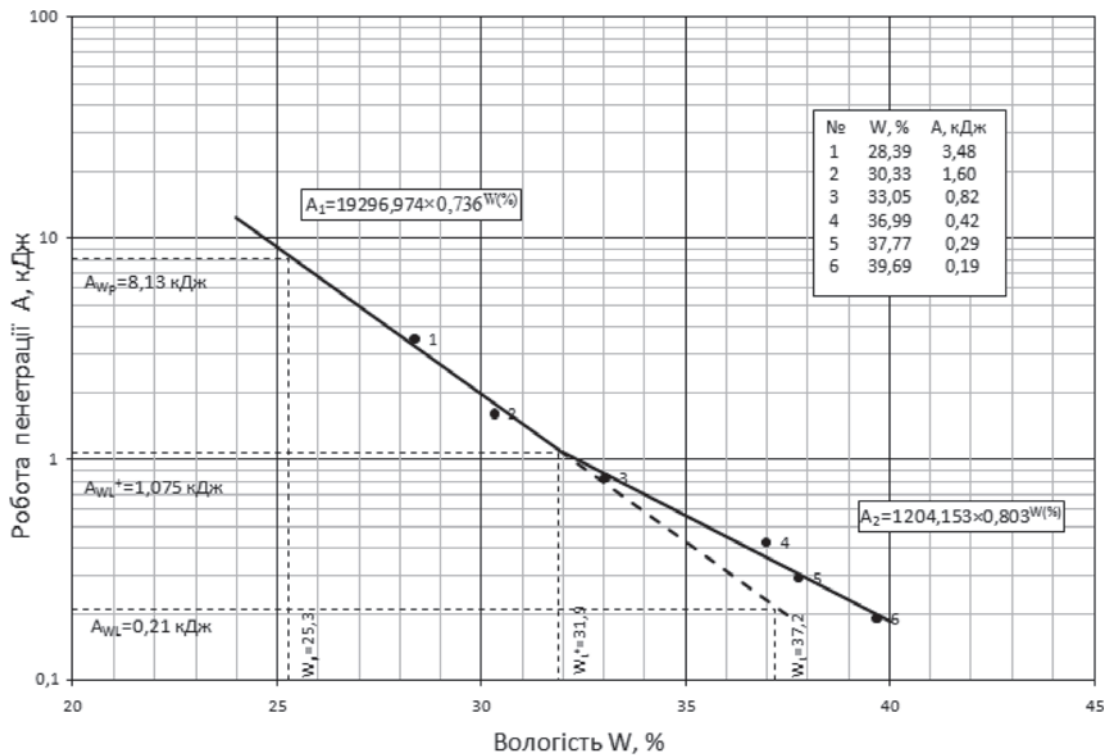


Рис. 4. Представлення залежності занурення конуса як функції роботи пенетрації $A = f(W)$, кДж

станів ґрунту, як і пропонував В.Ф. Разорьонов, для кожного із досліджених видів ґрунтів у напівлогарифмічних координатах були побудовані графіки лінійних залежностей типу $\lg R = f(W)$, МПа (рис. 3).

Хоча, як було показано раніше, з таким самим успіхом можна було б використовувати і залежності типу $A = f(W)$, Дж (рис. 4), де A є робота, яка витрачається на занурення силою F конуса на глибину h , що значно ближче до реальних умов досліду, хоча також не має безпосереднього зв'язку із визначенням власних фізико-механічних властивостей досліджуваних ґрунтів. Але ці питання будуть висвітлені далі, у наступних таких роботах.

Як видно з графіків, що наведені на рис. 3 і рис. 5, майже всі вони мають злам при $R \approx 0,024$ МПа і ці значення R змінюються у дуже вузькому діапазоні ($S = 1,85 \cdot 10^{-3}$ МПа і $K_v = 7,5\%$, $\rho = 2,8\%$) МПа якщо навести їх у вигляді нормального статичного розподілу. Ці величини не складно вирахувати для будь-якого виду ґрунту, розв'язуючи систему двох лінійних рівнянь з двома невідомими типу $\lg R = f(W)$, які характеризують ґрунт у стані повного водонасичення ($I_r = 0,98-1,0$) і які перетинаються між собою у певній точці.

Характерно, що у всіх відомих нам літературних джерелах таке визначення цієї важливої у цьому контексті точки R^+ ніде не описується, а значення R^+ на перетині ліній рівнянь $R = f(W)$ даються дуже приблизно у досить широкому діапазоні їх значень [8, с. 240; 11, с.35]. Наприклад, згідно з [8, с. 240]: "Исследования показали, что кривые $P_m = f(W)$

могут быть представлены двумя прямолинейными участками, которые имеют различный наклон к оси W . Первый участок начинается, когда пластическая прочность массы становится выше $(6-11) \cdot 10^5$ дин/см². В этом случае дисперсионная система содержит преимущественно связанную адсорбционную воду. При переходе ко второму участку, расположенному ниже $P_m = (6-11) \cdot 10^5$ дин/см² в массе происходит полное развитие гидратных оболочек. Дальнейшее увеличение влагосодержания приводит к резкому изменению кривой $P_m = f(W)$ и характеризуется появлением наряду с адсорбционной связанной водой и диффузной влагой также значительных количеств иммобилизованной воды". Нагадаємо, що $(6-11) \cdot 10^5$ дин/см² відповідає $0,06-0,11$ МПа $> 0,024$ МПа у наших дослідах.

Швидше за все це обумовлено певними розбіжностями у методах підготовки зразків до випробувань, хоча сам факт виникнення у певній точці залежності $\lg R = f(W)$ зламу є абсолютно незаперечним. Особливо добре це простежується в роботах науковців, які досліджували властивості глинистих суспензій із позиції фізико-хімічної механіки [14, с. 181; 15, с.388], у цих роботах наведено залежність опору ґрунтів пенетрації конусом не як функцію вологості $\lg R = f(W, \%)$ таких суспензій, а як функцію концентрації $\lg R = f(C, \%)$ дисперсної фази, про що буде сказано далі.

На прикладі ж графіка, наведеного на рис. 3, маємо для однієї з ділянок залежності $\lg R = f(W)$ емпіричне показникове рівняння $R = 142,328 \cdot 0,768^{W, \%}$ (у межах власне пластичного

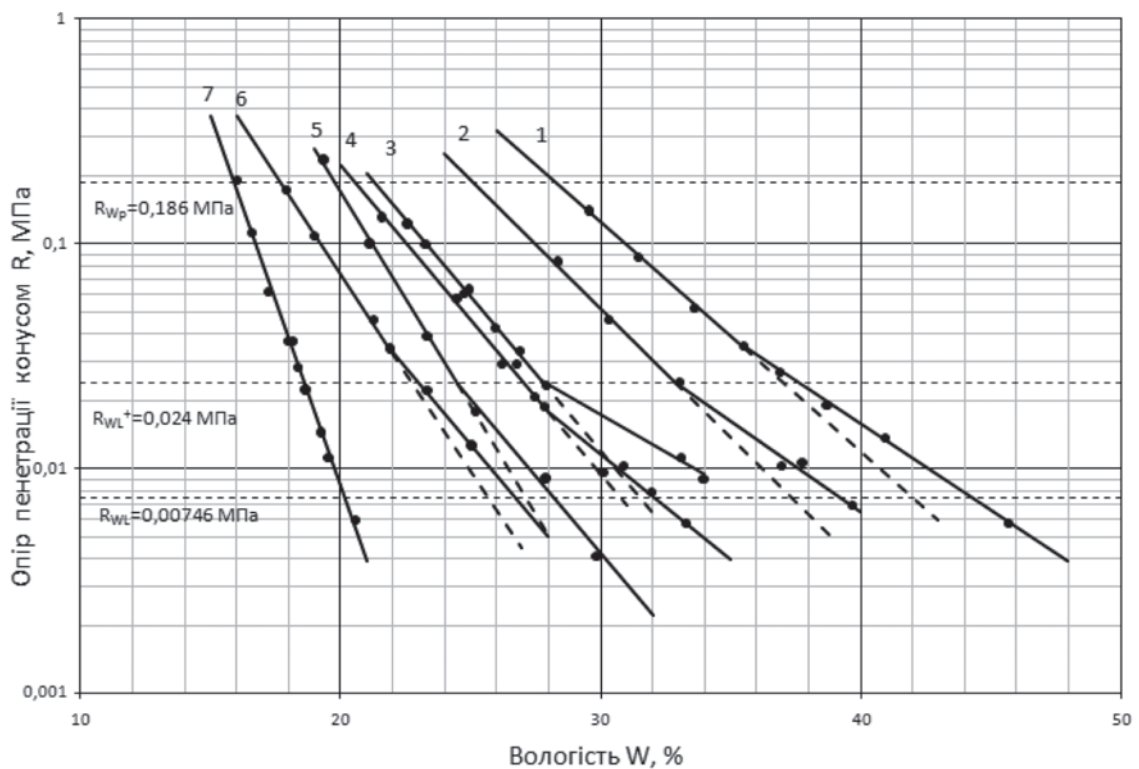


Рис. 5. Графіки залежності $R = f(W, \%)$, МПа для досліджених ґрунтів (1–7)

стану ґрунту) і для другої – $R = 11,537 \cdot 0,829^{W \cdot \%}$ (у межах вже в'язко-текучого стану), а перетинаються вони при вологості $W = 32,87\%$, яка відповідає $R = 0,0242$ МПа, і яка становить $I_L \approx 0,62$ за існуючими зараз уявленнями про визначення верхньої межі пластичності. Цю вологість і потрібно розглядати як справжнє значення верхньої межі пластичності – W_L^+ , для цього конкретного ґрунту. Такий висновок можемо зробити, виходячи із наступних сучасних теоретичних уявлень про природу зв'язних (глинистих) ґрунтів, і, зокрема, глинистих колоїдних частинок.

Глинисті частинки [12, с. 12; 13, с.27], які зазвичай мають від'ємний електричний заряд, утримують навколо себе декілька шарів молекул води "...и чем больше удельная поверхность частиц, тем большее количество молекул воды будет находиться в связанном состоянии" [12, с. 12]. Ці ґрунтові частинки, разом із шарами міцно- та слабозв'язної води складають так звані міцели, ядрами яких вони і є. І, нарешті, молекули води, які знаходяться поза межами дії електромолекулярних сил складають вільну або гравітаційну воду.

Щільні водонасичені ґрунти у твердому і пластичному стані мають дуже велику концентрацію і тому їх міцели чи навіть ядра (супіщані ґрунти) можуть мати безпосередні контакти між собою. Внаслідок цього з власних властивостей така система стискатися більше вже не може. Межею тут слугує явище зступу (усадки). Це дозволяє ґрунтам у такому стані працювати під навантаженням спочатку як пружним (твердим), а потім як деформативним (пластичним) середовищем. Однак зі змен-

шенням густини сухого ґрунту і збільшенням кількості води концентрація ґрунтових частинок (міцел) зменшується, а контакти між ними зникають і врешті-решт вони починають "плавати" у дисперсному середовищі – настає фаза текучості. На рис. 6 наведені дані penetраційних досліджень деяких ґрунтів, але зображені вони не відносно їх вологості, як зазвичай (рис. 3, рис. 5), а відносно концентрації глинистих частинок (дисперсної фази), яку нескладно вирахувати за тими ж значеннями маси ґрунту, що і при розрахунку його вологості.

Та міцели "плавають", так би мовити, не у "чистій" воді, а у розчині (дисперсному середовищі), утвореному глинистим матеріалом, який має певний хімічний склад і здатність до утворення певних хімічних зв'язків в процесі коагуляції у стані тиксотропного спокою. Таким чином, в стані тиксотропного спокою і при зміні атмосферного тиску починає проявляти себе явище, про яке ми згадували раніше і яке на своїй початковій стадії є підводним синерезисом, **що повертає систему до її початкового стійкого стану**, намагаючись шляхом витиснення вільної води зблизити між собою плаваючі у розчині частинки – міцели.

Як видно з даних рис. 6, чим більшими є розміри міцел (через більшу питому поверхню частинок ґрунту – масні глини), тим при меншій концентрації і більшій вологості відбувається перехід таких ґрунтів до текучого стану і навпаки, чим меншими є міцели (супіщані ґрунти), тим при більших концентраціях і меншій вологості досягається текучий

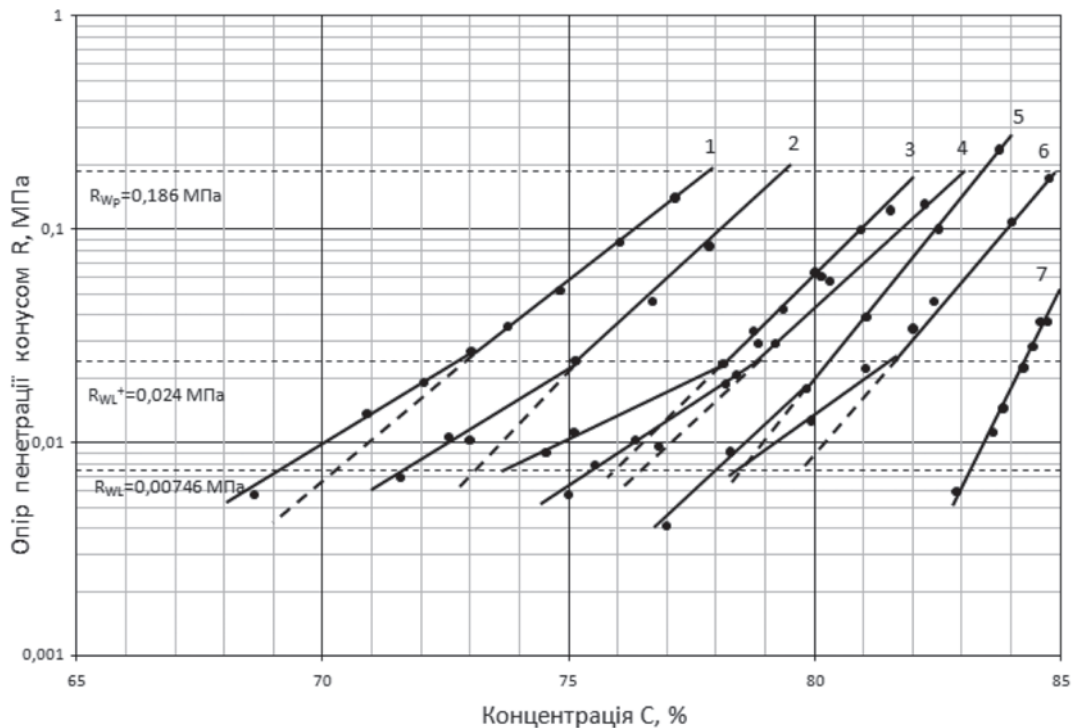


Рис. 6. Графіки залежності $R = f(C, \%)$, МПа для досліджених ґрунтів (1–7)

стан, що особливо проявляється при їх тиксотропному розрідженні.

Зрозуміло, що хімічні властивості більшим чи меншим чином проявляються зв'язними ґрунтами у будь-якому стані, але при великих щільностях (концентрації) переважають саме фізичні властивості у вигляді передачі зусиль, які діють на ґрунт, безпосередньо через контакти між міцелами чи їх ядрами, а при переході у текучий стан більш виразними стають хімічні зв'язки у вигляді коагуляційних ланцюжків, які й не дозволяють конусу занурюватися на більші глибини як це було б без них, що передбачав В.Ф. Разорьонов та інші у своїх дослідженнях, не враховуючи неоднорідності рівняння $R = f(W)$ між межею розкочування і межею текучості. А саме цим пояснюється злам залежності типу $\lg R = (W)$. Тобто опір фізичним навантаженням чинить вже не фізична властивість – густина сухого ґрунту, а хімічна – структурна решітка коагуляційних ланцюжків. Із часом, у стані тиксотропного спокою, такі зв'язки набувають дуже великої міцності забезпечують власне структурну міцність ґрунтів навіть при невеликій природній їх щільності. Тому поширювати на текучий стан ґрунтів такі поняття як модуль деформації i , тим більше, модуль динамічної пружності при розрахунках дорожніх одягів неприпустимо, тим паче, що такі колоїдно-коагуляційні зв'язки зазвичай є водонестійкими.

Однак і вважати суто текучим стан ґрунтів при вологостях у водонасиченому стані, більших ніж верхня межа пластичності (W_L), мабуть, було б теж недостатньо коректним. Скоріше за все, на якомусь

відтинку зміни вологості їх стан слід розглядати як в'язко-текучий і лише при ще більшій вологості і при концентраціях $C < 30 \%$, вже як справді текучий. На це вказують і дослідження М.П. Воларовича і А.Л. Багрова (рис. 7) [15, с. 384] та інших дослідників про що йшлося раніше і для яких у фізико-хімічній механіці існує досить детальна система різних показників [8, с. 194].

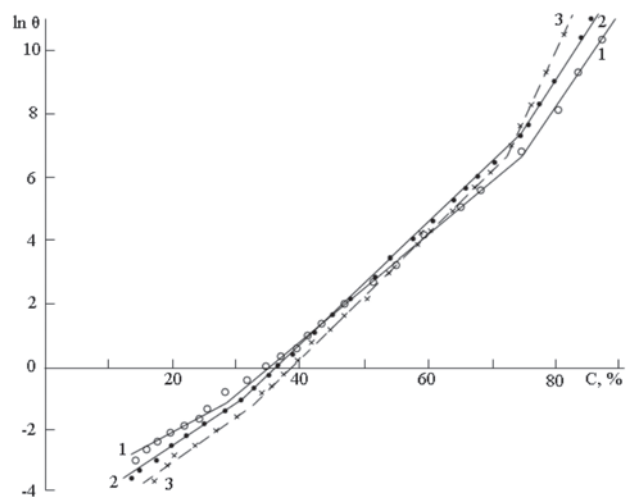


Рис. 7. Залежність граничного напруження зсуву від концентрації дисперсної фази в напівлогарифмічних осях (θ , г/см³) [15, с. 384, рис. 2]

Про можливу неналежність верхньої межі пластичності ґрунтів – W_L до їх пластичного стану в інтерпретації Аттерберга, свідчать і такі



дослідження як [17, с. 117] “...исследования в части увязки одной из констант Аттерберга – нижней границы текучести – с гранулометрическим составом (количеством глинистых частинок) показывают, что между ними существует четкая закономерность”, в той час як “...отсутствие определенной взаимосвязи между содержанием в грунте глинистой фракции и величиной границы раскатывания становится труднообъяснимым”.

Проте все як раз навпаки – у пластичному стані, коли переважають фізичні властивості ґрунтів, обумовлені великою концентрацією дисперсної фази ні межа розкочування, ні так звана нижня межа текучості (верхня межа пластичності) і не повинні особливо реагувати на хімічний склад глинистих частинок. Та при переході у в'язко-текучий стан, коли остаточно втрачається контакт між міцелами, хімічні властивості колоїдних глинистих частинок набувають більшої ваги, що і обумовлює їх вплив як на верхню межу пластичності за Аттербергом, так і на число пластичності, що безпосередньо з нею пов'язане. Тому, верхня межа текучості за Аттербергом вже не належить до пластичного стану і не є якоюсь його межею.

Про це ж свідчать і такі показники глинистих ґрунтів, як гідрофільність та активність глини [2, с. 314], які поки що хоча і не знайшли певного застосування в геотехніці, але є певним доповненням до класифікаційних характеристик цих ґрунтів.

Висновки

Як показав аналіз експериментальних даних безпосередньо визначити межу переходу від пластичного до текучого (в'язко-текучого) стану ґрунту із одного досліду практично неможливо. Аналіз цих даних у більш широкому діапазоні зміни фізико-механічних властивостей зв'язних ґрунтів порушеної структури у повністю водонасиченому стані у кількісному вираженні за залежністю $R = f(W, \%)$ чи $R = f(C, \%)$ показав, що такий перехід існує і не залежить від методу випробувань чи виду представлення їх результатів, а обумовлений їх власними фізико-хімічними властивостями. Ці фізико-хімічні властивості породжують таке природне явище як підводний синерезис, який відбувається при вакуумуванні в стані тиксотропного спокою.

Внаслідок підводного синерезису, як початкової стадії структурно-механічного зміцнення ґрунтів в процесі їх діагенезу спочатку із водоглинистої суспензії частково витісняється вільна вода через намагання системи перейти до більш стійкого стану із безпосередніми контактами ґрунтових міцел між собою. А потім відбувається утворення і зміцнення коагуляційних ланцюжків, які створюють просторову решітку і надають ґрунтам великої структурної міцності.

Витискання вільної води із водоглинистої суспензії відбувається вже при вологості водонасиче-

ного ґрунту, яка відповідає показнику текучості біля $I_L \approx 0,62$, за чинною процедурою визначення показника W_L . Своєю чергою це відповідає опору пенетрації ґрунтів “стандартним” конусом при $R=0,024$ МПа.

Користуючись емпіричними залежностями опору ґрунтів пенетрації як у пластичному, так і у в'язко-текучому стані можна кількісно ідентифікувати будь-який ґрунт. Ці ж залежності дозволяють оцінювати структурну міцність ґрунтів у їх природному заляганні, порівнюючи її із порушеним станом таких ґрунтів, отриманого в лабораторії.

У подальшому це дозволяє здійснити перехід від штучних, технічних показників міцності зв'язних ґрунтів типу C і ϕ до природних властивостей ґрунтів у вигляді коефіцієнта в'язкості та структурної міцності і безпосередньо їх використовувати у розрахунках, наприклад, стійкості укосів та інших розрахунках.

ЛІТЕРАТУРА

1. Литвиненко А.С. Наскільки об'єктивно визначається значення верхньої межі пластичності зв'язних ґрунтів у сучасному будівельному ґрунтознавстві? (Частина перша) // Автошляховик України. – 2014. – № 3. – С. 30–35.
2. Гольдштейн М.Н. Механические свойства грунтов. – М.: Стройиздат, 1973.
3. Лопатов С.М. Высокомолекулярные соединения. – Ташкент: Изд. АН БССР, 1943.
4. Чухров Ф.В. Коллоиды в земной коре. – М.: Изд. АН СССР, 1955.
5. Горкова И.М., Рябичева К.Н. Опыт изучения структурно-механических свойств некоторых глинистых пород // Труды лаборатории гидрогеологических проблем им. Саваренского. – Т. XXII. – М.: Изд. АН СССР, 1959.
6. Разорёнов В.Ф. Пенетрационные испытания грунтов (теория и практика применения). – М.: Стройиздат, 1980.
7. Разорёнов В.Ф. Определение строительных свойств грунтов методами пенетрации и вращательного среза. – К.: Будівельник, 1966.
8. Круглицкий Н.Н. Основы физико-химической механики. Часть 1. – К.: Вища школа, 1975.
9. ДСТУ Б В.2.1-17:2009. Основы та фундаменти будинків і споруд. ґрунти. Методи лабораторного визначення фізичних властивостей. – К.: Мінрегіонбуд, 2010.
10. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента. Перевод с англ. – М.: Мир, 1972.
11. Ничипоренко С.П. Основные вопросы теории процессов обработки и формования керамических масс. – К.: Изд. АН УССР, 1960.
12. Цитович Н.А. Механика грунтов (краткий курс). – М.: Высшая школа, 1973.
13. Бабков В.Ф., Безрук В.М. Основы грунтоведения и механика грунтов. – М.: Высшая школа, 1973.
14. Круглицкий Н.Н. Основы физико-химической механики. Часть 2. – К.: Вища школа, 1976.
15. Волярович М.П., Бегров А.А. Влияние дисперсности на зависимость реологических параметров системы глина – вода от концентрации дисперсной фазы // Физико-химическая механика дисперсных структур. Сб. статей. – Изд. “Наука”, 1966.
16. Горкова И.М. Труды лаборатории гидрогеологических проблем им. Акад. Ф.П. Саваренского. Том XII, раздел 2, глава III – IV. – М.: Изд. АН СССР, 1956.
17. Мельников. Влияние гранулометрического состава грунтов на степень их пластичности // Почвоведение. – №8. – Изд. АН СССР, 1940.