

УДК 625.7/.8

Литвиненко А.С.

**ПРО МЕТОДИ СТАТИЧНОГО І ДИНАМІЧНОГО ЗОНДУВАННЯ
ЯК МЕТОДИ ПРЯМОГО ПОЛЬОВОГО ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА
ДИНАМІЧНОЇ В'ЯЗКОСТІ ЗВ'ЯЗНИХ ҐРУНТІВ**

Анотація. У роботі доводиться, що методи статичного і динамічного зондування можуть і повинні бути методами прямого польового визначення такого природного показника зв'язних ґрунтів як їх коефіцієнт динамічної в'язкості. Використання реальних значень коефіцієнта динамічної в'язкості дозволяє в розрахунках міцності і стійкості відмовитися від таких штучних параметрів зв'язних ґрунтів як кут внутрішнього тертя та зчеплення.

Ключові слова: Зв'язні ґрунти, статичне зондування, динамічне зондування, показник текучості, коефіцієнт динамічної в'язкості.

УДК 625.7/.8

Литвиненко А.С.

**О МЕТОДАХ СТАТИЧЕСКОГО И ДИНАМИЧЕСКОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ КАК МЕТОДЫ ПРЯМОГО ПОЛЕВОГО
ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ДИНАМИЧЕСКОЙ ВЯЗКОСТИ
СВЯЗНЫХ ҐРУНТОВ**

Аннотация. В работе доказывается, что методы статического и динамического зондирования могут и должны быть методами прямого полевого определения такого природного показателя связных почв как их коэффициент динамической вязкости. Использование реальных значений коэффициента динамической вязкости позволяет в расчетах прочности и устойчивости отказаться от таких искусственных параметров связных ґрунтов как угол внутреннего трения и сцепление.

Ключевые слова: Связные ґрунты, статическое зондирование, динамическое зондирование, показатель текучести, коэффициент динамической вязкости.

UDC 625.7/.8

Lytvynenko A.S.

ABOUT THE METHODS OF STATIC AND DYNAMIC SOUNDING AS METHODS OF DIRECT FIELD DETERMINATION OF THE COEFFICIENT OF DYNAMIC VISCOSITY OF COHESIVE SOILS

Abstract. The study proves that the methods of static and dynamic probing can be and should be regarded as the methods of direct field definition of such natural indicator of cohesive soils as dynamic viscosity coefficient. The use of actual values of dynamic viscosity coefficient allows abandoning such artificial characteristics of cohesive soils as an angle of internal friction and adhesion in the calculation of strength and stability.

Key words: Cohesive soils, the static probing, dynamic probing, the turnover rate, the coefficient of dynamic viscosity.

Вступ

У небагатьох літературних джерелах, які нам відомі, фахівці з будівельного ґрунтознавства та механіки ґрунтів торкаються питання дослідження в'язкості зв'язних ґрунтів і визначення їх коефіцієнтів динамічної в'язкості – μ Па сек. Одним із таких джерел є робота Н.Н. Маслова [1, с. 105], в якій автор зокрема торкається як питання визначення цього показника, так і наводить його орієнтовні значення посилаючись на свою ж таки роботу [2]. На цю ж роботу [2] посилається і С.С. Вялов у своїй книзі [3, с.114]. Там же він наводить дані з цього питання і ще декількох авторів, а також робить порівняння лабораторних методів визначення цього показника.

У цій роботі ми покажемо як ще можна досить швидко, і не тільки в лабораторних умовах, але й на основі польових випробувань, обґрунтовано визначити значення коефіцієнтів динамічної в'язкості зв'язних ґрунтів при їх різних станах методом динамічного зондування, що здійснюється за удосконаленою методикою зондування і обробки отриманих даних, наведених в роботі [4, с.154].

Основна частина

Як зазначає С.С. Вялов [3, с.114]: «Вязкость различных сред меняется в весьма большом диапазоне: от $1,8 \cdot 10^{-4}$ П для воздуха, 10^{-2} П для воды, 0,5–10,0 П для различных масел и до $5 \cdot 10^{22}$ П для земляной коры».

Нас же, виходячи з досвіду практики проектування і спорудження **штучних ґрунтових споруд**, найбільше цікавить стан, а відповідно і в'язкість, ґрунтів в досить вузькому інтервалі значень показника текучості: $-0,5 \leq I_L \leq 0,5$. Комплексні лабораторні дослідження виконувалися на відносно великих зразках ґрунтів (Д=152,0 мм; Н=178,00 мм) які виготовлялись за допомогою трамбуючого присторою для виготовлення ущільнених зразків за методом Проктора. Ущільнення здійснювалося у дев'ять шарів через шабот-вкладиш для забезпечення рівної поверхні зразка з обох його сторін, оскільки у комплекс випробувань входило не тільки визначення сили опору ґрунту зондуванню і коефіцієнта динамічної в'язкості (рис.1), але і визначення для кожного зразка модулів пружності (деформації) (рис. 2) та величини найбільшого допустимого пружного прогину, який відповідає цьому модулю. Дослідження модулів пружності і величини прогину здійснювалося за новою удосконаленою методикою і при збільшенні чутливості індикаторів переміщення з 0,01 мм до 0,001 мм для напівтвердого і тугопластичного стану ґрунтів.

Робота виконувалась за схемою греко-латинського квадрата із жорсткою прив'язкою до певних значень показника текучості I_L . Ступінь водо насичення всіх зразків – $S_r \geq 0,95$. Згідно прийнятого плану експериментальних досліджень одночасно вивчався як вплив діаметра наконечника (індентора) – (d) на силу опору ґрунтів зондуванню F, Н, так і кут його загострення – (α°). В подальших дослідженнях передбачалось ще й визначення сили опору ґрунтів зондуванню в залежності від їх виду за числом пластичності I_p .

Необхідний ступінь водонасичення зразків $S_r \geq 0,9-0,95$ досягався вже в процесі їх виготовлення трамбуванням. Як показали окремі зразки задана в процесі ущільнення вологість (ω) практично не змінювалась, навіть при насиченні їх водою з вакуумуванням протягом трьох-шести місяців. При цьому, як верхнє, так і нижнє денце форми мали велику кількість отворів діаметром 2,0 мм, а між зразком і денцями у два шари клався фільтрувальний папір.



Рисунок 1 – Пристрій для динамічного зондування зразків в лабораторії



Рисунок 2 – Штампові випробування зразків на важільному пресі

Лабораторні дослідження зразків на опір зондування дозволяють залучити експериментальний досвід вже давно і добре випробуваний у гідро- і аеродинаміці [5, с.121, 133, 160-163].

Згідно цього досвіду [5, с.132]: «Сила сопроотивлення при обтекании тела вязкой жидкостью зависит от нескольких параметров, а именно от скорости, вязкости жидкости, поперечных размеров тела и плотности среды; функциональная зависимость в этом случае имеет вид:

$$P = f(v, L, \omega, \rho, \mu)$$

где P – сила сопроотивления;

v – скорость набегающего потока жидкости;

ω – площадь миделева сечения... остальные обозначения прежние».

В результаті аналіз розмірностей цих показників приводить до виразу [5, с. 133, (38.16)]:

$$P = C \rho v^2 \omega f(R)$$

де – $f(R) = R^{-S}$ (або – в загальному випадку – будь-яка інша функція числа Рейнольдса, де саме число Рейнольдса, як безрозмірний комплекс, має такий вигляд:

$$R = \frac{vd\rho}{\mu}$$

де v – швидкість руху;

d – міделевий діаметр;

ρ – густина середовища;

μ – коефіцієнт динамічної в'язкості.

Про це ж саме можемо довідатись і в роботі [6, с.104].

Таким чином, згідно аналізу розмірностей для умов динамічного зондування можемо визначити таке:

тоді:

$$F = \varphi(\rho^a; h^b; \mu^c; m^k; v^h; d^m; g^p) \quad (1)$$

або:

$$MLT^{-2} = [(ML^{-3})^a (L)^b (ML^{-1}T^1)^c (M)^k (LT^{-1})^h (L)^m (LT^{-2})^p] \quad (2)$$

для

$$M; 1 = a + c + k$$

$$L; 1 = -3a + b - c + n + m + p$$

$$T; -2 = -c - n - 2p$$

тоді після всіх спрощень маємо:

$$a = 1 - c - k$$

$$n = 2 - c - 2p$$

$$m = p - b + 2 - c - 3k.$$

Таблиця 1 – Вихідні дані до аналізу розмірностей

№ змінної	Назва змінної	Позначення	Формула розмірності
1	Густина ґрунту (об'ємна маса ґрунту)	ρ	ML^{-3}
2	Коефіцієнт динамічної в'язкості ґрунту	μ	$ML^{-1}T^1$
3	Величина міделєвого перерізу конуса	d	L
4	Сумарна маса молота і зонда	m	M
5	Середня швидкість одночасного руху молота і зонда	v	LT^{-1}
6	Глибина зондування за один удар молота	h	L
7	Прискорення вільного падіння	g	LT^{-2}
8	Сила опору ґрунту зондуванню	F	MLT^{-2}

Підставляючи ці співвідношення для показників ступенів у формулу (1) отримуємо:

$$F = \varphi (\rho^{1-c-k}; h^b; \mu^c; m^k; v^{2-c-2p}; d^{p-b+2-c-3k}; g^p). \quad (3)$$

І врешті-решт об'єднуючи члени з однаковими показниками ступенів отримуємо такі безрозмірні комбінації:

$$\frac{F}{\rho v^2 d^2} = \varphi \left(\frac{\mu}{\rho \cdot v \cdot d} \right)^c \left(\frac{h}{d} \right)^b \left(\frac{M_{m+3}}{\rho d^3} \right)^k \left(\frac{gd}{v^2} \right)^p. \quad (4)$$

Від умов статичного зондування цей набір безрозмірних комплексів відрізняється тільки тим, що при статичному зондуванні не буде останнього з них – v/gd (число Фруда), оскільки динамічне зондування здійснюється із впливом поля земного тяжіння, а сила опору при статичному зондуванні не залежать від прискорення вільного падіння.

Не претендуючи на більш повний аналіз співвідношення всіх згаданих безрозмірних комплексів тільки зазначимо, що для нас найбільш важливим є саме число Рейнольдса, яке дозволяє більш-менш об'єктивно визначити такий важливий для будівельного ґрунтознавства показник як коефіцієнт динамічної в'язкості ґрунтів – μ , Па сек. Та перед початком аналізу отриманих

експериментальних даних необхідно було більше об'єктивно визначитися із таким важливим параметром як швидкість руху конуса в ґрунтовому середовищі при його динамічному зондуванні.

Як відомо і попередні [7, 8] і чинні [9] в Україні нормативні документи при визначенні показника так званого умовного динамічного опору зондуванню – R_d , МПа (а в склад цього показника входить і сила опору зондуванню F , Н) користувались залежністю [10, с.141]:

$$R_d = (K \cdot P_o \cdot \Phi \cdot n) / h \quad (5)$$

в якій при визначенні коефіцієнта K :

$$K = (M_m + e^2 \cdot M_3) / (M_m + M_3) \quad (6)$$

додатково враховували спеціальний коефіцієнт $e = 0,56$ ($e^2 = 0,314$) для врахування пружності удару молота при його взаємодії із зондом (як сумою мас занурених штанг) та ґрунтом.

Стосовно цього коефіцієнта автори роботи [11, с.46] пишуть: «Известно, что при (не упругом ударе $e = 0$, при абсолютно упругом ударе $e = 1$. При упруго- пластичном ударе, что имеет место в процессе динамического зондирования, коэффициент e принимает промежуточное значение. Для стали, в частности, $e = 0,556$, что и принято в нормативных документах. Однако исследования подскока молота при зондировании показывает, что характер упруго-пластического удара молота определяется в значительной степени свойствами ґрунтов. Поэтому следует рассматривать систему молот-зонд-ґрунт как единое целое». В іншому місці ці ж автори [11, с.38] пишуть: «При зондировании слабых ґрунтов подскока молота при ударе, как правило, не наблюдается, что свидетельствует о неупругом характере удара. Поэтому значения коэффициента K при учете потерь энергии при ударе следует рассчитывать по формуле

$K = (M_m) / (M_m + M_3)$ принимая значение коэффициента $e=0$, как при неупругом ударе (M_m и $\sum M_3$ – соответственно массы молота и зонда с оголовником и наконечником)».

Але в усіх, як колишніх ГОСТ, так і чинних ДСТУ умови використання коефіцієнта e спеціально не наголошувались, що призводило (і призводить дотепер) до певної і досить великої похибки у визначенні показника R_d , а відповідно і у визначенні сили опору ґрунтів зондуванню F , Н. Та якщо дотепер при практичному користуванні такими нормативними документами, це не мало

особливого значення, оскільки вони розглядають метод динамічного зондування (як і статичного зондування) тільки як допоміжний до інженерно-бурових робіт, то тепер, коли на основі даних динамічного зондування можна визначати коефіцієнт динамічної в'язкості ґрунтів, такий підхід є неприпустимим.

Більш того, при оцінці методом динамічного зондування стану і властивостей зв'язних ґрунтів, які нас найбільше цікавлять, ми можемо виконувати зондування тільки до появи підскоку і коли він з'являється роботи зазвичай необхідно припинити, бо це свідчить про досить велику міцність розташованих глибше шарів ($I_L < -0,5$).

Таким чином, враховуючи саме пластично-в'язаний характер деформування ґрунтів в процесі динамічного зондування слід розраховувати швидкість руху наконечника разом із зондом і молотом через імпульс тіла після зіткнення їх мас і сумісному русі в ґрунті за один удар молота:

$$V = (M_M \cdot V_M) / (M_M + M_3). \quad (7)$$

При цьому середня швидкість (V_{cp}) системи має бути відповідно в двічі меншою.

Проведені порівняльні розрахунки значень показника – R_d , МПа показали, що його абсолютні значення при $e = 0$ зменшились лише в 1,2 рази порівняно із розрахунками при $e = 0,314$, а при розрахунках через імпульс тіла вони зменшуються приблизно у п'ять разів порівняно із розрахунками при $e = 0,314$. Характерно, що складність розрахунків значень показника R_d при цьому не збільшилась порівняно із попередньою процедурою і досить просто може виконуватись навіть на програмованому калькуляторі не кажучи вже про персональний комп'ютер чи ноутбук.

Майже не змінився при цьому і характер безперервного графіка (епюри) усереднених значень показника $R_{d\,cp}$ і параметрів розкиду його значень у шарі при визначенні різних за властивостями шарів по глибині зондувальної свердловини. Більш того при нових абсолютних значеннях показника R_d , МПа він став ще більш виразним.

Також ще більшої ваги набули значення показника R_d через їх прив'язку до певних значень показника текучості I_L . Тепер на будь яких графіках дуже добре видно, що той чи інший прошарок чи шар має властивості кращі чи гірші (і на скільки) порівняно із станом ґрунту на його межі розкочування. Це ж в

одноковій мірі стосується і значень коефіцієнтів динамічної в'язкості ґрунтів – μ , Па сек чи значення модуля пружності $E_{кр}$, МПа.

При аналізі даних лабораторних досліджень, одночасно із значеннями показника R_d , для кожного зразка розраховувались значення величини переміщення наконечника за один удар; середня швидкість його руху ($V_{ср}$, м/сек); сила опору F , Н; безрозмірний коефіцієнт опору (C_x); число Рейнольдса (R) та коефіцієнтів динамічної в'язкості (μ , Па сек).

На основі аналізу отриманих лабораторних даних для легкого пілуватого суглинку, характеристики якого наводяться на рисунках до цієї роботи, при $S_r \geq 0,95$ отримали такі залежності:

$$R_d = 0,4 \exp(-3,67 I_L), \text{ МПа} \quad (8)$$

$$\mu = 15,0 \exp(-2,5 I_L), \text{ кПа сек} \quad (9)$$

$$E_{пр} = 70,0 \exp(-3,9 I_L), \text{ МПа} \quad (10)$$

Ці залежності, до отримання більш точно визначених на основі наступних лабораторних досліджень, можуть бути використані при попередніх оціночних розрахунках і для інших зв'язних ґрунтів.

На рис. 3 показано (по усереднених даних) характер функціональної залежності (8). Подібний характер мають і залежності (9) і (10). Для практичного визначення показників μ і F достатньо за даними показника R_d , отриманими в процесі польових випробувань штучно створених ґрунтових масивів, оцінити показник текучості I_L для кожного з виокремлених шарів, і підставивши їх у залежності (9) і (10) розрахувати значення показників μ , Па сек та E , МПа які в свою чергу вже можуть бути безпосередньо використані у розрахунках стійкості, міцності і деформативності певних елементів штучних ґрунтових масивів.

Визначені подібним чином показники текучості можуть бути уточнені шляхом перерахунку за результатами визначення вологості зразків відібраних із відповідних шарів та значень густини частинок ґрунтів (ρ_s), що не вимагає використання ні ріжучих кілець, ні інших засобів відбору монолітів ґрунтів.

На рис. 4 надається графічна інтерпретація інтервалу значень показників текучості ($-0,5 \leq I_L \leq 0,5$) досліджуваного для визначення коефіцієнта в'язкості μ . Цей (інтервал) тут розглядається як дотична лінія до гіперболічної

залежності $\rho_d = f(\omega)$ у точці, що відповідає вологості ґрунту на межі розкочування ω_p .

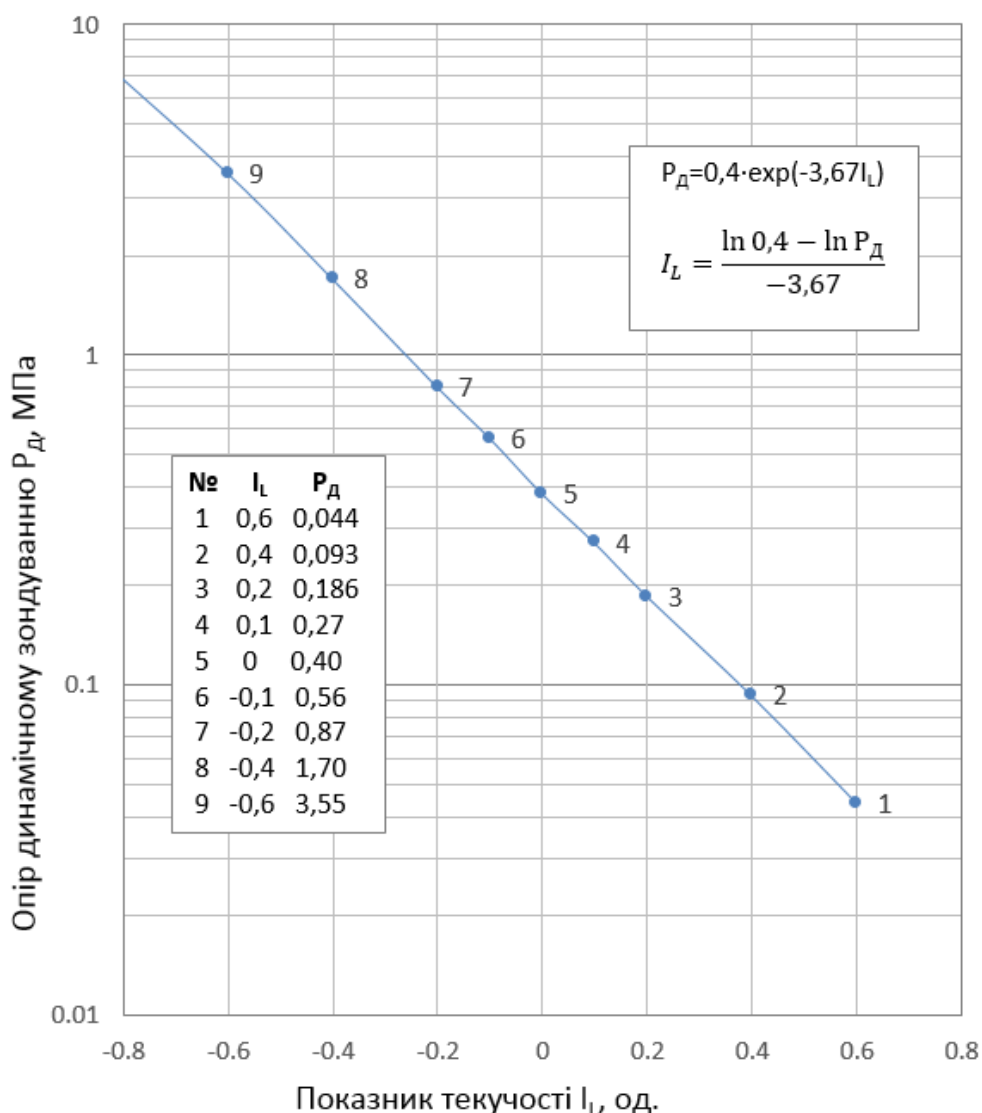


Рисунок 3 – Залежність показника P_d , розрахованого через імпульс тіла, від показника текучості $P_d = f(I_L)$

Тут же (рис.4) схематично показано і типову криву стандартного ущільнення ґрунтів оскільки зазвичай величина так званої максимальної густини сухого ґрунту ($\rho_{d \max}$) практично відповідає густині сухого ґрунту на межі розкочування ($\rho_{d \text{ор}}$). На цьому ж малюнку також показані значення концентрації ґрунтових паст і розчинів (суспензій) – С%, які свідчать, що коли концентрації цих суспензій наближається до нуля (С=0%) то, згідно отриманої залежності (9) мають показник текучості $\mu = 1 \cdot 10^{-3}$ Па сек так само як і вода (1 МПа сек).

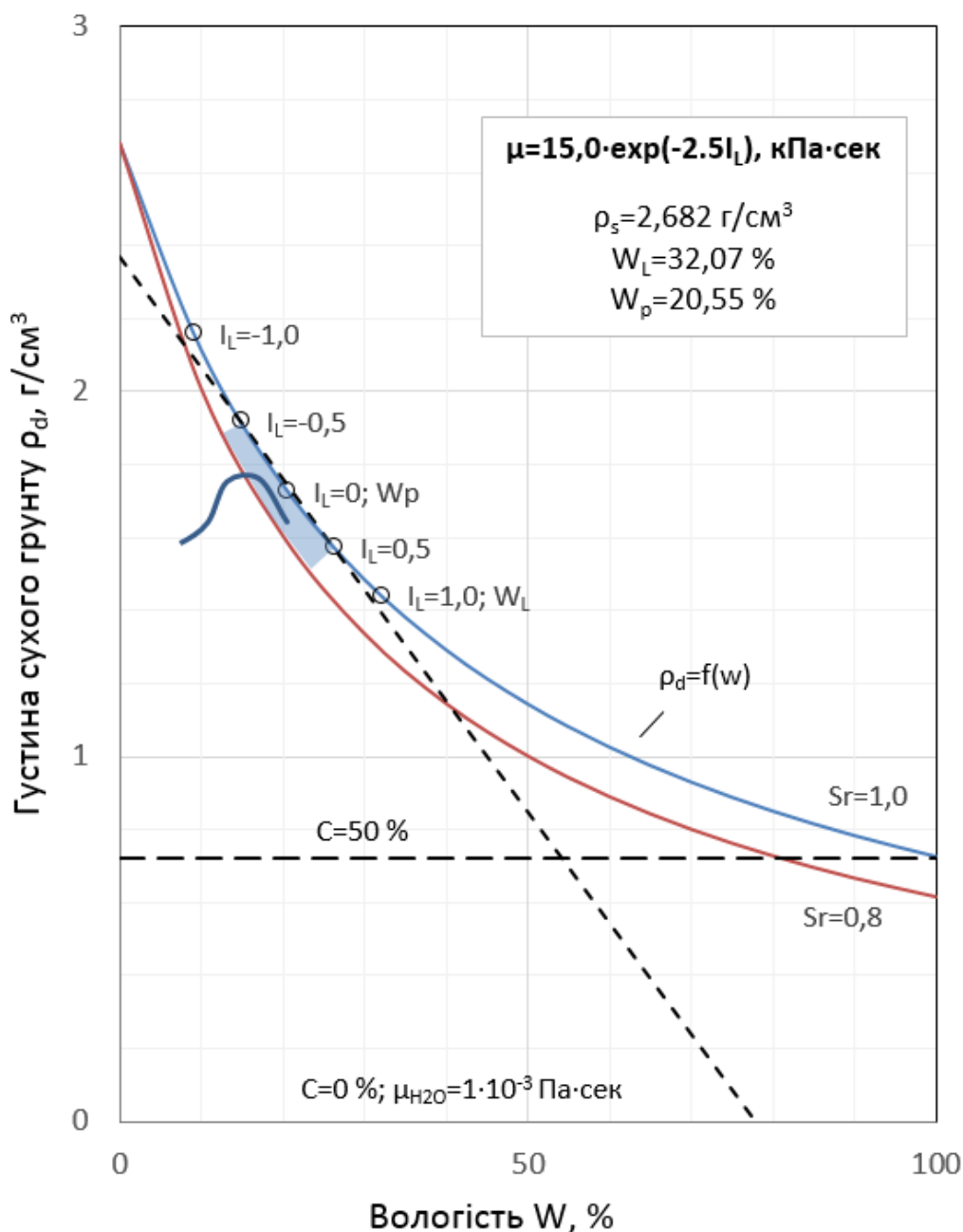


Рисунок 4 – Інтервал станів зв’язних ґрунтів що досліджувався при визначенні показників μ , Па·сек та $E_{пр}$, МПа

Цікавим також є порівняння залежності значень показника penetрації ґрунтів конусом – R , МПа ($\alpha=30^\circ$) при визначенні меж пластичності ($\omega_p - \omega_l$) за В.Ф. Розареновим [12, с.118], та залежності побудованої для нових значень показника R_d , МПа розрахованих через імпульс тіла, яке показано на рис.5. Відсутність повного збігу між ними можна пояснити хіба що тільки різною величиною кута та при вершині конуса $\alpha=60^\circ$ при зондуванні. Виходячи з цього можна запропонувати перейти від чинної penetрації конусом $\alpha=30^\circ$, яка використовується лише в деяких країнах колишнього СРСР (Радянського Союзу), до penetрації конусом $\alpha=60^\circ$, оскільки відлік глибини занурення конуса

у ґрунт при різних станах (пластичностях) ґрунтів в будь якому випадку слід визначати не на око – по рисочці, а по циферблатній шкалі пенетрометра.

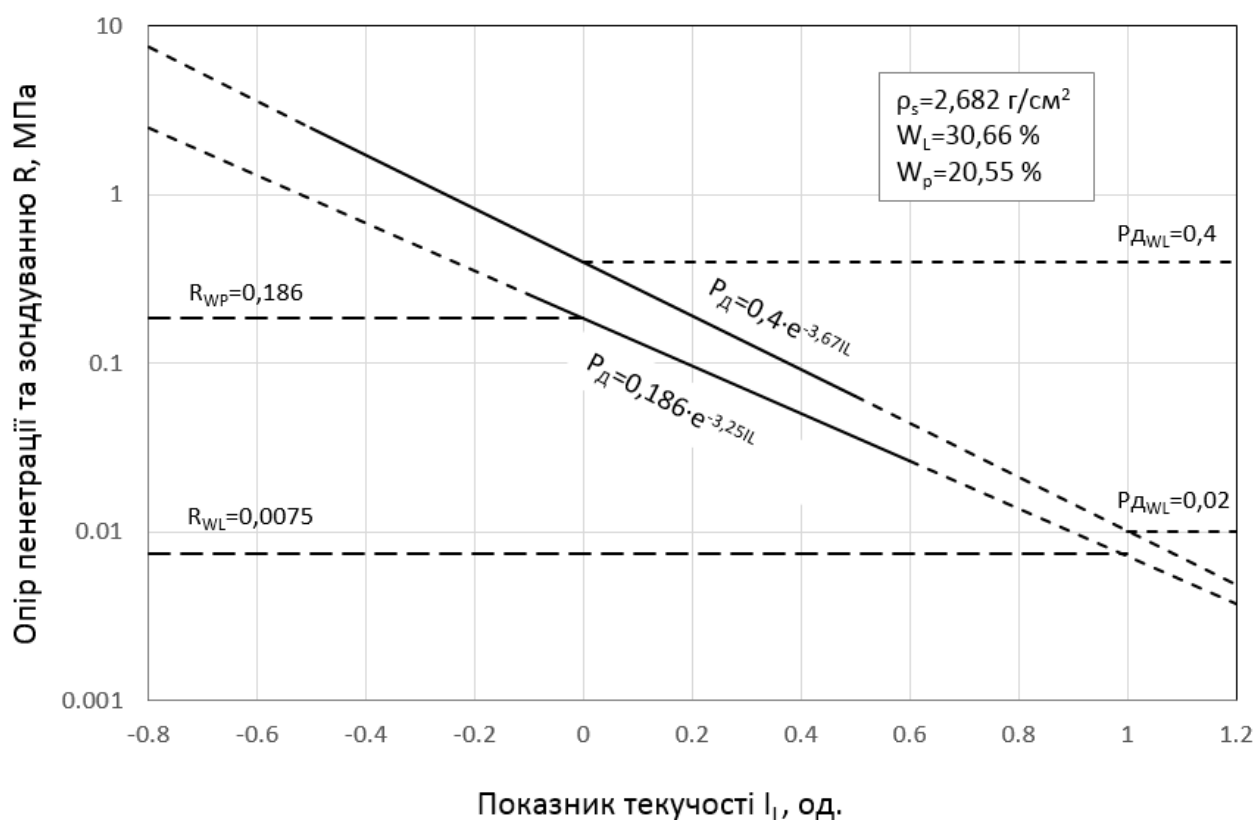


Рисунок 5 – Порівняння даних пенетрації R та динамічного зондування P_d , значення яких розраховано через імпульс тіла

На рис. 6 дано загальне порівняння швидкостей протікання різних процесів і явищ: від випробування на руйнування зразків при стиску на пресі ($v = 0,3$ см/хв), до продуктивної швидкості вітру ($v = 5-25$ м/сек). З цього порівняння видно в чому полягає головний недолік чинного методу статичного зондування зв'язних ґрунтів – зазвичай дуже маленька швидкість подачі зусилля при невеликій густині ґрунту, що не дозволяє правильно оцінювати реальний опір ґрунтів зондуванню в польових умовах. В той же час швидкість руху наконечника динамічного зонда як в лабораторних, так і в польових умовах майже на два порядки більше, і в цілому збігається із швидкістю руху води в звичайних побутових водо несучих мережах. До того ж у всіх модифікаціях зондів, які нами використовувались, є можливість скидати молот з різної висоти, що особливо важливо для польової модифікації зонда [4]. Таким чином, існує можливість регулювати величину імпульсу сили на величину занурення конуса

шляхом зміни кількості ударів молота (зазвичай від трьох до п'ятнадцяти ударів). При цьому добре видно наскільки ефективно кожен удар використовується при зондуванні і наскільки повно відповідає фізичному стану ґрунту, який досліджується.

Проведені дослідження також дозволили порівняти процес динамічного зондування конусом зв'язних ґрунтів різного стану з процесами обтікання тіл іншої конфігурації потоками різної в'язкості і густини. На рис.7 наведені результати як колишніх наших досліджень, з метою моделювання процесу статичного і динамічного зондування, так і теперішні. Характерно, що всі вони досить добре лягають на одну лінію залежності коефіцієнта опору C_x від числа Рейнольдса, а саме:

$$C_x = 4,116 \cdot R^{-0.83}. \quad (11)$$

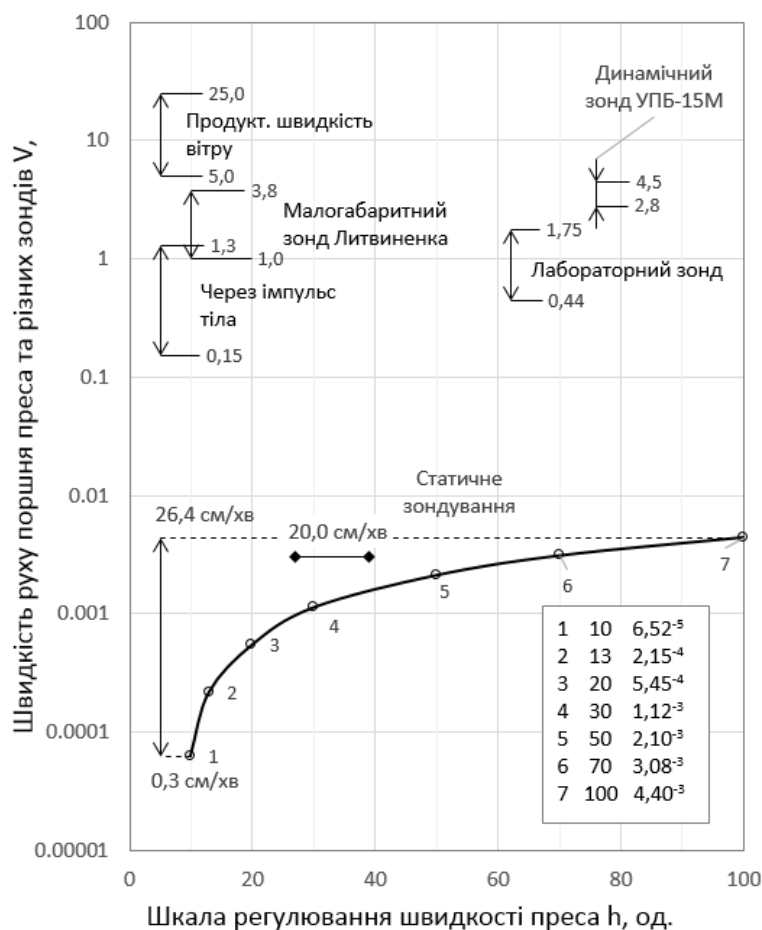


Рисунок 6 – Порівняння швидкостей випробувань різних будівельних матеріалів і ґрунтів

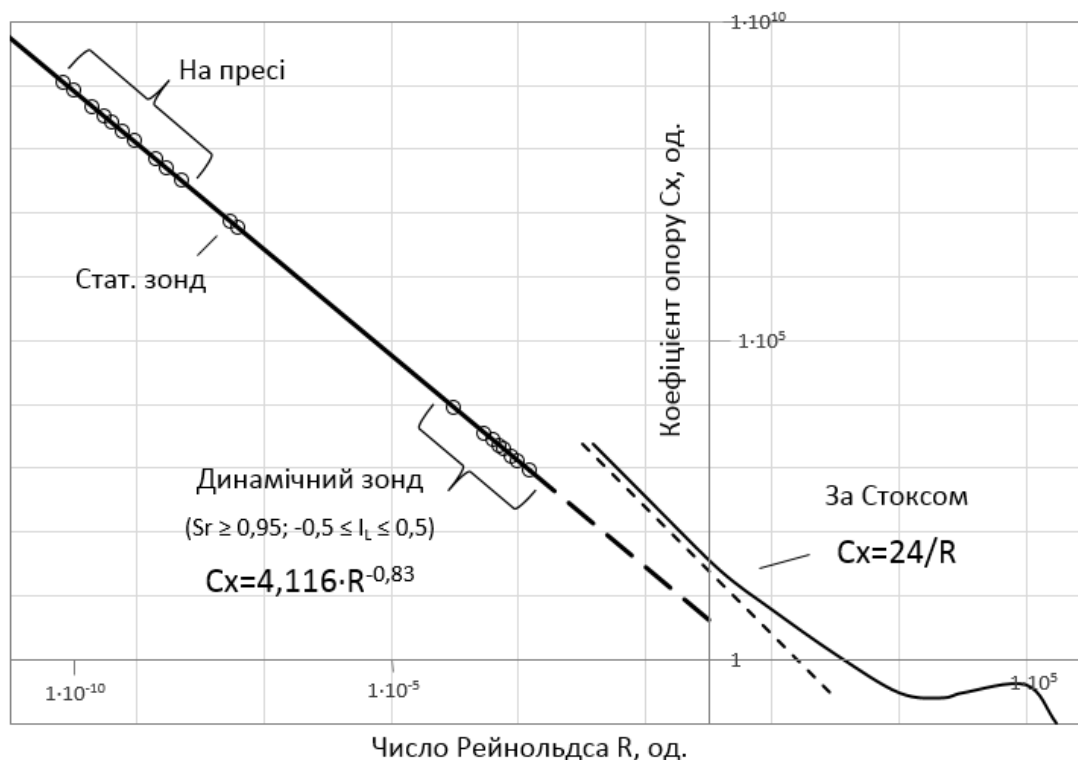


Рисунок 7 – Порівняння даних статичного і динамічного зондування із даними традиційних гідравлічних випробувань

Висновки

1. Як показали проведені лабораторні дослідження, при відповідному доопрацюванні, методи динамічного і статичного зондування можуть використовуватись як методи прямого визначення коефіцієнта динамічної в'язкості зв'язних ґрунтів в інтервалі показника текучості ($-0,5 \leq I_L \leq 0,5$) при $S_r \geq 0,90-0,95$.

2. Лабораторні дослідження також показали, що при згаданих вище умовах коефіцієнт динамічної в'язкості ґрунтів може змінюватись в інтервалі $1 \cdot 10^2 - 1 \cdot 10^6$ Па сек.

3. При станах ґрунтів, з якими найбільш часто зустрічаються виробничники і проєктанти, лабораторні визначення коефіцієнта динамічної в'язкості по точності не поступаються традиційним випробуванням ґрунтів як на одноплосинний зріз, так при стабілометричних випробуваннях.

4. Проведені розрахунки стійкості укосів штучних споруд, як не порушених, так і уражених зсувами показали, що значення коефіцієнта динамічної в'язкості μ можуть цілком замінити не тільки значення показників зчеплення (C) зв'язних ґрунтів, але і відповідають традиційним значенням тангенсів кута внутрішнього тертя (ϕ) для піщаних ґрунтів.

Література

1. Маслов Н.Н. Механика грунтов в практике строительства (оползни и борьба с ними): учебное пособие для вузов/Н. Н. Маслов. – М.: Стойиздат, 1977. – 320 с.
2. Маслов Н.Н., Караулов З.М. Реологические явления и их значения в развитии оползневых процессов. Тезисы докладов междуведомственного совещания по инженерной геологии. Издательство МГУ, 1968.
3. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов. Издательство «Высшая школа», – М.:1978. – 448 с.
4. Литвиненко А.С. «Удосконалення методики обробки даних, отриманих методами динамічного і статичного зондування ґрунтів». Міжвідомчий науково-технічний збірник «Будівельні конструкції» НДІБК, Вип. 63, Київ – 2005. – с. 154-162.
5. Яблонський В.С. Краткий курс технической гидромеханики. Изд. физ-мат. литературы . – М., 1961. – 356 с.
6. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента. Перевод с английского. Издательство «Мир» – М., 1972 – 382 с.
7. ГОСТ 19912-74 Грунты. Метод полевого испытания динамическим зондированием. Госстандарт – М.:1975.
8. ГОСТ 19912-81 Грунты. Метод полевого испытания динамическим зондированием. Госстандарт – М.:1982.
9. ГОСТ 19912-2001 (ДСТУ БВ.2.1-9-2001) Межгосударственный стандарт. Грунты. Методы полевых испытаний статическим и динамическим зондированием. Киев, 2002.
10. Трофименков Ю.Г., Воробков Л.Н. Полевые методы исследования строительных свойств грунтов. – М.: Стойиздат, 1981. – 215 с.
11. Рубинштейн А.Я. , Кулачкин Б.И. Динамическое зондирование грунтов. Издательство «Надра» – М.:1984. – 98 с.
12. Разорёнов В.Ф. Пенетрационные испытания грунтов (теория и практика применения) – М.: Стойиздат, 1980 – 247 с.

Рецензенти:

Кузло М.Т., д-р техн. наук, Національний університет водного господарства та природокористування.

Каськів В.І., канд. техн. наук, Національний транспортний університет.

Reviewers:

Kuzlo M.T., Dr. Tech. Sci., National University of Water and Environmental Engineering.

Kaskiv V.I., Cand. Eng. Sci. (Ph.D.), National Transport University.

Стаття надійшла до редакції: **20.02.2017 р.**