

## ОСНОВИ ТА ФУНДАМЕНТИ

УДК 624.131

**СТЕНДОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ СУФОЗІЙНИХ ЯВИЩ У ЗВ'ЯЗНИХ ГРУНТАХ**

**СТЕНДОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СУФФОЗИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ В СВЯЗНЫХ ГРУНТАХ**

**TESTBED RESEARCH OF UNDERWASHING IN COHESIVE SOILS**

**Беда С.В., к.т.н., доцент, Великодний Ю.Й., к.т.н., професор, Пашенко О.Ю., аспірант, Ягольник А.М., к.т.н., доцент** (Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка)

**Беда С.В., к.т.н., доцент, Великодний Ю.И., к.т.н., профессор, Пашенко А.Ю., аспирант, Ягольник А.Н., к.т.н., доцент** (Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка)

**S.V. Bida, PhD in Technical Sciences, associated professor; Y.I. Velikodny, PhD in Technical Sciences, professor; A.Y. Paschenko, post-graduate student; A.M. Yagolnik, PhD in Technical Sciences, associated professor; (Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University)**

**Проведено аналіз можливості виникнення суфозії у зв'язних грунтах порушеної структури під дією потоку ґрунтових вод. Встановлено залежність значення критичного напірного градієнта від характеристик зв'язного ґрунту.**

**Проведен анализ возможности возникновения суффозии в связных грунтах нарушенной структуры под воздействием потока грунтовых вод. Установлена зависимость значения критического напорного градиента от характеристик связного грунта.**

**The possibility of suffusion appearance in cohesive soils with deformation structure affected by water-table streams has been analyzed in the article. There has also been determined the dependence of crucial pressure gradient on cohesive soil's characteristics.**

### **Ключові слова**

**Підземний хід, зв'язний ґрунт, суфозія, напірний градієнт  
Подземный ход, связный ґрунт, суффозия, напорный градиент  
Underpass, cohesive soil, suffusion, water-table gradient.**

**Вступ.** Відомі дослідження суфозійних явищ відносяться в основному до піщаних ґрунтів і дуже рідко стосуються глинистих. У той же час такі процеси дуже часто виникають у глинистих ґрунтах, що викликає деформування та руйнування будівель і споруд.

Численні дослідження показали, що там де знаходяться підземні виробки з часом виникають провалля, прослідковуються значні деформації як денної поверхні так і конструкцій будівель і споруд, а іноді і їх руйнування. Підземні виробки часто пов'язані із стародавніми поселеннями для яких характерні покинуті частково або повністю засипані погребі, галереї, підземні ходи, тощо. У наш час більшість підземних виробок заповнені насипними не ущільненими ґрунтами. У разі руху води по таким виробкам виникають суфозійні процеси, які зменшують щільність ґрунтів, знижують їх механічні властивості, викликають додаткові осідання основ фундаментів, деформації існуючих будівель. Усе це спонукає до ретельного вивчення суфозійних процесів у глинистих ґрунтах.

Відомо, що суфозія у ґрунтах виникає при досягненні критичного напірного градієнту відповідної величини і пов'язана із щільністю та пластичністю зв'язних ґрунтів у яких відсутні або зруйновані структурні зв'язки (насипні ґрунти, деградовані леси тощо). Тому постає питання вивчення залежності критичного напірного градієнта від показників фізичних властивостей.

**Аналіз раніше проведених досліджень.** Рух води по порах ґрунтів при повному заповненні пор водою має назву фільтрація. Вона характеризується постійним коефіцієнтом фільтрації при відповідних напірних градієнтах. Якщо збільшувати напірний градієнт, то при досягненні ним певної величини починається процес суфозії, який може викликати пливунні процеси. Суфозійні явища можуть відбуватися тільки в породах певного складу і структури при наявності в породах пустот, по яких може текти вода, і при відповідній швидкості руху води. Незважаючи на порівняну зрозумілість умов виникнення і розвитку суфозійних явищ, це питання мало вивчене і присвячено в основному піскам. Так С.В. Ізбаш і Л.І. Козловою була запропонована формула для визначення швидкості руху води, при якій починається суфозія. А.Е. Замарін запропонував формулу для визначення критичного гідравлічного градієнта ( $I_{кр}$ ), при перевищенні якого відбувається виважування піску. В.С. Істоміна розробила графічний метод визначення критичних швидкостей і градієнтів природних неоднорідних пісків. За допомогою цього графіка можна визначити області можливого розвитку суфозійних процесів залежно від напірного градієнта і від ступеня неоднорідності породи, яка виражається величиною коефіцієнта неоднорідності при фільтрації, спрямованої знизу вгору [1]. Існують методичні вказівки щодо визначення руйнуючого напірного градієнту глинистих ґрунтів у лабораторних умовах на незначних за розмірами зразках [2].

**Виклад основного матеріалу.** З метою вивчення процесів руйнування пухких ґрунтів у засипаних підземних ходах і пустотах та зниження механічних властивостей цих ґрунтів був сконструйований стендовий прилад. Його було запроєктовано і виготовлено згідно з вимогами нормативних документів для вивчення фільтраційних властивостей та суфозійних явищ у ґрунтах. Прилад складався з пластикової труби діаметром 110 мм і довжиною 1 м, яка заповнювалася ґрунтом відповідної щільності. Подача води в трубу відбувалася з постійним градієнтом, який можна було змінювати для різних серій випробувань. У процесі дослідження визначався час, за який фіксований об'єм води фільтрувався через ґрунти та фіксувалася наявність винесених частинок. Умови проведення дослідів намагались зробити максимально наближеними до реальних умов, у яких відбувається рух води по підземних ходах.

**Метою** досліджень було визначення впливу щільності ґрунтів на їх фільтраційні властивості при різних напірних градієнтах води з урахуванням фактору часу. Для цього були проведені дослідження з ґрунтами, що мали різну щільність та піддавались дії потоку води з різними напірними градієнтами. Залежність зміни коефіцієнта фільтрації  $k_f$  з часом  $t$  для лесового суглинку з числом пластичності  $I_p=11,0$  і коефіцієнтом пористості  $e=1,4$  при різних напірних градієнтах  $I$  наведено на рис. 1.

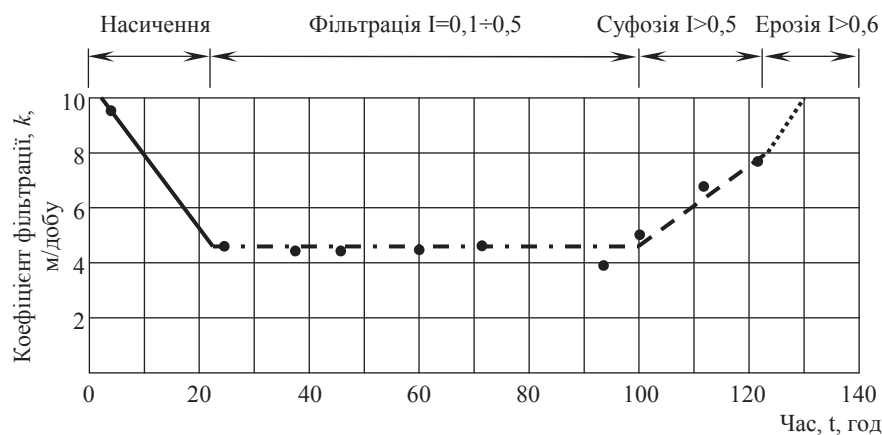


Рис. 1. Графік залежності коефіцієнта фільтрації  $k$  від напірного градієнту  $I$  у часі

З графіка видно, що з початку при напірному градієнті  $I=0,1$  відбувається насичення ґрунту водою, про що свідчить відсутність витoku води з приладу. Потім наступала фаза фільтрації, тобто об'єм води, що фільтрувалась, а отже і коефіцієнт фільтрації були практично постійними. Незмінним коефіцієнт фільтрації залишався аж до набуття напірним градієнтом значення  $I=0,5$ . Вода яка виливалася з фільтраційної труби була без домішок і не вмичувала у

собі частинок ґрунту. Після досягнення напірним градієнтом значення  $I=0,5$  спостерігається збільшення коефіцієнта фільтрації з часом, тобто починається процес суфозії. Вода, яка вилівалася з вихідного отвору приладу, змінила колір за рахунок наявності у ній частинок ґрунту. З часом коефіцієнт фільтрації різко збільшився, наступила фаза ерозії. Такий висновок підтвердився зміною кольору води і розрізом ґрунту, виконаний після досліду (рис. 2).

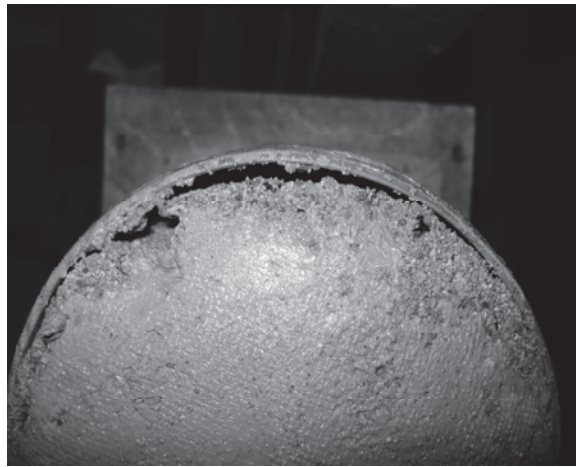


Рис. 2. Переріз ґрунту у пластиковій трубі, після закінчення досліду

Усього вивчалися процеси суфозії на трьох видах глинистих ґрунтів з числами пластичності  $I_p=0,04$ ,  $I_p=0,11$  та  $I_p=0,16$  при різних показниках коефіцієнту пористості. Результати дослідів зведені у таблицю 1.

Таблиця 1

Результати стендових досліджень

Критичний напірний градієнт $I_{p_{кр}}$	Число пластичності					
	$I_p=0,16$		$I_p=0,11$		$I_p=0,04$	
	Коефіцієнт пористості, $e$					
	До суфозії	Після суфозії	До суфозії	Після суфозії	До суфозії	Після суфозії
0,5	1,4	1,55	1,20	1,35	1,10	1,45
0,6	1,31	1,42	1,14	1,27	1,00	1,25
0,8	1,20	1,30	1,00	1,18	0,83	1,10
1,0	1,10	1,22	0,90	1,12		

Характер зміни коефіцієнта пористості у процесі суфозії показано на рис. 3. Порівнюючи результати випробувань ґрунтів із різними числами пластичності можна відмітити, що менш повільно суфозійні процеси протікали при випробуванні ґрунту з  $I_p=0,16$ . Більш інтенсивно суфозійні процеси проходили у суглинку ( $I_p= 0,11$ ) а найбільш інтенсивно у супісках ( $I_p= 0,04$ ). Про це свідчать кути нахилу до осі абсцис ліній залежності коефіцієнтів пористості до і після суфозії.

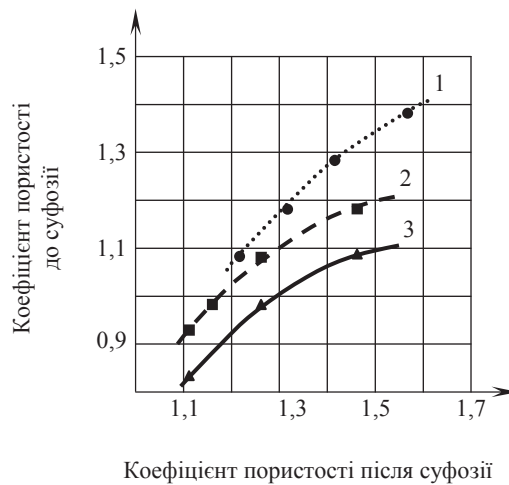


Рис. 3. Співвідношення між коефіцієнтами пористості до і після суфозії ґрунтів з числом пластичності: 1 – 0,16; 2 – 0,11; 3 – 0,04

Аналізуючи приведені у таблиці 1 результати досліджень можна відмітити взаємозв'язок між критичними напірними градієнтами, коефіцієнтами пористості і числами пластичності.

Графоаналітична та статистична обробка результатів досліджень дала можливість стверджувати, що  $I_{pнг} = f(e)$  має вигляд:

$$\lg e_i = \lg e_o - 1/r_i \times I_{pнг}. \quad (1)$$

Результати проведених досліджень показали наявність загальної точки перетину залежностей  $I_{pнг} = f(\lg e)$  для усіх трьох ґрунтів. Подальша обробка проводилася графоаналітичним методом. На першому етапі за допомогою графіка у напівлогарифмічних координатах знайдена точка перетину залежностей логарифму коефіцієнта пористості  $\lg e_i$  від критичного градієнта напору  $I_{pнг}$ . Таким чином встановлені координати точки перетину залежностей  $e_o = 2,65$  та  $I_o = - 0,67$ . Рівняння (1) приймає вигляд:

$$\lg e_i = \lg 2,65 - 1/r_i \times (I_i + 0,67). \quad (2)$$

Потім методом найменших квадратів визначалися параметри рівнянь (2) для кожного з трьох видів досліджених ґрунтів, які зведені у таблицю 2.

Таблиця 2

Значення коефіцієнтів рівняння (2) та статистичних коефіцієнтів.

№ з/п	Число пластичності $I_p$	Коефіцієнти рівняння				Статистичні коефіцієнти		
		$\lg e_o$	$1/r_i$	$\lg E_o$	$I_o$	Коефіцієнти		
						Варіації		Кореляції
						$V_{\lg e_o}$	$V_{1/r_i}$	
1	0,16	0,26	-0,23	0,423	- 0,67	0,00018	0,0291	0,98
2	0,11	0,23	-0,27	0,423	- 0,67	0,00065	0,0444	0,99
3	0,04	0,199	-0,33	0,423	- 0,67	0,029	0,047	0,98

Визначені статистичні коефіцієнти свідчать про практично функціональну залежність між розрахованими коефіцієнтами рівняння (2)

Аналізуючи результати розрахунків можна відзначити залежність коефіцієнта  $1/r_i$  від числа пластичності  $I_p$ . При збільшенні числа пластичності зменшується значення коефіцієнта  $1/r_i$ , тобто суфозійні прояви більш характерні для супісків ніж для суглинків. Залежність між цими параметрами має вигляд:

$$1/r_i = B - A I_p. \quad (3)$$

За результатами розрахунків встановлена наступна залежність між коефіцієнтом  $1/r_i$  та числом пластичності  $I_p$  при значеннях коефіцієнта кореляції  $r > 0,95$  та коефіцієнта варіації  $V = 0,05$ , що свідчить про високу імовірність розрахунків

$$1/r_i = 0,36 - 0,84 I_p. \quad (4)$$

Підставивши (4) у рівняння (2), отримуємо:

$$\lg e_i = 0,423 - (I_{p_{\text{гні}}} + 0,67) \times (0,36 - 0,84 I_p). \quad (5)$$

Рівняння (5) можливо записати у вигляді:

$$I_{p_{\text{гні}}} = \frac{0,432 - \lg e_i}{0,36 - 0,84 \cdot I_p} - 0,67 \quad (6)$$

Використовуючи залежність (6), можна визначати критичний градієнт напору за щільністю ґрунтів, які заповнюють підземні ходи м. Полтави.

Проведені дослідження дозволяють запропонувати розрахункову схему визначення критичного напірного градієнту суфозії для зв'язних ґрунтів (рис. 4).

Рівняння взаємозв'язку між критичним градієнтом напору та показниками фізичних властивостей зв'язних ґрунтів має вигляд

$$\lg e_i = \lg E_o - (I_{p_{\text{гні}}} \pm I_o) \times (B - A I_p). \quad (7)$$

Проведені дослідження дозволили зробити наступні **висновки**:

1. Сконструйовано стендовий прилад для вивчення фільтраційних та суфозійних властивостей ґрунтів, який дозволяє моделювати поведінку насипних ґрунтів у підземних ходах та виробках з урахуванням руху

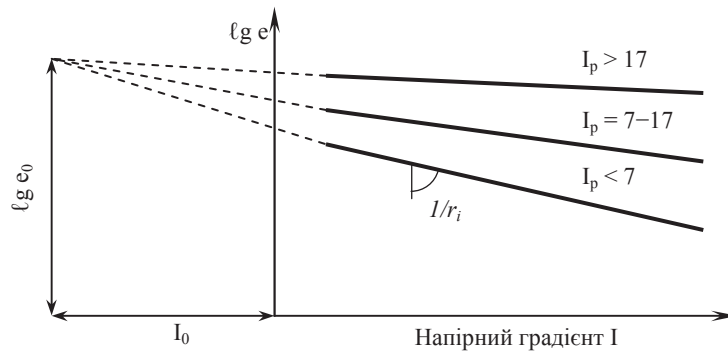


Рис. 4. Розрахункова схема для визначення зон виникнення суфозії для ґрунтів

ґрунтової води. Особливістю цього приладу є можливість вивчення властивостей ґрунтів на зразках об'ємом  $3800 \text{ см}^3$ , що значно підвищує якість випробувань.

2. На стендовому приладі проведені дослідження виникнення суфозійних явищ у глинистих ґрунтах. Випробування проводилися на ґрунтах порушеної структури різної щільності при поступовому збільшенню напірних градієнтів. Доведено, що критичний напірний градієнт, з якого починаються суфозійні явища, залежить від коефіцієнта пористості і числа пластичності ґрунту.
  3. Виконаний аналіз результатів досліджень дозволив встановити залежність критичного напірного градієнта від коефіцієнта пористості і числа пластичності, яка дозволяє за показниками фізичних властивостей ґрунтів порушеної структури визначати значення критичного напірного градієнта.
  4. Запропонована розрахункова схема взаємозв'язку між критичним напірним градієнтом, показниками фізичних властивостей і числом пластичності
1. Справочник по инженерной геологии. – 3-е изд. перераб. и доп. / Под ред. М.В. Чуринова. М., Недра, 1981. 325 с. 2. Рекомендации по методике лабораторных испытаний ґрунтов на водопроницаемость и суффозионную устойчивость. ВНИИГ. Л., 1983.