

УДК: 556.322+532.546+624.131.6

В. Саприкін, студ., Д. Бугай, канд. фіз.-мат. наук,
О. Скальський, канд. геол.-мінералог. наук, Н. Ван Меєр, д-р філософії

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТУ ВОЛОГОПЕРЕНОСУ ПІСКІВ *IN-SITU* НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ДИНАМІКИ ВМІСТУ ВОЛОГИ В ҐРУНТОВОМУ ПРОФІЛІ ПІСЛЯ ДОЩІВ

(Рекомендовано членом редакційної колегії канд. геол.-мінералог. наук, доц. О.Є. Кошляковим)

Описана методика визначення коефіцієнту вологопереносу піщаного ґрунту *in-situ* на основі аналізу автоматизованих спостережень за вмістом вологи в ґрунтового профілі після дощів у межах експериментального полігону, розташованому в Чорнобильській зоні відчуження на ділянці поховання радіоактивних відходів на відстані 2 км від ЧАЕС у "Рудому лісі". Одержана наступна залежність коефіцієнту вологопереносу K (м/добу) від капілярного тиску ψ (см. водн. стовп.): $K(\psi) = 5,7 \exp(-0,13 \psi)$. Перевагою методу є те, що коефіцієнт вологопереносу визначається в умовах непорушеного ґрунтового профілю в діапазоні значень капілярного тиску, що є характерним для природного режиму зони аерації.

The methodology for estimation of unsaturated hydraulic conductivity of sandy soils is described, which is based on analysis of automated observations of the moisture content of soil profile after rains at the experimental site, situated in Chernobyl exclusion zone within the "Red Forest" radioactive waste dump area at 2 km distance from the ChNPP. The following dependence is obtained for unsaturated hydraulic conductivity K (m/day) from soil suction pressure ψ (cm of wat. column): $K(\psi) = 5,7 \exp(-0,13 \psi)$. The advantage of the method is that unsaturated hydraulic conductivity is determined in conditions of undisturbed soil profile in the range of suction pressure values, which is characteristic for the natural regime of unsaturated zone.

Вступ. Визначення гідрофізичних параметрів піщаних ґрунтів є складною методичною проблемою внаслідок різко нелінійного характеру функціональних залежностей між вмістом вологи в ґрунтах і капілярним (всмоктуючим) тиском вологи [2, 3]. Недоліки лабораторних методів визначення гідрофізичних параметрів (таких як експерименти на пресі Ричардса, колонкові експерименти і ін. [1, 3]) пов'язані з тим, що лабораторні дослідження, як правило, проводяться на зразках ґрунтів порушеної структури (що впливає на геометрію капілярного простору), а також з тим, що масштаб (просторовий, часовий) лабораторних експериментів не відповідає польовим умовам.

Нижче представлено методику і результати оцінки коефіцієнту вологопереносу піщаного ґрунту *in-situ* на основі аналізу автоматизованих спостережень за режимом зони аерації. Використано данні автоматизованих спостережень за вмістом вологи в ґрунті і тиском порової вологи, одержані в 2000-2005 рр. на експериментальному полігоні, розташованому в Чорнобильській зоні відчуження на ділянці поховання радіоактивних відходів на відстані 2 км від ЧАЕС у так званому "Рудому лісі" [6]. Спостереження виконувались в зоні аерації потужністю 2,5 – 3 м, складеній еоловими мілкозернистими кварцевими пісками. Періодичність замірів параметрів ненасиченого ґрунтового профілю складала від 4 до 24 годин.

Для інтерпретації даних використано метод "миттєвого профілювання балансу вологи" в ґрунтового профілі (instantaneous profile method) [5]. Раніше цей метод використовувався в контрольованих лабораторних і польових експериментах [1, 3]. В нашому випадку використані дані режимних спостережень за динамікою вмісту вологи в ґрунтового профілі після значних злив в весняний і осінній період. При цьому оцінювався розмір потенційної евапотранспірації, щоб уникнути похибок розрахунку водного балансу ґрунтового профілю, пов'язаних із витратами вологи на випаровування з поверхні ґрунту.

Експериментальний набір даних. В статті аналізуються данні автоматизованих спостережень за режимом піщаних ґрунтів зони аерації, одержані в 2000-2005 рр. на експериментальному полігоні в Чорнобильській зоні відчуження, де в відповідний період виконувались комплексні моніторингові спостереження за гідрогеологічними, метеорологічними, радіаційними умовами і міграцією радіонуклідів в геологічному середовищі [6].

Зона аерації на полігоні складається із відносно однорідних мілкозернистих кварцевих пісків еолового генезису. Дані про гранулометричний склад пісків представлені в табл. 1.

Таблиця 1. Гранулометричний склад (у масових відсотках) еолових пісків на експериментальному полігоні (станція "Шурф", глибина відбору зразка 1,5 м)

Розмір фракції, мм	2,5-1,6	1,6-1,0	1,0-0,65	0,65-0,4	0,4-0,315	0,315-0,2	0,2-0,16	0,16-0,1	0,1-0,065	0,065-0,05	<0,05
%	0,03	0,09	1,02	4,16	14,07	49,58	17,42	8,98	4,55	0,03	0,06

Для моніторингу руху вологи в зоні аерації на полігоні в період 2000 – 2005 рр застосовувався шурф глибиною 1,8 м (станція моніторингу "Шурф"), обладнаний на різних глибинах наступними електронними датчиками: тензіометрами моделі SWT6 (виробн. UMS, Німеччина) для вимірювання капілярного тиску порової вологи, датчиками вмісту вологи в ґрунті Theta Probe ML2x, і електронним регістратором даних Datalogger DL2e (ви-

робн. Delta-T Devices Ltd., Великобританія). Принцип дії датчиків ML2x базується на вимірюванні діелектричної константи ґрунту, що в свою чергу залежить від вмісту вологи. За умов калібрування точність вимірювань ML2x складає $\approx 1\%$ об'ємного вмісту вологи в ґрунті. Схема шурфу показана на рис. 1.

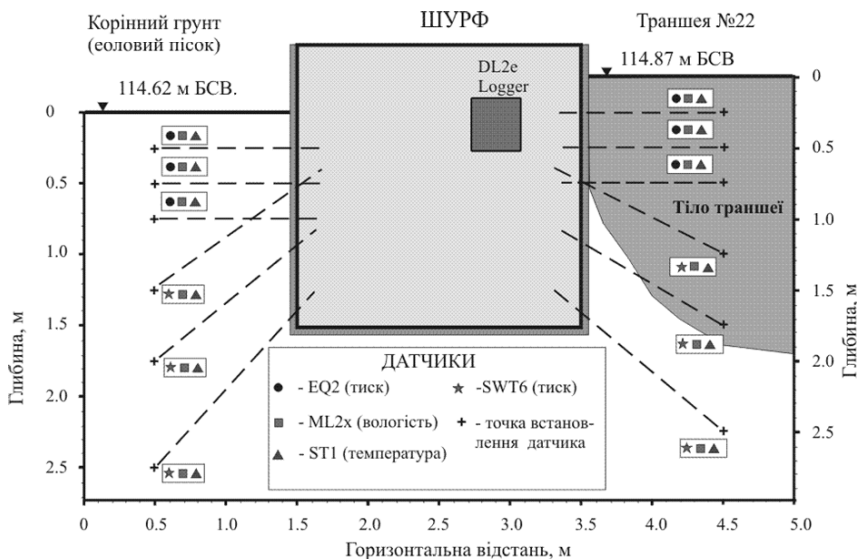


Рис. 1. Схема шурфу для моніторингу зони аерації (вертикальний розріз ґрунту) [6]

На експериментальній ділянці також виконувалися регулярні метеорологічні спостереження із використанням автоматичної метеостанції, що реєструвала температуру і вологість повітря, кількість сонячної радіації, кількість опадів і швидкість вітру. Більш детально геологічна будова, гідрогеологічні умови і інструментальне обладнання полігону описані в [6].

Вміст вологи і капілярний тиск в ґрунтах вимірювалися станцією "Шурф" на глибинах 0,25 м, 0,5 м, 0,75 м, 1,25 м, 1,75 м і 2,5 м із періодичність від 4 год. до 1 доби. Шурф було споруджено таким чином, що одна його стінка прорізала тіло поховання радіоактивних відходів (траншеї), а друга стінка забезпечувала доступ до профілю не порушеного корінного ґрунту (еолових пісків) за межами траншеї (див. рис.1). Нами для подальшого аналізу використані дані спостережень за режимом зони аерації в профілі, складеному еоловими пісками. Беручи до уваги однорідність еолових пісків, при аналізі даних моніторингу ми виходимо із припущення про однорічний режим руху вологи в досліджуваному ґрунтовому профілі. Зазначимо, що поверхня ґрунту поруч з шурфом не мала рослинного покриву.

Методика розрахунків коефіцієнту вологопереносу. Як вже зазначалося, для оцінки коефіцієнту вологопереносу було використано метод "миттєвого профілювання балансу вологи" в ґрунтовому профілі [5]. З цією метою були використані дані спостережень гравітаційного дренажу ("стікання") ґрунтів зони аерації після значних злив. Розрахунок балансу ґрунтової вологи було проведено в інтервалі глибин від $Z=0$ до $Z=1,5$ м. Розрахункова глибина $Z=1,5$ м була вибрана виходячи із того, що вона відповідає середині відстані між датчиками шурфу, що встановлені на глибинах 1,25 м і 1,75 м (що зручно для розрахунків за наведеними нижче в статті формулами). За даним спостережень ґрунту на глибині $Z=1,5$ м знаходились поза зоною впливу капілярної кайми дзеркала ґрунтових вод.

Для розрахунків ми звичайно використовували часовий відрізок дренування профілю, який слідував після інфільтрації фронту дощової вологи на глибину 1,75 м. В наступній фазі дренажу вологість ґрунтів монотонно знижувалась в усьому інтервалі глибин від $Z=0$ до $Z=1,75$ м.

Принцип методу "миттєвого профілювання балансу вологи" в ґрунтовому профілі полягає в розрахунку (на основі регулярних замірів вмісту вологи в ґрунтах) швидкості зменшення запасу вологи в відповідному

шарі ґрунту зони аерації. В результаті розраховуються витрати потоку вологи через нижню границю досліджуваного шару ґрунту (в нашому випадку $Z=1,5$ м). В поєднанні з даними про градієнт напору вологи (що вимірюється в ході експерименту тензіометрами) розраховується відповідні значення коефіцієнту вологопереносу (K), як функції капілярного тиску (ψ) (або вмісту вологи в ґрунтах, θ).

Розрахунки за методом передбачають послідовне визначення наступних параметрів:

1. Оцінюється запас вологи $R(Z_0, t)$ в шарі ґрунту в інтервалі глибин від $z=0$ до $Z_0=1,5$ м, в залежності від часу t (1):

$$R(Z_0, t) = \int_0^{Z_0} \theta(z, t) dz \quad (1)$$

де θ – вміст вологи в ґрунті згідно даних вимірювань датчиками ML2x.

2. Розраховується швидкість вологопереносу (v) на глибині $z = Z_0$ виходячи із динаміки втрат води відповідним шаром ґрунту (2):

$$v(Z_0, t) = \frac{dR(Z_0, t)}{dt} \quad (2)$$

3. Оцінюється градієнту гідралічного напору (i) в зоні аерації (3):

$$i(z, t) = \frac{dH(z, t)}{dz} \quad (3)$$

де $H = z - \psi$, ψ – капілярний (всмоктуючий) тиск на глибині z в момент t .

4. Нарешті, визначається коефіцієнту вологопереносу (4):

$$K(\psi(Z_0, t)) = \frac{v(Z_0, t)}{i(Z_0, t)} \quad (4)$$

i співвідноситься з даними про капілярний тиск (або вміст вологи) на глибині $z = Z_0$.

Для коректного застосування методу важливо забезпечити мінімальний вплив на баланс вологи в ґрунтовому профілі витрат вологи з поверхні ґрунту (на випаровування, евоптранспірацію). В контрольованих експериментах поверхня ґрунту з цією метою зазвичай закривається непроникною для води плівкою. В нашому випадку для розрахунків нами були обрані дощові епізоди в відносно холодні періоди року (рання весна, пізня осінь), коли випаровування з поверхні є мінімальним. Крім того,

для контролю можливих похибок водного балансу були виконані розрахунки потенційної (тобто максимальної можливої) евапотранспірації (ПЕТ) з поверхні ґрунту на основі даних метеоспостережень. Для оцінки ПЕТ було використано метод Пенмана–Монтейна (для референтної поверхні "ґрунт без рослинності") [4].

Результати розрахунків. Для розрахунків коефіцієнту вологопереносу було вибрано 6 слушних дощових епізодів в 2001-2004 рр., що перелічені в табл. 2. Для кожного дощового епізоду було оцінено кілька (3-8) значень коефіцієнту вологопереносу для відповідного діапазону значень капілярного тиску впродовж "стікання" вологи в ґрунтовому профілі.

Таблиця 2. Перелік дощових епізодів, що використані для розрахунку коефіцієнту вологопереносу на глибині 1,5 м на станції моніторингу "Шурф"

Дата дощу	Опади, мм	Розрахунковий інтервал (початок, кінець)	Щоденна евапотранспірація (діапазон та середнє значення), мм/добу	Щоденна втрата води із ґрунтового профілю через дренавання (діапазон та середнє значення), мм/добу
29/03/01	34 мм	29/03/2001 13/04/2001	2,4 – 0,5 1,7	1,4 – 0,7 1,0
01/05/01	83 мм	01/05/2001 11/05/2001	3,4 – 1,0 2,6	8,5 – 1,3 3,3
02/09/03	131 мм	11/09/2003 30/09/2003	2,0 – 0,8 1,3	1,7 – 0,7 1,1
09/10/03	108 мм	13/10/2003 21/10/2003	0,5 – 0,0 0,3	7,9 – 1,4 3,5
01/09/04	18 мм	06/09/2004 09/09/2004	0,8	5,3 – 3,5 4,3
19/10/04	72 мм	30/10/2004 13/11/2004	0,7 – 0,1 0,3	1,7 – 0,7 1,1

Приклад вхідних моніторингових даних і розрахункових параметрів із використанням описаної методики наведено на рис. 2, де проаналізовано гравітаційний дренаж ґрунтового профілю після інтенсивного дощу (108 мм опадів), що відбувся 09.10.2003 р.

Для деяких розрахункових інтервалів виявилось, що витрати на евапотранспірацію з поверхні ґрунту можуть бути значущими (особливо для пізніх етапів "стікання" ґрунтового профілю, коли запаси вологи в ґрунті зменшуються і інтенсивність дренажу затухає) (див. табл. 2). Відповідні дані не були враховані при побудові остаточних оцінок коефіцієнту вологопереносу. Одержаний в результаті набір експериментальних точок $K(\psi)$ та результати регресійного аналізу показано на рис. 3 а.

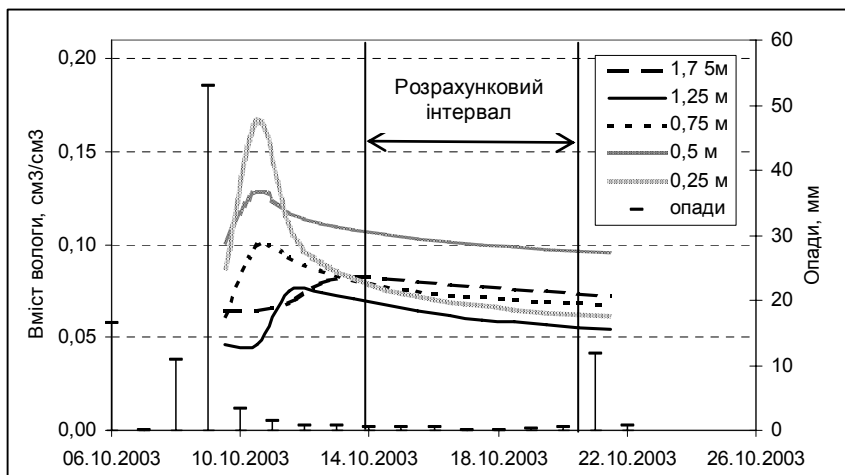
Експериментальні дані описуються наступною експоненційною функціональною залежністю (5):

$$K(\psi) = 5,7 \exp(-0,13 \psi) \quad (5)$$

Тут коефіцієнт волого переносу $K(\psi)$ вимірюється в одиницях м/добу, а капілярний тиск ψ – у см водн. стовпчику.

Для $\psi=0$ (тобто в умовах повного насичення пор ґрунту вологою) вищенаведена формула дає значення коефіцієнту фільтрації $K_{sat}=5,7$ м/добу, що узгоджується з незалежними оцінками K_{sat} для еолових пісків на полігоні [6].

Одержані результати узгоджуються з оцінками фільтраційних параметрів зони аерації, одержаними в ході виконаного раніше авторами контрольованого наливу (інфільтраційного тесту) на полігоні [2] (рис. 3 б).



а)

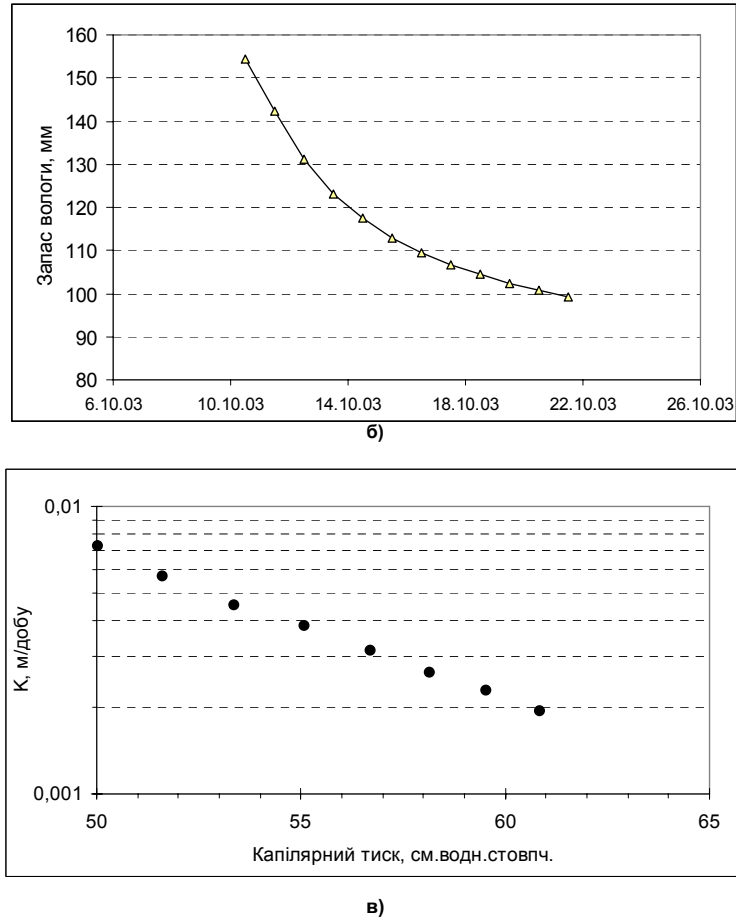


Рис. 2. Моніторингові дані і розрахункові параметри згідно методу "миттєвого профілювання води в ґрунтовому профілі" для дощу, що відбувся 10.10.2003 р.:

- а) динаміка зміни вмісту води в ґрунті на різних глибинах;
- б) зміна запасу води в шарі ґрунту глибиною 1,5 м;
- в) результуючий графік залежності коефіцієнту вологопереносу від капілярного тиску

Висновки. Наведені результати засвідчують, що метод "миттєвого профілювання балансу води" в ґрунтовому профілі може бути ефективно використаний для оцінки коефіцієнту вологопереносу ґрунтів на основі аналізу автоматизованих спостережень за режимом зони аерації. Одержані нами оцінки $K(\psi)$ для різних дощових епізодів добре узгоджуються між собою і утворюють експоненційний тренд, що відповідає теоретич-

ним уявленням (модель Гарднера [1, 3]) про рух води в ненасиченому пористому середовищі.

Перевагою запропонованого методу є те, що коефіцієнт вологопереносу визначається *in-situ* в умовах не порушеного ґрунтового профілю в діапазоні значень тиску води (або вмісту води в ґрунті), що є характерним для природного режиму зони аерації.

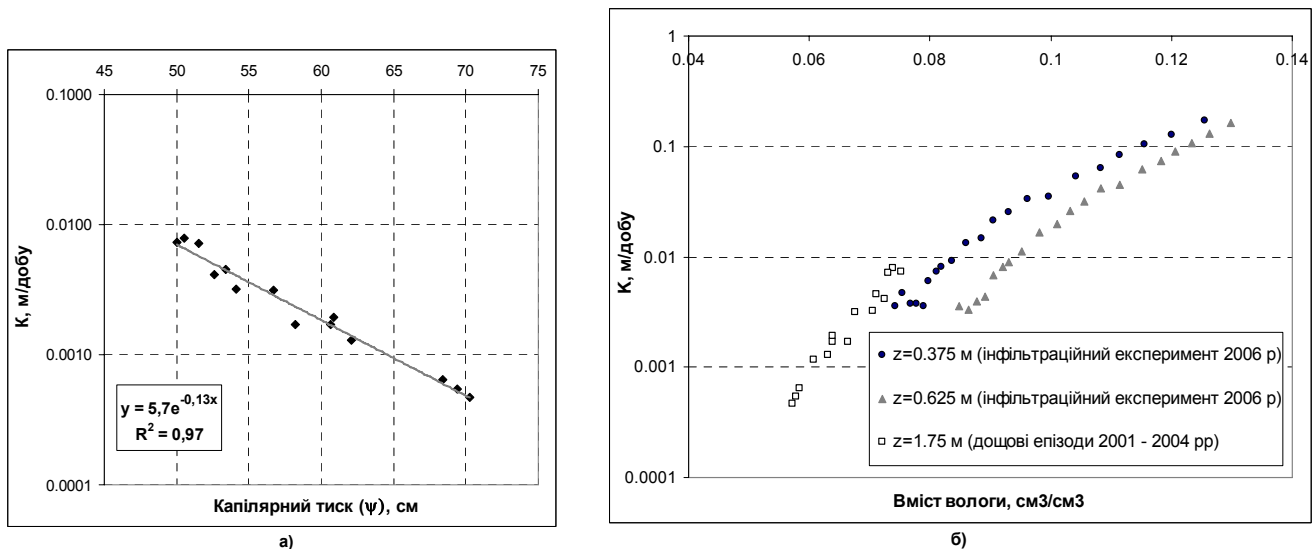


Рис. 3. Результати розрахунків коефіцієнту вологопереносу на основі аналізу спостережень за дренажем ґрунтового профілю після дощів: а) експериментальні точки і результуючий експоненційний тренд для $K(\psi)$; б) порівняння значень $K(\theta)$ розрахованих у цій статті з даними інфільтраційного тесту на полігоні в листопаді 2006 р. [2]

Визначені гідрофізичні параметри зони аерації призначені для подальшої оцінки режиму інфільтраційного живлення водоносного горизонту, а також для гідрогеологічного моделювання вологопереносу і міграції радіонуклідів в ґрунтах зони аерації в Чорнобильській зоні відчуження.

Представлені в цій статті результати досліджень одержані в рамках міжнародного українсько-французького проекту "Експериментальна платформа в Чорнобилі", що фінансується Інститутом ядерної безпеки і радіаційного захисту (IPCH, Фонтене-о-Розез, Франція).

УДК 624.131

Ю. Савченко, асп.

АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ЧИННИКІВ ВПЛИВУ НА МІЦНІСНІ ВЛАСТИВОСТІ ЛЕСОВИХ ҐРУНТІВ (НА ПРИКЛАДІ М. КИЄВА)

(Рекомендовано членом редакційної колегії канд. геол.-мінералог. наук, доц. О.Є. Кошляковим)

Розглядаються основні природні та техногенні чинники впливу на міцнісні властивості лесових відкладів. Проаналізована ділянка забудови та наведені основні рекомендації щодо зменшення негативної дії факторів впливу.

The paper considers main natural and technogenic factors of influence on the strength properties of loess rocks. Analyzed territory of the building and provided recommendations to reduce the negative impact of these factors.

Вступ. В умовах стрімкого зростання техногенного навантаження на геологічне середовище в межах міст та міських агломерацій відбуваються різноманітні зміни гідрогеологічного стану ґрунтів та основ споруд. Підвищення вологості лесових ґрунтів приводить до зменшення їх міцнісних властивостей, модуля стиснення і, як наслідок, до додаткових осідань фундаментів.

При замочуванні ґрунту, який має просадочні властивості (лесу), під фундаментом споруди знижується модуль деформації зволоженого ґрунту. Величина та характер розвитку просідань ґрунту від навантаження фундаменту залежить в основному від ступеню підвищення вологості ґрунту і розмірів зволоженої зони. Нерівномірність осідань фундаменту викликається зміною просадочних властивостей ґрунтів, і, головним чином, різними глибинами зволоження і ступінню підвищення вологості в межах зволоженої зони [1].

Постановка проблеми. Відомо, що на сьогоднішній день спостерігається стрімке зростання урбанізованості території міста Києва за рахунок його безсистемної забудови. Особливо страждає центральна історична частина міста, яка збудована на лесових ґрунтах. Лесові породи набувають просадочних властивостей за рахунок зволоження від втрат із комунікацій, водонесучих мереж (ці втрати за різними даними складають до 50 %), а також інших техногенних факторів. Саме тому вивчення всіх джерел впливів на стійкість будівель і споруд є однією з актуальних задач у сучасному будівництві.

Метою даної статті є аналіз основних чинників впливу на деформаційні властивості основ споруд і будинків, які зведені на лесових ґрунтах, а також опис механізму і динаміки просадочних процесів в межах ділянки забудови.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема дослідження впливу різних факторів на міцнісні властивості лесових ґрунтів почала розглядатись ще 170 років тому, проте і на сьогодні не втратила своєї актуальності. Багатьма дослідниками розробляються різноманітні методики щодо мінімізування техногенного впливу на оточуюче природне середовище. Одним з останніх досліджень є дисертаційна робота Д. Келкай "Зміна фізико-механічних властивостей лесових просідаючих ґрунтів в зоні промислової забудови (на прикладі черкаського ВАТ "Азот")" та робота О.В. Гранько

1. Bear J. Hydraulics of groundwater. 1979. 2. Estimation of hydraulic properties of unsaturated sandy soils using laboratory and field methods. Bugai D. A., Dzhepo S. P., Skalskyi A. S., et al. // Геологічний журн. 2008. №4. С. 99-105. 3. Fredlund D.G., Rahardjo H. Soil mechanics for unsaturated soils, 2000. 4. Monteith, J. L. Evaporation and temperature // Q.J. Royal Meteor. Soc. 1981, Vol. 107. P.1-27. 5. Watson K. K. An instantaneous profile method for determining the hydraulic conductivity of unsaturated porous materials// Water Resour. Res. 1966. – Vol. 2. – P. 709-715. 6. Дослідження міграції радіонуклідів на експериментальній ділянці-полігоні в ПТЛРВ "Рудий ліс". Ч. 2: Міграція радіонуклідів в геологічному середовищі; Бугай Д.О., Девієр Л., Скальський О.С. та ін. // Чорнобил. наук. вісн. — 2007. — №2 (30). — С. 16-33.

Надійшла до редколегії 02.12.09

[7]. У роботах цих авторів наводиться аналіз конкретних факторів, які впливають на міцність лесових порід, а також стійкість будинків і споруд. Також ряд поставлених проблем можна знайти у публікаціях наступних авторів: В.І. Крутов [1], Р. Ламперті, В.Б. Швец [8], В. Сухін, Ю.М. Абелєв, З.Г. Зубко, В. Глущенко, В.Л. Седін, Н.І. Крігер. Проте всі згадані вище автори аналізують певні окремі чинники і наводять практичні рекомендації щодо конкретних об'єктів. Саме тому необхідно визначити вплив не окремих факторів, а цілого комплексу цих факторів.

Поширення лесових ґрунтів на території міста. Територія м. Києва та його околиць на 36 % складена переважно лесовими відкладами четвертинної системи.

Відклади четвертинної системи суцільним покривом залягають на корінних породах неогенової системи. На схилах Дніпра і в ярах часто можна спостерігати відслонення неогенових відкладів. За характером відкладів четвертинної системи проф. А.М. Дранніков на території міста виділив наступні райони: лесовий, зандровий (безлесовий), перехідний (від лесового до зандрового), терасовий [3]. Далі наведемо коротку характеристику лесового району.

Лесовий район є областю суцільного розповсюдження типового еолового лесу, який являє собою тонкий макропористий вапняковий суглинок палевожовтого кольору.

Лес зустрічається повсюдно в межах плато та схилів, на будь-яких висотах, плащеподібно покриваючи всі нерівності рельєфу.

У межах дослідної території зустрічаються такі різновиди лесу: лес плато, лес присхиловий, лес делювіальний та лес перехідної зони. Окрім умов залягання, ці утворення відрізняються лише потужністю і частково структурою.

Найкраще відслонення лесу простежуються вздовж схилу високого правого берегу річки Дніпро та у бортах ярів.

Лесові відклади займають центральний район та усю південно-східну та південну частину міста Києва. Північна межа лесового району проходить вздовж правого берегу річки Дніпро до Сінного ринку, потім перетинає вул.Воровського по Обсерваторній вздовж Чехівського провулку та обриву вул. Ворошилова по Театральній, перетинає Володимирську, відокремлюючи вер-