

В.Г. Кравець, д.т.н., проф.

Н.В. Зуєвська, д.т.н., доц.

Національний технічний університет України "КПІ"

## ПОШИРЕННЯ ФРОНТУ ЗМОЧУВАННЯ ПРОСАДНИХ МАСИВІВ В ОСНОВАХ СПОРУД В РЕЗУЛЬТАТІ АВАРІЙНИХ ВИТОКІВ ВОДИ ПІДВИЩЕНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ

*В результаті аварійних витоків води з підвищеною температурою, за рахунок збільшення коефіцієнта вологопровідності, збільшується глибина замочування, вода проникає в глибинні шари ґрунту, які знаходяться поза зоною ущільнення від власної ваги та ваги споруди, і відповідно знаходяться в недоущільненому стані та зберігають свою просадність.*

**Постановка проблеми.** Значна частина території України представлена лесовими просадними ґрунтами. Здатність цих ґрунтів до раптового просідання під дією зволоження в поєднанні з зовнішнім навантаженням потребує суттєвих попереджувальних заходів та відповідних матеріальних та енергетичних витрат для підготовки лесових масивів до експлуатації. Ступінь складності даних заходів, їх технічна озброєність та рівень витрат матеріалів і коштів на одиницю оброблюваної площі зростають зі зростанням ступеня просадності ґрунту та відповідальності споруд, що зводяться на таких ґрунтах.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Дослідження динаміки процесу просідання передусім вимагає вивчення закономірностей фільтрації вологи при неповній водонасиченості ґрунту. Теорія побудована на припущенні неповної насиченості ґрунту вологою, де приймається коефіцієнт водопроникності як функція насичення ґрунту [1].

Вплив вологості на просідання лесового ґрунту після замочування розглядається як механізм взаємодії процесів інфільтрації і осідання. Міцність лесових ґрунтів обумовлена двома видами зчеплення. Перший вид обумовлюється дією сил молекулярного притягання між частками ґрунту і залежить від складу і щільності породи. У зв'язку з малою природною щільністю лесових порід первинне зчеплення відіграє незначну роль в їх стійкості та лише уповільнює процес осідання. Зчеплення другого виду – зчеплення зміцнення, обумовлене цементуючою дією плівок вуглекислого вапна, гіпсу та інших солей, що оточують частинку ґрунту. Зчеплення зміцнення відіграє вирішальну роль у стійкості лесових ґрунтів і змінюється зі зміною тиску, вологості, температури та інших зовнішніх факторів [2]. До недавнього часу в будівництві процес замочування лесових ґрунтів розглядався без урахування температури води. Однак практика міського будівництва та експлуатації підземних мереж в умовах інтенсифікації міської забудови та одночасного старіння підземних комунікацій в останні роки внесла суттєві корективи у вибір системи протипросадних заходів у зв'язку з проявом нового – гідротермального фактора впливу, який навіть в умовно непросадних лесових масивах провокує небезпечні деформаційні процеси [3].

**Метою роботи** є вивчення впливу гідротермального чинника на міцність мінеральних скелетних зв'язків у лесових ґрунтах, специфічних за складом, що збагатить методику прогнозування несучої здатності ґрунтових основ, дозволить розробити нові технологічні рішення з укріплення ґрунтових основ у геотехнічній галузях будівельного виробництва.

**Викладення основного матеріалу.** Основні джерела тепловиділення, що сприяють розвиткові деформаційного процесу можна умовно поділити на 2 типи: замочування просадного ґрунту витокami води з підвищеною температурою та нагрівання ґрунтових вод через процес теплопередачі від тепловиділяючих об'єктів з подальшим впливом нагрітої ґрунтової води на лесовий масив [4, 5].

Основними джерелами теплових впливів на ґрунти є підземні теплові комунікації (теплотраси). Вплив теплотрас виражається не лише у прогріванні ґрунту внаслідок теплопередачі, але й у втратах (витоках) гарячої води, що призводить до формування техногенних полів вологості навколо них та підтоплення ґрунтів водою з високою температурою. Основним джерелом теплового впливу на ґрунти є магістральні теплотраси (діаметр труб 500–1000 мм і більше). Реальні ж теплові втрати можуть значно перевершувати нормативні, що обумовлюється головним чином якістю теплоізоляції й терміном служби теплотраси.

Коефіцієнт фільтрації, а отже і коефіцієнт вологопровідності, залежать від зміни динамічної в'язкості води. Зі збільшенням температури води її динамічна в'язкість зменшується, відповідно коефіцієнт вологопровідності збільшується.

Дослідження впливу температури води для замочування на коефіцієнт вологопровідності лесових ґрунтів проводилися на зразках лесового просадного ґрунту II типу. На рисунку 1 наведено залежність середнього значення коефіцієнта вологопровідності ґрунту від температури замочування. Відповідно, можна отримати показник зміни вологопровідності залежно від температури води для замочування  $\theta_T$  в межах 20...80 °С, який визначається за формулою:

$$Q_T = \frac{k_w^{T_{cp}}}{k_w^{20^{\circ}C_{cp}}} \cdot$$

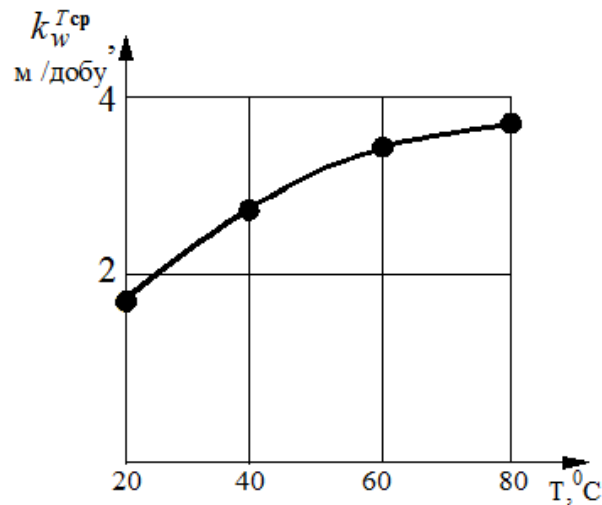


Рис. 1. Середнє значення коефіцієнта вологопровідності ґрунту залежно від температури замочування

Як видно з графіку, температура суттєво впливає на вологопровідність просадного ґрунту, при цьому залежність  $k_w^{T_{cp}}$  виположується практично при  $T = 80^{\circ}C$ , досягаючи значення близько 3,77 м/добу, що більше ніж втричі перевищує величину  $k_w^{T_{cp}}$  для нормальних умов,  $k_w^T = k_w^{20^{\circ}C} \cdot \theta_T = k_w^{20^{\circ}C} \cdot (-0,000001667T^3 + 0,000037T^2 + 0,0254T + 0,49)$ .

Таблиця 1

Розвиток глибини замочування в масиві лесового ґрунту

Температура води замочування, °C	Вертикальна координата фронту замочування / коефіцієнт впливу температури води $\beta_T$					
	тривалість замочування t, діб					
	1	2	5	9	14	22
T = 20	2,02/1,0	3,14/1,0	5,86/1,0	8,99/1,0	12,57/1,0	17,93/1,0
T = 40	2,73/1,35	4,24/1,35	7,92/1,34	12,13/1,35	16,97/1,35	24,21/1,35
T = 60	3,13/1,55	4,78/1,54	9,09/1,55	13,93/1,55	19,48/1,55	27,79/1,55
T = 80	3,53/1,75	5,49/1,75	10,26/1,75	15,73/1,75	22,0/1,75	31,38/1,75

Збільшення коефіцієнта вологопровідності призводить також до розширення фронту змочування і проникнення води в ті шари ґрунту, які не були ущільнені. Найбільш важливим у цьому випадку є вплив температури води при інфільтрації на збільшення глибини замочування. Результати експериментальних дослідів наведені в таблиці 1, де в знаменнику наведено відношення значення координати фронту замочування при підвищеній температурі води до значення координати фронту замочування при холодній воді, або коефіцієнт впливу температури води, який визначається за формулою:  $\beta_T = \frac{y_0^T}{y_0^{20^{\circ}C}}$ .

Згідно з таблицею 1, вертикальна координата фронту замочування поглиблюється як з часом, так і зі зростанням температури води для замочування.

Коефіцієнт впливу температури води  $\beta_T$  не залежить від часу замочування і зростає в 1,75 раза лише зі збільшенням температури від 20 до 80 °C. У результаті вираз для глибини замочування залежно від температури води має вигляд:

$$y_o^T = y_o^{20^{\circ}C} \cdot \beta_T = y_o^{20^{\circ}C} (0,000003125T^3 - 0,000563T^2 + 0,0425T + 0,35).$$

**Вплив температури води для замочування на просадну вологість ґрунту.** Початкова вологість просідання  $W_{пр}^T$  – це вологість, при якій просадні лесові ґрунти, що знаходяться в напруженому стані від

зовнішнього навантаження фундаментів або власної ваги ґрунту, починають проявляти просадні властивості.

За критерій початкової просадної вологості в лабораторних умовах приймається відносне просідання  $\delta_{np} = 0,01$ . Методика визначення початкової просадної вологості в лабораторних умовах ґрунтується на компресійних випробуваннях ґрунту. Лабораторні дослідження проводилися в лесовому суглинку II типу просадності. Для побутового тиску приймалося значення  $P_{поб.} = 0,05$  МПа, яке відповідає тискові від власної ваги даного ґрунту за висотою і дорівнює початковому тисковій просідання.

Результати проведених досліджень про вплив температури замочувальної води на значення початкової просадної вологості наведено на рисунку 2.

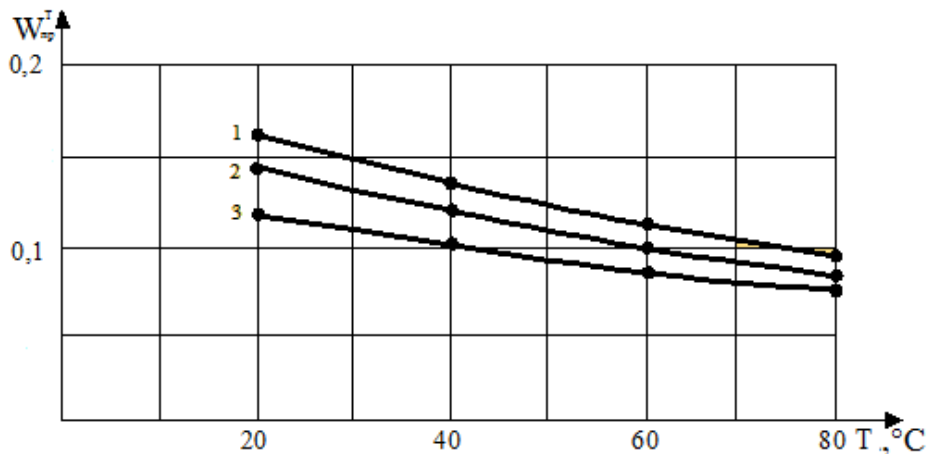


Рис. 2. Залежність початкової просадної вологості від температури води:  
1, 2, 3 – серії зразків

З аналізу наведених залежностей витікає, що зі збільшенням температури води, якою проводили замочування, величина початкової просадної вологості зменшується при постійному тискові.

Необхідно зазначити, що процес просідання лесового ґрунту під власною вагою починається з моменту, коли вологість дорівнюватиме  $W_{np}$  або максимальній молекулярній вологоємності даного ґрунту. Однак при замочуванні лесового ґрунту гарячою водою процес просідання починається значно раніше, ніж вологість набуває значення  $W_{np}$  і більш інтенсивно, ніж при замочуванні його холодною водою [6, 7].

Причина даного явища полягає в тому, що при замочуванні водою з підвищеною температурою швидше відбувається процес розчинення солей та породотворюючих мінералів у скелеті лесового ґрунту, і пластичні деформації починаються раніше, ніж тоді, коли вологість дорівнюватиме максимальній молекулярній вологоємності ґрунту.

Результати експериментальних досліджень деформацій лесового ґрунту (S) при зміні вологості з урахуванням впливу температури води для замочування, що були проведені в лесових суглинках II типу просадності на об'єктах м. Києва, представлено на рисунку 3. Для України інтервал, в якому знаходиться вологість лесового ґрунту при деформаціях просідання, складає від 11 до 26 %. При вологості приблизно 26 % процес просідання починає стабілізуватися.

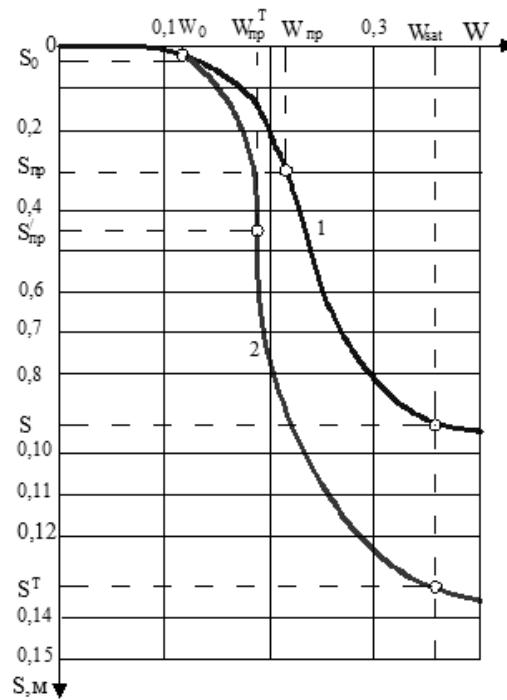


Рис. 3. Вплив вологості  $W$  на деформацію лесового ґрунту:  
1 – при  $T = 20$  °C; 2 – при  $T = 60$  °C

Як видно з рисунка 3, вся деформація в лесових ґрунтах, у тому числі деформація просідання, виникає при інфільтрації. Деформації відбуваються до настання вологості насичення  $W_{sat}$ .

Вертикальне просочування води в лесовий ґрунт (аварія в трубопроводі теплотраси) має локальну ділянку, тому завдання інфільтрації та просідання може розглядатися як одновимірне при постійному напорі  $H$ . Тоді рівняння, що характеризує глибину інфільтраційного змочування лесового ґрунту в часі, можна записати у вигляді:

$$y_0^T(t) = \sqrt{2 \frac{k_w^T}{n} (H + h_k) t},$$

де  $n$  – показник пористості,  $h_k$  – висота капілярного підняття в ґрунті, який розглядається.

Тоді для одновимірного виміру апроксимуючу функцію вологості лесового ґрунту можна записати в такому вигляді:

$$y^T(W, t) = \sum_{i=1}^n d_i \beta_T \left[ 1 - \left( \frac{W}{W_{sat} - W_0} \right)^2 \right]^i \cdot t^{i/2}.$$

де  $\beta_T$  – коефіцієнт впливу температури води при інфільтрації на вертикальну координату фронту змочування;  $d_i$  – постійний параметр, що дозволяє апроксимувати функцію розповсюдження гарячої води в ґрунті.

В результаті отримуємо:

$$y^T(W, t) = d_1 \beta_T \left[ 1 - \left( \frac{W}{W_{sat} - W_0} \right)^2 \right] t^{1/2} + d_2 \beta_T \left[ 1 - \left( \frac{W}{W_{sat} - W_0} \right)^2 \right]^2 t,$$

На рисунку 4 наведено результати розрахунків за розробленою програмою глибини змочування лесового масиву при аварії тепломережі для реального об'єкту в м. Києві.

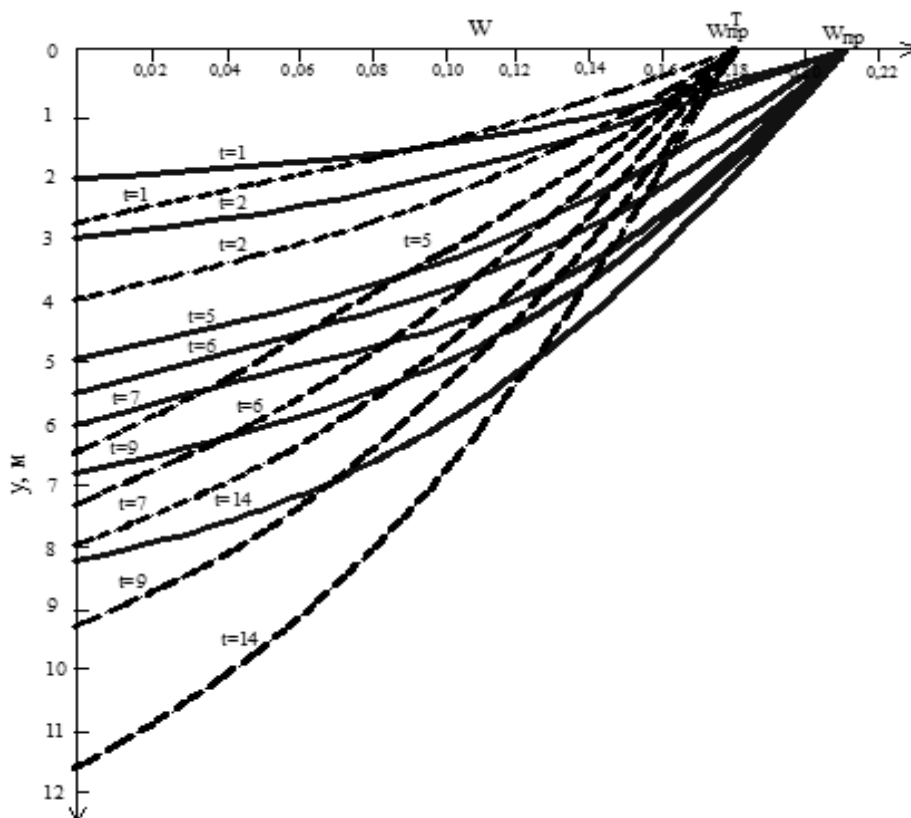


Рис. 4. Залежність вертикальної координати фронту замочування від часу  $t$  (1–14 діб) та температури води для замочування. Суцільні криві при  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , пунктирні криві при  $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$

Як видно з отриманих значень вертикальної координати фронту замочування, найбільш інтенсивним процес зволоження був у перші 5 діб. Потім інтенсивність збільшення глибини спадала. При зволоженні ґрунту в основі споруди, яка вже тривалий час простояла, холодною водою, по мірі насичення верхньої частини ґрунту він перетворюється в тістоподібну масу, частково забиваючи вертикальні пори. У випадку замочування гарячою водою більш інтенсивно розчиняються цементуючі речовини і такого забивання пор не відбувається.

За рахунок збільшення глибини замочування вода проникає в глибинні шари ґрунту поза зоною ущільнення від власної ваги та ваги споруди, які відповідно знаходяться в недоущільненому стані та зберігають свою просадність.

**Висновки.** Величина початкової просадної вологості для різних видів лесового ґрунту залежить не лише від напруженого стану ґрунту під впливом зовнішнього навантаження або власної ваги, ступеня щільності, міцності структурних зв'язків ґрунту, а й значною мірою від температури води для замочування.

Основними причинами збільшення проявів просідання лесового ґрунту при замочуванні його водою з підвищеною температурою є прискорення розчинності солей та цементуючих речовин в складі лесових ґрунтів, поглиблення замочування і проникнення води в ті шари ґрунту, які не були ущільнені.

При аналізі техногенного впливу теплового фактора на просадні лесові ґрунти необхідно враховувати коефіцієнт збільшення вологопровідності  $\theta_r$ , коефіцієнт впливу температури води  $\beta_r$  на збільшення вертикальної координати фронту замочування шляхом поєднання експериментальних результатів з математичним моделюванням інфільтраційних та деформаційних процесів у просадних масивах.

Неврахування впливу підвищеної температури ґрунтової вологи на структурні зв'язки в лесових ґрунтах будь-якого ступеня просадності призводить до значних помилок у визначенні несучої здатності масиву.

#### Список використаної літератури:

1. *Полубаринова-Кочина П.Я.* Теория движения грунтовых вод / *П.Я. Полубаринова-Кочина.* – М. : Наука, 1977. – 664 с.
2. *Мустафаев А.А.* Основы механики просадочных грунтов / *А.А. Мустафаев.* – М. : Стройиздат, 1978. – 263 с.
3. *Быкова Е.В.* Деформация лессовых просадочных грунтов при замачивании холодной и горячей водой : матер. 61-й научно-техн. конф. студентов, аспирантов и профессорско-преподавательского состава / *Е.В. Быкова, А.А. Соболев, Г.И. Шведов.* – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2003. – С. 126–127.
4. *Зуєвська Н.В.* Математичне моделювання генерації тепла від теплових споруд на масив гірської породи / *Н.В. Зуєвська* // Вісник Криворізького технічного університету / Технічні науки. – 2008. – Вип. 20. – С. 229–232.
5. *Зуєвська Н.В.* Проблеми безпеки фундаментів теплових споруд / *Н.В. Зуєвська, І.А. Куцаківський* // Проблеми охорони праці в Україні : зб. наук. пр. – 2009. – Вип. 16. – С. 92–97.
6. *Зуєвська Н.В.* Вплив води з підвищеною температурою на інфільтраційні процеси при замочуванні лесових ґрунтів / *Н.В. Зуєвська* // Вісник НТУУ “КПІ” / Гірництво. – 2011. – Вип. 20. – С. 17–20.
7. *Зуевская Н.В.* Инфильтрационные процессы при замачивании лессовых грунтов водой с повышенной температурой / *Н.В. Зуевская, В.Г. Кравец, В.В. Гридасов* // Geotechnika-Geotechnics 2010 ; XIV Międzynarodowe Sympozjum Czesc II: zagraniczna : Materiały Naukowe. – Gliwice-Ustron, 2010. – С. 115–122.

**КРАВЕЦЬ Віктор** Георгійович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри геобудівництва та гірничих технологій Інституту енергозбереження та енергоменеджменту Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут".

Наукові інтереси:

- фізичні процеси гірничого виробництва;
- механіка ґрунтів і гірських порід;
- будівництво міських і спеціальних підземних споруд;
- розроблення наукових основ енергозберігаючих технологій для вирішення прикладних задач геодинаміки вибуху.

**ЗУЄВСЬКА Наталя** Валеріївна – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри геобудівництва та гірничих технологій, заступник директора Інституту енергозбереження та енергоменеджменту Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут".

Наукові інтереси:

- дослідження в галузі геобудівництва;
- вибухове армування.

Стаття надійшла до редакції 14.03.2013