



**ДЕМЕССИЕ М.К.**

Канд. технічних наук,  
доцент кафедри промислово-  
го та цивільного будівництва  
Черкаського державного техно-  
логічного університету,  
м. Черкаси, Україна  
e-mail: demessiemk@gmail.com  
тел.: +38 (096) 220-31-43  
ORCID: 0000-0002-5015-4820

## ПРОГРЕСУЮЧІ НЕРІВНОМІРНІ ДЕФОРМАЦІЇ ГРУНТОВИХ ОСНОВ ЗА НЕЗМІННОГО НАПРУЖЕНОГО СТАНУ В ПЕРІОД ЕКСПЛУАТАЦІЇ БУДІВЕЛЬ

### АНОТАЦІЯ

У статті викладено результати вирішення науково-практичного завдання визначення причин прогресуючих нерівномірних деформацій будівлі в умовах зволоження водою ґрунтів основи.

В ході дослідження ґрунтів основи у межах фундаментів будівлі було встановлено, що відбулася непрогнозована на стадії проектування суттєва зміна в їх просідаючих характеристиках.

Описані кількісні зміни відносного просідання і початкового тиску просідання в часі. Розглянуто процес просідання лесової основи в часі та його вплив на стан несучих конструкцій будівлі.

Встановлено, що просідання ґрунтів основи в зоні під подошвою фундаментів призвело до появи деформацій у вигляді тріщин у цегляних стінах будівлі шириною розкриття  $15 \div 51$  мм.

Аналіз отриманих даних дає підстави встановити, що причиною нерівномірних деформацій є погіршення деформаційних характеристик лесових просідаючих ґрунтів основ унаслідок підтоплення витокami виробничих вод. Також результат дослідження показав, що прогресуючі деформації будівлі на даний час мінімізувалися за рахунок усунення витоків виробничих вод у ґрунти основи.

У процесі тривалої експлуатації будівель поряд

з ущільненням в основах відбуваються і більш складні явища та процеси, які призводять до зміни показників міцності і просідаючих властивостей лесових ґрунтів.

Достовірне прогнозування майбутніх можливих змін просідаючих властивостей лесових ґрунтів у процесі експлуатації на стадії проектування є досить складним.

Результати лабораторних досліджень показали, що за час експлуатації будівлі в несучому шарі відбулися наступні кількісні зміни:

- вологість ґрунту збільшилася в 2,5 рази;
- модуль деформації лесових основ зменшився в 4 рази;
- збільшенням вологості лесового ґрунту основи усереднене значення кута внутрішнього тертя зменшилося в 1,5 рази, а питоме зчеплення – в 2 рази.

Аналіз характеристик просідання лесових супісків основи в межах будівлі до будівництва та на період дослідження показує, що зменшення значень  $\varepsilon_{st}$  коливається від 50 % (при тисках до 100 кПа) до 22 % (при тиску 300 кПа).

Додаткові лабораторні дослідження зразків лесового ґрунту при зволоженні водою різної температури показали збільшення кількісного значення відносного просідання  $\varepsilon_{st}$  при підвищенні



температури води. При цьому усереднена величина відносного просідання збільшилась на 20 %. Підтверджено припущення про вплив температури води зволоження на прискорення просідання ґрунту основи.

Накопичення таких даних дає змогу отримати коригувальні коефіцієнти зміни просідаючих властивостей лесових ґрунтів за час експлуатації будівель.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** нерівномірні деформації будівель, зміни фізико-механічних властивостей, відносне просідання, лесові ґрунти, характеристики просідання, зволоження просідаючих ґрунтів, фундамент будівлі.

## **PROGRESSIVE UNEVEN DEFORMATION OF SOIL FOUNDATIONS UNDER UNCHANGED STRESS STATE DURING THE PERIOD OF EXPLOITATION OF BUILDINGS**

### **ABSTRACT**

The article presents the results of solving the scientific and practical problem of determining the causes of progressive uneven deformations of the building in conditions of soaking the foundation soils with water. The study of the foundation soils in wells and pits revealed a significant change in their characteristics.

A comparison of the physical and mechanical properties of loess subsiding soils of the industrial building foundation before construction and during its operation was carried out. Quantitative changes in relative subsidence and initial subsidence pressure over time were described. The process of subsidence of the loess foundation over time and its influence on the condition of the building's load-bearing structures were considered.

It was established that the subsidence of the base soils in the area under the sole of the foundations led to the appearance of deformations in the form of cracks in the brick walls of the building with an opening width from 15 to 51 mm.

Analysis of the obtained data allowed us to establish that the cause of uneven deformations is the deterioration of the deformation characteristics of loess subsiding soils of the foundations due to flooding by production water leaks. The study also showed that the progressive deformations of the building have currently been minimized by eliminating production water leaks into the foundation soil.

During the long-term operation of buildings, along with compaction in the foundations, more complex phenomena and processes occur, which lead to changes in the strength indicators and subsidence properties of loess subsidence soils

Full prediction of future possible changes in the subsidence properties of loess soils during operation at the design stage is quite difficult.

The results of laboratory studies showed that during

the operation of the building, the following quantitative changes occurred in the bearing layer: soil moisture increased by 2,5 times; the modulus of deformation of loess bases decreased by 4 times; with an increase in the moisture content of the loess base soil, the average value of the angle of internal friction decreased by 1.5 times, and the specific adhesion decreased by 2 times.

The analysis of the characteristics of subsidence of the base loess sandy loam within the building before construction and during the study period shows that the decrease in values ranges from 50 % (at low loads) to 22 % (at a load of 0.3 MPa).

Additional laboratory tests of loess soil samples under soaking with water of different temperatures showed an increase in the quantitative value of relative subsidence with increasing water temperature. At the same time, the average value of relative subsidence increased by 20%. This confirmed the assumption about the influence of soaking water temperature on accelerating the process of foundation soil subsidence.

The accumulation of such data will make it possible to introduce correction factors for assessing changes in the subsidence properties of loess soils during the operation of buildings.

**KEYWORDS:** uneven deformations, changes in physical and mechanical properties, relative subsidence, loess soils, subsidence characteristics, saturation of subsiding soils.

### **ВСТУП**

Деформації будівель виникають внаслідок відхилення від нормативних рекомендацій, допущених при вишукуванні, проектуванні, будівництві та експлуатації.

Надійність нормальної експлуатації будівель забезпечується спільною роботою системи «основа – фундамент – надземні конструкції». Повне або часткове порушення роботи цієї системи призводить до деформацій будівель та порушень їх надійності та довговічності. Тому при проектуванні та в процесі експлуатації потрібно враховувати усі нюанси та нормативні вимоги [9, 10, 11, 12, 27, 28].

Однією з найпоширеніших причин деформацій будівель є неприпустимі нерівномірні осадки ґрунтів основи фундаментів [1]. Переважно такі деформації виникають при замочуванні структурно нестійких лесових ґрунтів в основі фундаментів. Поширеною причиною додаткової деформації (просідання) лесових ґрунтів є локальне зволоження. При тривалій експлуатації будівель у основі фундаментів відбуваються внутрішні процеси, що призводять до зміни міцнісних та деформаційних властивостей лесових ґрунтів.

### **АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ**

Просідаючі властивості лесових ґрунтів широко вивчені, але урахування їх місцевих особли-



востей дуже важливе, оскільки, залежно від умов формування та стану, ґрунти, близькі за складом, можуть суттєво відрізнятися за своїми властивостями.

Кількість робіт, присвячених вивченню лесових ґрунтів (походження, фізико-механічні властивості, просідаючі властивості та ін.), дуже велика. Однак, праці про зміну властивостей лесових просідаючих основ за час експлуатації будівель та споруд з урахуванням місцевих особливостей порівняно нечисленні.

Великий внесок у розвиток будівництва на просідаючих ґрунтах зробили В.Б. Швець, І.П. Бойко, М.В. Корнієнко, М.А. Зоценко, Ю.А. Винников, Р.О. Тімченко, Д.А. Крішко, Т.А. Барон, Ю.І. Іщенко, Ю.Б. Мелашенко, Ю.С. Слюсаренко та ін. [16 ÷ 24].

У своїх роботах зарубіжні науковці вказують на необхідність вивчення стисливості ґрунтів, звернувши увагу на повільність перебігу осадок зв'язних ґрунтів, тим самим вказуючи на тривалість протікання осадки та її наслідки [1, 2, 13, 14, 25].

М.В. Корнієнко у своїх дослідженнях показує, що при зволоженні під навантаженням фізико-механічні властивості лесових ґрунтів значною мірою змінюються [18]. Так, наприклад, величина модуля деформації лесових ґрунтів, як і коефіцієнт стисливості, що характеризують деформаційні властивості, – зменшились.

Однією з властивостей лесових ґрунтів є різке зростання стисливості та зниження опору зрушення, кута внутрішнього тертя та питомого зчеплення при зволоженні. Нашим дослідженням також підтверджується зниження кількісного значення цих властивостей лесових ґрунтів при зволоженні.

Багато авторів (Р.О. Тімченко, А.С. Моргун, В.Г. Самченко, І.П. Бойко, В.Л. Винников, М.О. Вабіщевич, А.С. Моргунг, І.М. Меть та ін.) вважають, що ступінь просідання лесових порід знаходиться в прямій залежності від їх вологості та щільності [6, 19, 20, 21]. За даними М.В. Корнієнка, М.М. Корзаченка особливість та закономірність розвитку просадок ґрунтів від навантаження фундаментів у тому, що вони відбуваються лише в межах деформованої зони та на ділянках зволоження чи підвищення вологості ґрунтів. При цьому на кількісне значення відносного просідання  $\varepsilon_{sl,i}$  впливає тривалість і метод випробувань, кількість і величина ступенів завантаження та інші фактори, які впливають і на оцінку ґрунтів [18].

Дані В.Б. Швеця показують, що деформації лесових ґрунтів під спорудою при зволоженні тривають від кількох місяців до кількох років і можуть досягати 0,7 ÷ 1,0 м [22]. Ступінь ущільнення залежить від властивостей і потужності лесових ґрунтів, а також від розмірів споруди і величини

тиску під подошвою.

Узагальнені дані І.П. Бойка показують, що при зволоженні та збільшенні навантаження скорочуються в обсязі великі міжчасткові пори, макropори з пухкими стінками та порожнечі. Частина загальної пористості, яка зменшується під тиском при зволоженні ґрунту, називається активною пористістю, а пасивна пористість повільно деформується протягом тривалого періоду [4].

Фізично початковий тиск просідання – це мінімальне значення додаткового вертикального навантаження (тиску), яке необхідне для того, щоб у водонасиченому стані почався процес структурного руйнування ґрунту з різким зменшенням його об'єму. Це означає, що при водонасиченні міцність лесової основи значно знижується і проявляються деформації просідання. Причинами водонасичення лесової основи під фундаментом можуть бути як підйом рівня ґрунтових вод, так і систематичне та аварійне зволоження основи. Це може стати причиною деформації будівель та споруд, побудованих на лесових ґрунтах, зазначається у роботах М.В. Корнієнка, М.М. Корзаченка, В.А. Басараба, Д.Г. Гладишева, Г.М. Гладишева, В.В. Жук, Р.В. Самченка, А.І. Юхименка, М.О. Вабіщевича [3, 5, 7, 8, 15, 18, 20].

#### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

У зв'язку з різким збільшенням обсягів реконструкції та посилення існуючих будівель (збільшення корисних майданчиків, надбудови, влаштування підземних приміщень, перепланування або заміна конструктивних елементів) гостро стоїть питання оцінки будівельних властивостей ґрунтів основи. Насамперед, це стосується просідаючих властивостей лесових супісків та суглинків, які за час експлуатації будівель та споруд мають тривале додаткове завантаження. Крім того, спостереження показують, що деякі будівлі та споруди мають значні деформації та вимагають посилення вже за існуючого стану.

Особливо це питання актуальне на територіях промислових підприємств з великим водоспоживанням, де порушується природна рівновага між інфільтрацією та випаром і відбувається додаткове штучне зволоження просідаючої товщі з різних джерел.

Так, наприклад, натурні обстеження будівель та споруд, побудованих на лесових просідаючих ґрунтах на території міста Черкаси, показують, що багато з них зазнають деформації просідання у вигляді тріщин і кренів, незважаючи на те, що були застосовані протипросадочні заходи, які виявилися неефективними для даного району [15, 16].

У зв'язку з цим виникла необхідність у проведенні детальних досліджень просідаючих властивостей лесових основ та змін їх фізико-механічних властивостей за час експлуатації будівель.



## МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження було:

- виявлення змін фізико-механічних властивостей лесових просідаючих основ за час експлуатації будівель;
- виявлення впливу температури води замочування на параметри просідання лесових ґрунтів;
- надання рекомендацій щодо відновлення експлуатаційної придатності будівлі.

## МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

При розв'язанні задачі було застосовано такі методи: візуальне обстеження будівлі, спостереження за розвитком розкриття тріщин на стінах будівлі, інженерно-геологічні дослідження геологічної будови ділянки, лабораторні дослідження ґрунтів основи на зразках, відібраних у шурфах і свердловинах в межах плями будівлі.

## ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ

В природних умовах ґрунти постійно змінюються під впливом численних геологічних процесів та явищ, завдяки чому змінюються і їхні фізико-механічні властивості. Швидкість такої зміни залежить від інтенсивності проходження природних та техногенних процесів [16].

Зміна властивостей ґрунтів є результатом процесів, що протікають у них, тому дослідження та прогнозування таких змін мають проводитися з огляду на головні діючі техногенні чинники [27, 28].

Господарська діяльність людини суттєво впливає на властивості ґрунтів. Одним із таких впливів є зволоження ґрунтів. Інтенсивна забудова територій, нерегульований поверхневий стік, витоки води з різних комунікацій, порушення динаміки руху ґрунтових вод призводить до різкого обводнення ґрунтів і зміни їхніх фізико-механічних властивостей. За час експлуатації будівель в ґрунтах основ відбуваються зміни властивостей ґрунтів під дією різних факторів. Зміна властивостей може стати відчутною, якщо ґрунти основ є лесовими. Однією з характерних ознак лесових ґрунтів є низька водоміцність, яка виявляється у швидкому розмоканні та значній розмивності.

Відповідно до цього, цим дослідженням проведено обстеження промислової будівлі з неповним каркасом, яка побудована на лесових супісках на одному із майданчиків колишнього пивоварного заводу у місті Черкаси. Будівля призначена для виробництва безалкогольних напоїв. Установки цеху працюють за умов мокрого технологічного процесу. Майданчик цієї промислової будівлі знаходиться на забудованій території з плоским рельєфом в межах третьої надзаплавної тераси правого берега р. Дніпро.

## ХАРАКТЕРИСТИКА ДОСЛІДЖУВАНОЇ БУДІВЛІ

Будівля має розміри в плані 40,9×21,6 м та висоту – 18,0 м. Зовнішні стіни будівлі цегляні, товщиною 510 мм із цегли на цементному розчині марки М75. Відповідно, під стіни влаштовані стрічкові фундаменти, а під залізобетонні збірні колони – стовпчасті залізобетонні фундаменти, розміром 2,0×2,5 м у плані при глибині закладення – 3,0 м.

Перекрыття та покриття виконані зі збірних та монолітних залізобетонних плит.

Поверхні цегляних стін усередині будівлі оштукатурені цементно-піщаним розчином з подальшим фарбуванням. Товщина штукатурних шарів варіюється в межах 15...30 мм.

У приміщеннях із мокрим режимом роботи поверхні цегляних стін додатково облицьовані керамічною плиткою. У коридорах будівлі на стінах виконана декоративна мозаїчна штукатурка.

Просторова стійкість будівлі забезпечується спільною роботою зовнішніх та внутрішніх цегляних стін, та жорстких дисків перекрыть, покриття.

## МЕТОДИКА ТЕХНІЧНОГО ОБСТЕЖЕННЯ БУДІВЛІ

Обстеження будівлі проводилося у три етапи. Етап попереднього обстеження включав суцільне візуальне обстеження поверхні зовнішніх і внутрішніх стін, конструкцій перекрыть і покриттів. Складання відомості дефектів та пошкоджень основних несучих конструкцій. Вимірювання ширини розкриття тріщин у несучих стінах. Установку маяків для подальшого спостереження за динамікою розвитку розкриття тріщини.

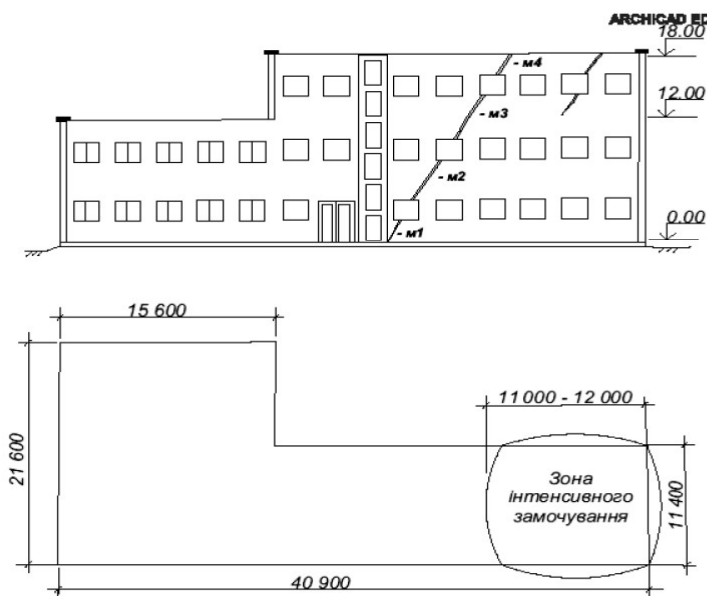
Другий етап обстеження полягав у визначенні стану основи та фундаментів. Для дослідження конструкцій фундаментів були відкриті шурфи. Також для детального вивчення поточних змін стану ґрунтів основи влаштовані свердловини по зовнішній частині будівлі.

На третьому етапі дослідження проводилися вивчення фізико-механічних та просідаючих властивостей ґрунтів основи у лабораторних умовах.

## МОРФОЛОГІЯ УТВОРЕННЯ ТРІЩИН

За період експлуатації будівлі у несучих стінах виникли значні деформації у вигляді тріщин із розкриттям зверху. Час виникнення тріщин невідомий.

Характер виявлених деформацій у стінах у вигляді похилих тріщин на всю висоту будівлі свідчить, що їх причиною є нерівномірні деформації основ фундаментів виробничого корпусу. Для спостереження за розвитком деформацій у вигляді тріщин на стінах будівлі було встановлено маяки – М1, М2, М3 та М4 (рис. 1).



**Рисунок 1** – Деформація цегляної стіни виробничої будівлі при просіданні лесової основи, де M1, M2, M3, M4 – розташування марок спостереження за розвитком тріщини

На початку дослідження проводилася фіксація розмірів розкриття тріщин на стінах будівлі. Замір показав такі розміри по маяках: M1 = 12 мм, M2 = 23 мм, M3 = 32 мм і M4 = 35 мм. Фіксація проводилася на початку 2022 року (рис. 1).

На початку 2023 року ширина розкриття тріщин у місцях розташування наглядових марок складала: 15 мм (M1), 28 мм (M2), 39 мм (M3), 45 мм (M4).

Замір розкриття тріщин на початку 2024 року показав такі результати: M1 = 16 мм, M2 = 30 мм, M3 = 42 мм і M4 = 49 мм. Додатковим контроль-

ним виміром ширини тріщини за спостережними маяками на початку 2025 року отримано: M1 = 17 мм, M2 = 32 мм, M3 = 43 мм і M4 = 51 мм.

Аналіз результатів спостереження показує, що будівля піддається прогресуючим нерівномірним деформаціям. Деформація будівлі у вигляді тріщин з кожним роком зростає (рис. 2). При цьому прогресуючі нерівномірні деформації будівлі відбуваються за незмінного напруженого стану в період експлуатації, тобто додаткового завантаження будівлі, яке не передбачено проектом, у період експлуатації не було.

У період спостереження будівля експлуатується і в ній відбувається мокрий технологічний процес з явним просочуванням в ґрунт основи

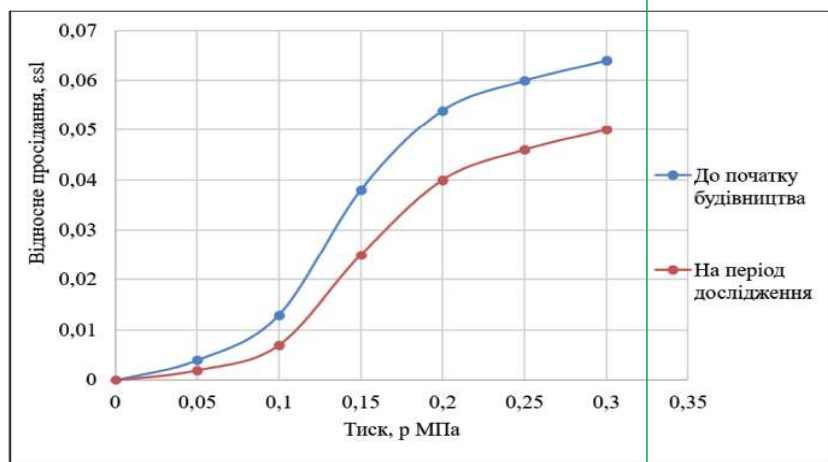
виробничих вод.

Моніторинг тріщин, який здійснювався протягом дослідницького періоду, показав, що деформація будівлі повністю не стабілізувалася, динаміка розкриття тріщин повільно прогресує залежно від інтенсивності технологічного процесу підприємства.

## ІНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГІЧНІ УМОВИ МАЙДАНЧИКА

У геологічній будові ділянки на розвідану глибину до 18,0 м беруть участь чвертинні відкладення, які представлені лесовими супісками та суглинками еолово-делювіального походження загальною потужністю 13 ÷ 15 м. Між шаром лесових супісків (верхнім шаром) та шаром лесових суглинків (нижнім шаром) залягає прошарок дрібних пісків, маловологих, середньої щільності, потужністю 2,2 ÷ 3,4 м.

З поверхні лесовий супісок перекривається насипним ґрунтом і ґрунтово-рослинним шаром. Лесовий супісок палевожовтий, макропористий, з рідкісними вклученнями, з рівнем вологості ґрунту перебували у твердому стані і були просідаючими під дією додаткових навантажень. Потужність шару – від 3,7 до 5,9 м. Саме



**Рисунок 2** – Ширина розкриття тріщин на стінах будівлі за спостережними маяками M1, M2, M3 і M4



лесовий супісок служить основою фундаментів цієї будівлі.

На період досліджень, які проведені до будівництва, рівень ґрунтових вод знаходився на глибині 8,10 м [8]. На даний час на окремих ділянках безпосередньо під фундаментами сформувалася техногенна «верховодка», обумовлена фільтрацією поверхневих вод при мокрому технологічному процесі виробництва.

У 2022 ÷ 2023 роках для детального вивчення та виявлення поточних змін стану ґрунтів основ проведено підкоп під підшви фундаменту у 4-х місцях по зовнішній частині будівлі та влаштовано свердловини (9 штук) по периметру будівлі до глибини 8,0 м для відбору зразків ґрунту (рис. 3).

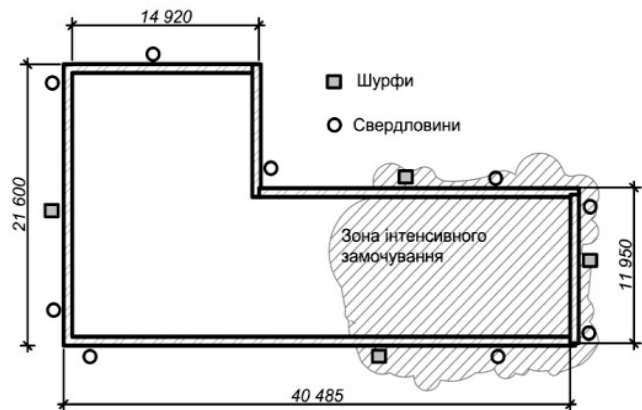


Рисунок 3 – Схема розташування шурфів та свердловин

### МЕТОДИКА ВІДБОРУ ЗРАЗКІВ ҐРУНТУ

Для відбору зразків ґрунту використувався буровий метод. Відбір непорушених зразків ґрунту для дослідження фізико-механічних властивостей проводився з використанням спеціальних бурів. Для забезпечення репрезентативності відбір здійснювався з різних шарів ґрунту на певній глибині. Після відбору зразки були упаковані у водонепроникну тару та марковані з вказанням всієї необхідної інформації для подальшого лабораторного дослідження.

Лабораторне дослідження зразків ґрунту проводилося згідно із загальноприйнятою методикою [11].

Показники міцності ґрунтів визначались шляхом випробування на приладі триосового стику з дотриманням вимог стандарту [9].

За отриманими лабораторними даними проведено порівняння фізико-механічних властивостей лесової основи (супісок) до будівництва будівлі та на період досліджень. Дані про зміну властивостей лесової основи представлені у табл. 1.

За період експлуатації будівлі в несучому шарі відбулися наступні кількісні зміни в фізико-механічних властивостях ґрунту. Вологість ґрунту ( $w$ ) збільшилася з 0,11 до 0,28 ч. од. (рис. 4).

Результат дослідження показує, що вологість ґрунту змінюється по глибині через постійне затоплення ґрунту витоками води з технологічних приладів. Верхній шар ґрунту під фундаментами має вищу вологість, яка зменшується з глибиною. Вологість ґрунту навколо фундаменту збільшилась майже на 150% в порівнянні з проектними значеннями (рис. 4). Це результат витоків промислових вод з обладнання та скидання промислових стоків, які утворилися внаслідок виробничих процесів.

Зі збільшенням вологості лесового ґрунту основи усереднене значення кута внутрішнього тертя ( $\phi$ ) зменшилося з 240 до 190 град, а питоме зчеплення ( $c$ ) – з 0,015 до 0,007 МПа.

З підвищенням вологості просідаючого ґрунту

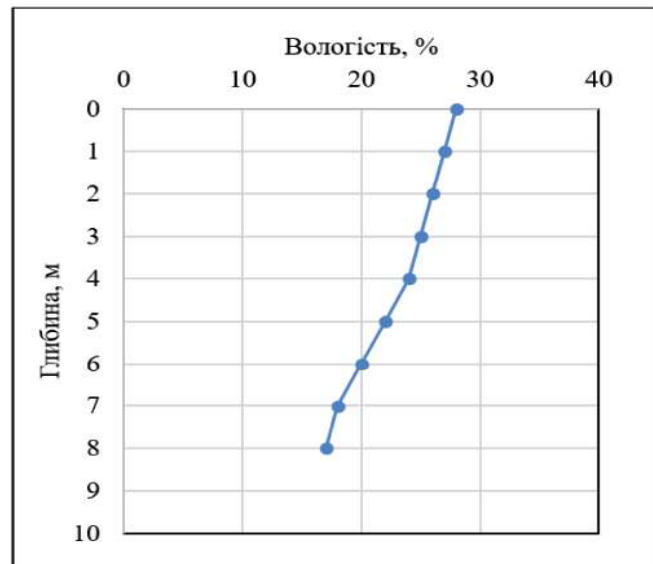


Рисунок 4 – Графік зміни вологості ґрунтів по глибині

до повного водонасичення значення зчеплення знижується в 2,14 рази, кут внутрішнього тертя – в 1,26 рази.

Збільшення вологості пояснюється постійною фільтрацією в ґрунти основи виробничих вод.

Враховуючи викладене вище, характеристики міцності просідаючих ґрунтів повинні визначатися з урахуванням можливого підвищення ступеня їх вологості в період експлуатації будівель.

За результатами лабораторних досліджень встановлено, що модуль загальної деформації лесових ґрунтів зменшився з 12,0 МПа до 3,0 МПа.

До будівництва ґрунти за рівнем вологості перебували у маловологому стані ( $S_r = 0,34$ ), а на період дослідження ці ґрунти знаходяться вже у водонасиченому стані ( $S_r = 1,0$ ).

Щільність ґрунту ( $\rho$ ) зросла з 1,6 г/см<sup>3</sup> до 1,96 г/см<sup>3</sup>. Цей результат є очікуваним, оскільки ґрунт став насиченим водою і ущільнився під дією тривало-



го навантаження від будівлі. Щільність скелета ґрунту ( $\rho_d$ ) збільшилася з 1,44 до 1,54 г/см<sup>3</sup>.

Лесові ґрунти цього району мають високу пористість  $e = 0,85$ , але під тривалою дією навантаження при зволоженні значення цього показника зменшилося і становить  $e = 0,72$ . Середні значення показників консистенції також змінилися. Так, наприклад, за показником текучості лесові просідаючі супіски знаходилися в твердому стані ( $I_L < 0$ ), а в період дослідження вони знаходяться в текучому стані ( $I_L > 1$ ).

Значення в табл. 1 свідчать про значну зміну фізико-механічних показників ґрунту у результаті обводнення основи.

### ЛАБОРАТОРНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОСІДАЮЧИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ

Визначення характеристик просідання проведено в компресійних приладах за методом «двох кривих». Випробування за цим методом проводились на зразках, вирізаних з одного моноліту,

відібраних у зоні зволоження з-під фундаменту та поза межами зволоження. Лабораторні дослідження проводились згідно зі стандартною методикою [11].

Як правило, при випробуваннях методом «однієї кривої» зразок ґрунту завантажується до деякого тиску  $p$ , потім проводиться його замочування до повного водонасичення і подальше його завантаження, але в нашому випадку ґрунт вже знаходився в водонасиченому стані, тому випробування проводились за методом «двох кривих» на зразках ґрунту.

Для зволоження зразків ґрунту використовувалась вода питної якості кімнатної температури  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ .

Лесові ґрунти ділянки проектованої будівлі залежно від можливого прояву просідання від власної ваги при зволоженні відносяться до I типу [9 ÷ 11].

Визначення характеристик просідання проведено у компресійних приладах на зразках,

**Таблиця 1** – Зміна фізико-механічних властивостей лесових супісків ділянки в межах будівлі у часі

Час дослідження, рік	Глибина, м	Вологість $w$ , ч. од.	Щільність, г/см <sup>3</sup>			Показники пластичності та консистенції ґрунту				Ступінь вологості, $S_r$ , ч. од.	Коефіцієнт пористості, $e$ , ч. од.	Опір зрушення		Модуль деформації, $E$ , МПа
			ґрунту, $\rho$	скелета, $\rho_d$	часток, $\rho_s$	$w_L$	$w_P$	$I_P$	$I_L$			Кут внутрішнього тертя, $\varphi$ , град	Питоме зчеплення, $c$ , МПа	
1980 р. (до початку будівництва)	3,2	0,11	1,6	1,44	2,66	0,24	0,19	0,05	< 0	0,34	0,85	24	0,015	12
2022 ÷ 2023 р. (на період дослідження)	3,2	0,25	1,86	1,50	2,66	0,25	0,20	0,05	1,0	0,86	0,77	21	0,008	5,5
	3,6	0,28	1,96	1,54	2,66	0,26	0,21	0,05	1,4	1,0	0,72	19	0,007	3,0



відібраних з-під фундаменту (на глибині 3,2 м) при вологості  $w = 0,25$  та у водонасиченому стані (з додатковим водонасиченням в лабораторних умовах згідно з методикою).

Значення відносного просідання наведені у табл. 2. За даними компресійних випробувань встановлено, що ці супіски можна охарактеризувати як середнього просідання при додатковому тиску.

Початковий тиск просідання становить  $\rho_{sl} = 103$  кПа. За даними досліджень до зведення будівлі значення початкового тиску становило  $\rho_{sl} = 85$  кПа [26]. За обчисленими значеннями визначалася залежність відносного просідання від тиску  $\varepsilon_{sl} = f(p)$  (рис. 5).

Аналіз характеристик просідання лесових супісків основи в межах будівлі до будівництва та на період дослідження показує, що зменшення значень  $\varepsilon_{sl}$  коливається від 50 % при малих тисках (до 100 кПа) до 22 % при тиску 300 кПа (рис. 5).

З наведених даних видно, що значення початкового тиску просідання збільшилося з 85 до 103 кПа, що складає 17,5 %.

Візуальне обстеження роботи підприємства показало, що одним із джерел місцевого зволоження та зволоження ґрунтів основи будівлі є витік води, що нагрівається в процесі охолодження обладнання, а також тепла вода, яка використовується для промивання та очищення деякого обладнання.

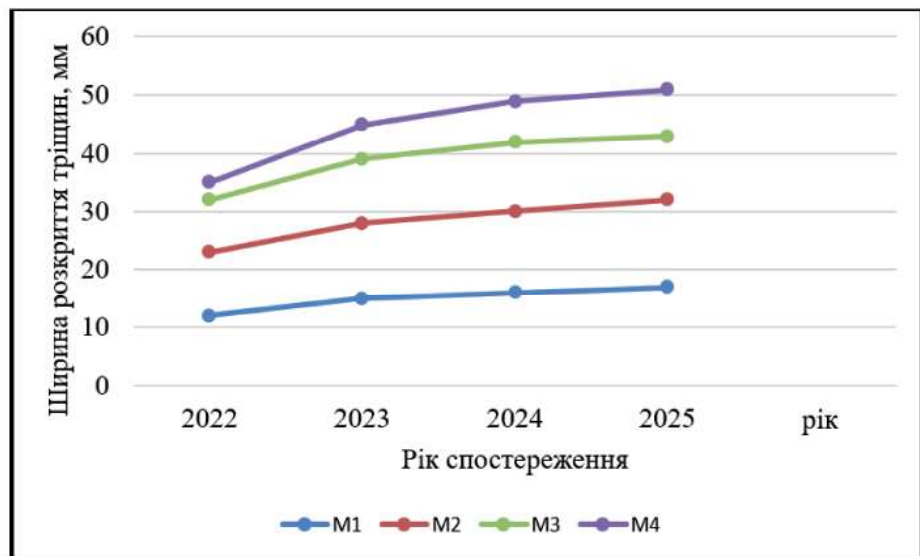
### ДОСЛІДЖЕННЯ ЛЕСОВОГО ҐРУНТУ ПРИ ЗВОЛОЖЕННІ ВОДОЮ РІЗНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ

Візуальне обстеження будівлі показало, що одним із джерел локального зволоження ґрунтів основи фундаментів став витік технологічної гарячої води з виробничого обладнання.

Для з'ясування впливу температури води, яка витікає з обладнання та просочується в ґрунти основи, на просідаючі властивості лесового супіску, нами були проведені додаткові

**Таблиця 2** – Відносне просідання лесових супісків майданчика

Час досліджень, рік	Відносне просідання $\varepsilon_{sl}$ при $p$ , кПа					Початковий тиск просідання $\rho_{sl}$ , кПа
	50	100	150	200	300	
1980 (до початку будівництва)	0,004	0,014	0,038	0,054	0,064	85
2022 ÷ 2023 (на період дослідження)	0,002	0,008	0,025	0,040	0,050	103



**Рисунок 5** – Графік залежності відносного просідання від тиску  $\varepsilon_{sl} = f(p)$  для лесового супіску до початку будівництва будівлі і на період дослідження

лабораторні випробування із зволоженням ґрунту гарячою водою різної температури.

Випробування виконувались за стандартною методикою із зволоженням лесового ґрунту під максимальним тиском для будівель, характерних для цього району в 0,3 МПа, водою з температурою  $t = 20$  °С, 40 °С, 60 °С та 90 °С. Протягом 3-х годин з моменту замочування підтримувалася задана температура води шляхом її безперервного нагрівання у чайнику. Визначення температури води проводилося термометром з точністю  $\pm 0,05$ °С фірми «Braun».

З метою визначення величини та швидкості процесу просідання показники індикаторів годинникового типу компресійних приладів знімалися через кожні 20 хвилин.

Дослідження проводилися на зразках лесового супіску, відібраних на глибині 3,2 м у незатопленій зоні фундаменту обстежуваної будівлі. Результат лабораторного випробування фізико-механічних характеристик лесового ґрунту показав схожі значення, які були отримані на стадії проектування, навіть деякі характеристики тріски покращили-



ся: щільність ґрунту  $\rho = 1,78 \text{ г/см}^3$ , щільність сухо-го ґрунту  $\rho_d = 1,45 \text{ г/см}^3$ , щільність часток ґрунту  $\rho_s = 2,66 \text{ г/см}^3$ , природна вологість  $w = 0,14$  ч. од, число пластичності ( $I_p = 0,05$ ), показник текучості ( $I_L < 0$ ); коефіцієнт пористості  $e = 0,81$ , кут внутрішнього тертя,  $\varphi = 23,5^\circ$ , питоме зчеплення,  $c = 0,013 \text{ МПа}$ , модуль загальної деформації  $E = 12,0 \text{ МПа}$ .

Основним завданням третього етапу дослідження було з'ясування впливу температури води на просідаючі властивості лесових ґрунтів. Випробування проводилися на 14-ти зразках для кожної температури води. Зразок ґрунту поміщався в сталеве кільце висотою 25 мм і діаметром 87 мм, що не допускало його деформації у бічному напрямку.

Результати компресійних випробувань зразків ґрунту зі зволоженням їх гарячою водою різної температури наведено у табл. 3.

За результатами проведеного дослідження вдалося встановити залежність між просідаючими характеристиками лесового ґрунту та температу-

рою води зволоження.

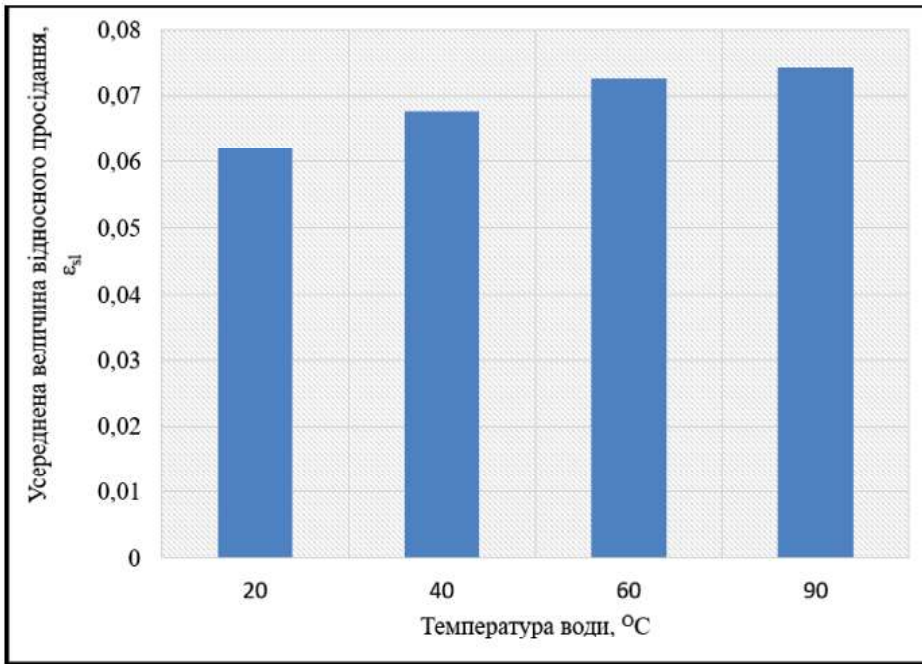
При впливі гарячої води на зразок ґрунту величина і інтенсивність просідання більша, ніж при зволоженні ґрунту водою кімнатної температури. Так, при зволоженні водою  $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  середня величина відносного просідання  $\bar{\varepsilon}_{sl}$  склала 0,0620, при зволоженні водою  $t = 40 \text{ }^\circ\text{C}$  –  $\bar{\varepsilon}_{sl} = 0,0676$ , при зволоженні водою  $t = 60 \text{ }^\circ\text{C}$  –  $\bar{\varepsilon}_{sl} = 0,0725$ , а при зволоженні водою  $t = 90 \text{ }^\circ\text{C}$  –  $\bar{\varepsilon}_{sl} = 0,0743$ . У середньому величина відносного просідання збільшилась на 20 %.

Отримані результати випробувань показали, що збільшення температури води зволоження призводить до зростання величини відносного просідання (рис. 6).

Підтверджено припущення про вплив температури води зволоження на прискорення перебігу процесу просідання ґрунту основи і, як наслідок, деформації будівлі у вигляді тріщини на його стінах. Зазначено, що величина відносного просідання лесового ґрунту при зростанні температури води зволоження збільшується.

**Таблиця 3** – Результати лабораторного дослідження лесового ґрунту при зволоженні водою різної температури

		Температура води зволоження ґрунту, $^\circ\text{C}$			
		20	40	60	90
Відносне просідання $\varepsilon_{sl}$ при $p = 0,3 \text{ МПа}$	зразок 1	0,0624	0,0683	0,0740	0,0745
	зразок 2	0,0531	0,0585	0,0649	0,0654
	зразок 3	0,0628	0,0688	0,0741	0,0747
	зразок 4	0,0599	0,0678	0,0700	0,0722
	зразок 5	0,0716	0,0745	0,0797	0,0844
	зразок 6	0,0658	0,0687	0,0792	0,0819
	зразок 7	0,0595	0,0650	0,0700	0,0712
	зразок 8	0,0700	0,0779	0,0801	0,0820
	зразок 9	0,0498	0,0577	0,0599	0,0621
	зразок 10	0,0624	0,0699	0,0715	0,0732
	зразок 11	0,0620	0,0675	0,0721	0,0744
	зразок 12	0,0499	0,0545	0,0601	0,0617
	зразок 13	0,0769	0,0795	0,0874	0,0882
	зразок 14	0,0623	0,0678	0,0724	0,0741
Сума $x_i$		<b>0,8684</b>	<b>0,9464</b>	<b>1,0154</b>	<b>1,04</b>
Усереднена величина відносного просідання $\bar{\varepsilon}_{sl}$ при $p = 0,3 \text{ МПа}$ для досліджуваної ділянки	$\bar{\varepsilon}_{sl} = \frac{\sum_i^n x_i}{n}$	<b>0,0620</b>	<b>0,0676</b>	<b>0,0725</b>	<b>0,0743</b>



**Рисунок 6** – Зміна величини відносного просідання лесового ґрунту при зволоженні водою різної температури

Накопичення таких даних дає змогу надалі вести в дію коригувальні коефіцієнти для оцінки зміни просідаючих властивостей лесових ґрунтів за час експлуатації будівель, що у свою чергу сприятиме зменшенню аварійних ситуацій.

#### **СТАТИСТИЧНА ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ЛАБОРАТОРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

За результатами статистичної обробки даних, значення відносного просідання при замочуванні водою різної температури було кориговано і складає при 20°C –  $\epsilon_{sl} = 0,06649$ ; при 40°C –  $\epsilon_{sl} = 0,07172$ ; при 60°C –  $\epsilon_{sl} = 0,0769577$ ; при 90°C –  $\epsilon_{sl} = 0,078855$  (табл. 4).

На основі статистичної обробки фактичного матеріалу компресійних випробувань лесових ґрунтів майданчика було уточнено значення відносного просідання. Порівнюючи результати обробки можна побачити, що кількісні параметри відносного просідання збільшуються зі збільшенням температури води замочування. Одержані результати статистичної обробки дають можливість оцінювати достовірність даних лабораторних випробувань і уточнити кількісне значення відносного просідання.

#### **ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ**

За результатами проведеного дослідження для підвищення експлуатаційної надійності будівель було рекомендовано такі стандартні інженерні заходи:

- відремонтувати технологічну водойму;
- виключити витоки промислових вод з обладнання та скидання промислових стоків, які

використовуються для охолодження та миття обладнання;

- модернізувати систему охолодження промислових обладнань;
- замінити зношені та пошкодженні системи розподілу води;
- виконати водозахисні заходи, а саме: організувати вертикальне планування території для відведення атмосферних опадів;
- розробити проєкт посилення пошкоджених несучих конструкцій;
- дотримуватись вимог норм щодо експлуатації будівель, зведених на просідаючих ґрунтах;
- продовжити моніторинг за станом будівлі та гідрогеологічним режимом території.

#### **ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗРОБЛЕНЬ**

Зміна характеристик просідання лесових супісків основи в межах будівлі до будівництва та на період дослідження показує, що зменшення значень відносного просідання коливається від 50 % при малих тисках до 22 % при тиску 0,3 МПа.

Лабораторними випробуваннями підтверджено, що величина відносного просідання лесового ґрунту при зростанні температури води зволоження збільшується. Приріст величини відносного просідання становить 20 % при збільшенні температури води від 20 °C до 90 °C.

Аналіз результатів спостереження показує, що будівля піддається прогресуючим нерівномірним деформаціям, що проявляється у вигляді тріщин за незмінного напруженого стану в період експлуатації.

Встановлено, що основна частина нерівномірних деформацій обстеженої промислової будівлі на лесових супісках відбулася внаслідок зволоження ґрунтів основ витоками виробничих вод.

На етапах вишукувань та проєктування важливо надавати обґрунтований прогноз зміни властивостей просідаючих ґрунтів та їх поведінки у тих чи інших умовах експлуатації будівель. Але, як показує практика, достовірно прогнозувати цей процес не вдається. Основною причиною такої ситуації є недостатній обсяг досліджень механічних властивостей ґрунтів в цілому та параметрів просідання зокрема.

**Таблиця 4** – Статистична обробка результатів лабораторних досліджень, отриманих при зволоженні водою температурою  $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  та  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Розрахункова величина відносного просідання $\varepsilon_{si} = \frac{\bar{x}_n}{\gamma_g}$	0,06649	0,07172	0,0769577	0,078855
Коефіцієнт надійності $\gamma_g = \frac{1}{1 \pm \rho_\alpha}$	0,9328	0,94252	0,94244713	0,9420507663
Показник точності $\rho_\alpha = \frac{t_\alpha V}{\sqrt{n}}$ (Критерій Стюдента = 2,16 (з табл. при довірчій імовірності 0,95))	0,07203	0,060984	0,0610674787	0,0615139181
Коефіцієнт варіації $V = \frac{S}{\bar{x}_n}$	0,124776	0,10564	0,1057841399	0,1065574102
Середньоквадратичне відхилення $S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{x}_n - x_i)^2}$	0,00774	0,00714153	0,0076723725	0,0079156933
Сума квадратів відхилень $\sum  \bar{x}_n - x_i ^2$	0,00077877	0,00066302	0,000765249	0,000814557
Середня арифметична величина відносного просідання, $\bar{x}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$	0,06203	0,0676	0,072528571	0,074285714
Загальна сума всіх значень відносного просідання за чотирнадцятьма зразками $\sum_i^n x_i$	0,8684	0,9464	1,0154	1,04
Температура води зволоження ґрунту, $^{\circ}\text{C}$	20	40	60	90

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Korff M. Deformations and damage to buildings adjacent to deep excavations in soft soils. Delft Cluster. 2009. 143 P. URL: [https://publications.deltares.nl/1001307\\_004.pdf](https://publications.deltares.nl/1001307_004.pdf).
2. Ukleja, J. Renovation of the historic building after damage connected with foundations subsidence – case study. MATEC Web of Conferences. 2018. № 174 (03006). Pp. 1–11. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201817403006>.
3. Басараб В.А. Визначення технологічних параметрів процесу ущільнення ґрунту. Міжвідомчий науково-технічний збірник «Основи і фундаменти». Київ: КНУБА. 2020. № 45. С. 3 – 15.
4. Бойко І., Скочко Л., Хоронжевський М. Ідентифікація параметрів ґрунтів на основі результатів натурних випробувань пал ь // Основи та фундаменти / Bases and Foundations. 2021. № 42. С. 9–18. DOI: 10.32347/0475-1132.42.2021.9-18
5. Вабищевич М.О., Затилюк, Г.А. Аналіз напружено-деформованого стану фундаменту-оболонки при взаємодії із пружно-пластичним середовищем. Опір матеріалів і теорія споруд: наук. – тех. збірник. Київ: КНУБА, 2021. № 106. С. 105–112. DOI: 10.32347/2410-2547.2021.106.105-112.
6. Винников Ю. Л., Манжалій С. М. Удосконалення геотехнічного моніторингу підсилення деформованої будівлі на палевому фундаменті. Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. 2020. № 18. С. 28–39. DOI: 10.15802/bttrp2020/217695.
7. Гладишев Д. Г., Гладишев Г. М. Визначення характеру деформацій будівель і споруд за напрямками та шириною тріщиноутворення. Ресурсоeconomні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Рівне, 2024. Вип. 46. С. 171–184. DOI: 10.31713/budres.v0i46.20.
8. Гладишев Г. М., Гладишев Д. Г. Підходи до оцінки деформацій існуючих будівель ущільненої забудови за результатами обстежень їх фасадів. Будівельні конструкції. Теорія і практика. 2025. № 16. С. 171–182. DOI: 10.32347/2522-4182.16.2025.171-182.
9. ДСТУ Б В.2.1-4-96. Основи та підвалини будинків і споруд. Ґрунти. Методи лабораторного визначення характеристик міцності і деформованості. Київ: Державний комітет України у справах містобудування та архітектури, 1997. 107 с.



10. ДБН В.2.1-10:2018. Основи і фундаменти будівель та споруд. Основні положення. Київ : Мінрегіон України, 2018. 35 с.
11. ДСТУ Б В.2.1-22:2009. Основи та підвалини будинків і споруд. Ґрунти. Метод лабораторного визначення властивостей просідання. Київ: Мінрегіон України, 2010. 17 с.
12. ДСТУ 9273:2024. Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінювання їхнього технічного стану. Механічний опір та стійкість. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2024. 78 с.
13. Wang Z., Xin L., Ye S., Wu J., Ye W., Li J. Study on negative friction of pile foundation in homogeneous layered soil in collapsible loess area. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Article No. 6540. DOI: 10.1038/s41598-025-86942-8.
14. Castelli F., Grasso S., Lentini V., Sammito M. S. V. Effects of soil–foundation interaction on the seismic response of a cooling tower by 3D-FEM analysis. *Geosciences*. – 2021. № 11 (5). Article 200. DOI: 10.3390/geosciences11050200.
15. Жук В. В., Павленко І. В. Вплив можливого водонасичення лесового ґрунту на напружено-деформований стан фундаментів багатопверхового будинку. *Основи і фундаменти*. Київ : КНУБА, 2022. № 44. С. 27–43. DOI: 10.32347/0475-1132.44.2022.27-43.
16. Зоценко М. Л., Винников Ю. Л. Особливості деформування основ при влаштуванні глибоких котлованів. *Academic Journal. Industrial Machine Building, Civil Engineering*. 2020. № 2(55). С. 76–81. DOI: 10.26906/znr.2020.55.2346.
17. Іщенко Ю. І., Мелашенко Ю. Б., Бень І. В., Слюсаренко Ю. С., Яковенко М. С. Геотехнічний моніторинг в умовах ущільненої міської забудови. *Наука та будівництво*. № 25(3). С. 13–25. DOI: 10.33644/scienceandconstruction.v25i3.2.
18. Корнієнко М. В., Корзаченко М. М. Деформації малоповерхових будівель та споруд. *Міжвідомчий науково-технічний збірник «Основи та фундаменти»*. 2019. №38, С. 44 – 52.
19. Моргунг А. С., Меть І. М. Геотехнічні питання дослідження технічного стану споруди на слабких ґрунтах за методом граничних елементів. *Основи та фундаменти*. 2024. № 48. Київ : КНУБА. DOI: 10.32347/0475-1132.48.2024.32-38.
20. Самченко Р. В., Юхименко А. І. Ліквідація деформованого стану будівель, споруд у водонасичених умовах. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*, 2019. № 75. С.151– 156. DOI:10.31650/2415-377X-2019-75-151-15.
21. Тімченко, Р.О., Крішко, Д.А., Барон, Т.А. Влаштування основ і фундаментів на просідаючих ґрунтах. *Гірничий вісник*. 2021. № 109. С. 41–45.
22. Швець В. Б., Бойко І. П., Винников Ю. Л., Зоценко М. Л., Петраков О. О., Біда С. В. *Механіка ґрунтів. Основи та фундаменти*. Дніпропетровськ : Пороги, 2014.
23. Яковенко М., Нестеренко О., Зорін Є., Бень І. Моніторинг сезонного розкриття тріщин на прикладі Національного заповідника «Софія Київська». *Сучасні проблеми архітектури та містобудування*. 2021. № 61. С. 276–291. DOI: 10.32347/2077-3455.2021.61.276-291.
24. Яковенко М., Мелашенко Ю., Зорін Є., Бень І. Багаторічний моніторинг деформацій будівель і споруд геодезичними методами. *Наука та будівництво*. 2023. № 37(3). DOI: 10.33644/2313-6679-3-2023-8.
25. Liu Y. Research on foundation engineering design and construction technology in soft soil area. *Journal of Civil Engineering and Urban Planning. Canada : Clausius Scientific Press*. 2024. № 6 (1). DOI: 10.23977/jceup.2024.060123.
26. Звіт про інженерні вишукування для виявлення причин деформації димової труби та головного виробничого корпусу колишнього АТ «Черкаське пиво» по вул. Благовісній, 436 в м. Черкаси, 2022.
27. ДБН В.1.1-45:2017. Будівлі і споруди в складних інженерно-геологічних умовах. Загальні положення. Київ: Мінрегіон України, 2017. 19 с.
28. ДСТУ-Н Б В.1.1-44:2016. Настанова з проєктування будівель і споруд на просідаючих ґрунтах. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017. 65 с.

## REFERENCES

1. Korff, M. (2009). Deformations and damage to buildings adjacent to deep excavations in soft soils. Delft Cluster. [https://publications.deltares.nl/1001307\\_004.pdf](https://publications.deltares.nl/1001307_004.pdf)
2. Ukleja, J. (2018). Renovation of the historic building after damage connected with foundation subsidence – Case study. *MATEC Web of Conferences*, 174(03006), 1–11. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201817403006>
3. Basarab, V. A. (2020). Determination of technological parameters of the soil compaction process. *Bases and Foundations*, 45, 3–15. Kyiv: KNUBA.
4. Boiko, I., Skochko, L., & Khoronzhevskiy, M. (2021). Identification of soil parameters based on the results of field pile tests. *Bases and Foundations*, 42, 9–18. <https://doi.org/10.32347/0475-1132.42.2021.9-18>
5. Vabishchevych, M. O., & Zatyliuk, H. A. (2021). Analysis of the stress–strain state of a shell foundation interacting with an elastic–plastic medium. *Strength of Materials and Theory of Structures*, 106, 105–112. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2021.106.105-112>
6. Vynnykov, Yu. L., & Manzhaliy, S. M. (2020).



- Improvement of geotechnical monitoring for strengthening a deformed building on a pile foundation. *Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice*, 18, 28–39. <https://doi.org/10.15802/bttrp2020/217695>
7. Hladyshev, D. H., & Hladyshev, H. M. (2024). Determination of the nature of deformations of buildings and structures by crack orientation and width. *Resource-Efficient Materials, Structures, Buildings and Constructions*, 46, 171–184. <https://doi.org/10.31713/budres.v0i46.20>
  8. Hladyshev, H. M., & Hladyshev, D. H. (2025). Approaches to assessing deformations of existing buildings in dense urban development based on façade inspection results. *Building Structures. Theory and Practice*, 16, 171–182. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.16.2025.171-182>
  9. DSTU B V.2.1-4-96. (1997). Bases and substructures of buildings and structures. Soils. Methods for laboratory determination of strength and deformability characteristics. Kyiv: State Committee of Ukraine for Urban Development and Architecture.
  10. DBN V.2.1-10:2018. (2018). Bases and foundations of buildings and structures. General provisions. Kyiv: Ministry for Communities and Territories Development of Ukraine.
  11. DSTU B V.2.1-22:2009. (2010). Bases and substructures of buildings and structures. Soils. Method for laboratory determination of collapsibility properties. Kyiv: Ministry for Communities and Territories Development of Ukraine.
  12. DSTU 9273:2024. (2024). Guidelines for inspection of buildings and structures for determining and assessing their technical condition. Mechanical resistance and stability. Kyiv: SE “UkrNDNC”.
  13. Wang, Z., Xin, L., Ye, S., Wu, J., Ye, W., & Li, J. (2025). Study on negative friction of pile foundation in homogeneous layered soil in collapsible loess area. *Scientific Reports*, 15, Article 6540. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-86942-8>
  14. Castelli, F., Grasso, S., Lentini, V., & Sammito, M. S. V. (2021). Effects of soil–foundation interaction on the seismic response of a cooling tower by 3D-FEM analysis. *Geosciences*, 11(5), Article 200. <https://doi.org/10.3390/geosciences11050200>
  15. Zhuk, V. V., & Pavlenko, I. V. (2022). Influence of possible water saturation of loess soil on the stress–strain state of foundations of a multi-storey building. *Bases and Foundations*, 44, 27–43. <https://doi.org/10.32347/0475-1132.44.2022.27-43>
  16. Zotsenko, M. L., & Vynnykov, Yu. L. (2020). Features of soil base deformation during deep excavation. *Academic Journal. Industrial Machine Building, Civil Engineering*, 2(55), 76–81. <https://doi.org/10.26906/znп.2020.55.2346>
  17. Ishchenko, Yu. I., Melashenko, Yu. B., Ben, I. V., Slyusarenko, Yu. S., & Yakovenko, M. S. (n.d.). Geotechnical monitoring under conditions of dense urban development. *Science and Construction*, 25(3), 13–25. <https://doi.org/10.33644/scienceandconstruction.v25i3.2>
  18. Korniienko, M. V., & Korzachenko, M. M. (2019). Deformations of low-rise buildings and structures. *Bases and Foundations*, 38, 44–52.
  19. Morgunh, A. S., & Met, I. M. (2024). Geotechnical aspects of assessing the technical condition of structures on weak soils using the boundary element method. *Bases and Foundations*, 48. Kyiv: KNUBA. <https://doi.org/10.32347/0475-1132.48.2024.32-38>
  20. Samchenko, R. V., & Yukhymenko, A. I. (2019). Elimination of deformed state of buildings and structures under water-saturated conditions. *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*, 75, 151–156. <https://doi.org/10.31650/2415-377X-2019-75-151-15>
  21. Timchenko, R. O., Krishko, D. A., & Baron, T. A. (2021). Construction of bases and foundations on collapsible soils. *Mining Bulletin*, 109, 41–45.
  22. Shvets, V. B., Boiko, I. P., Vynnykov, Yu. L., Zotsenko, M. L., Petrakov, O. O., & Bida, S. V. (2014). Soil mechanics. *Bases and foundations*. Dnipro: Porohy.
  23. Yakovenko, M., Nesterenko, O., Zorin, Ye., & Ben, I. (2021). Monitoring of seasonal crack opening using the example of the National Reserve “Saint Sophia of Kyiv.” *Modern Problems of Architecture and Urban Planning*, 61, 276–291. <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2021.61.276-291>
  24. Yakovenko, M., Melashenko, Yu., Zorin, Ye., & Ben, I. (2023). Long-term monitoring of deformations of buildings and structures by geodetic methods. *Science and Construction*, 37(3). <https://doi.org/10.33644/2313-6679-3-2023-8>
  25. Liu, Y. (2024). Research on foundation engineering design and construction technology in soft soil area. *Journal of Civil Engineering and Urban Planning*, 6(1). Canada: Clausius Scientific Press. <https://doi.org/10.23977/jceup.2024.060123>
  26. Report on engineering surveys to identify the causes of deformation of the chimney and main production building of the former JSC “Cherkasy Beer” at 436 Blahovisna Street, Cherkasy (2022).
  27. DBN V.1.1-45:2017. (2017). Buildings and structures in complex engineering and geological conditions. General provisions. Kyiv: Ministry for Communities and Territories Development of Ukraine.
  28. DSTU-N B V.1.1-44:2016. (2017). Guidelines for the design of buildings and structures on collapsible soils. Kyiv: SE “UkrNDNC”

Стаття надійшла до редакції: 18.08.2025

Перевірено: 27.08.2025

Прийнято: 05.09.2025