

Дослідження процесів, що протікають у набухаючих ґрунтах, залежно від природної вологості

Ірина ХРАПАТОВА ¹, Олександр ЛЯПІН ²

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна

17, вул. Маршала Бажанова, м. Харків, Україна, 61002,

¹iryna.khrapatoва@kname.edu.ua, orcid.org/0000-0003-3404-5349

²oleksandr.liapin@kname.edu.ua, orcid.org/0009-0007-4488-4599

DOI: 10.32347/0475-1132.50.2025.316-322

Анотація. Проблема набухання ґрунтів внаслідок їх замочування є важливим аспектом геотехнічного аналізу, особливо при проектуванні та будівництві заглиблених споруд і фундаментів. В умовах України, де актуальним є створення підземних укриттів, набухаючі ґрунти створюють додаткові ризики для стабільності конструкцій. Окрему загрозу становить замочування ґрунтів, що може бути спричинене гасінням пожеж під час воєнних дій.

Дослідження набухаючих глинистих ґрунтів засвідчили їхню ортотропність, що проявляється в значному переважанні горизонтального набухання над вертикальним—різниця може досягати 60 %. Це спричиняє не лише збільшення навантаження на фундаментні плити, але й значний боковий тиск на заглиблені конструкції. Така особливість ґрунтів впливає на їхню деформаційну поведінку, що має бути враховано при розрахунках стійкості будівельних споруд.

Лабораторний аналіз набухання підтвердив залежність ступеня деформації ґрунту від його початкової вологості. Спостереженнями виявлено закономірність, згідно з якою ґрунти з меншою природною вологістю демонструють значно більший потенціал набухання після замочування. Це означає, що прогнозування вологісного режиму та попередній аналіз гідрогеологічних умов на ділянці будівництва є ключовими факторами для мінімізації ризику деформацій та пошкоджень конструкцій.

У контексті заглиблених споруд необхідно розглядати не лише вертикальні навантаження, але й можливий боковий тиск на підземні конструкції. Це потребує впровадження додаткових конструктивних заходів, спрямованих на зміцнення ґрунтів та підвищення їхньої стабільності.

Проведення ретельного аналізу ґрунтових



Ірина ХРАПАТОВА

доцент кафедри
геотехніки, підземних споруд та гідротехнічного будівництва
к.т.н., доц.



Олександр ЛЯПІН

аспірант кафедри
геотехніки, підземних споруд та
гідротехнічного будівництва

умов, врахування факторів набухання та застосування ефективних методів протидії набухання дозволить значно зменшити ризики, забезпечити довговічність споруд та надійність їх експлуатації.

Ключові слова. Набухаючі ґрунти, набухання, системи «основа – фундамент – споруда», зволоження, деформації.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

На значній частині території України інженери-будівельники мають справу зі складним інженерно-геологічними умовами, до таких можемо віднести набухаючі ґрунти. Набухання ґрунтів виступає додатковим фактором навантаження на підземні елементи будівель та фундаментів, особливо в умовах їх зволоження та тимчасової зміни фізико-механічних властивостей.

Характерним і наглядним проявом впливу набухаючих ґрунтів на споруду є виникнення додаткового тиску по підшві фундаментів, що призводить до нерівномірних підйомів/осідань конструкцій.

При зволоженні набухаючого ґрунту відбуваються як вертикальні, так і горизонтальні деформації. В умовах компресійного випробування ґрунту, де горизонтальні деформації обмежені, виникає горизонтальний тиск, що діє на стінки кільця. Це свідчить про те, що на захисні конструкції (фундаменти, підпірні стіни, тунелі тощо), розташовані в набухаючих ґрунтах, при їх зволоженні виникатимуть додаткові навантаження, обумовлені набуханням ґрунту. Адже ґрунти змінюють свої властивості не тільки вертикально, а й в горизонтальній площині.

МЕТА РОБОТИ

Метою роботи є дослідження зміни властивостей набухаючих ґрунтів в залежності від величини замочування та різниці тиску набухання ґрунтів в горизонтальному і вертикальному напрямку для подальшого врахування впливу набухання на роботу будівельних споруд.

ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

Відомо, що набухаючі ґрунти проявляють ортотропні властивості (Храпатова І.В., 2007). При зволоженні вони збільшуються в обсязі, при цьому величина набухання в горизонтальному та вертикальному напрямку може суттєво відрізнятися (Elif Avsar et al., 2009, Jan Pruska et al., 2024). В основному набухання переважає в вертикальному напрямку. Але це залежить від регіонально-генетичних особливостей.

В результаті бойових дій в Україні виникла необхідність будівництва підземних захисних споруд. Крім того, додатковим фактором виникнення набухання є замочування ґрунтів в результаті гасіння пожеж від воєнних дій. При цьому конструкції, заглиблені в набухаючі ґрунти, будуть відчувати не тільки додатковий тиск по підшві, але й по

боковій поверхні стін заглибленої споруди.

Зазвичай в розрахунках деформацій системи «основа-фундамент» враховується вертикальний підйом фундаментів з використанням модуля деформації визначеному в компресійних приладах, що виключають бокове розширення. В ортотропних ґрунтах деформаційні характеристики відрізняються у перпендикулярних напрямках, що приводить до необхідності визначення деформаційних характеристик в горизонтальному напрямку (Masood Abdollahi et al, 2021).

Влітку 2024 року в Печерському районі міста Київ, на будівельному майданчику були відібрані зразки ґрунтів з набухаючими властивостями для подальшого лабораторного аналізу. Завдяки чому було отримано данні по вертикальному і горизонтальному тиску набухання ґрунтів. Дослідження властивостей набухаючого ґрунту було проведено шляхом аналізу даних, отриманих під час випробувань у компресійних приладах. Визначено набухання без навантаження, та при тисках у діапазоні 0,0025; 0,025; 0,05; 0,1; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30 МПа. Додатково для експерименту було виконане висушування зразків, з подальшим замочування та аналіз впливу початкової вологості на величину набухання.

За результатами роботи були отримані наступні дані:

- вільне набухання,
- відносну деформацію набухання під тисками,
- зміну вологості ґрунту для подальшого використання у моделюванні процесу набухання.

Загальний вигляд будівельного майданчика для відбору зразків ґрунтів з набухаючими властивостями для подальшого лабораторного аналізу наведено на Рис. 1.



1a



1б

Рис.1. Загальний вигляд будівельного майданчика відбору зразків ґрунтів з набухаючими властивостями (1a–1б).

Fig.1. General view of the construction site for sampling soils with swelling properties (1a–1b).

Це допомогло описати два типи набухаючих ґрунтів, а саме:

ПЕ-3 Глина легка, сіра, жовто-сіра, напівтверда, місцями тверда, з карбонатами, слабонабухаюча. Товщина шару 5,1-6,0 м. Глибина залягання складала 4-5м від денної поверхні землі.

ПЕ-4 Глина важка, строката, жовта, жовто-червона, тверда, з карбонатами, з лінзами піску, середньонабухаюча. Товщина шару 2,5-3,9 м. Глибина залягання складала 8,5-9 м від денної поверхні землі.

Зазначимо, на зразках непорушеної структури були вирізані кільця у двох перпендикулярних напрямках для подальшого аналізу впливу зміни вологості на відносне набухання та модуль деформації у двох перпендикулярних напрямках.

Лабораторний аналіз дослідження властивостей набухаючого ґрунту наведені на Рис. 2.



Рис.2. Лабораторний аналіз дослідження властивостей набухаючого ґрунту.

Fig.2. Laboratory analysis of the study of the properties of swelling soil.

За результатами лабораторного аналізу

отримано більш детальне розуміння властивостей набухаючих ґрунтів, наведених нижче.

1. Слабонабухаючі глини, з такими особливостями:

- різниця відносного набухання у вертикальному та горизонтальному напрямках досягає 60%.

- при збільшенні різниці між природною та вологістю після замочування на 30% різниця в відносному набуханні складає 75% в обох напрямках.

- різниця в значеннях модулів деформації в вертикальному та горизонтальному напрямках складає 17%.

2. Середньонабухаючі глини, з такими особливостями:

- різниця відносного набухання у вертикальному та горизонтальному напрямках досягає 27 %. При чому відносне набухання більше в горизонтальному напрямку.

- при збільшенні різниці між природною та вологістю після замочування на 30% різниця в відносному набуханні складає 75% в обох напрямках.

- різниця в значеннях модулів деформації в вертикальному та горизонтальному напрямках складає 30%.

Результати дослідження підтверджують ортотропні властивості набухаючих ґрунтів. Це свідчить про те, що не можна нехтувати горизонтальним впливом від набухання на огорожуючі конструкції заглиблених споруд (протирадіаційних укриттів, підземних заводів, підземних шкіл та ін.).

У контексті проектування та будівництва виникає необхідність у деталізованому моделюванні процесу набухання ґрунтів з метою забезпечення точності розрахунків взаємодії між основою, фундаментом та спорудою. Це питання є ключовим, оскільки поведінка всієї системи в умовах впливу набухаючих ґрунтів значною мірою визначає стійкість, довговічність та безпеку конструкцій.

Правильний підхід до моделювання дозволяє врахувати складні механізми деформацій ґрунту, додаткові напруження, що виникають у фундаменті, а також їхній вплив на систему «основа-фундамент-споруда» в цілому.

Пропонується виконати цю задачу представивши масив набухаючого ґрунту, у вигляді лінійно-деформованої середовища, а набухання основи враховувати як додатковий вплив, близький по природі до температурного (Воблих В.А. та ін., 2008).

Основне співвідношення для величини деформації набухання ґрунту приймається за Сорочаном Е. А. (Сорочан Е. А., 1989):

$$\varepsilon_{i=1,2,3}^y = \varepsilon_i^y + \varepsilon_{i,sw}, \quad (1)$$

де ε_i^y – головні деформації в основі від напружень у ґрунті;

$\varepsilon_{i,sw}$ – деформації набухання, пов'язані зі зміною вологості та головними напруженнями, співвідношенням:

$$\varepsilon_{i,sw} = m \cdot \Delta w \left(1 - \frac{P}{p_{sw}}\right), \quad (2)$$

де m – коефіцієнт, що визначається дослідним шляхом;

Δw – зміна вологості ґрунту;

p_{sw} – тиск набухання;

P – тиск у напрямку набухання.

Передбачається, що залежність деформації набухання від тиску і вологості має лінійний характер. Коефіцієнт m подібний до коефіцієнта температурного розширення. Крім цього він враховує властивості ґрунту, що набухає.

Отримані розрахункові дані наведені в Табл.1, 2

Табл. 1. Коефіцієнти m для середньонабухаючих ґрунтів, ІГЕ-4
 Table. 1. Coefficients m for medium-swelling soils, IGE-4

№	ρ_d , г/см ³	W_{sw} , д.ед.	$W_{ест}$, д.ед.	ΔW , д.ед.	ε_{sw}	P , МПа	P_{sw} , МПа	m
1	1,62	0,304	0,238	0,066	0,054	0,0025	0,115	0,836
2	1,62	0,304	0,238	0,066	0,027	0,025	0,115	0,523
3	1,62	0,304	0,238	0,066	0,016	0,05	0,115	0,429
4	1,62	0,304	0,238	0,066	0,003	0,1	0,115	0,348
5	1,63	0,301	0,235	0,066	0,060	0,0025	0,123	0,928
6	1,63	0,301	0,235	0,066	0,032	0,025	0,123	0,609
7	1,63	0,301	0,235	0,066	0,021	0,05	0,123	0,536
8	1,63	0,301	0,235	0,066	0,005	0,1	0,123	0,405
9	1,63	0,304	0,236	0,066	0,058	0,0025	0,127	0,896
10	1,63	0,304	0,236	0,066	0,033	0,025	0,127	0,623
11	1,63	0,304	0,236	0,066	0,021	0,05	0,127	0,318
12	1,63	0,304	0,236	0,066	0,006	0,1	0,127	0,428

Табл. 2. Коефіцієнта m для слабонабухаючих ґрунтів, ІГЕ-3
 Table. 2. Coefficient m for slightly swelling soils, IGE-3

№	ρ_d , г/см ³	W_{sw} , д.ед.	$W_{ест}$, д.ед.	ΔW , д.ед.	ε_{sw}	P , МПа	P_{sw} , МПа	m
1	1,67	0,263	0,219	0,044	0,024	0,0025	0,057	0,57
2	1,67	0,263	0,219	0,044	0,010	0,025	0,057	0,41
3	1,67	0,263	0,219	0,044	0,002	0,05	0,057	0,37
4	1,66	0,272	0,22	0,052	0,025	0,0025	0,063	0,50
5	1,66	0,272	0,22	0,052	0,012	0,025	0,063	0,38
6	1,66	0,272	0,22	0,052	0,004	0,05	0,063	0,373

Після цього було проведено статистичну обробку експериментальних даних.

Для середньонабухаючої глини було визначено нормативне значення коефіцієнта m як середнє арифметичне: $\overline{m}_n = 0.568$

Середнє квадратичне відхилення S становить **0,172**.

Розрахункове значення коефіцієнта m для довірчої ймовірності 0,85 і 0,95 склало:

$$m_{0.85} = 0,508$$

$$m_{0.95} = 0,47$$

Для слабонабухаючої глини було визначено нормативне значення коефіцієнта m як середнє арифметичне: $\overline{m}_n = 0.434$

Середнє квадратичне відхилення S становить **0,083**.

Розрахункове значення коефіцієнта m для довірчої ймовірності 0,85 і 0,95 склало:

$$m_{0.85} = 0,395$$

$$m_{0.95} = 0,383$$

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Проведене дослідження підтвердило значущість впливу набухаючих властивостей глинистих набухаючих ґрунтів, на стійкість підземних та фундаментних конструкцій. Виявлено, що горизонтальне набухання цих ґрунтів може перевищувати вертикальне до 60 %, створюючи суттєве навантаження як на основи фундаментів, так і на бокові поверхні заглиблених споруд. Лабораторні випробування показали, що ступінь набухання має пряму залежність від початкової вологості ґрунтів: чим нижча вологість, тим більший потенціал для деформацій після замочування. Це особливо важливо враховувати в умовах змінного вологісного режиму, який може бути зумовлений природними або техногенними факторами, включно з гасінням пожеж.

Отримані результати підкреслюють необхідність врахування явища набухання під час проектування системи «основа – фундамент – споруда». Це включає розробку ефективних методів протидії набухання ґрунтів, які мінімізують ризики деформацій конструкцій. Аналіз геотехнічних умов має проводитися з особливою увагою до гідрогеоло-

гічних характеристик та прогнозування можливих змін вологості. На основі попередніх досліджень прийнято метод моделювання процесу набухання в вигляді температурної впливу, знайдено коефіцієнт m для дослідженого ґрунту, що враховує його особливості, для подальшого вирішення цієї задачі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Храпатова І.В. (2007) Урахування набухання ґрунтової основи на НДС системі «основа – фундамент – споруда» в умовах плоскої деформації. *Науковий вісник будівництва*, 40, 25–30.
2. Воблых В.А., Кичаева О.В., Храпатова И.В. (2008). Определение характеристик набухающих грунтов, необходимых для работы системы «основание – фундамент – сооружение». *Науковий вісник будівництва*, 46, 57–60.
3. Сорочан Е. А. Строительство сооружений на набухающих грунтах. М.: Стройиздат, 1989. 312 с.
4. Elif Avsar, Resat Ulusay, Harun Sonmez (2009). Assessments of swelling anisotropy of Ankara clay. *Engineering Geology* 105(1), 24-31. DOI:10.1016/j.enggeo.2008.12.012.
5. Jan Pruska, Miroslav Šedivý (2024). Input data for indirect estimation of swelling pressure of expansive soils. *Stavební obzor - Civil Engineering Journal* 33(4):548-559. DOI:10.14311/CEJ.2024.04.0037.
6. Masood Abdollahi, Farshid Vahedifard (2021). Model for Lateral Swelling Pressure in Unsaturated Expansive Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 147(10): 04021096. DOI:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002605

REFERENCES

1. Hrapatova I.V. (2007) Urahuvannya nabuhannya gruntovoyi osnovi na НДС sistemi «osnova – fundament – sporuda» v umovah ploskoyi deformaciyi. *Naukovij visnik budivnictva*, 40, 25–30 (in Ukrainian).
2. Voblyh V.A., Kichaeva O.V., Hrapatova I.V. (2008). Opredelenie harakteristik nabuhayushih gruntov, neobhodimyh dlya raboty sistemy «osnovanie – fundament – sooruzhenie». *Naukovij visnik budivni-ctva*, 46, 57–60 (in Ukrainian).

3. Sorochan E. A. Stroitelstvo sooruzhenij na nabuhayushih gruntah. M.: Strojizdat, 1989. 312 (in Russian).
4. Elif Avsar, Resat Ulusay, Harun Sonmez (2009). Assessments of swelling anisotropy of Ankara clay. *Engineering Geology* 105(1), 24-31. DOI:10.1016/j.enggeo.2008.12.012.
5. Jan Pruska, Miroslav Šedivý (2024). Input data for indirect estimation of swelling pressure of expansive soils. *Stavební obzor - Civil Engineering Journal* 33(4):548-559. DOI:10.14311/CEJ.2024.04.0037.
6. Masood Abdollahi, Farshid Vahedifard (2021). Model for Lateral Swelling Pressure in Unsaturated Expansive Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 147(10): 04021096. DOI:10.1061/(ASCE)GT. 1943-5606.0002605

structures, it is necessary to consider not only vertical loads, but also possible lateral pressure on underground structures. This requires the implementation of additional structural measures aimed at strengthening the soils and increasing their stability. A thorough analysis of soil conditions, taking into account swelling factors and the use of effective methods of combating swelling will significantly reduce risks, ensure the durability of structures and their reliability of operation.

Keywords. Swelling soils, swelling, base-foundation-structure systems, hydration, deformation.

Investigation of processes in swelling soils depending on natural moisture content

Iryna KHRAPATOVA
Oleksandr LIAPIN

Summary The problem of soil swelling due to soaking is an important aspect of geotechnical analysis, especially in the design and construction of buried structures and foundations. In the conditions of Ukraine, where the creation of underground shelters is relevant, swelling soils create additional risks for the stability of structures. A separate threat is soil soaking, which can be caused by extinguishing fires during military operations.

Studies of swelling clay soils have shown their orthotropy, which is manifested in a significant predominance of horizontal swelling over vertical - the difference can reach 60%. This causes not only an increase in the load on the foundation slabs, but also significant lateral pressure on buried structures. This feature of soils affects their deformation behavior, which must be taken into account when calculating the stability of buildings.

Laboratory analysis of swelling confirmed the dependence of the degree of soil deformation on its initial humidity. A pattern has been observed, according to which soils with lower natural moisture content demonstrate a significantly higher swelling potential after soaking. This means that forecasting the moisture regime and preliminary analysis of hydrogeological conditions at the construction site are key factors in minimizing the risk of deformation and damage to structures. In the context of buried