

ВПЛИВ МОРОЗНОГО ЗДИМАННЯ ҐРУНТІВ НА ФУНДАМЕНТИ СПОРУД ЗА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ

Б. Моркляник, д. т. н., П. Проценко, аспірант
Національний університет «Львівська політехніка»

<https://doi.org/10.31734/architecture2018.19.074>

Постановка проблеми. Вертикальні колектори теплових насосів – найпоширеніші для отримання геотермальної енергії, їх можна встановлювати в будь-який вид ґрунту. Ця система найбільш економічна з позиції кількості отриманого тепла, особливо за використання палевих фундаментів суміщеного типу. Для вирішення питань, пов'язаних із проектуванням і застосуванням теплових насосів, обов'язково треба проаналізувати земельну ділянку для визначення типу ґрунтів, їх теплоємності, геологічних особливостей та дослідження деформаційних процесів у ґрунтах різних типів, зміни цих властивостей в умовах зміни температури.

Будівництво та експлуатація будівель і споруд на основах, що піддаються перемінному замерзанню-розмерзанню, пов'язані з певними труднощами, вирішення яких залежить від ступеня вивченості фізико-механічних властивостей ґрунтів і чинників, їх що визначають. Такими чинниками є особливості складу, властивостей і мікробудови ґрунтів, вивчення яких має важливе наукове і практичне значення, оскільки дає змогу істотно підвищити якість вишуквальних робіт та знизити витрати на ліквідацію наслідків деформацій будівель і споруд.

Постановка завдання. Наше завдання – експериментально-теоретичне дослідження впливу циклічного замерзання-розмерзання ґрунту основи на його деформативність.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблеми досліджень деформацій ґрунтів основ будівель і споруд присвячено чимало наукових праць і публікацій. Н. А. Цитович у 1927 р. вперше зіштовхнувся з проблемами мерзлих ґрунтів і, зокрема, з відсутністю науково обґрунтованих принципів і методів проектування і будівництва різних інженерних об'єктів у сфері вічного промерзання, та організував лабораторію для вивчення фізико-механічних властивостей мерзлих ґрунтів і льоду [11]. Розвиток сучасних основ теорії напружено-деформованого стану основ у напрямку реології ґрунтів дослідив С. С. Вялов [1]. Згодом ці питання вирішували науковці [1-11].

Більшість опублікованих праць присвячені дослідженню вічномерзлих ґрунтів, проте на сьогодні актуальне питання дослідження основ у зоні дії колекторів теплових насосів на режимах роботи, за яких допускається замерзання ґрунтів основи.

Проведені дослідження показують істотний вплив циклічного замерзання-розмерзання ґрунту основи на його деформативність. Результати роботи можуть бути використані для вдосконалення теорії проектування і застосування теплових насосів, а також суміщених фундаментів, особливо палевих.

Виклад основного матеріалу. Властивості мерзлих ґрунтів залежать передусім від температури і вологості. Ця залежність особливо велика в межах від 0° до -10° С, коли замерзають значна частина води і розчинів солей, що перебувають між частинками ґрунту. Зі збільшенням у мерзлому ґрунті незамерзлої води або розчинів солей знижується його міцність. За температури -10° С межа міцності на стиск мерзлих суглинків становить 35...50, супісків – 55...80 і пісків 90...120 кг/см². Зі зниженням температури межа міцності ґрунту підвищується. Міцність на розтяг становить близько однієї третини межі міцності на стиск.

Зі збільшенням вологості до повної вологоємності міцність ґрунтів у мерзлому стані зростає, а за більшої вологості знижується.

Основними чинниками, які зумовлюють виникнення у ґрунті пластичних деформацій, є значення зовнішнього навантаження і температура мерзлого ґрунту. За температур, близьких до 0° С, деформації ґрунту протікають швидше, і вони особливо великі й небезпечні. Зміну пластичності мерзлих ґрунтів можна пояснити зміною кількості пов'язаної з ними води. Остання, замерзаючи в порах ґрунту, переходить у лід, збільшуючись в об'ємі. Цьому чинять опір суміжні частинки ґрунту, який, не маючи можливості розширюватися в сторони, піднімається вгору – здимається, а за розтавання – опускається. До здимання схильні шари ґрунту з вологістю, що вища за критичну (вода повністю заповнює всі

пори). Зволоженню ґрунтів сприяє капілярне всмоктування ними ґрунтових вод.

Здимаються переважно мокрі й вологі пилувато-мулкуваті і глинисті ґрунти, а також мокрі водопроникні супіщані і піщані ґрунти з вологістю, що перевищує критичну, що можливо за наявності підстильного водонепроникного пласта.

Здимання ґрунту пов'язане з осіданням за відтавання внаслідок танення крижаних лінз, а також з фільтрацією талої води вглиб ґрунту.

Залежно від рівня міжпластових вод явища здимання проявляються протягом сезону в різному ступені. Якщо водонасичені шари перебувають високо, то явища здимання виявляються і взимку, і навесні. У такому разі низькі зимові температури і підвищена вологість ґрунту посилюють здимання ґрунту. Якщо ж ґрунтові води залягають глибоко, то зволоження верхніх шарів ґрунту «верховодка» виникне тільки в разі танення снігу навесні, коли температура повітря не така низька, як узимку. За таких умов здимання ґрунту не буде настільки значним.

Із початком впливу мінусової температури кожен елементарний шар ґрунту перебуває послідовно в одній із стадій:

- перша стадія (підготовча) – охолодження ґрунту до температури, за якої лід у ньому ще не утворюється;

- друга стадія (основна) – охолодження ґрунту в межах інтенсивних фазових переходів, коли відбувається об'ємне збільшення води за переходу її в лід (замерзання) і перерозподіл вологи (міграція). Ця стадія супроводжується морозним здиманням ґрунту;

- третя стадія (переохолодження) – зменшення об'єму ґрунту (усадка на морозі) за подальшого зниження температури.

Перехід з однієї стадії замерзання в іншу відбувається плавно. Кожній стадії охолодження відповідають певні фізичні процеси і пов'язані з ними зміни стану і властивостей ґрунту. Основну роль при цьому відіграють процеси переміщення (міграції) і кристалізації (замерзання) води.

Одним із найважливіших процесів, що відбуваються за промерзання ґрунту, вимагають врахування при проектуванні основ і фундаментів, є збільшення його об'єму (як правило, нерівномірне) і подальше осідання-просідання за відтавання (також нерівномірне), які є найпоширенішою причиною деформацій різних будівель і споруд (особливо малонавантажених).

Морозне здимання ґрунту – це результат об'ємного розширення води (приблизно на 9%),

що перебуває в ньому до промерзання і додатково мігрує до межі промерзання у процесі переходу води з рідкого стану у твердий (лід).

У разі замерзання навіть усієї парової води у ґрунті його обсяг не перевищує 3 – 4% (закрита система). Водночас у природі обсяг ґрунту за його промерзання збільшується на 10 – 50 і навіть на 100%. Зростання обсягу ґрунту за промерзання (здимання) супроводжується різким збільшенням вологості ґрунту з утворенням у ньому льоду у вигляді лінз і прошарків. Здимання ґрунту розвивається внаслідок припливу (міграції) води до фронту промерзання з нижчих верств (відкрита система).

У природних умовах, і особливо у процесі будівництва, внаслідок неоднорідності складу ґрунтів, розподілу вологи, щільності, умов промерзання і низки інших чинників, морозне здимання завжди буває нерівномірним, а тому небезпечним для споруд, оскільки при цьому виникають і нерівномірні сили такого здимання.

За додатної температури ґрунти є звичайною трикомпонентною системою, що складається з мінеральних часток, води і повітря. За мінусової температури ґрунти переходять у складнішу чотирікомпонентну систему. Лід у мерзлом ґрунті – цементуюча речовина між окремими мінеральними частинками. Крім того, лід є заповнювачем пор ґрунту і його розпушувачем за промерзання (здимання).

Співвідношення між вільною та зв'язаною водою у ґрунтах різне і визначається її гідрофільністю (здатністю мінералів абсорбувати воду) і складом парової води. У пилувато-глинистих ґрунтах зв'язаної води набагато більше порівняно з ґрунтами, складеними переважно частинками грубодисперсної фракції (понад 0,1 мм). У пісках великих і середніх та великоуламкових ґрунтах із заповнювачем до 10% (за масою) цієї води мало, і вона не має практичного значення.

Температурою початку замерзання вважають найвищу і найстійкішу температуру, яка настає за температурним стрибком і зумовлена кристалізацією найменш пов'язаної з мінеральним скелетом води в об'ємі ґрунту, охолодженого до температури нижче нуля. Температура для різних ґрунтів різна (для піску 0 °С, для глини – -0,5°... -1,5 °С) і залежить здебільшого від вологості й наявності солей у розчиненому вигляді. Так, температура початку замерзання суглинку за концентрації розчину солей і вологості 16% становить -10 °С, за концентрації 23,1% – відповідно -21,1 °С, а незасолених -1,0 °С. Цю особливість необхідно враховувати і вживати заходів для

зниження температури початку замерзання ґрунту поблизу фундаменту або під ним.

Об'єм промерзання ґрунту збільшується, якщо його вологість перевищує розрахункову «критичну» вологість, за якої припиняється перерозподіл води в мерзлом ґрунті. Коефіцієнт водонасичення ґрунту за його критичної вологості дорівнює приблизно 0,9. Однак ця залежність виражає лише межу вологості, що характеризує стабільний стан ґрунту за його промерзання в умовах трифазної системи, але не враховує здатності води до пересування (міграції).

Під час промерзання ґрунтів (основна стадія), особливо в межах інтенсивних фазових переходів води (за температури від 0° С до -5° С), в деяких умовах може відбуватися значний перерозподіл води, що міститься у ґрунті. Зазвичай у пісках дрібних і пилюватих, у пилювато-глинистих ґрунтах спостерігається підтягування її від низу до верху (міграція) до фронту охолодження і промерзання.

Міграція води у ґрунтах – явище дуже складне. На якість процесу міграції впливає чимало чинників: гранулометричний і хіміко-мінералогічний склад ґрунтів; гідрофільність ґрунту; початкова вологість і наявність підтікання води ззовні; щільність ґрунту; швидкість і час промерзання; температура середовища, за якої замерзає вода у ґрунті; значення прикладеного навантаження (тиск); повторність циклів замерзання і відтавання тощо.

Міграція спостерігається тільки в гідрофільних (змочуваних водою) замерзальних системах. Найінтенсивніша міграція – у ґрунтах з малою швидкістю промерзання і з високим вмістом пилюватих фракцій (розмір часток 0,05 ... 0,005). Це можна пояснити тим, що ґрунти, які містять понад 50% пилюватих фракцій, у природних умовах характеризуються високим капілярним тиском і, отже, легкою віддачею води і швидким її поглинанням. Структурна зв'язність цих ґрунтів дуже слабка. Такі фізичні властивості ґрунтів створюють найсприятливіші умови для льодовиділення у промерзлом ґрунті (здимання).

Наявність у глинистих ґрунтах великої кількості колоїдних частинок неабияк ускладнює пересування води капілярами, що різко обмежує можливість великого накопичення льоду, що утворюється за рахунок підтягування води капілярами з нижніх шарів ґрунту до фронту промерзання. Крім того, дрібнодисперсні зовнішні ґрунти мають велику питому поверхню частинок і за рахунок поверхневої енергії притягують до себе воду; отже, ці ґрунти ускладнюють рух води по тонких капілярах до шару промерзання і, відтак,

зменшують можливість накопичення лінз і прошарків льоду.

У свою чергу у крупноскелетних ґрунтах (супіщаних, суглинних, глинистих моренах) за утримання у вигляді заповнювача частинок розміром менше за 0,1 мм і більше за 10% за масою спостерігаємо інтенсивну міграцію води. Залежно від положення рівня підземних вод ці ґрунти можна віднести до середньо- і навіть сильноздимальних.

У дрібних і пилюватих пісках, у пилювато-глинистих ґрунтах (супісках, суглинках, глинах), що промерзають в умовах обводнення, спостерігаємо інтенсивну міграцію води. Перераховані ґрунти у разі промерзання дають деформації до десятків сантиметрів на 1 метр промерзання і завдають значних пошкоджень фундаментам будівель і споруд. Що ближче рівень підземних вод до межі промерзання, то більший ступінь здимання мають пилювато-глинисті ґрунти за інших рівних умов.

ґрунти, які здимуються найбільше, містять від 30 до 80% пилюватих частинок. Подібні ґрунти мають слабовиражену текстуру і незначне зчеплення між пилюватими частинками, тому за промерзання крижані кристали в таких ґрунтах утворюються всередині структурних елементів і зумовлюють значні деформації морозного здимання. За зволоження пилюваті ґрунти втрачають зчеплення між частинками, за промерзання в них утворюється велика кількість крижаних прошарків і лінз.

На розмір морозного здимання ґрунтів істотно впливає їх щільність. Якщо ґрунти дуже щільні, то в разі їх промерзання спостерігаємо незначне здимання (хоча всі пори заповнені водою), оскільки такі ґрунти мають малу кількість води і в них ускладнена можливість її пересування за промерзання. У дуже пухких ґрунтах багато пор, які зазвичай вільні від води, і за рахунок цих пор можуть гаситися деформації здимання. ґрунти середньої щільності з повним заповненням усіх пор водою за промерзання дуже збільшуються в об'ємі, тобто деформуються від морозного здимання.

Отже, вирішальним чинником, що спричинює здимання ґрунту, є його вологість перед промерзанням, зі збільшенням якої до певної межі небезпека від замерзання ґрунту зростає. Визначаючи ступінь здимання ґрунту, необхідно враховувати положення і можливу зміну рівня підземних вод. Ступінь здимання ґрунту в зоні капілярного зволоження (аерації) залежить від виду ґрунту, його показника плинності і низки інших чинників.

**Значення сумарних дотичних сил морозного здимання,
що діють на фундаменти**

| Значення сумарних дотичних сил морозного здимання T_f , кПа | | | |
|---|--------------|---|--------------|
| Сильноздимальні ґрунти ($t_f = 100$ кПа) | | Малоздимальні ґрунти ($t_f = 60$ кПа) | |
| За промерзання на $d_f = 1,5$ м | | | |
| з одного боку | з двох боків | з одного боку | з двох боків |
| 15 | 30 | 9 | 18 |

Незнання процесів, що відбуваються у ґрунті за промерзання-відтавання, може бути причиною неправильного проектування нульового циклу і, як наслідок цього, – деформування, як правило, малонавантажених (легких, законсервованих) будівель і споруд.

Для прогнозування характеристик здимання (відносної деформації здимання) ґрунтів необхідно встановити низку нормативних значень вихідних показників, до яких передусім належать: зерновий (гранулометричний) склад ґрунту; вологість ґрунту; щільність скелета ґрунту; щільність твердих частинок ґрунту; пластичність ґрунту; рівень підземних вод; середня температура і тривалість періоду промерзання; потужність шару промерзлого ґрунту. Основними чинниками, що зумовлюють значення нормальних сил морозного здимання, є:

- склад ґрунту і фізико-механічні його властивості;
- умови промерзання ґрунту;
- форма підшви фундаменту;
- тиск на підшву фундаменту (див. табл.).

Зі зростанням площі підшви стовпчастого фундаменту збільшується обсяг зони, в якій діють напруження від навантаження на основу, що протидіють об'ємному розширенню ґрунту за здимання. Тому за однакового питомого тиску на основу меншому здиманню піддаються фундаменти з більшою площею (шириною) підшви. Зі збільшенням під фундаментом глибини промерзання вплив площі (ширини) підшви зменшується.

За постійної швидкості здимання ґрунту питомі нормальні сили морозного обдимання пропорційні підйому ненавантаженої основи і залежать від відношення ширини підшви фундаменту до товщини шару мерзлого ґрунту під ним, а для стовпчастих фундаментів – також від площі підшви.

Зменшення питомих нормальних сил морозного здимання за підйому фундаментів практично пропорційне підйому. Коефіцієнт пропорційності

залежить від швидкості здимання і товщини шару мерзлого ґрунту, а також від форми і площі підшви стовпчастих і стрічкових фундаментів.

Висновки. За результатами проведених досліджень можна дійти таких висновків:

1. Морозне здимання ґрунтів суттєво впливає на міцність і деформативність фундаментів будівель і споруд.

2. Для прогнозування характеристик здимання основи необхідно визначати низку нормативних значень вихідних показників ґрунтів.

3. За проектування фундаментів з можливим замерзанням основи необхідно досліджувати розподіл і рух вологи у шарах ґрунтів.

Результати досліджень можна використати під час проектування та розрахунку основ і фундаментів будівель і споруд унаслідок впливу на них циклічного замерзання-розмерзання за роботи теплових насосів.

Бібліографічний список

1. Вялов С. С. Реология мерзлых грунтов / С. С. Вялов; ред. В. Н. Разбегин. Москва: Стройиздат, 2000. 464 с.
2. Гребенец В. И., Рогов В. В. Инженерное мерзлотоведение: учеб. пособие. Москва: Изд-во Моск. ун-та, 2000. 96 с.
3. Инженерная геокриология: справ. пособие / под ред. Ершова Э. Д. Москва: Недра, 1991. 439 с.
4. Лабораторные методы исследования мерзлых пород / под ред. Ершова Э. Д. Москва: Изд-во МГУ, 1986. 210 с.
5. Методы геокриологических исследований / под ред. Э. Д. Ершова. Москва: Изд-во МГУ, 2004. 503 с.
6. Основы геокриологии. Ч. 5. Инженерная геокриология. Москва: Изд-во МГУ, 1999. 526 с.
7. Роман Л. Д. Механика мерзлых грунтов. Москва: Наука-Интерпериодика, 2002. 426 с.
8. СНиП 2.02.04-88. Строительные нормы и правила. Основания и фундаменты на вечномёрзлых грунтах. Москва: ЦИТП Госстроя СССР, 1990. 56 с.
9. Хрусталева Л. Н. Основы геотехники в криолитозоне. Москва: Изд-во МГУ, 2005. 542 с.

10. Хрусталеv Л. Н., Пармузин С. Ю., Емельянова Л. В. Надежность северной инфраструктуры в условиях меняющегося климата. Москва: Унив. кн., 2011. 260 с.
11. Цытович Н. А. Механика мерзлых пород. Москва: Высш. шк., 1973. 448 с.
12. Kezdi A. Handbuch der Bodenmechanik. Verlag: VEB, 1969. Bd. I. 258 s.
13. Miansari M., Ganji D., Miansari M. Application of he's variational iteration method to nonlinear heat transfer equations. *Physics Letters A*. 2008. Vol. 372. N. 6. P. 779–785.
14. Morklyanyk B., Fartushnyy A. Simulation of the Impact of Work of Heat Pumps on the Frost Heaving of the Base Soil. *Econtechmod: an International Quarterly Journal on economics of technology and modeling processes*. Lublin; Rzeszow, 2015. Vol. 04, No 2. P. 71–74.
15. Morklyanyk B. V. The Heat Pumps Foundation Design Calculation Aspects. *Academic Journal of Science*. 2013. Vol. 02, No 01. P. 283–288.

Моркляник Б., Проценко П.

ВПЛИВ МОРОЗНОГО ЗДИМАННЯ ҐРУНТІВ НА ФУНДАМЕНТИ СПОРУД ЗА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ

Проведені дослідження чинників, які впливають на фундаменти споруд за морозного здимання ґрунтів. Встановлено та проаналізовано додаткові навантаження та впливи на ґрунтові основи і розташовані на них фундаменти, зумовлені функціонуванням розташованих у них колекторів ґрунтових теплових насосів. Для прогнозу температурних полів використано підхід, суть якого полягає в побудові фундаментальних рішень задач теплопровідності і далі, з використанням принципу суперпозиції, знаходженні температурних полів для конкретних нестандартних випадків. Подано отримане фундаментальне рішення, необхідне для визначення температурного поля в основі плоского колектора теплового насоса, тобто вирішено завдання про визначення температурного поля від двовимірного (плаского) точкового джерела температури, розташованого усередині півпростору.

Досліджено, що морозне здимання ґрунтів суттєво впливає на міцність і деформативність фундаментів будівель і споруд. Для прогнозування характеристик здимання основи необхідно визначити низку нормативних значень вихідних показників ґрунтів. За проектування фундаментів з можливим замерзанням основи необхідно досліджувати розподіл і рух вологи у шарах ґрунтів. Результати досліджень можна використати під час проектування та розрахунку основ і фундаментів будівель і споруд внаслідок впливу на них циклічного замерзання-розмерзання за роботи теплових насосів.

Ключові слова: морозне здимання ґрунтів, фундамент, стадії замерзання.

Morklyanyk B., Protsenko P.

THE EFFECT OF GREENHOUSING OF SOILS ON THE BUILDING FOUNDATIONS FUNCTION IN THE USE OF HEAT PUMPS

Investigations of factors influencing the foundations of structures during frosty soiling of soils have been carried out. During the designing of the bases and foundations, in which the collectors of heat pumps are located, it must be taken into account the distribution of temperature fields. A common disadvantage of the methods of finite differences and finite elements is the inability to calculate fields in unbounded domains (a ground arrays are precisely this areas). For the forecasting of the temperature fields in the paper it is used the approach, the essence of which is to construct a fundamental solution of tasks of the thermal conductivity and further, using the principle of superposition, finding the temperature fields for the specific cases of interest. It is presented the obtained fundamental solution that is necessary to determine the temperature field in the base of the planar collector of a heat pump. It means that it was solved the problem of determining the temperature field of two-dimensional (flat) point source of temperature, which is located inside the halfspace.

It was investigated that the freezing of soils causes significant influence on the strength and deformability of the foundations of buildings and structures. In order to predict the characteristics of ejection of the base, it is necessary to determine a number of normative values of the initial soil indexes. For the design of foundations with possible freezing of the foundation, it is necessary to investigate the distribution and movement of moisture in the soil layers. The research results can be used during the design and calculation of foundations and foundations of buildings and structures due to the cyclic freezing-freezing effect on the work of heat pumps.

Key words: freezing of soils, foundation, freezing stage.

Стаття надійшла 23.03.2018.