

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-2-12>

УДК 631.22:697.94:536.2:631.4

О. С. Ковязін¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-3027-872X

А. О. Парієв², канд. техн. наук

ORCID: 0000-0001-7193-1409

О. О. Дереза¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0003-2652-9853

С. В. Дереза¹

ORCID: 0000-0001-9797-0967

¹Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного²Інститут механіки та автоматики агропромислового виробництва

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РОЗРАХУНКОВЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ІНТЕГРАЛЬНИХ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ҐРУНТОВОГО МАСИВУ ДЛЯ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ҐРУНТОВО-ПОВІТРЯНОГО ТЕПЛООБМІННИКА

Анотація. У статті наведено результати експериментально-розрахункового визначення фізичних і теплофізичних характеристик ґрунту, які використовуються як вхідні параметри для чисельного моделювання роботи ґрунтово-повітряного теплообмінника системи геотермальної вентиляції. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю врахування фактичної неоднорідності ґрунтового профілю, оскільки літологічний склад, об'ємна густина, вологість і теплоакумулявальна здатність ґрунту істотно впливають на інтенсивність теплообміну між підземним повітропроводом і навколишнім ґрунтовим середовищем. Польові дослідження виконували на дослідному полігоні, де було змонтовано зразок системи геотермальної вентиляції. Під час ручного буріння свердловини здійснювали пошаровий відбір проб, визначали літологічний тип матеріалу, масу вилученої бурової порції, об'ємну густину та масову вологість. Межі окремих шарів встановлювали за результатами візуально-тактильного опису з урахуванням кольору, зернистості, пластичності, зв'язності, вологості та наявності включень. Отримані дані було узагальнено у вигляді стратиграфічної схеми з профілями зміни об'ємної густини та вологості за глибиною. Встановлено, що досліджуване середовище має неоднорідну літологічну будову та представлене послідовністю чорноземного шару, суглинків, супіску й глини різної консистенції. Показано, що об'ємна густина загалом зростає з глибиною, тоді як розподіл вологості має немонотонний характер. Для потреб розрахункового експерименту неоднорідний профіль було подано як еквівалентне однорідне середовище з середньозваженими параметрами. На основі експериментально встановлених значень об'ємної густини, вологості та літологічного складу, а також довідкових даних для відповідних типів матеріалу, визначено еквівалентні значення коефіцієнта теплопровідності та питомої теплоємності ґрунту, які становлять відповідно 0,926 Вт/(м·К) і 920 Дж/(кг·К). Отримані результати можуть бути використані як вхідні дані для подальшого чисельного моделювання нестационарного теплообміну між повітряним потоком у підземному каналі та ґрунтовим масивом, що дає змогу уточнити прогноз температурного режиму ґрунтово-повітряного теплообмінника системи геотермальної вентиляції.

Ключові слова: геотермальна вентиляція, стратифікація, літологічна неоднорідність, об'ємна густина, вологість, теплопровідність, питома теплоємність.

Постановка проблеми. Енергоефективне формування мікроклімату у тваринницьких приміщеннях є одним із важливих напрямів підвищення сталості аграрного виробництва, оскільки значна частина експлуатаційних витрат пов'язана з вентиляцією, опаленням та охолодженням повітря [1]. Водночас температурний режим приміщення безпосередньо впливає на адапційні реакції та продуктивність сільськогосподарських тварин [2]. В умовах зростання вартості енергоресурсів, необхідності зменшення питомого енергоспоживання та посилення вимог до екологічної безпечності інженерних систем особливої актуальності набувають технології, що використовують природний тепловий потенціал ґрунту [3].



Одним із перспективних технічних рішень є геотермальна вентиляція на основі ґрунтово-повітряного теплообмінника, у якій припливне повітря попередньо нагрівається або охолоджується під час проходження через підземний канал [4]. Ефективність такої системи значною мірою визначається не лише конструктивними параметрами теплообмінника, довжиною повітропроводу, глибиною його закладання та швидкістю руху повітря [5], а й теплофізичними властивостями ґрунтового масиву. До таких властивостей належать об'ємна густина, вологість, коефіцієнт теплопровідності та питома теплоємність ґрунту [6].

Разом із тим ґрунтовий масив у реальних умовах не є однорідним середовищем. Його будова формується послідовністю літологічних шарів, які можуть істотно відрізнятися за гранулометричним складом, щільністю, вологістю, водоутримувальною здатністю та теплофізичними характеристиками [7]. Це зумовлює просторову неоднорідність теплоперенесення в зоні розміщення ґрунтово-повітряного теплообмінника і може впливати на точність прогнозування температурного режиму системи геотермальної вентиляції [8].

У практиці чисельного моделювання ґрунтовий масив часто розглядають як еквівалентне однорідне середовище з усередненими теплофізичними параметрами [9]. Такий підхід спрощує побудову математичної моделі та зменшує обчислювальну складність розрахунків, однак потребує належного експериментального обґрунтування. Використання лише довідкових значень теплофізичних характеристик без урахування фактичної стратифікації, вологості та об'ємної густини ґрунту може призводити до зниження достовірності результатів чисельного експерименту [10].

Особливо важливим це є для дослідних або проєктованих систем геотермальної вентиляції, ефективність яких оцінюється на основі розрахункових моделей [11]. У таких випадках необхідно мати не лише узагальнені довідкові характеристики ґрунту, а й експериментально встановлену будову ґрунтового профілю в місці розміщення теплообмінника [8]. Це дає змогу коректніше визначити інтегральні параметри ґрунтового масиву, які надалі можуть бути використані як вхідні дані для чисельного моделювання процесів теплообміну [7].

Отже, актуальною науково-прикладною задачею є експериментальне визначення стратифікації ґрунтового профілю, оцінювання зміни об'ємної густини та вологості ґрунту за глибиною, а також обґрунтування еквівалентних інтегральних теплофізичних характеристик ґрунтового масиву для чисельного моделювання роботи системи геотермальної вентиляції. Розв'язання цієї задачі дає змогу підвищити достовірність розрахунків, уточнити вихідні параметри моделі та створити більш обґрунтовану основу для оцінювання ефективності геотермальної вентиляції у тваринницьких приміщеннях.

Аналіз останніх досліджень. Дослідження ґрунтово-повітряних теплообмінників у сучасній науковій літературі розвиваються переважно у трьох напрямках: експериментальне оцінювання їх теплової ефективності, чисельне моделювання процесів теплообміну та оптимізація конструктивно-режимних параметрів системи [9, 12]. У більшості робіт ґрунтово-повітряний теплообмінник розглядається як пасивний або малозатратний елемент попереднього нагрівання й охолодження припливного повітря, ефективність якого залежить від взаємодії повітряного потоку з ґрунтовим масивом через стінку підземного каналу [12, 13].

У працях, присвячених експериментальному аналізу таких систем, основну увагу приділено визначенню температури повітря на вході та виході з теплообмінника, оцінюванню величини теплового ефекту, а також впливу сезонних умов на роботу системи [14, 15]. Показано, що ґрунтово-повітряні теплообмінники можуть забезпечувати зниження температури припливного повітря в теплий період і його попереднє підігрівання в холодний період року [14, 16]. Водночас отримані результати істотно залежать від кліматичних умов, глибини закладання повітропроводу, довжини каналу, швидкості руху повітря та тривалості роботи системи [15, 16].



Значна кількість досліджень спрямована на параметричний аналіз конструкції теплообмінника [5, 17, 18]. Зокрема, розглядається вплив діаметра й довжини повітропроводу, глибини його розміщення, матеріалу стінки, витрати повітря та режиму експлуатації на інтенсивність теплообміну [5, 17]. Такі роботи дають змогу встановити загальні закономірності функціонування ґрунтово-повітряних теплообмінників і сформулювати рекомендації щодо вибору їх геометричних та режимних параметрів [17, 18].

Окремий напрям становлять чисельні дослідження, у яких процес теплообміну між повітрям, стінкою каналу та ґрунтом описується за допомогою математичних моделей нестационарного теплоперенесення [19, 20]. У таких моделях ґрунтовий масив здебільшого задається як суцільне середовище з певними теплофізичними характеристиками: коефіцієнтом теплопровідності, питомою теплоємністю, густиною та початковим температурним полем. Саме від коректності цих параметрів залежить точність прогнозування температури повітря після проходження через підземний теплообмінник [20, 21].

Водночас у багатьох чисельних моделях теплофізичні властивості ґрунту приймаються за довідковими або узагальненими значеннями [22, 23]. Такий підхід спрощує розрахункову схему, однак не завжди враховує реальну неоднорідність ґрунтового профілю. У природних умовах ґрунтовий масив складається з послідовності шарів різного літологічного складу, які відрізняються між собою об'ємною густиною, вологістю, гранулометричним складом і здатністю акумулювати теплоту [24]. Через це використання єдиного набору довідкових параметрів може призводити до спрощеного опису процесів теплообміну в зоні розміщення підземного каналу [23, 24].

Вплив властивостей ґрунту на роботу ґрунтово-повітряних теплообмінників підтверджено в роботах, де аналізувалися тип ґрунту, рівень його ущільнення, вологість і теплофізичні характеристики. Зокрема, встановлено, що підвищення вологості та зміна ступеня ущільнення ґрунту можуть помітно впливати на теплопровідність і, відповідно, на інтенсивність теплообміну між ґрунтом і повітряним потоком [25, 26]. Це свідчить про необхідність уточнення фізичних параметрів ґрунту не лише за довідковими джерелами, а й за результатами польових або лабораторних вимірювань [27].

Незважаючи на значну кількість праць, присвячених моделюванню й оптимізації ґрунтово-повітряних теплообмінників, питання попереднього експериментального опису ґрунтового профілю в місці розміщення системи висвітлено недостатньо повно. Зазвичай дослідники детально аналізують геометрію теплообмінника, температурний режим і витрату повітря [28], тоді як стратифікація ґрунту, зміна об'ємної густини та вологості за глибиною, а також перехід від неоднорідного профілю до еквівалентних інтегральних параметрів для чисельної моделі залишаються менш розробленими [29].

Отже, аналіз останніх досліджень показує, що наукові основи функціонування ґрунтово-повітряних теплообмінників достатньо широко розглянуті в літературі, однак потребує подальшого уточнення методичний підхід до визначення вхідних теплофізичних параметрів ґрунтового масиву для чисельного моделювання. Особливо важливим є поєднання польового опису стратифікації ґрунту, експериментального визначення його об'ємної густини та вологості з подальшим розрахунком еквівалентних інтегральних характеристик, які можуть бути використані в моделі геотермальної вентиляції.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Метою роботи є підвищення достовірності чисельного моделювання роботи ґрунтово-повітряного теплообмінника геотермальної вентиляції шляхом експериментального визначення стратифікації ґрунтового профілю та розрахункового обґрунтування еквівалентних інтегральних теплофізичних характеристик ґрунтового масиву.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- встановити літологічну будову ґрунтового профілю за результатами пошарового буріння свердловини;
- визначити зміну об'ємної густини та вологості ґрунту за глибиною свердловини;
- розрахувати еквівалентні інтегральні теплофізичні характеристики ґрунтового масиву для подальшого використання в чисельному експерименті.

Основна частина. Для розв'язання поставлених завдань дослідження було спрямоване на поетапне встановлення реальної будови ґрунтового масиву та визначення його фізичних характеристик, необхідних для подальшого чисельного моделювання роботи ґрунтово-повітряного теплообмінника геотермальної вентиляції. Вихідним етапом було польове дослідження ґрунтового профілю в зоні розміщення дослідного зразка системи геотермальної вентиляції з подальшим відбором проб ґрунту, визначенням їх об'ємної густини й вологості та розрахунковим узагальненням отриманих даних у вигляді еквівалентних інтегральних теплофізичних параметрів ґрунтового масиву.

Буріння та відбір проб ґрунту виконували на о. Хортиця (м. Запоріжжя), на випробувальному полігоні відділу біоекотехнічних систем в тваринництві ННЦ «ІМЕСГ», де було змонтовано дослідний зразок геотермальної вентиляції. Для виконання польових робіт використовували ручний бур зі змінними штангами та допоміжне підйомне обладнання, що забезпечувало пошарове заглиблення інструмента, вилучення бурових порцій ґрунту та подальший відбір проб для лабораторного аналізу. Загальний вигляд обладнання та ділянки ручного буріння свердловини наведено на рис. 1.



а

б

**Рис. 1. Обладнання та ділянка ручного буріння свердловини:
а – робоча частина ручного бура; *б* – загальний вигляд ділянки буріння**



Ґрунтовий профіль по глибині свердловини досліджували під час ручного буріння буром діаметром 280 мм. За один робочий прохід бур, залежно від літологічного типу та консистенції ґрунту, забезпечував заглиблення на 0,07–0,15 м. Найменша глибина проходу за один цикл спостерігалася у шарах тугопластичної та твердої глини. У процесі буріння фактичний діаметр свердловини виявився більшим за діаметр бура і становив у середньому 0,30 м. Саме це значення використовували для розрахунку об'єму вилученого ґрунту.

Після кожного проходу бур виймали зі свердловини, а отриману бурову порцію ґрунту використовували для визначення літологічного типу ґрунту, оцінювання об'ємної густини та визначення вологості. Інтервал заглиблення за окремий прохід бура Δz_i визначали як різницю між двома послідовними відліками від постійної реперної точки на гирлі свердловини до дна вибою, використовуючи сталеву мірну стрічку з вантажем. Для зменшення випадкової похибки кожне вимірювання контролювали повторними відліками. Об'єм вилученого ґрунту для i -го проходу визначали за геометричними параметрами свердловини:

$$V_i = \frac{\pi D_c^2}{4} \Delta z_i, \quad (1)$$

де D_c – фактичний діаметр свердловини при бурінні, $D_c = 0,30$ м;

Δz_i – фактичний інтервал заглиблення за один цикл, $\Delta z_i = 0,07$ – $0,15$ м.

Після вилучення ґрунту визначали масу кожної бурової порції m_i . Об'ємну густину ґрунту в природному стані для кожного проходу оцінювали за співвідношенням [31]

$$\rho_{ei} = \frac{m_i}{V_i}, \quad (2)$$

де m_i – маса вилученої бурової порції ґрунту, кг;

V_i – об'єм ґрунту, вилученого за один прохід, м³.

Для визначення вологості частину кожної бурової порції відбирали в алюмінієву бюксу, герметизували та направляли до лабораторії. Вологість ґрунту визначали ваговим методом після висушування проби до сталої маси [32]. Масову вологість обчислювали за формулою

$$W_{ri} = \frac{m_{vi} - m_{ci}}{m_{ci}} \cdot 100\%, \quad (3)$$

де m_{vi} – маса вологої проби, кг;

m_{ci} – маса сухої проби після висушування, кг.

Літологічний тип ґрунту для кожного проходу встановлювали за результатами польового візуально-тактильного опису бурової проби [33] з урахуванням її кольору, зернистості, пластичності, зв'язності, вологості, наявності органічних решток та мінеральних включень. Таким способом по глибині свердловини ідентифікували послідовність стратиграфічних інтервалів, представлених гумусованим верхнім шаром, суглинками, супісками та глинами різної консистенції. Межі окремих шарів визначали за зміною літологічного типу ґрунту та комплексу супровідних морфологічних ознак.

Оскільки фактичний інтервал спостереження за один прохід бура становив 0,07–0,15 м, отримані результати забезпечували достатньо детальну характеристику ґрунтового профілю по глибині свердловини. При цьому літологічну будову профілю описували у вигляді послідовності стратиграфічних інтервалів, тоді як об'ємну густину та вологість розглядали як величини, що змінюються по глибині свердловини, у тому числі в межах одного й того самого шару.

Для потреб чисельного експерименту ґрунтовий масив розглядали як еквівалентне однорідне середовище [24]. Середні значення об'ємної густини ґрунту ρ_r та вологості W_r , вико-

ристані як інтегральні характеристики ґрунтового масиву в чисельній моделі, визначали як середньозважені по всій глибині свердловини [34]:

$$\rho_r = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_{ri} \Delta z_i}{\sum_{i=1}^n \Delta z_i}, \quad W_r = \frac{\sum_{i=1}^n W_{ri} \Delta z_i}{\sum_{i=1}^n \Delta z_i}, \quad (4)$$

де n – загальна кількість проходів бура по всій глибині свердловини.

Для аналізу реальної будови ґрунтового профілю та розподілу його фізичних характеристик по глибині результати буріння, а також експериментально визначені значення об'ємної густини і вологості було подано у вигляді узагальненої стратиграфічної схеми. На рис. 2 наведено стратифікацію ґрунту по глибині свердловини, а також профілі зміни об'ємної густини $\rho_r(z)$ і вологості $W_r(z)$, побудовані за результатами буріння та лабораторного аналізу проб. Встановлено, що ґрунтовий масив є літологічно неоднорідним і представлений послідовністю чорноземного шару, суглинків, супіску та глин різної консистенції. Профіль об'ємної густини має загалом зростаючий характер із глибиною, що відповідає природному ущільненню ґрунту та переходу до щільніших глинистих шарів. Розподіл вологості є немонотонним: максимальні значення спостерігаються у верхній частині профілю, мінімальні – у супіщаному інтервалі, тоді як у нижніх глинистих шарах вологість дещо підвищується внаслідок більшої водоутримувальної здатності ґрунту. Пунктирними лініями на рисунку показано інтегральні значення ρ_r і W_r , використані в чисельному експерименті.

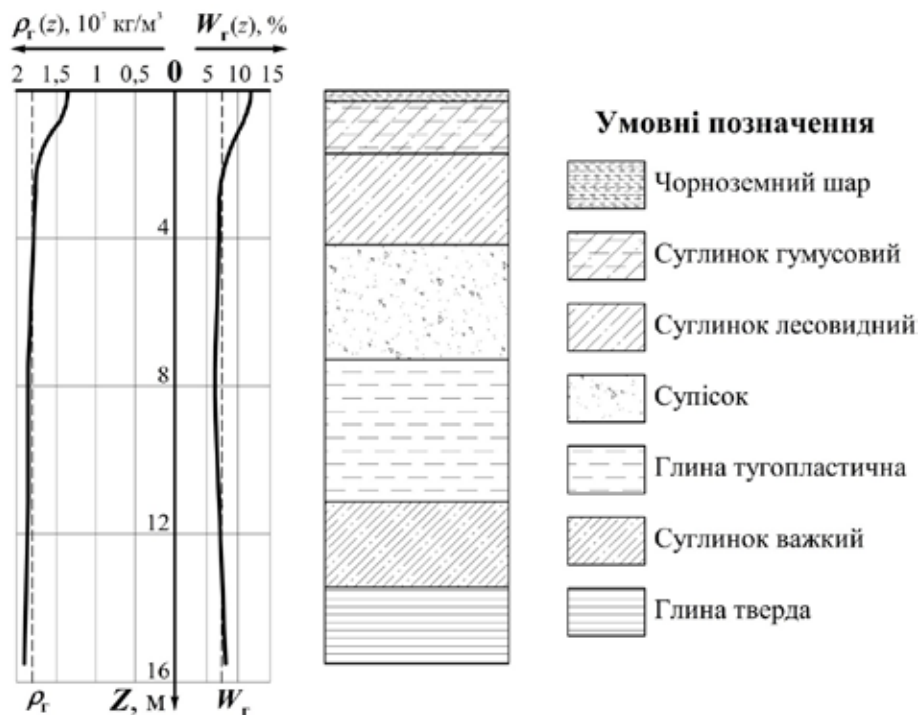


Рис. 2. Стратифікація ґрунтового профілю свердловини та зміна об'ємної густини $\rho_r(z)$ і вологості $W_r(z)$ за глибиною

Теплофізичні характеристики ґрунту для чисельного експерименту визначали опосередковано за довідковими даними для ґрунтів відповідного літологічного типу з урахуванням експериментально встановлених значень об'ємної густини ρ_{ri} та вологості W_{ri} [6, 30]. Для кожного i -го проходження бура за довідковими даними підбирали відповідні значення коефіцієнта теплопро-



відності $\lambda_{\Gamma i}$ і питомої теплоємності $c_{\Gamma i}$. Інтегральні теплофізичні характеристики ґрунтового масиву, використані в чисельному експерименті, визначали як середньозважені по всій глибині свердловини:

$$\lambda_{\Gamma} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_{\Gamma i} \Delta z_i}{\sum_{i=1}^n \Delta z_i}, \quad c_{\Gamma} = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_{\Gamma i} c_{\Gamma i} \Delta z_i}{\sum_{i=1}^n \rho_{\Gamma i} \Delta z_i}, \quad (5)$$

де $\lambda_{\Gamma i}$ – коефіцієнт теплопровідності ґрунту для i -го проходу, Вт/(м·К);

$c_{\Gamma i}$ – питома теплоємність ґрунту для i -го проходу, Дж/(кг·К).

За результатами узагальнення довідкових і експериментально встановлених даних визначено інтегральні теплофізичні характеристики ґрунтового масиву для чисельного експерименту: $\lambda_{\Gamma} = 0,926$ Вт/(м·К) та $c_{\Gamma} = 920$ Дж/(кг·К). Зазначені значення слід розглядати як еквівалентні інтегральні теплофізичні характеристики ґрунтового масиву, визначені опосередковано за довідковими даними з урахуванням експериментально встановлених літологічного складу, об'ємної густини та вологості ґрунту.

Висновки. За результатами пошарового буріння свердловини встановлено стратифікацію ґрунтового профілю в зоні розміщення ґрунтово-повітряного теплообмінника геотермальної вентиляції. Визначено, що ґрунтовий масив має неоднорідну літологічну будову та представлений послідовністю гумусованого верхнього шару, суглинків, супіску й глин різної консистенції. Це підтверджує необхідність урахування реальної будови ґрунтового профілю під час підготовки вхідних даних для чисельного моделювання.

Експериментально визначено зміну об'ємної густини та вологості ґрунту за глибиною свердловини. Встановлено, що об'ємна густина ґрунту загалом зростає з глибиною, що пов'язано з природним ущільненням ґрунтового масиву та переходом до щільніших глинистих шарів. Розподіл вологості має немонотонний характер: підвищені значення спостерігаються у верхній частині профілю та в нижніх глинистих шарах, тоді як у супіщаному інтервалі вологість зменшується.

На основі експериментально встановлених значень об'ємної густини, вологості та літологічного складу ґрунту розрахунково обґрунтовано еквівалентні інтегральні теплофізичні характеристики ґрунтового масиву для чисельного експерименту. Визначено, що інтегральний коефіцієнт теплопровідності становить $\lambda_{\Gamma} = 0,926$ Вт/(м·К), а інтегральна питома теплоємність – $c_{\Gamma} = 920$ Дж/(кг·К). Отримані значення можуть бути використані як узагальнені вхідні параметри ґрунтового масиву під час чисельного моделювання роботи ґрунтово-повітряного теплообмінника геотермальної вентиляції.

Використання експериментально обґрунтованих інтегральних параметрів ґрунтового масиву дає змогу підвищити достовірність чисельного моделювання, оскільки враховує не лише довідкові теплофізичні характеристики ґрунтів, а й фактичну стратифікацію, густину та вологість ґрунту в місці розміщення теплообмінника.

Список використаних джерел

1. Трунова І. М., Мірошник О. О., Галько С. В. Дослідження енергоефективності систем мікроклімату тваринницьких приміщень з використанням комп'ютерних технологій. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2023. Т. 13, № 2. Ст. 37. DOI: <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2023-2-37>.
2. Ковязін О. С., Чижиков І. О., Дереза О. О., Пастушенко А. С. Аналіз впливу температури на адаптацію та продуктивність сільськогосподарських тварин. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного*. 2025. Т. 25, № 1. С. 8–14. DOI: <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-1-1>.
3. Ковязін О. С., Чижиков І. О., Дереза С. В., Пастушенко А. С. Аналіз альтернативних джерел енергії для терморегуляції повітря у тваринницьких приміщеннях. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2025. Т. 15, № 1. С. 61–67. DOI: <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-25-1-6>.



4. Савченко О. О., Желих В. М., Дуднік К. А., Конончук О. М. Технічні передумови влаштування геотермальної вентиляції пасивних будинків. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва*. 2015. № 823. С. 281–285.
5. Benhammou M., Draoui B. Parametric study on thermal performance of earth-to-air heat exchanger used for cooling of buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 44. P. 348–355. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.030>.
6. Abu-Hamdeh N. H. Thermal properties of soils as affected by density and water content. *Biosystems Engineering*. 2003. Vol. 86, No. 1. P. 97–102. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1537-5110\(03\)00112-0](https://doi.org/10.1016/S1537-5110(03)00112-0).
7. Wessolek G., Bohne K., Trinks S. Validation of soil thermal conductivity models. *International Journal of Thermophysics*. 2023. Vol. 44. Art. 20. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10765-022-03119-5>.
8. Simms R. B., Haslam S. R., Craig J. R. Impact of soil heterogeneity on the functioning of horizontal ground heat exchangers. *Geothermics*. 2014. Vol. 50. P. 35–43. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2013.08.007>.
9. Недбайло О. М., Божко І. К., Ткаченко М. В., Андрейчук С. В. Чисельне моделювання параметрів повітряно-грунтових теплообмінників для геотермальної вентиляції. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*. 2020. № 35. С. 41–48. DOI: <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2020.35.41-48>.
10. Gan G. Simulation of dynamic interactions of the earth–air heat exchanger with soil and atmosphere for preheating of ventilation air. *Applied Energy*. 2015. Vol. 158. P. 118–132. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.08.081>.
11. Vaz J. et al. Experimental and numerical analysis of an earth–air heat exchanger. *Energy and Buildings*. 2011. Vol. 43, No. 9. P. 2476–2482. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.06.003>.
12. Imanloozadeh A., Lubitz W. D. Characteristics, design, and optimization of earth-air heat exchangers: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2026. Vol. 230. Art. 116677. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116677>.
13. Serageldin A. A. et al. Earth-Air Heat Exchanger thermal performance in Egyptian conditions. *Energy Conversion and Management*. 2016. Vol. 122. P. 25–38. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.05.053>.
14. Basok B. et al. Analysis of the energy efficiency of the earth-to-air heat exchanger. *Rocznik Ochrona Środowiska*. 2022. Vol. 24. P. 202–213. DOI: <https://doi.org/10.54740/ros.2022.015>.
15. Díaz-Hernández H. P. et al. Experimental study of an earth to air heat exchanger. *Geothermics*. 2020. Vol. 84. Art. 101741. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2019.101741>.
16. Yaropud V. Experimental studies of the air flow heating process in a vertical soil heat exchanger. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2024. № 2(125). С. 83–90. DOI: <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2024-2-9>.
17. D'Agostino D. et al. Parametric analysis on an earth-to-air heat exchanger. *Energies*. 2020. Vol. 13, No. 11. Art. 2925. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13112925>.
18. Hegazi A. A. et al. Parametric optimization of earth-air heat exchangers. *International Journal of Refrigeration*. 2021. Vol. 129. P. 278–289. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2021.05.009>.
19. Koviazin O. et al. Research ways to increase the energy efficiency of ground heat exchangers. *Rural Development 2019: Research and Innovation for Bioeconomy*. 2019. P. 155–161. DOI: <https://doi.org/10.15544/RD.2019.019>.
20. Minaei A., Safikhani H. A new transient analytical model for heat transfer of earth-to-air heat exchangers. *Journal of Building Engineering*. 2021. Vol. 33. Art. 101560. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101560>.
21. Ковязін О. С. Дослідження функціонування теплообмінника у ґрунтах різної температуропровідності. *Геофізичний журнал*. 2018. Т. 40, № 2. С. 164–170. DOI: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i2.2018.128938>.
22. Зур'ян О. В., Четверик Г. О. Експериментальні дослідження та математичне моделювання теплових процесів в ґрунті. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2023. № 3. С. 34–46. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-168-3-34-46>.
23. Tang F. et al. A numerical study into effects of soil compaction and heat storage on thermal performance of a horizontal ground heat exchanger. *Renewable Energy*. 2021. Vol. 172. P. 740–752. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.025>.
24. Ali M. H. et al. Estimating the impact of the thermo-physical properties of the multilayer soil on earth-air heat exchanger system performance. *International Journal of Thermofluids*. 2024. Vol. 23. Art. 100722. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2024.100722>.



25. Elminshawy N. A. S. et al. Experimental investigation on the performance of earth-air pipe heat exchanger for different soil compaction levels. *Applied Thermal Engineering*. 2017. Vol. 124. P. 1319–1327. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.06.119>.
26. Agrawal K. K. et al. Effect of soil moisture contents on thermal performance of earth-air-pipe heat exchanger for winter heating in arid climate. *Geothermics*. 2019. Vol. 77. P. 12–23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2018.08.004>.
27. Low J. E. et al. A comparison of laboratory and in situ methods to determine soil thermal conductivity. *Acta Geotechnica*. 2015. Vol. 10. P. 209–218. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11440-014-0333-0>.
28. Agrawal K. K. et al. A review on effect of geometrical, flow and soil properties on the performance of earth air tunnel heat exchanger. *Energy and Buildings*. 2018. Vol. 176. P. 120–138. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.07.035>.
29. Luo J. et al. A review of ground investigations for ground source heat pump systems. *Energy and Buildings*. 2016. Vol. 117. P. 160–175. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.02.038>.
30. Басок Б. І. та ін. Теплофізичні властивості природного ґрунту. *Промислова теплотехніка*. 2008. Т. 30, № 4. С. 77–85.
31. ДСТУ CEN ISO/TS 17892-2:2007. Геотехнічні дослідження та випробування. Лабораторні випробування ґрунту. Частина 2. Визначення щільності дрібнозернистого ґрунту. Київ : Держспоживстандарт України, 2009.
32. ДСТУ Б В.2.1-17:2009. Основи та підвалини будинків і споруд. Ґрунти. Методи лабораторного визначення фізичних властивостей. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010.
33. ASTM D2488-17e1. Standard practice for description and identification of soils (visual-manual procedures). West Conshohocken: ASTM International, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1520/D2488-17E01>.
34. Shi Z. et al. Comparative analysis of ground thermal conductivity and thermal resistance of borehole heat exchanger. *Journal of Building Engineering*. 2024. Vol. 91. Art. 109603. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109603>.

Дата першого надходження статті до видання: 20.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 25.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)



O. Koviazin¹, A. Pariev², O. Dereza¹, S. Dereza¹

¹*Dmytro Motorny Tavria State Agrotechnological University*

²*Institute of Mechanics and Automation of Agriculture Production*

EXPERIMENTAL AND COMPUTATIONAL SUBSTANTIATION OF INTEGRAL THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF A SOIL MASSIF FOR NUMERICAL MODELING OF AN EARTH-TO-AIR HEAT EXCHANGER

Summary

The article presents the results of an experimental and computational determination of the physical and thermophysical characteristics of soil used as input parameters for numerical modeling of an earth-to-air heat exchanger in a geothermal ventilation system. The relevance of the study is determined by the need to account for the actual heterogeneity of the soil profile, since lithological composition, bulk density, moisture content, and heat storage capacity of the soil significantly affect the intensity of heat transfer between the underground air duct and the surrounding soil medium. Field studies were carried out at an experimental site where a prototype geothermal ventilation system had been installed. During manual borehole drilling, layer-by-layer soil sampling was performed, and the lithological type of the material, the mass of the extracted drilling portion, bulk density, and gravimetric moisture content were determined. The boundaries of individual layers were established based on a visual-manual



description, taking into account color, grain size, plasticity, cohesion, moisture condition, and the presence of inclusions. The obtained data were summarized in the form of a stratigraphic scheme with depth profiles of bulk density and moisture content. It was found that the studied medium has a heterogeneous lithological structure and is represented by a sequence of a chernozem layer, loams, sandy loam, and clays of different consistencies. The results show that bulk density generally increases with depth, whereas the moisture distribution is nonmonotonic. For the purposes of the computational experiment, the heterogeneous profile was represented as an equivalent homogeneous medium with weighted-average parameters. Based on the experimentally determined values of bulk density, moisture content, and lithological composition, as well as reference data for the corresponding material types, the equivalent values of soil thermal conductivity and specific heat capacity were determined as $0.926 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ and $920 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$, respectively. The obtained results can be used as input data for further numerical modeling of transient heat transfer between the airflow in the underground duct and the soil mass, which makes it possible to refine the prediction of the temperature regime of an earth-to-air heat exchanger in a geothermal ventilation system.

Keywords: geothermal ventilation, stratification, lithological heterogeneity, bulk density, moisture content, thermal conductivity, specific heat capacity.