

які найбільш повно враховують розміщення показників і дозволяють гірничо-геометричне моделювання в різних гірничо-геологічних умовах.

Список літератури

1. Ступнік М.І., Федько М.Б., Письменний С.В., Колосов В.О., Курносів С.А., Маланчук З.Р. Проблеми розкриття та підготовки рудних родовищ на глибоких горизонтах шахт Кривбасу. – Вісник Криворізького національного університету: збірник наукових праць. – Кривий Ріг: КНУ, 2018. – Вип. 47. – С. 3-8.
2. Переметчик А.В., Федоренко С.О., Подойніцина Т.О. Геометричне моделювання та прогнозування якості залізних руд. – Гірничий вісник: науково-технічний збірник. – Кривий Ріг: КНУ, 2023. – Вип. 111. – С. 46-54.
3. Федоренко П.Й., Переметчик А.В., Подойніцина Т.О. Статистико-імовірнісний розподіл прогнозних характеристик залізородних родовищ при геометризції надр. – Гірничий вісник: науково-технічний збірник. – Кривий Ріг: КНУ. – 2020. – Вип. 107. – С. 32-36.
4. Переметчик А.В., Федоренко С.О., Подойніцина Т.О. Геометричне моделювання та прогнозування якості залізних руд. – Гірничий вісник: науково-технічний збірник. – Кривий Ріг: КНУ, 2023. – Вип. 111. – С. 46-54.
5. Федоренко П.Й., Переметчик А.В., Подойніцина Т.О., Настін П.В. Гірничо-геометричний моніторинг та моделювання надр. – Гірничий вісник: науково-технічний збірник. – Кривий Ріг: КНУ. – 2021. – Вип. 109. – С. 7-14.
6. Давид М. Геостатистические методы при оценке запасов руд. – Л.: Недра, 1980.
7. Huang, S. & Huaming, A. (2016). Application of geostatistics in the estimation of Sujishan graphite deposits, Mongolia Stavební obzor – Civil Engineering Journal, 27, 487-499. <https://doi.org/10.14311/CEJ.2018.04.0039>.
8. Nekmatnejad, A., Emery, X. & Alipour-Shahsavari, M. (2019). Comparing linear and non-linear kriging for grade prediction and ore/waste classification in mineral deposits. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 33(4), 247–264. <https://doi.org/10.1080/17480930.2017.1386430>.
9. Крамбейн У., Кауфмен М., Мак-Кеммон Р. Модели геологических процессов. – М.: Мир. – 1973. – 150 с.
10. Де Гроот М. Оптимальные статистические решения. – М. – 1974. – 481 с.
11. Крамбейн У., Грейбилл Ф. Статистические модели в геологии. – М.: Мир. – 1969. – 400 с.
12. Девис Дж. С. Статистический анализ данных в геологии. Книга 1. – М.: Недра. – 1990. – 246 с.
13. Миллер Р.Л., Кан Дж. С. Статистический анализ в геологических науках. – М.: Мир. – 1965. – 482 с.
14. Калинин В.М. Многомерная геометрия форм и качественных свойств месторождений. – Маркшейдерское дело и геодезия. – 1979. – Вип. 6. – с. 99-105.
15. Переметчик А.В. Разработка эвристического алгоритма прогнозирования геологических показателей месторождений полезных ископаемых. – Разработка рудных месторождений: респ. межвед. науч.-техн. сб. – Кривой Рог: КТУ. – 2004. – Вип. 85 – С. 194-200.
16. Peremetchyk, A., Pysmennyi, S., Chukharev, S., Shvahr, N., Fedorenko, S., & Moraru, N. (2023). Geometrization of Kryvbas iron ore deposits. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1254(1), 012067. <http://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012067>.
17. Pysmennyi, S., Peremetchyk, A., Chukharev, S., Fedorenko, S., Anastasov, D., & Tomiczek, K. (2022). The mining and geometrical methodology for estimating of mineral deposits. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1049(1), 012029. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1049/1/012029>.
18. Peremetchyk, A., Pysmennyi, S., Shvahr, N., Fedorenko, S., & Podoymitsyna, T. (2023). Modeling and Prediction of Iron Ore Quality Indicators. Inżynieria Mineralna – Journal of the Polish Mineral Engineering Society, 1(51). 127-136. <http://doi.org/10.29227/IM-2023-01-15>.
19. Peremetchyk, A., Kulikovska, O., Shvahr, N., Chukharev, S., Fedorenko, S., Moraru, R., & Panayotov, V. (2022). Predictive geometrization of grade indices of an iron-ore deposit. Mining of Mineral Deposits, 16(3), 67-77. <https://doi.org/10.33271/mining16.03.067>.

Рукопис подано до редакції 26.03.24

УДК 662.997

В.В. САВІН, ст. викладач, П.С. КІРІЧЕНКО, канд. техн. наук, доц.
Криворізький національний університет

ЕФЕКТИВНЕ ВИКОРИСТАННЯ ҐРУНТОВИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ В ЕНЕРГООЩАДНІЙ ВЕНТИЛЯЦІЇ

Мета. Основна мета дослідження полягає в аналізі існуючих видів нетрадиційних відновлювальних джерел енергії, які можна використовувати у вигляді блоку попередньої обробки повітря для пасивної економії споживання енергії системами вентиляції житлових будинків, та їх класифікації. До таких джерел можна віднести ґрунтові теплообмінники, які або трансформують розсіяну теплову енергію ґрунту у відносно високопотенційне тепло з подальшим використанням на потреби системи вентиляції, або використовують її безпосередньо для пасивного попереднього підігріву взимку та/або попереднього охолодження влітку припливного повітря системи вентиляції, що дає змогу зменшити витрати енергії на підтримання допустимих санітарно-гігієнічних і метеорологічних параметрів приміщень.

Методи дослідження. Результати, наведені у статті, отримані з використанням методів: узагальнення результатів попередніх досліджень, комплексного аналізу, логіко-структурного аналізу, науково-аналітичного аналізу тощо.

Наукова новизна. Дослідження дозволяє виокремити та систематизувати існуючі види нетрадиційних відновлювальних джерел енергії, а саме ґрунтових теплообмінників, які можна використовувати в якості блоку попередньої обробки повітря (підігріву та/або охолодження) в системах вентиляції житлових будинків.

Практична значимість. Проведений аналіз існуючих видів нетрадиційних відновлювальних джерел енергії, а саме ґрунтових теплообмінників, які можна використовувати для потреб систем вентиляції житлових будинків, та їх класифікація за конструктивними ознаками допоможуть фахівцям при проектуванні або реконструкції систем вентиляції житлових будинків зменшити енерговитрати системою вентиляції для попередньої обробки (підігріву та/або охолодження) припливного повітря.

Результати. Наведено типи ґрунтових теплообмінників, які отримали найбільше розповсюдження в якості блоку попередньої обробки повітря системи вентиляції та розроблено їх класифікацію за конструктивними ознаками. Стаття буде корисною проектувальникам, інженерам, будівельникам та всім, хто цікавиться впровадженням нетрадиційних відновлювальних джерел енергії з метою пасивної економії споживання енергії системами вентиляції житлових будинків.

Ключові слова. ґрунтовий теплообмінник, система вентиляція, енергозбереження, витрати енергії.

doi: 10.31721/2306-5451-2024-1-58-83-89

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Однією з найважливіших умов комфортного перебування людей в житлових будинках є наявність свіжого повітря. Подачу цього повітря забезпечує система вентиляції, до функцій якої входить обмін повітря у приміщенні для видалення надлишків теплоти, вологи, шкідливих та інших забруднюючих речовин з метою підтримання допустимих санітарно-гігієнічних і метеорологічних параметрів, що, в свою чергу, потребує значних витрат енергії. Припливне повітря, в залежності від його метеорологічних параметрів, перед потраплянням до житлових приміщень може бути оброблено (підігріто та/або охолоджено). Наявну енергію необхідно не лише максимально ефективно використовувати, а ще, за можливістю, її повторно використовувати, а також використовувати безкоштовну відновлювану енергію оточуючого середовища. Одним з напрямків на шляху до зменшення споживання електроенергії в будинках, таким чином мінімізуючи викиди шкідливих газів, який отримав широкий інтерес у науковців, є використання низькотемпературних джерел теплової енергії, до яких належать енергія води, повітря, ґрунтового середовища та енергія сонячної радіації. Багатообіцяючий потенціал для пасивної економії споживання енергії системами вентиляції для попереднього підігріву та/або охолодження припливного повітря має ґрунтовий теплообмінник, в якому циркулюючий «носіє» (розчин або повітря) влітку використовується для вилучення тепла з будівлі або споруди, які вони обслуговують, та скидання його в ґрунт, а взимку навпаки.

Аналіз досліджень і публікацій. Ще у 1852 році видатний британський фізик та інженер Вільям Томсон звернув увагу, що холодильник можна використати для опалення, так як він використовує тепло, поглинене з навколишнього середовища, та потребує менше енергії, ніж прямі системи опалення, і запропонував концепцію теплового насоса [1]. Згодом винахідник-ентузіаст Роберт Вебер запропонував використовувати тепло землі. Це можна пояснити тим, що шари ґрунту, що знаходяться нижче глибини промерзання, мають стабільну температуру, близьку до $+8^{\circ}\text{C}$. З плином часу та розвитком науки і техніки ефективність ґрунтових теплообмінників зростає в рази, їх конструкція стала більш компактною, а тепла енергія низькотемпературних джерел використовуються в громадських і виробничих будівлях та спорудах для вентиляції, опалення і т.п., але без змін залишається один з визначальних факторів під час проектування - значення температури ґрунту, яка залежить від глибини вкладання теплообмінника.

Одним із найбільш використовуваних відновлюваних джерел для обслуговування системи вентиляції будинку є геотермальна енергія з низькою ентальпією [2-5], оскільки вона базується на характеристиці ґрунту, – температура якого є постійною протягом усього року на певній глибині [6]. Оскільки труби закопані на певній глибині для використання незмінності температури ґрунту, між «носієм» та ґрунтом відбувається конвективний теплообмін [7]. Дослідження [8-10] освітлюють вплив на теплові та енергетичні показники ґрунтових теплообмінників розмірів труб, їх кількість та розміщення. Дослідження [11-13] підтверджують ефективний теплообмін «носія» із ґрунтом на глибині від 1,5 м

Постановка задачі. Провести аналіз існуючих типів ґрунтових теплообмінників, які використовуються для потреб систем вентиляції житлових будинків, та розробити їх класифікацію за конструктивно-технічними ознаками.

Викладення матеріалу та результати. Можна виділити дві основні системи ґрунтових теплообмінників: із замкнутим контуром та відкриті. В системах із замкнутим контуром «носій» не має прямого контакту з ґрунтом рухаючись контуром труб, які розташовано під землею на глибині нижче, ніж 0,2 м за рівень промерзання ґрунту (зазвичай від 1,5 до 3 м залежно від географічної місцевості та типу ґрунту). Довжина контуру ґрунтових теплообмінників залежить від типу його конфігурації, глибини укладання, навантаження на систему вентиляції, опалення та кондиціонування, місцевого клімату та вологості ґрунту. Замкнені системи поділяються на горизонтальні та вертикальні, а їх використання залежить лише від розмірів відведеної для цих потреб земельної ділянки.

Влаштування горизонтальних ґрунтових теплообмінників має найпростіший монтаж, труби прокладаються, в залежності від схеми, паралельно або послідовно, займаючи велику площу, на якій не повинно бути згодом будівель і дерев, та вимагає значних грошових витрат. Тип конфігурації контуру (рис. 1) визначається теплопровідністю ґрунту та геометрією ділянки [14, 15]. Крок укладання контуру вибирається в залежності від умов, але не повинен бути менше 0,6 м. Ділянка, на якій покладено контур, можна використовувати лише під газон або однорічні квіти, кущі та дерева на ній садити не можна, тому що їх коренева система може пошкодити труби контуру. Крім того, бажано, щоб майданчик був добре освітлений сонцем, це дозволяє значно збільшити продуктивність теплообмінника.

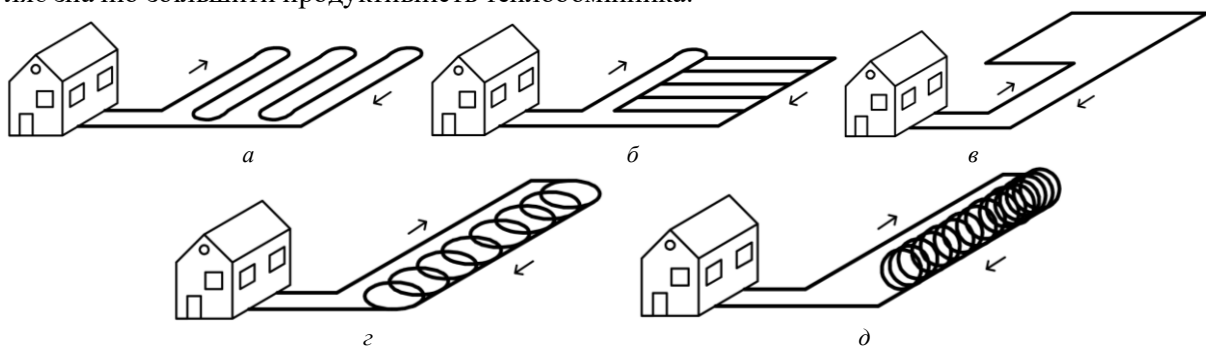


Рис. 1. Типи прокладання контуру горизонтальних ґрунтових теплообмінників: а - змійовиком; б - паралельне; в - петлею; г - кільцеве горизонтально; д - кільцеве вертикально

Для зменшення займаної контуром площі використовують вертикальні теплообмінники (рис. 2), які для прокладання контуру вимагають меншої площі, але більшого об'єму земляних робіт за рахунок більшої глибини (від 15 м і вище), що призводить до удорожчання системи. Ці системи використовують в тих випадках, коли потрібно отримати велику теплообмінну потужність, але при обмеженій площині ділянки. Вертикальні теплообмінники складаються з однієї або декількох труб. Основною перевагою є можливість створювання теплообмінників практично необмеженої теплової потужності завдяки високій технологічності їх спорудження. До вертикальних ґрунтових теплообмінників відносяться геотермальні зонди та енергетичні (енергоєфективні) палі.

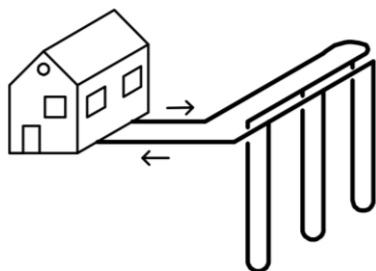


Рис. 2. Вертикальний теплообмінник

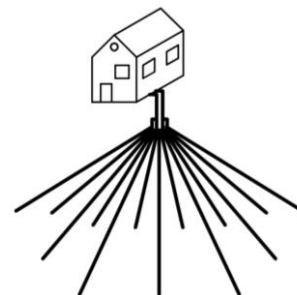


Рис. 3. Кластерний геотермальний зонд

При відсутності вільної площі на ділянці доцільно використовувати кластерні геотермальні свердловини (рис. 3) [16] - це система коротких геотермальних зондів з бурінням з одного місця діагонально під кутом $20-45^{\circ}$ на глибину 11-20 м, які утворюють так зване кластерне геотермальне поле. Для облаштування кластерного геотермального поля потрібно лише 4 м^2 території. Недоліком його застосування є вартість самих труб та монтажу.

На глибині більше 20 м температура ґрунту, завдяки геотермальній енергії надр Землі, протягом року дорівнює $8-10^{\circ}\text{C}$. Для отримання цієї енергії буряться свердловини, глибина та кількість яких залежать від технічних розрахунків, заснованих на структурі ґрунту у конкретній місцевості та від потрібної потужності установки. В свердловині можна розташувати геотермальні зонди U-подібної конструкції у двох або чотирьох трубному виконанні (рис. 4) та коаксіальні (концентричні) зонди (за типом труба в трубі). Після чого свердловина заповнюється спеціальною речовиною з високою теплопровідністю для забезпечення герметичного та довготривалого сполучення зонду з оточуючими породами ґрунту. Ефективність зонду також залежить від якості і характеристик ґрунту.

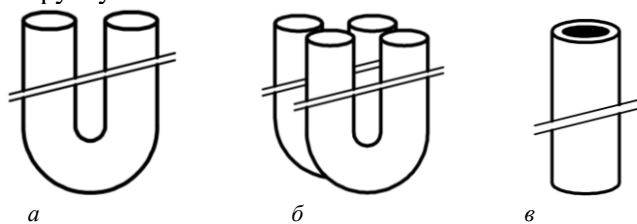


Рис. 4. Геотермальний зонд: *а* - U-подібної конструкції у двотрубному виконанні; *б* - U-подібної конструкції у чотирьох трубному виконанні; *в* - коаксіальний

Енергетичні палі (рис. 5а) - це інтегровані в фундамент будівлі спеціальні труби або групи труб U-подібної форми, у формі спіралі або у вигляді меандру. Використання енергетичних паль схоже з використанням геотермальних зондів, тільки залитий у свердловину бетон є частиною фундаменту будівлі. Укладання труб проводиться на будівельному майданчику, де контури труб розміщуються у конструкціях паль, які згодом заливаються бетоном. Використання енергетичних паль дозволяє раціонально використовувати площу будівлі. Цей тип ґрунтового теплообмінника може застосовуватися для потреб систем вентиляції, гарячого водопостачання, теплопостачання, охолодження та ін.

Закордонна технологія, яка ще не отримала широкого розповсюдження на території України через високу вартість - це енергетичний кошик (рис. 5б) та спіральний зонд (рис. 5в) [17, 18, 22]. Монтаж ґрунтових теплообмінників даним способом дозволяє відмовитись від буріння і зменшити необхідну площу ділянки, головний мінус цієї технології - висока вартість енергетичного кошика. Це схоже на гібрид двох попередніх груп, які мають властивості горизонтальних, а за методом установки - вертикальних теплообмінників. Труба контуру укладається за спіраллю, з кожним витком поступово заглиблюючись у ґрунт. Це рішення дозволяє відмовитись від буріння свердловини в місцевостях, де це недоцільно або неможливо, та використовувати геотермальну енергію на глибині до 5 м. Цей тип зондів виготовляють з високоякісного матеріалу, що забезпечує додаткову надійність та довговічність системи, оскільки прямий і зворотний трубопроводи виготовлені з однієї суцільної труби.

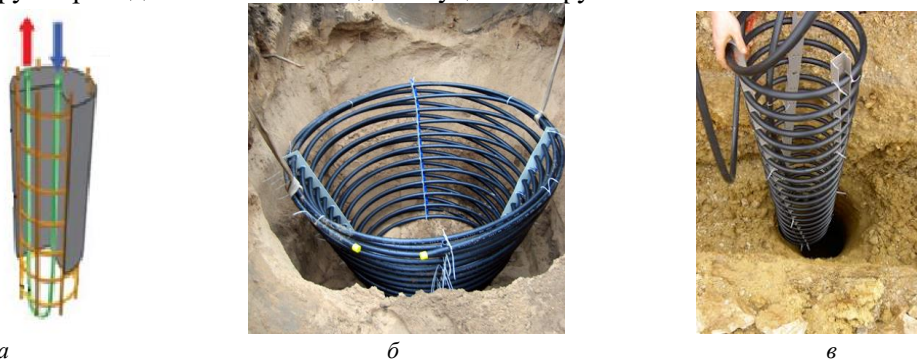


Рис. 5. Вертикальні ґрунтові теплообмінники (рисунок взято з мережі Internet): *а* - енергетична паля; *б* - енергетичний кошик; *в* - спіральний зонд

Відкриті системи використовують ґрунт для попереднього нагріву або охолодження припливного повітря систем вентиляції та фізично забирають (закачують) ґрунтові води з водозабірних свердловин і повертають її в ті ж водоносні шари по нагнітальнім (рис. 6). Ця схема використовується лише при відсутності ризику зменшення рівня ґрунтових вод водонасиченого горизонту та впливу на навколишнє середовище.

Для пасивної економії споживання енергії системами вентиляції житлових будинків на попередній підігрів влітку або охолодження повітря взимку де функцію «носія» виконує повітря, застосовується ґрунтовий повітряний теплообмінник, які за конструкцією поділяються на каналні (трубні) та безканалні. Основними вимогами до матеріалу каналних теплообмінників є достатня жорсткість, стійкість до корозії та механічних навантажень, високий коефіцієнт теплопровідності, та наявність захисного шару, який попереджає розвиток мікроорганізмів, плісняви та грибку на внутрішній і зовнішній поверхнях теплообмінника. Система прокладається під кутом з обов'язковим влаштуванням конденсатозбірника для подальшого видалення (насосом або самопливом) конденсату. Можна виокремити три схеми укладання ґрунтових повітряних теплообмінників (рис. 7) [19]: кільцева (рекомендується при необхідному повітрообміні до 250 м³/год), Тихельмана та змійовиком (необхідна температура припливного повітря на виході з теплообмінника забезпечується кількістю труб теплообмінника та їх довжиною).

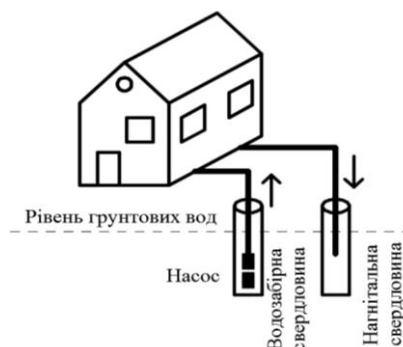


Рис. 6. Схема відкритої системи ґрунтових теплообмінників

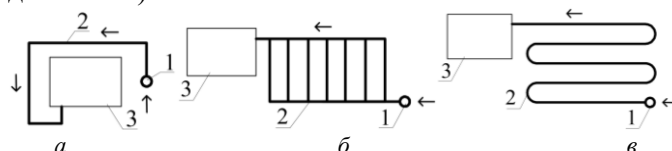


Рис. 7. Схеми укладання ґрунтових повітряних теплообмінників: а - кільцева схема; б - схема Тихельмана; в - схема змійовиком; 1 - повітрозбірник; 2 - теплообмінник; 3 - житловий будинок

В безканалному ґрунтовому теплообміннику (рис. 8) повітря проходить через підготовлений шар ґрунту, конструкція якого нагадує глибокий котлован, заповнений гравієм та ізольований утеплювачем, з яким і відбувається теплообмін. Назовні виводиться патрубок для припливу повітря, а з іншої сторони котловану - отвір, який під'єднано до вентиляційної системи будинку. Встановлені спеціальні труби водопостачання дозволяють підтримувати оптимальну вологість повітря. Такий теплообмінник дозволяє повітрю, що проходить шар гравію, одночасно фільтруватися, зволожуватися, прогріватися або охолоджуватися.

Виконаний аналіз ґрунтових теплообмінників, які використовуються при попередній обробці повітря для пасивної економії споживання енергії системами вентиляції житлових будинків, дозволяє класифікувати їх за конструктивно-технічними ознаками (рис. 9).

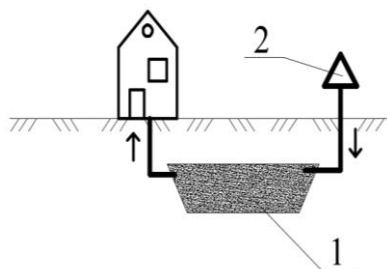


Рис. 8. Схема безканалного ґрунтового теплообмінника: 1 - шар гравію; 2 - повітрозбірник

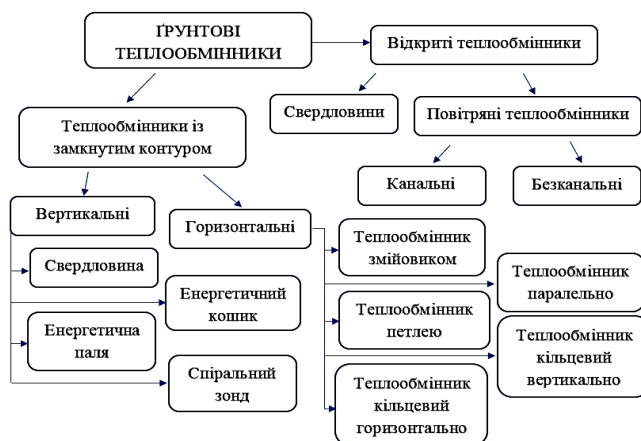


Рис. 9. Класифікація ґрунтових теплообмінників

Висновки та напрямки подальших досліджень. Проведений аналіз та класифікація існуючих типів ґрунтових теплообмінників відображає перспективність їх ефективного використання при попередній обробці повітря для пасивної економії споживання енергії системами вентиляції житлових будинків. Подальші дослідження в напрямку використання нетрадиційних джерел енергії допоможе зменшити залежність від традиційних джерел енергії та забезпечити власну енергонезалежність.

Список літератури

1. Електронний ресурс. - Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Вільям_Томсон.
2. **M.H. Dickson, M. Fanelli.** Geothermal Energy: Utilization and Technology, Routledge, 2013.
3. **T. Sharmin, N.R. Khan, M.S. Akram, M.M. Ehsan.** A state-of-the-art review on for geothermal energy extraction, utilization, and improvement strategies: conventional, hybridized, and enhanced geothermal systems, *Int. J. Thermofluids* (2023), 100323.
4. **M. Vujanović, G. Besagni, N. Duić, C.N. Markides.** Innovation and advancement of thermal processes for the production, storage, utilization and conservation of energy in sustainable engineering applications, *Appl. Therm. Eng.* 221 (2023), 119814.
5. **A. Greco, E. Gundabattini, D.G. Solomon, R. Singh Rassiah, C. Masselli.** A review on geothermal renewable energy systems for eco-friendly air-conditioning, *Energies* 15 (15) (2022) 5519.
6. **M. Lehnert.** Factors affecting soil temperature as limits of spatial interpretation and simulation of soil temperature, *Acta Universitatis Palackianae Olomucensis Geographica* 45 (1) (2014) 5–21.
7. **M. Cuny, J. Lin, M. Siroux, C. Fond.** Influence of an improved surrounding soil on the energy performance and the design length of earth-air heat exchanger, *Appl. Therm. Eng.* 162 (2019), 114320.
8. **D. Qi, A. Li, S. Li, C. Zhao.** Comparative analysis of earth to air heat exchanger configurations based on uniformity and thermal performance, *Appl. Therm. Eng.* 183 (2021), 116152.
9. **T. Long, Y. Li, W. Li, S. Liu, J. Lu, D. Zheng, S. Huang.** Investigation on the cooling performance of a buoyancy driven earth-air heat exchanger system and the impact on indoor thermal environment, *Appl. Therm. Eng.* 207 (2022), 118148.
10. **D. D'Agostino, F. Esposito, A. Greco, C. Masselli, F. Minichiello.** Parametric analysis on an earth-to-air heat exchanger employed in an air conditioning system, *Energies* 13 (11) (2020) 2925.
11. **A. Greco, C. Masselli.** The optimization of the thermal performances of an earth to air heat exchanger for an air conditioning system: a numerical study, *Energies* 13 (23) (2020) 6414.
12. **N.A. Elminshawy, F.R. Siddiqui, Q.U. Farooq, M.F. Addas.** Experimental investigation on the performance of earth-air pipe heat exchanger for different soil compaction levels, *Appl. Therm. Eng.* 124 (2017) 1319–1327.
13. **H. Wei, D. Yang.** Performance evaluation of flat rectangular earth-to-air heat exchangers in harmonically fluctuating thermal environments, *Appl. Therm. Eng.* 162 (2019), 114262.
14. **G. Florides, S. Kalogirou.** Ground heat exchangers - A review of systems, models and applications. *Renewable Energy*. Vol. 32, Issue 15, - 2007.- 2461-2478 pp.
15. **Мельник В. І., Цимбал Б. М.** Аналіз тепло-енергетичних систем з використанням теплових насосів із інтегрованими у фундамент ґрунтовими теплообмінниками. *Інженерія природокористування*, - 2019. № 2 (12). - 6-16 с.
16. Електронний ресурс.- Режим доступу: <http://www.geotherm.com.ua/about/closedloop/claster-loop.html>.
17. **Бурцева С.О., Клик А.В., Постол Ю.О.** Використання низькопотенційної енергії ґрунтів як спосіб підвищення енергоефективності будівель // II Міжнародна науково-технічна конференція. Мелітополь, - 2020 р.- 657-661 с.
18. **Филатов С.О., Володин В.И.** Эффективность использования энергетических свай с теплоносителем воздух в системах вентиляции и теплоснабжения // *Промышленная теплотехника*, - 2013, т. 35, № 3.- 44-50 с.
19. **О. О. Савченко.** Технічні передумови влаштування геотермальної вентиляції пасивних будинків / О. О. Савченко, В. М. Желих, К. А. Дуднік, О. М. Конончук // *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Теорія і практика будівництва*, - 2015. - № 823. - С. 281-285.
20. **O. Savchenko, Y. Yurkevych, V. Zhelykh & O. Voznyak.** Review of schemes of geothermal district heating and recommendations for their use in Lviv region. *Proceedings of EcoComfort*, - 2022.- 344-354 pp.
21. **Ю. П. Морозов.** Видобування геотермальної енергії. Київ ІВЕ, - 2022.- 245 с.
22. **A. Manzella.** Geothermal energy. *EPJ Web Conf.* Volume 148, 00012 (2017).

Рукопис подано до редакції 11.03.24